

Investigación experimental comparativa de vigas de hormigón reforzado con fibras de acero

A comparative experimental study of steel fibre-additive reinforced concrete beams

F. ALTUN, T. HAKTANIR

Engineering Faculty, Civil Eng., Dpt., Kayseri

Persona de contacto/*Corresponding author:* faltun@erciyes.edu.tr

TURQUIA

Fecha de recepción: 15-VIII-03

Fecha de aceptación: 13-IV-04

RESUMEN

Se han utilizado cinco lotes diferentes de hormigón clase C20, cuatro de ellos con fibras de acero (FA), identificadas como Dramix-CR-80/60-BN, en cuatro proporciones diferentes: 30, 40, 50 y 60 kg/m³ y el quinto exento de FA. De cada lote se elaboraron 6 probetas cilíndricas de φ 15x30 cm. Se midió la resistencia a compresión de todas las probetas así como las relaciones carga-deformación. Se determinó la dureza, la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de las probetas. La resistencia a compresión y los módulos de elasticidad del hormigón con un contenido de 30 kg/m³ de fibras (SFAC) disminuyeron en un 9% y en un 7% respecto al hormigón de referencia (C20) sin FA, mientras que el área limitada por la curva carga deformación aumenta más del doble. Con los hormigones de mayor cantidad de FA esas proporciones están alrededor del 10% y el incremento de la dureza es casi la misma. Debido a que los valores de las durezas de los hormigones con 30, 40, 50 y 60 kg/m³ de FA están muy próximos y dado que tanto la resistencia como el módulo de elasticidad del primero son incluso ligeramente superiores a los del último, por razones de economía la dosis de 30 kg/m³ de fibra de acero es la seleccionada como óptima para el hormigón armado (SFARC). Se fabricaron seis probetas de hormigón armado (RC) de iguales dimensiones, todas ellas con barras de acero de la misma capacidad de tensión, diseñadas para que alcanzaran un valor mínimo de rotura a compresión con la proporción de acero más baja. Tres de las probetas se elaboraron adicionando fibras de acero en una proporción de 30 kg/m³. Los ensayos de rotura a compresión de esas probetas se complementaron con ensayos de rotura a flexión; el resultado obtenido fue un 18% superior en el caso de las vigas SFACR que en el caso de las vigas RC, y la zona superior de la sección central de las curvas de carga-deformación antes de la última rotura de las SFARC, ha dado un valor considerablemente superior que el correspondiente a las vigas RC.

SUMMARY

Five different batches of class C20 concrete, containing Dramix-RC-80/60-BN steel fibres (SFs) as additives at doses of 0, 30, 40, 50 and 60 kg/m³, and six φ15x30 cm prisms were poured from each batch. Standard crushing tests were run on all the specimens and the respective load-displacement and stress-strain curves were plotted. Toughness, ultimate compressive strength and the modulus of elasticity were determined for all specimens. The compressive strength and modulus of elasticity declined in 30 kg/m³ steel-fibre-additive concrete (SFAC) by 9% and 7% compared to the reference C20 concrete without SFs, and the area under the load-deflection curve grew more than two-fold. In concrete with a higher SF dosage, the differences in strength and elasticity were around 10% whilst toughness was about the same. Because toughness values were similar in 30, 40, 50 and 60 kg/m³ plain SF-additive concrete and the strength and modulus of elasticity were slightly better in the mixes with the smallest proportion of SF, for reasons of economy, 30 kg/m³ was taken as the optimum dose of steel fibre to be added to the reinforced concrete used in a second phase of the study. Hence, of the six reinforced concrete (RC) beams made, all of equal size and with the same under-reinforced tensile reinforcement design, three were made with concrete containing the above-mentioned dose of SF. In addition to compressive strength, these beams were tested for flexural strength, which was found to be 18% greater for the SFACR beams than the ordinary RC beams, and the upper arms of the load versus mid-span deflection curves prior to ultimate failure of the SFACR beams were considerably longer than the same arms on the curves for ordinary RC beams.

PALABRAS CLAVE: fibra de acero, vigas de hormigón reforzado, resistencias mecánicas.

KEYWORDS: steel fibre, reinforced concrete, mechanical strengths.

1. INTRODUCCIÓN

Es conocido que la resistencia a compresión (y otras propiedades mecánicas) del hormigón dependen de las características químicas y mineralógicas de sus componentes y mejoran con la incorporación de adiciones, tales como fibras de carbono, fibras de silicio y fibras de acero. Los hormigones a los que se les ha adicionado fibras de acero (SFAC) y los hormigones armados adicionados con fibras de acero (SFACR) se utilizan cada vez más. Dado que la resistencia a compresión aumenta, también aumenta la fragilidad del hormigón y la tendencia a que aparezcan fisuras. La adición al hormigón de fibras de acero de un tamaño y forma normalizada mejora su capacidad de protección a la fisuración, le hace dúctil, incrementa su resistencia a la tensión y mejora de forma notable su durabilidad; por ello, demostradas estas cualidades, tanto los hormigones SFAC como los SFARC son de utilización habitual en numerosos países. La mezcla de esas fibras de acero al hormigón fresco durante su elaboración no requiere cambios importantes en su fabricación habitual, puesto que pueden manejarse de forma similar a la que se realiza con los áridos finos.

El hormigón adicionado con fibras de acero (SFAC) se utiliza en una gama muy amplia de actividades, como en recubrimiento de minas y túneles, en pavimentos y losas, especialmente las de gran tamaño, en fábricas y zonas de accesos públicos, en estabilización de taludes, revestimiento de hornos, recubrimientos refractarios, presas, cubiertas hechas con *composites* metálicos, reparaciones de acueductos, protección sísmica para todo tipo de edificios de hormigón armado, reparación y rehabilitación de estructuras marinas, recubrimientos de protección contra incendios, hormigón de tuberías de alcantarillado e incluso en estructuras convencionales. La principal ventaja de esos SFAC es su alta capacidad de absorción de energía y su elevada resistencia, debido a la alta ductilidad que poseen (1).

Se ha realizado recientemente un estudio en vigas pretensadas en forma de T, sobre las cuales se fijaban con resina epoxi, en las zonas de tensión y compresión, placas con fibras de carbono de dimensiones prefijadas. Se sometieron a resistencias a flexión y de cizalla con cargas estáticas. Se determinó que las roturas a flexión y la capacidad de cizallamiento se incrementaban en un 23 y un 106%, respectivamente, según las normas Noruegas (2-4).

Se realizó una investigación sobre el efecto que ejercían las fibras de acero (FA) sobre la disminución de fisuras en vigas de hormigón armado y se comprobó que una dosificación de 30-40 kg/m³ era apropiada para obtener una mejoría notable en la reducción de la fisuración (5).

1. INTRODUCTION

The compressive strength and other mechanical properties of Portland cement concrete can be improved not only with mineral and chemical admixtures, but by adding other components to the concrete mix such as carbon, silicon, or steel fibres. Steel fibre-additive concrete (SFAC) and steel fibre-additive reinforced concrete (SFARC) are being increasingly used in real-life applications. As concrete compressive strength increases, concrete brittleness also increases and the tendency of such high-performance concrete to crack also rises. The addition of steel fibres of standard size and shape to the concrete reduces cracking, renders the concrete ductile, increases its tensile strength and improves its durability appreciably. In the light of these improvements, the use of both SFAC and SFARC has become standard practice in many countries. Furthermore, the addition of standardised SFs involves no radical change in concrete manufacture, inasmuch as the procedure is similar to the method used to mix fines into fresh concrete.

SFAC is used in a wide range of applications, such as mine and tunnel linings, slabs and floors, particularly large slabs in factories and public squares, embankment stabilisation, shell domes, refractory linings, dam constructions, composite metal decks, aqueduct rehabilitation, seismic retrofitting of all sorts of reinforced concrete buildings, repair and rehabilitation of marine structures, fire protection coatings, sewer pipes, and even conventional portal frames. The main advantage to SFAC is its high ductility and concomitant improvements in energy absorption capacity and toughness (1).

In recent studies, carbon fibre plates of pre-established sizes were epoxied to both the tensile and compression zones of pre-tensioned T-beams; when the shear and flexural strengths were determined under static loads, the bending moment and shear capacities were found to increase by 23% and 106%, respectively, when tested to Norwegian standards (2-4).

In another study on the effect of SFs on cracks in RC beams, it was concluded that a SF dosage of 30~40 kg/m³ reduced cracking appreciably (5).

Gopalaratnam y colab. (6) estudiaron los efectos que ejercen sobre la dureza de las vigas de hormigón armado con adición de fibras de acero (SFARC), distintas variables: dosificación, forma, textura de las fibras de acero (FA) así como la influencia de la carga, del tamaño de las muestras y de la composición de las variables que influyen en la dureza.

Paine y colab. (7) estudiaron la contribución de las fibras de acero (SFs) en la resistencia al cizallamiento de las vigas de hormigón armado y concluyeron que una dosificación del 1-2% (en volumen) del total era idónea.

Ganesan y Shivananda (8) realizaron una serie de determinaciones sobre vigas fabricadas con hormigón armado adicionado con fibras de acero (SFARC) en un porcentaje de 0,5%-1% y 1,5% (en volumen) y proponen diversas fórmulas que relacionan la resistencia a flexotracción de la viga frente a su dosificación en fibras de acero.

Alavizadeh-Farhang (9) aplica simultáneamente cargas estáticas y calor a vigas SFARC en las cuales se empleó fibras de acero de 30 mm de longitud y 0,5 mm de espesor en una única dosificación de 60 kg/m³, comprobando un significativo aumento en la capacidad portante en las vigas estudiadas.

Hartman (10) elaboró y ensayó un total de 12 vigas SFARC, curadas a 28 días, con dos dosificaciones, 60 y 100 kg/m³ de fibras de acero (Dramix CR-65/35-BN) y comprobó que la relación de la carga de rotura experimental frente a la carga teórica fue más alta para las vigas con 60 kg/m³ de fibras. De acuerdo con la bibliografía más relevante, la dosificación de fibras de acero más adecuada es de 1-2,5% (en volumen), dado que con una proporción inferior al 1% se pierde eficacia y con una proporción más alta del 2,5% se produce una caída importante en la resistencia a compresión. Las fibras de acero, cuando sobrepasan el 2,5%, se aglomeran en vez de repartirse uniformemente en el hormigón; esas aglomeraciones son «puntos débiles», crean huecos de gran tamaño, etc., lo que supone un deterioro de sus características mecánicas. Los autores del presente trabajo no han encontrado en la revisión bibliográfica hecha, ninguna publicación en la que se detalle el costo económico de las vigas SFARC, y una simultánea evaluación de su precio en función de la optimización del porcentaje de fibras de acero empleadas.

2. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo fue doble: en primer lugar, determinar el efecto que inducen las fibras de

Gopalaratnam et al. (6) studied the effects of SF dosage, shape and texture, along with the rate of loading, specimen size and the composition of the variables on SFARC beam toughness.

Paine et al. (7) studied the contribution of SFs to the shear resistance of RC beams and determined that a SF dosage of ~1-2 % by absolute volume was ideal in that respect.

Ganesan and Shivananda (8), after performing experiments on SFARC beams with SF dosages of 0.5%, 1% and 1.5% by absolute volume, developed expressions relating flexural crack widths to the SF dosage.

Alavizadeh-Farhang (9) applied static load and heat simultaneously to 30x0.5-mm SFARC beams manufactured with a single dose of 60 kg/m³ of SFs and reported a significant increase in the static load carrying capacity of the beams tested.

Hartman (10) manufactured and tested a total of 12 SFARC beams made with Dramix RC-65/35-BN steel fibres at doses of 60 kg/m³ and 100 kg/m³, reporting that the ratio of the measured ultimate load to the theoretical load was higher for the 60 kg/m³ SFARC beams. According to the relevant literature, the optimum SF dosage is about ~1-2.5 % by volume, as doses of under 1% of SF are ineffective and proportions over 2.5% occasion a considerable decline in compressive strength. Steel fibres in excess of 2.5% tend to cluster and form lumps instead of spreading uniformly throughout the concrete; such pockets of accumulated fibre generate weak spots, large voids, etc. that impair the mechanical properties of the mix. In their review of the literature, the authors of this study found no detailed survey of the cost of SFARC beams, nor any study simultaneously addressing the optimisation -financial and mechanical- of SF dosage.

2. OBJECTIVE

This study has a dual aim: firstly, to determine the effect of a common dose of SFs on strength, modulus of

acero en las dosificaciones utilizadas generalmente sobre las resistencias mecánicas, el módulo de elasticidad y la dureza del hormigón estructural, y en segundo lugar, estudiar el comportamiento de la resistencia a flexión de las vigas SFARC con una dosificación razonable de fibras de acero, comparándolas con las vigas de hormigón armado.

3. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

La parte experimental del trabajo se llevó a cabo en dos fases distintas. En la primera, se efectuaron sobre cinco tipos diferentes de hormigón ensayos convencionales de resistencia mecánica y deformación. El primero fue un tipo C20 ordinario, sin fibras de acero, y los otros cuatro tipos de hormigón se fabricaron a partir de ese mismo tipo de C20, pero con distintas proporciones de fibras de acero. Se adoptó una dosificación óptima de fibras como consecuencia de los resultados que se obtuvieron en los ensayos de las resistencias mecánicas de estos hormigones (SFAC).

En una segunda fase del estudio, se llevaron a cabo las determinaciones de deformación bajo carga sobre vigas de hormigones armados (RC) y vigas de hormigones armados adicionados con fibras de acero (SFARC) con el objeto de evaluar los efectos de la adición de las fibras al hormigón armado.

3.1. Determinaciones sobre SFAC

Inicialmente se decidió trabajar sobre un hormigón estructural de tipo común: por ello se seleccionó sobre hormigón fresco de clase C20 con un escurrimiento de 150 ± 20 cm. A continuación se mezcló el mismo tipo de hormigón fresco fibras de acero en proporciones de 30, 40, 50 y 60 kg/m³, respectivamente, manteniendo exactamente igual las cantidades de los otros componentes. De cada lote se tomaron 6 probetas cilíndricas de $\phi 15 \times 30$ cm.

Para esos cinco lotes de muestras se utilizó cemento Portland Ordinario, PC-32.5, que equivale al Portland Tipo I ASTM. Se molieron áridos gruesos y medios; los finos eran de arena natural de río, con peso específico de, respectivamente, 2,72, 2,65 y 2,60. Una vez tamizadas estas tres fracciones se ajustaron para obtener una proporción de mezcla que se encontrara dentro del huso granulométrico. Las cantidades de cada uno de los componentes para obtener el hormigón de clase C20 utilizado, se da en la Tabla I.

Las fibras de acero utilizadas fueron de 60 mm de longitud y 0,75 mm de diámetro, conocidas como «Dramix CR 80/60 BN» (Figura 1); presentan una resistencia a la tensión superior a 1.050 N/mm². Estas fibras se añadieron al hormigón durante su fabricación a 20 kg por minuto, y la mezcla se agitó exactamente durante 5 minutos a velocidad elevada para lograr una adecuada homogeneidad en el hormigón final (11) (Figura 2).

elasticity, and toughness of ordinary structural concrete, and secondly, to compare the flexural strength of SFARC beams with a moderate dose of SF to the strength of ordinary RC beams.

3. EXPERIMENTAL STUDIES

Experimental studies were performed in two phases. In the first, conventional workability, mechanical strength and deformation experiments were performed on five batches of ordinary C20 concrete, one with no SFs and the other four containing various doses of fibres. The optimum SF dosage was found by testing the SFAC for mechanical strength.

In the second phase, load/deflection experiments were performed on ordinary RC beams and SFARC beams to determine the practical effects of adding SFs to reinforced concrete.

3.1. Experiments on SFACs

C20, a common class of structural concrete, was chosen for the study. First, a C20 concrete mix with a slump of 150 ± 20 mm was designed and produced. Next, 30, 40, 50 and 60 kg/m³ doses of SFs were added to the C20 concrete, in which the proportions of all other components remained constant. Six cylindrical specimens measuring $\phi 15 \times 30$ cm were made from each batch following standard procedures.

OPC-32.5, which is equivalent to ASTM Type I Portland cement, was used in all five batches, made with crushed medium and coarse aggregate and river sand. The saturated surface-dry bulk specific gravity values of these components were 2.72, 2.65, and 2.60, respectively. Standard sieve tests were conducted and the three groups of aggregates were proportioned to attain a mid-scale aggregate mix. The properties of the class C20 concrete used are given in Table 1.

The steel fibres used in the study, known as "Dramix RC 80/60 BN" (Figure 1), were 60 mm long and 0.75 mm in diameter, with a tensile strength greater than 1050 N/mm². After the fibres were added at a rate of 20 kg/min, the batches were mixed at high speed for exactly 5 minutes to distribute the SFs evenly throughout the concrete (11). One such batch of SFAC is shown in the photograph in Figure 2.

TABLA 1/TABLE 1
Mezclas de hormigón clase C20 empleado
Mixture recipe of the C 20 class concrete used

Materiales/Materials	Cantidad/Amount (kg/m ³)
Agua/Water	150
Cemento portland <i>Portland cement</i>	300
Filler/Filler (SSD *)	386
Arena/Sand (SSD)	472
Árido fino/Fine coarse (SSD)	467
Árido medio <i>Medium coarse (SSD)</i>	559

* SSD significa superficie seca saturada

* SSD means saturated surface-dry

TABLA 2/TABLE 2
Valores medios de las determinaciones mecánicas en los hormigones
Averages of the measured mechanical peculiarities of the concrete batches tested

Serie hormigón <i>Concrete batch</i>	Dosificación de SFs <i>Dosage of SFs</i> (kg/m ³)	Carga última <i>Ultimate load</i> (N)	Resistencia última <i>Ultimate strength</i> (N/mm ²)	% de pérdida de resistencia <i>Percent loss in strength</i> (%)	Módulo de elasticidad <i>Elasticity modulus</i> (N/mm ²)	Tenacidad <i>Toughness</i> (kN-mm)
No SFs	0	432 000	24.46	---	29 500	202
SFAC-30	30	397 000	22.48	8.80	27 500	446
SFAC-40	40	385 000	21.80	12.20	26 500	522
SFAC-50	50	377 000	21.34	14.60	26 500	415
SFAC-60	60	399 000	22.59	8.30	26 000	474

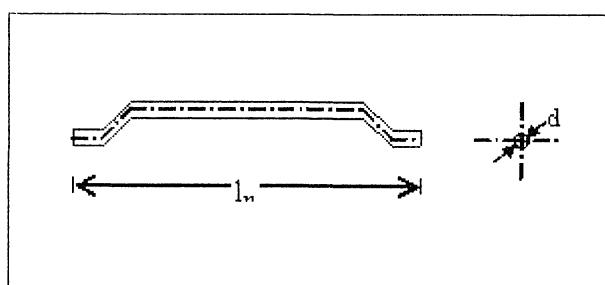


Figura 1.- Forma de una de las fibras de acero usadas.

Figure 1.- Shape of one of the steel fibers used.

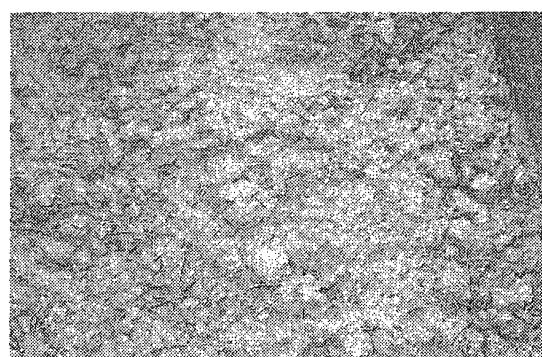


Figura 2.- Apariencia de uno de los lotes de CAFA mientras estuvo fresco.

Figure 2.- Appearance of one of the batches of SFACs while fresh.

Las probetas de hormigón así obtenidas se curan durante 28 días y la superficie superior de cada una de ellas se refrenta con azufre para un sellado adecuado.

Dos horas más tarde se ensayan a compresión. Las deformaciones debidas a la carga de compresión se registran en cada incremento de 20 kN, hasta la rotura final, incluyendo la deformación en rotura. En la Tabla 2 se da un resumen de estos datos, el porcentaje de la resistencia a compresión, del módulo de elasticidad y de la dureza de los cinco tipos de hormigón ensayados. Como puede comprobarse de los resultados de la Tabla 2 hay una reducción de, aproximadamente, el 10% en los módulos de elasticidad en los hormigones SFAC, mientras que estos mismos hormigones parecen que se van haciendo más comprensibles y más elásticos. La dureza de estos hormigones con una menor proporción de fibras de acero (30 kg/m^3) se incrementó en un 120%, en relación al hormigón de referencia (sin SF). También se observa en los valores dados en la Tabla 2, que no fue notable el incremento de la dureza en los hormigones con una dosificación más elevada en fibras de acero. Por consiguiente, teniendo en cuenta el costo de las fibras de acero y considerando que otras propiedades relevantes del material no cambian apreciablemente, se concluye que la dosificación óptima de las ensayadas es la más baja, de 30 kg/m^3 . De acuerdo con estos datos, las vigas SFRAC ensayadas se hicieron con hormigón de clase C20, con 30 kg/m^3 de fibras de acero.

3.2. Ensayos con vigas RC y SFARC

En los ensayos no se ha tenido en cuenta el peso de la propia viga. Con el fin de conseguir el comportamiento resistente más elevado se utilizó un acero de refuerzo de $\rho = 0.00315$. El acero que presentaba un esfuerzo a tensión más cercano tenía $2 \Phi 12 + 1 \Phi 8$, y la carga repartida aplicada a la viga en dos puntos hasta la rotura se calculó en 130 kN. En estos cálculos se utilizó la resistencia característica a compresión y la de deformación para hormigón de clase C20, como se indica en RILEM TC 162-TDF (12). Los estribos se calcularon y se colocaron para que se produjera la rotura de las barras longitudinales de acero solamente por flexión.

Se fabricaron tres vigas de hormigón armado empleando hormigón de clase C20 y diseñadas, como se indica en el párrafo anterior, con la proporción menor de fibras de acero y tres vigas SFARC empleando, asimismo, hormigón C20, con 30 kg/m^3 de fibras de acero; estas vigas contenían la misma cantidad de barras de hierro, tanto en las que se situaron longitudinalmente como en las situadas transversalmente; todas tenían una dimensión de $250 \times 250 \times 2000 \text{ mm}$. La fotografía de la Figura 3 se

Twenty eight days after curing, the top of each cylindrical sample was duly capped with a sulfur compound seal.

Two hours later the specimens, on which a standard compressometer was mounted, were compression tested on a certified compression machine. Readings of axial strain due to compressive stress were recorded at 20 kN load increments through failure, together with the strain at fracture. A summary of these data, along with the mean compressive strength, moduli of elasticity, and toughness computed from the experimental data for all five types of concrete are given in Table 2. The results show that compressive strength declines by 10% in SFACs; a similar decline is observed in the modulus of elasticity, indicating that such concrete is more elastic and compressible. The SFAC with the smallest dosage of fibre - 30 kg/m^3 - was 120% tougher than the fibreless control. Table 2 also shows that there was no material rise in toughness with SF dosage. In light of these findings, cost considerations and the lack of any appreciable change in other relevant concrete properties, the smallest dosage of SF tested was taken to be the optimum proportion of fibre. Consequently, the SFARC beams used in the second phase of the study were made with C20 class concrete, to which 30 kg/m^3 of steel fibre were added.

3.2. Experiments on RC and SFARC Beams

Beam dead load was disregarded in the computations. A steel reinforcement ratio of $\rho = 0.00315$ was used in the beams to ensure they maintained an under-reinforced behaviour. The tensile steel conforming most closely to this ratio was $2 \Phi 12 + 1 \Phi 8$, and the failure load computed for the beam in a conventional two-point loading configuration to test for flexural strength was computed to be 130 kN. The characteristic compressive strength and deformation particulars of class C20 concrete as given in RILEM TC162-TDF (12) were used in these calculations.

Three C20 under-reinforced RC beams were made, as described in the preceding paragraph, along with three C20 SFARC beams. All beams, which contained the same amount of longitudinal and lateral reinforcement, measured $250 \times 350 \times 2000 \text{ mm}$. The stirrups were designed and placed so as to cause failure of the longitudinal steel bars under simple bending only. The photograph in Figure 3, taken during concreting of one

tomó durante el hormigonado de una de las vigas SFARC y en ella se pueden observar las barras de refuerzo convencionales. Se fabricaron también, en otros moldes de las dimensiones estandar 250x350x2000 mm, tres probetas de hormigón (no armado) adicionando una proporción de 30kg/m³ de fibras de acero para ser ensayadas y comprobar sus características mecánicas.

Cada una de esas tres vigas SFARC (de hormigón armado reforzado con fibras de acero) y las tres vigas de hormigón armado (sin fibras de acero) se ensayaron a flexotracción con una prensa de una capacidad de 350 kN, después de haber permanecido en el laboratorio durante 28 días, envueltas en una manta permanentemente mojada. Después de cada incremento de carga de 5 kN se medía con precisión el valor medio de deformación. La Figura 4 muestra uno de estos ensayos, casi en el valor de rotura. Cada una de las pequeñas vigas fabricadas con hormigón (adicionado de fibras de acero) (SFAC) se ensayó con una relación de carga tal que diera lugar a 1 mm de deformación en 1 minuto con un programa elaborado para medir la dureza de tales vigas, de acuerdo con ASTM C1018-92 (13).

of the SFARC beams, shows the conventional reinforcement bars. Three further standard 150x150x750 mm beams were also made with the plain concrete containing 30 kg/m³ of steel fibre to test for toughness.

The three SFARC and the three RC beams were tested for flexural strength by a simple two-point experiment on a 350 kN loading frame exactly 28 days after casting and curing on the laboratory floor, wrapped in wet burlap. Mid-section deflection was measured at every 5 kN load increment by a properly installed strain gauge. Figure 4 shows one of these experiments just prior to final beam failure. The three small SFAC beams were tested at a loading rate sufficient to prompt 1 mm of deflection per minute in a certified stroke-controlled set-up, pursuant to the ASTM C1018-92 (13) design for measuring the toughness of such SFAC beams.

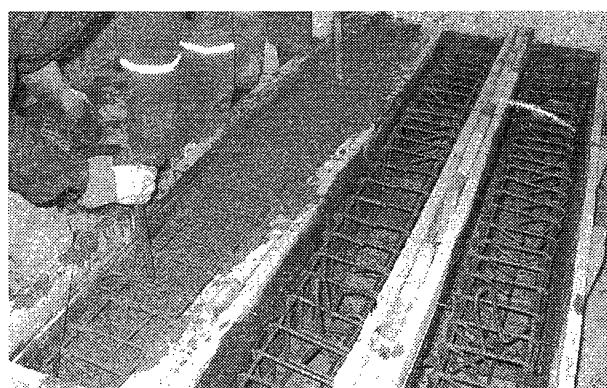


Figura 3.- Elaborando el hormigón de las vigas SFARC.

Figure 3.- *Concreting of the SFARC beams.*

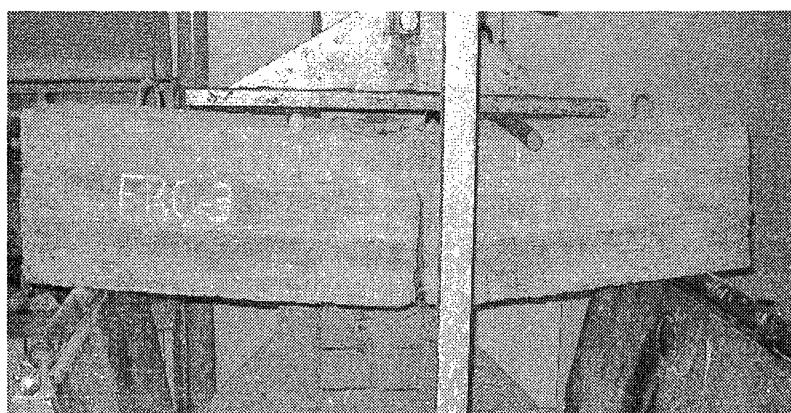


Figura 4.- Uno de los experimentos de dos-puntos de carga en vigas.

Figure 4.- *One of the two-point beam loading experiments.*

4. RÉSULTADOS Y DISCUSIÓN

La transferencia de esfuerzo de cizallado en el hormigón no es regular, debido a las microfisuras que están presentes incluso en hormigones de buena calidad. Las fibras de acero distribuidas en el hormigón actúan como pequeños puentes y mejoran las características de las fisuras y su comportamiento es mejor si se consigue que estén uniformemente repartidas. El resultado de someter a compresión las probetas cilíndricas revelan que las fibras de acero consiguen que, en la carga final, con la rotura no se hagan pedazos. Esto se puede ver en la Figura 5. La Figura 6 representa las curvas de las relaciones esfuerzo/deformación de esos ensayos y el módulo de elasticidad y la dureza calculados a partir de los datos experimentales (Tabla 3).

4. RESULTS AND DISCUSSION

Even in good quality concrete, shear stress is not evenly transferred due to the micro cracks present in the material. Steel fibres distributed in concrete act like tiny bridges, improving crack properties; the more uniformly distributed the fibre, the better is its performance in this regard. The effect of the SFs in the cylindrical specimens was to prevent fragmentation at and beyond the ultimate load as shown in Figure 5. The stress-strain curves for these specimens are shown in Figure 6, and the moduli of elasticity and toughness values computed from the experimental data in Table 3.

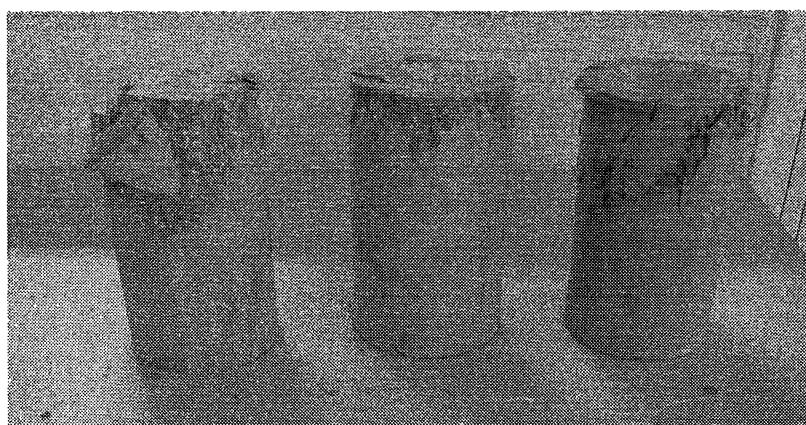


Figura 5.- Algunos de los especímenes cilíndricos del SFAC después de haber sido cargados hasta la falla completa en una máquina de compresión.

Figure 5.- Some of the cylindrical specimens of the SFAC after having been loaded to full failure in a compression machine

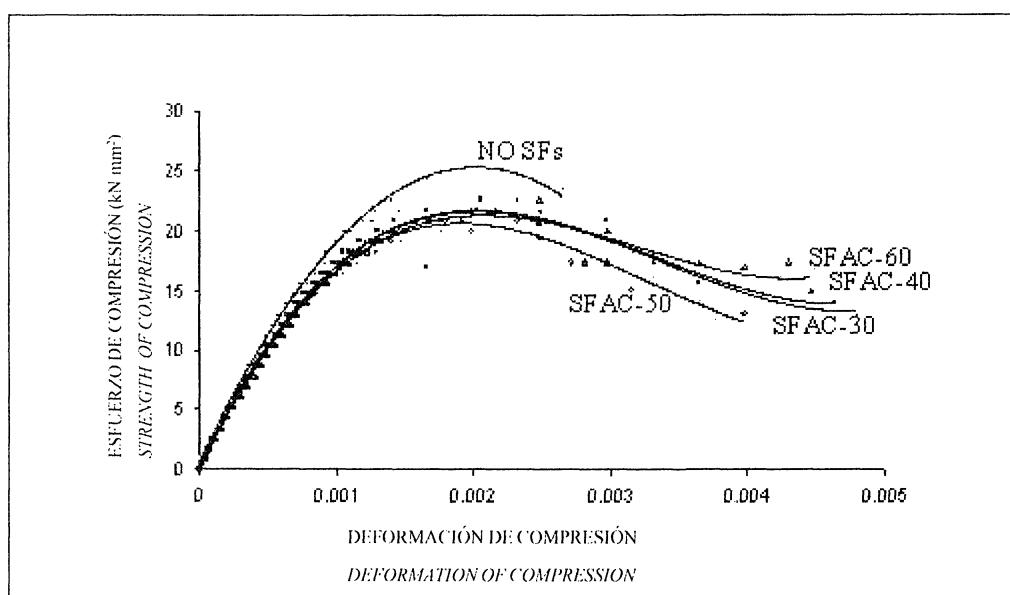


Figura 6.- Relaciones Esfuerzo-Deformación de los cinco diferentes lotes de hormigones C20 medidas experimentalmente en muestras cilíndricas de 15x30 cm.

Figure 6.- Stress-Strain relationships of all the five different batches of C20 concretes measured experimentally on 15x30 cm cylindrical samples.

TABLA 3/TABLE 3

Valores teóricos y experimentales de los ensayos de carga
Theoretically computed and experimentally measured values of the beam loading experiments

Muestra Nº <i>Sample No</i>	Dosificación de SFs <i>Dosage of SFs</i> (kg/m ³)	Refuerzo a tensión <i>Tensile reinforcement</i> (mm)	Carga última teórica <i>Theoretical ultimate load</i> (kN)	Carga primera fisura <i>Load to first crack</i> (kN)	Carga rendimiento plástico <i>Load to plastic yield</i> (kN)	Carga última medida <i>Measured ultimate load</i> (kN)	Relación de carga <i>Ratio of load</i> Th. L/ M.L
No.1	0	2Φ12+1Φ8	129.95	92.00	144.00	197.20	1.52
No.2	0	2Φ12+1Φ8	129.95	87.00	137.00	180.25	1.39
No.3	0	2Φ12+1Φ8	129.95	93.25	162.00	196.40	1.51
No.4	30	2Φ12+1Φ8	129.95	98.00	157.50	213.65	1.65
No.5	30	2Φ12+1Φ8	129.95	101.90	178.00	227.10	1.75
No.6	30	2Φ12+1Φ8	129.95	115.00	173.15	232.10	1.79

Los resultados han demostrado que hay una caída gradual tanto en los valores de carga a compresión como en los módulos de elasticidad con una dosificación mayor de fibras de acero; la disminución de estos últimos parámetros es más pronunciada que la disminución observada en los valores de la carga a compresión. El valor de la rotura a compresión de las probetas con la dosificación de fibras de acero más elevada (60 kg/m³) sigue siendo, sin embargo, más alto que el valor inferior de la carga característica del hormigón de clase C20. Al aumentar la dosificación de las fibras de acero en el hormigón, hay un incremento drástico de su ductilidad, comportándose como un material un tanto pseudo-elástico; esto se comprueba por la caída de la tangente de la parte inicial de la curva esfuerzo/deformación. Los valores medios de los módulos de elasticidad del hormigón C20 sin fibras de acero estuvieron alrededor de unos 29.500 N/mm², y los de SFAC (hormigón adicionado con fibras de acero) fueron de unos 26.500 N/mm². En resumen la adición de fibras de acero al hormigón estructural C20 conduce a una reducción promedio del 10% en los módulos de elasticidad. Los resultados obtenidos en las medidas de la dureza de todos los lotes de probetas SFAC no se diferenciaban apreciablemente entre sí; de los datos obtenidos puede concluirse que la capacidad de absorción de energía (dureza) de los SFAC de, al menos, el doble que la del hormigón normal, entre 2 y 2.5. Además de las consideraciones económicas que se derivan de esto, los resultados sugieren que en una segunda fase de la investigación, los hormigones armados a emplear se deben dosificar con la menor proporción de fibras de acero, 30 kg/m³.

The results of the experiments showed that both compressive strength and modulus of elasticity gradually decrease as the steel fibre dose increases, although the modulus of elasticity declines proportionally more than compressive strength. Nonetheless, even at the highest SF dosage, 60 kg/m³, compressive strength was greater than the lower limit of class 20 concrete characteristic strength. Increasing the dosage of steel fibres within the concrete raises its ductility dramatically, provoking pseudo-elastic behaviour in the material, as reflected by the lesser slope of the initial portion of the stress-strain curve. The mean modulus of elasticity of C20 concrete without steel fibres used in this study was about 29500 N/mm², and the value for SFAC was approximately 26500 N/mm². In short, the addition of SF to C20 structural concrete reduces the modulus of elasticity by 10% on average. Toughness did not vary appreciably in the different SFACs and it may be sustained from these findings that the energy absorption capacity (toughness) of SFAC is from twice to 2.5 times higher than in normal concrete. These results, in conjunction with cost considerations, suggested that the smallest steel fibre dosage experimented, 30 kg/m³, should be used to make the reinforced concrete beams to be tested in the second phase of the study.

Los valores calculados para las vigas hormigón armado en los ensayos de rotura a flexotracción han dado un valor de 1,47 y en las de SFARC dosificadas con 30kg/m³ y con los mismos refuerzos (armaduras), longitudinal y perpendicularmente instalados en las vigas exactamente igual, han dado unos valores para las cargas de rotura de 1,73. Esto indica que la capacidad de carga de una viga SFARC es superior en un 18% a la de una viga RC.

Los valores obtenidos en las vigas RC y SFARC para las relaciones de deformación bajo carga medidas a flexotracción, se dan en la Figura 7.

La dureza media calculada en base a esas medidas fue de 7.175 kN para las vigas RC y de 13.140 para las vigas SFARC, lo cual significa que la adición de fibras de acero -incluso a una dosis moderada, de 30 kg/m³- incrementó su dureza 1.83 veces respecto a las vigas RC, sin fibras.

Las probetas estandar de hormigón C20 con una dosificación de 30 kg/m³ de fibras de acero, se ensayaron a compresión y los índices de consistencia obtenidos fueron: $I_s = 5,9$ y $I_{10} = 9,3$. Ambos están dentro de la gama de ASTM 1018, que es $1 < I_s < 6$ y $1 < I_{10} < 12$, longitudinal y perpendicularmente.

5. CONCLUSIONES

Se demuestra experimentalmente que la dureza de las vigas de hormigón armado mejora notablemente adicionando fibras de acero en una proporción de

The ratios of the measured to the computed ultimate loads, found from two-point loading experiments, for ordinary RC and 30 kg/m³-SFARC beams with exactly the same amount of longitudinal and lateral reinforcing steel were 1.47 and 1.73, respectively. In other words, the load bearing capacity was 18% higher in the SFARC beam than in the RC beam.

The load-mid section displacement curves for RC and SFARC beams based on the two-point load experiments are given in Figure 7.

The mean toughness values computed from these curves were 7,175 kN for the RC beams and 13,140 kN for the SFARC beams; i.e., the addition of even a mild dose of steel fibre (30 kg/m³) brought a 1.83-fold increase in toughness.

The toughness indices obtained for the standard size prisms made from 30 kg/m³-steel fibre-additive reinforced C20 concrete were: $I_s = 5,9$ and $I_{10} = 9,3$, both of which are within the ranges defined in ASTM C1018, namely: $1 < I_s < 6$ and $1 < I_{10} < 12$.

5. CONCLUSIONS

Experiments showed that a steel fibre dose of 30 kg/m³ substantially improved the toughness of reinforced concrete beams. Whilst compressive strength declined

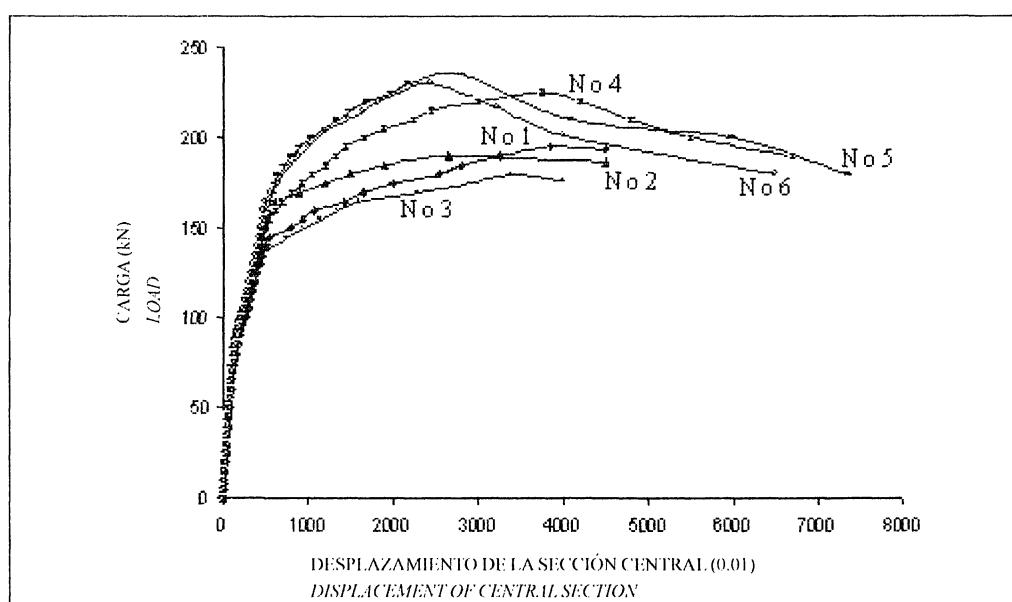


Figura 7.- Relaciones de (Carga)-(desplazamiento en sección central) determinados experimentalmente en todas las vigas probadas.

Figure 7.- (Load)-(mid-section displacement) relationships determined experimentally on all the beams tested.

30kg/m³. Mientras que en el hormigón ordinario con esta dosificación tiene lugar una ligera disminución de la resistencia a la compresión y una disminución de alrededor del 10% en los módulos de elasticidad, en los casos en que se mezclen de forma homogénea con el hormigón fibras de acero tipo Dramix CR 80/60BN, se consigue una mejoría de alrededor del 20% de su capacidad de compresión y casi el doble en la dureza. Debido a que se conseguirán mejorías similares con los hormigones SFARC, las estructuras elaboradas para soportar cargas con estos hormigones tendrán un comportamiento drásticamente mejorado frente a movimientos sísmicos. Teniendo en cuenta que una dosificación de 30 kg/m³ de fibras de acero supone tan sólo un costo moderado, la construcción de hormigones armados adicionados con fibras de acero debe de tener notables ventajas en terrenos son riesgo de movimientos sísmicos.

slightly and the modulus of elasticity by about 10% in plain concrete at this dosage, ultimate load values grew by around 20% and toughness two-fold in reinforced concrete beams when Dramix RC 80/60BN steel fibres were mixed uniformly into the concrete. Since similar improvements can be expected in SFARC columns, structures built with such frames should improved the resistance to seismic action dramatically. Account taken of the moderate cost of a 30 kg/m³-dose of steel fibre, the construction of reinforced concrete frames with SFARC members should bring obvious benefits in regions of high seismic risk.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Ocean Concrete Products, Ocean Heidelberg Cement Group, Steel Fibre Reinforcement, Working Together to Build Our Communities Report, 1999.
- (2) Norwegian Standard: *Concrete Structures-Design rules, NS 3473*, Norwegian Council for Building Standardization, Oslo, Norway, 1998.
- (3) P. F. Takács, T. Kanstad: *Strengthening prestressed concrete beams with Carbon Fibre Reinforced Polymer plates*, NTNU Report R-9-00, Trondheim, Norway, 2000
- (4) N. F. Grace, G. Abdel-Sayed, W. F. Ragheb: *Strengthening of Concrete Beams Using Innovative Ductile Fibre-Reinforced Polymer Fabric*. ACI Structural Journal (2002), pp. 692-700.
- (5) D. Dupont, L. Vandewalle: *Bending Capacity of Steel fibre-additive reinforced concrete (SFARC) Beams*, International Congress on Challenges of Concrete Construction, Dundee (2002), pp. 81-90.
- (6) V. S. Gopalaratnam, S. P. Shah, G. B. Batson, M. E. Criswell, V. Ramakrishnan, M. Wecharatara: *Fracture Toughness of Fibre Reinforced Concrete*. ACI Materials Journal, Vol. 88, No.4 (1991), pp.339-353.
- (7) K. A. Paine, K. S. Elliott, C. H. Peaston: *Flexural Toughness As a Measure of Shear Strength and Ductility of Prestressed Fibre Reinforced Concrete Beams*, International Congress on Challenges of Concrete Construction, Dundee (2002), pp. 200-212.
- (8) N. Ganeshan, K. P. Shivananda: *Spacing and Width of Cracks in Polymer Modified Steel fibre-additive reinforced concrete Flexural Members*, International Congress on Challenges of Concrete Construction, Dundee (2002), pp. 244-253.
- (9) A. Alavizadch-Farhang: *Plain and Steel fibre-additive reinforced concrete Beams Subjected to Combined Mechanical and Thermal Loading*. Thesis, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology, Bulletin No. 38, Stockholm, Sweden, 1998.
- (10) T. Hartman: *Steel fibre-additive reinforced concrete*, Thesis, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1999.
- (11) RILEM TC162-TDF: *Test and design methods for steel fibre-additive reinforced concrete: Bending test*, Materials and structures, Vol. 33, january-february (2000), pp 3-5.
- (12) RILEM TC162-TDF: *Test and design methods for steel fibre-additive reinforced concrete: s-e design method*, Materials and structures, Vol. 33, march (2000), pp 75-81.
- (13) ASTM C1018-92: *Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fibre-Reinforced Concrete*, American Society for Testing and Materials, 1992

Nota del Comité de Redacción:

El Comité de Redacción de Materiales de Construcción agradece al Prof. Tomás Vázquez la traducción de la versión española de este artículo.

SEMINARIOS TORROJA '2004

Ciclo nº 46

Tema:

"TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DE SUS MATERIALES"

Actuarán como ponentes:

Juan Miguel Hernández de León, Álvaro Siza, sobre:

Reforma y acondicionamiento del Paseo del Prado en Madrid
(7 de octubre)

Francisco González de Posada, sobre:

Evacuación del calor de hidratación del hormigón en grandes masas
(21 de octubre)

Jaime Fernández Gómez, Elez Dervisevic, sobre:

Avances en el uso de las armaduras industrializadas en el hormigón
(4 de noviembre)

Francisca Puertas Maroto, sobre:

Cementos y hormigones de escorias activadas alcalinamente
(18 de noviembre)

Antonio Cruz Villalón, Antonio Ortiz García, sobre:

Estadio de Atletismo de Madrid y su ampliación
(2 de diciembre)

César Bedoya Frutos, Francisco Javier Neila González, sobre:

Concurso Solar Decathlon 2005
(16 de diciembre)

Estos Seminarios tendrán lugar en el
Aula Eduardo Torroja
a las 12 horas
La asistencia será gratuita

IETCC

CSIC