

# Evolución con la edad de las propiedades mecánicas de hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero sometidos a compresión

*Evolution over time of the mechanical properties of self compacting concret reinforced with steel fibers subjected to compression*

J. L. Sánchez-Pérez<sup>1</sup>, I. Mateos-Delso<sup>2</sup>,  
A. Cobo-Escamilla<sup>1</sup>, N. Llauradó-Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Madrid (España)

<sup>2</sup> LafargeHolcim (France)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8198>

## 1. INTRODUCCIÓN

Se puede definir al hormigón auto-compactante (HAC) como un hormigón capaz de compactarse únicamente por la acción de la gravedad, que llena los encofrados y discurre entre las armaduras sin necesidad de aplicar medios internos o externos de compactación y manteniéndose, durante su puesta en obra, homogéneo y estable sin presentar segregaciones [1]. Las ventajas que presenta frente a un hormigón convencional (HC) son su facilidad de colocación, mejora del acabado final de las superficies, menor contaminación acústica, ahorro de mano de obra y de energía, baja permeabilidad y alta durabilidad del hormigón.

La incorporación aleatoria de fibras de acero a la matriz del hormigón modifica las propiedades del material base, aumentando su tenacidad y mejorando el control de la fisuración [2-5]. Las mejoras en la tenacidad dependen del tipo y del porcentaje de las fibras [6]. Las fibras con mayor resistencia a ser extraídas (fabricadas con formas rizadas u onduladas o con superficies deformadas) son más efectivas que las equivalentes de forma recta uniforme con la misma longitud y diámetro [7,8].

La resistencia a compresión del hormigón solo se ve afectada ligeramente con la presencia de las fibras [9-11]. Algunos investigadores han constatado incrementos en la resistencia que varían del 0 al 15% para un 1,5% de volumen de fibras [8]. En otros casos se han detectado pequeñas disminuciones en la resistencia a

compresión [12,5]. En todos los casos se han obtenido fuertes incrementos en la tenacidad, sobre todo cuando las fibras de acero poseen los extremos conformados [12,13]. Esta mejora en la tenacidad se produce porque las fibras limitan la fisuración transversal del hormigón, produciendo un estado de confinamiento en su interior, mejorando de forma significativa la tenacidad de los elementos [9,14].

Además de las ventajas propias del HAC y del HRFA, el empleo de un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero (HACRFA) supone una sinergia del empleo de los dos hormigones anteriores en el siguiente sentido: debido a la mayor densidad de las fibras de acero respecto del resto de los componentes del hormigón, existe una tendencia a incrementar la proporción de fibras en la parte inferior de los elementos hormigonados respecto de la parte superior. Esto se produce fundamentalmente durante el vibrado de los elementos [15]. El empleo del HACRFA elimina el inconveniente anterior, obteniendo elementos más homogéneos a lo largo de la sección transversal.

La Instrucción EHE-08 [16] aborda el tema de los HAC en su anejo 17 en el que se especifica que su comportamiento en términos de resistencia puede considerarse similar al de un HC elaborado con los mismos materiales componentes. Sin embargo, se indica que cuando el valor del módulo de elasticidad sea crítico en el proyecto, éste debe evaluarse mediante ensayos específicos. Los HRFA se tratan en el anejo 14 en el cual no se indica nada acerca del comportamiento específico de este tipo de hormigones cuando se ensayan a compresión.

Las normas de diseño de estructuras aportan la formulación necesaria para obtener en HC la resistencia a compresión a distintas edades, el módulo de elasticidad

longitudinal o la resistencia en distintos tipos de probetas a partir del valor de la resistencia a compresión obtenida a los 28 días de edad sobre una probeta cilíndrica de 15cm de diámetro y 30cm de altura. Sin embargo, esta información no está disponible en las normas para HACRFA y la investigación realizada al respecto es muy escasa. En este trabajo y a partir de los valores experimentales obtenidos se ofrecen expresiones para aportar esa información en el caso de HACRFA.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la fabricación del hormigón empleado en este trabajo se ha empleado cemento CEM II/A-M (P-V) 42,5 R, con un contenido de 350 Kg/m<sup>3</sup>, una relación agua cemento de 0.56, como aditivos se han añadido 1.9 Kg/m<sup>3</sup> de plastificante y 5.8 Kg/m<sup>3</sup> de superplastificante. Como refuerzo se han utilizado fibras de acero trelladas en frío de 50 mm de longitud y 0.62 mm de diámetro (esbeltez 80.6), con una dosificación de 10 kg/m<sup>3</sup> (0.13% en volumen), suministradas por la empresa Bekaert con la denominación comercial Dramix.

Se han fabricado 15 probetas cilíndricas de 15cm de diámetro y 30cm de altura y 15 probetas cúbicas de 15cm de lado. Las probetas se han curado en cámara húmeda durante 28 días, al 92% de humedad y 20°C. Posteriormente, las probetas se han mantenido en las condiciones ambientales del laboratorio, a una humedad aproximada del 35% y 24°C. Tres especímenes de cada probeta se han sometido a ensayos mecánicos de compresión hasta rotura a las edades de 7, 14, 28, 90 y 365 días. Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Las probetas se han ensayado con la prensa universal IBERTEST MIB60-AM equipada con software wintest 32. Los ensayos se han realizado con control de desplazamiento a una velocidad de 10<sup>-5</sup> /s. Para poder obtener el módulo de elasticidad longitudinal y el coeficiente de Poisson, en todas las probetas se han colocado 4 galgas extensométricas LY4 de HBM en posiciones vertical y horizontal con el fin de medir las deformaciones longitudinales y transversales en función de la tensión aplicada. Las galgas se han colocado por

parejas (vertical y horizontal) en caras opuestas. Previamente a la colocación de las galgas, se han lijado las probetas en la zona de pegado, se ha eliminado el polvo y se han trazado con un lapicero de dureza 5H sendas líneas verticales para asegurar que las galgas queden en posición paralela al eje de las probetas. Las galgas se han pegado utilizando un pegamento de la casa HBM que responde a la denominación "pegamento rápido 2 componentes X60/100g + 2x40ml. Las medidas se han registrado con un adquisidor de datos Quantum X MX840B de HBM.

### 3. RESULTADOS

Para garantizar que el hormigón estudiado posee características de autocompactable, se han realizado los ensayos de escurrimiento, embudo en V, caja en L y escurrimiento con anillo J según la Instrucción EHE-08. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos y su comparación con los límites fijados por el anejo 17 de la Instrucción EHE-08. Los resultados obtenidos permiten asegurar las características de hormigón autocompactable para el hormigón estudiado. En la Figura 1 se muestra un detalle de la torta durante el ensayo de escurrimiento, donde se puede comprobar la ausencia de segregación o exudación en el perímetro de la misma.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos. Se han facilitado los datos correspondientes a la resistencia a compresión en probeta cilíndrica ( $f_{cm,cil}$ ), módulo de elasticidad longitudinal en probeta cilíndrica ( $E_{c,cil}$ ) y resistencia a compresión en probeta cúbica ( $f_{cm,cúb}$ ). Cada uno de los valores de la Tabla se ha obtenido como la media de tres probetas. Todos los resultados se muestran de la forma  $a/b$ , donde  $a$  representa la media y  $b$  la desviación típica.

En las Figuras 2 y 3 se muestra el momento de la rotura de probetas cilíndricas y cúbicas, respectivamente.

### 4. DISCUSIÓN

#### 4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN. EVOLUCIÓN CON EL TIEMPO

La rotura de las probetas se produce de forma gradual, sin estallidos, debido al cosido transversal de las fibras.

Los datos de la Tabla 2 muestran la evolución en el tiempo de la resistencia a compresión para las dos geometrías de probetas ensayadas. En probeta cúbica el crecimiento de la resistencia se produce de forma más gradual que en el caso de pro-

beta cilíndrica, en la cual desde los 7 a los 14 días se produce un fuerte incremento de resistencia que posteriormente se estabiliza en el tiempo. Para ambos tipos de probeta, el paso de 90 a 365 días supone

un incremento notable en la resistencia. El análisis de la varianza de los resultados de la Tabla 2 ofrece los valores  $F=33.20$  y  $F_{cr}=3.24$  por lo que se puede afirmar que no existe diferencia significativa entre las

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Escurrecimiento	$T_{50} = 6.37$ s	$T_{50} \leq 8$ s
	$d_f = 700$ mm	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 850$ mm
Embudo en V	$T_v = 4.56$ s	$4 \text{ s} \leq T_v \leq 20$ s
Caja en L	$C_{bl} = 0.77$	$0.75 \leq C_{bl} \leq 1.00$
Escurrecimiento con anillo J	$d_{jf} = 695$ mm	$\geq d_f - 50$ mm

Tabla 1: Características de autocompactabilidad del hormigón estudiado



Fig. 1: Detalle de la torta durante el ensayo de escurrimiento

EDAD (días)	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$E_{c,cil}$ (MPa)	$f_{cm,cúb}$ (MPa)
7	29.28/2.25	17053/978	42.93/0.31
14	41.28/1.24	27146/1289	47.10/4.16
28	43.56/3.07	33926/1410	53.23/0.13
90	44.57/0.67	35716/1326	56.37/2.89
365	66.31/1.32	52080/1217	70.61/7.76

Tabla 2: Resultados medios y desviación típica obtenidos en los ensayos a compresión



Fig. 2: Rotura de probeta cilíndrica ensayada a compresión



Fig. 3: Rotura de probeta cúbica ensayada a compresión

propiedades evaluadas en el tiempo.

Las normas ofrecen expresiones para predecir la evolución de las propiedades mecánicas con el tiempo. EHE 08 (artículo 31.3) indica la siguiente expresión para obtener a cualquier edad la resistencia media del hormigón a compresión a partir del valor de la resistencia media a compresión a la edad de 28 días:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (1)$$

Donde:

$\beta_{cc}(t)$ : Coeficiente que depende de la edad del hormigón

$$\beta_{cct} = e^{s(1-28/t)} \quad (2)$$

- $f_{cm}$  Resistencia media a compresión obtenida mediante ensayo a los 28 días
- $t$  Edad del hormigón en días
- $s$  Coeficiente que depende de la

velocidad de endurecimiento del cemento, en este caso, cemento rápido,  $s=0.2$

En la Tabla 3 se muestra la evolución en el tiempo (en tanto por 1) de la resistencia media a compresión para probeta cilíndrica, probeta cúbica y el valor estimado por EHE 08 (usando las ecuaciones 1 y 2) tomando como referencia el valor obtenido a 28 días.

El análisis de la Tabla 3 permite comprobar que a 7 días EHE 08 sobreestima la resistencia respecto de los valores experimentales, estando el valor obtenido sobre probeta cilíndrica más alejado que el obtenido sobre probeta cúbica. A los 14 días EHE 08 ofrece un valor intermedio y cercano a los obtenidos experimentalmente en ambos tipos de probeta, sobreestimando el resultado en probeta cúbica e infravalorando el de la cilíndrica. A las edades de 90 días EHE08 ofrece valores más altos

que los experimentales y a la edad de 365 días las resistencias estimadas son muy inferiores a las experimentales.

A las edades de 14 y 90 días, la diferencia entre los valores experimentales y la estimación de EHE08 no difiere en más de un 9%. Sin embargo, a la edad de 7 días las discrepancias son muy superiores, llegando a un máximo de un 22% para las probetas cilíndricas. A la edad de un año y con probetas cilíndricas es donde se producen los mayores desajustes entre los valores estimados por la Instrucción y los valores obtenidos experimentalmente (valores experimentales superiores en un 31% a los estimados analíticamente por medio de la Instrucción).

En la Tabla 4 se ofrecen las ecuaciones de las curvas de las Figuras 7 y 8 junto con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Los símbolos de las ecuaciones de las Tablas tienen los mismos significados que los de las ecuaciones (1) y (2). Las tensiones se miden en MPa y el tiempo en días.

El análisis de la Tabla 4 permite comprobar que las ecuaciones mostradas suponen un buen ajuste con los valores obtenidos experimentalmente. Los coeficientes de determinación son muy altos en ambos casos y permiten el empleo de las ecuaciones de la Tabla 4 para predecir valores de resistencia en el abanico de edad estudiado.

#### 4.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN. COEFICIENTE DE CONVERSIÓN

EHE 08 establece un coeficiente de conversión de 0.90 para estimar la resistencia en probeta cilíndrica de 15cm de diámetro y 30cm de altura cuando se conoce la resistencia en probeta cúbica de 15cm de lado. En la Tabla 5 se muestra para cada edad el coeficiente de paso o de conversión obtenido para las resistencias medias alcanzadas experimentalmente en las probetas ensayadas.

EDAD (Días)	7	14	28	90	365
CILÍNDRICA	0.67	0.95	1.00	1.02	1.52
CÚBICA	0.76	0.88	1.00	1.06	1.33
EHE 08	0.82	0.92	1.00	1.09	1.16

Tabla III: Evolución con el tiempo de la resistencia media a compresión

TIPO DE PROBETA	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	R2
CILÍNDRICA	(3)	0.88
CÚBICA	(4)	0.97

Tabla IV: Ecuaciones de las funciones de regresión

Edad (días)	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$f_{cm,cúb}$ (MPa)	COEFICIENTE DE PASO
7	29.28	42.93	0.68
14	41.28	47.10	0.88
28	43.56	53.23	0.82
90	44.57	56.37	0.79
365	63.31	70.61	0.90

Tabla V: Coeficiente de paso a distintas edades

El análisis de la Tabla 5 permite comprobar que únicamente a la edad de un año se alcanza el valor de 0.90, indicado por EHE08. A la edad de 14 días la diferencia entre los valores experimentales y el valor de la norma es mínimo, mientras que a las edades de 7 y 90 días las diferencias son apreciables (24% y 12%, respectivamente).

El análisis de la varianza de los resultados de la Tabla 5 ofrece los valores  $F=1.40$  y  $F_{cr}=5.32$  por lo que se puede afirmar que existe diferencia significativa entre las propiedades evaluadas en el tiempo.

La función de regresión encontrada entre las resistencias medias obtenidas en probeta cilíndrica y cúbica para las distintas edades analizadas responde a la ecuación (5).

$$f_{cm,cil}=1.11 \cdot f_{cm,cúb}-15.84 \quad (5)$$

Donde  $f_{cm,cil}$  y  $f_{cm,cúb}$  son las resistencias medias (MPa) en probetas cilíndricas y cúbicas, respectivamente. Esta función presenta un coeficiente de determinación muy alto ( $R^2 = 0.94$ ), por lo que puede afirmarse que existe una buena relación entre los valores obtenidos experimentalmente.

### 4.3. EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y DEL COEFICIENTE DE POISSON CON EL TIEMPO

El Eurocódigo 2, EC2 [17], EHE08 y el Código Modelo, CM10 [18] relacionan el valor del módulo de elasticidad longitudinal con el de la resistencia media a compresión. Además, EC2 y EHE08 ofrecen la misma formulación. La norma ACI [19] considera también el valor de la densidad para poder predecir el módulo de elasticidad longitudinal.

En la Tabla 6 se muestran los valores medios experimentales obtenidos para el módulo de elasticidad longitudinal del hormigón a las distintas edades de ensayo junto a los valores estimados por las normas anteriores. También se han incorporado en la Tabla las expresiones propuestas por las normas en las que  $E_c$  es el módulo de elasticidad longitudinal,  $f_{cm}$  es la resistencia media del hormigón a compresión y  $\rho_c$  es la densidad del hormigón.

El análisis de la Tabla 6 permite comprobar que en todos los casos el CM predice valores superiores de módulo de elasticidad que EHE08, EC y ACI. A las edades de 7 y 14 días el valor experimental es inferior al estimado por los documentos analizados. Particularmente, a la edad de 7 días se produce una discrepancia importante entre los valores

Edad (días)	$f_{cm}$ (MPa)	$E_c$ (MPa)			
		Experimental	EHE08/EC2 (2)	CM10 (3)	ACI (4)
7	29.28	17053	26198	30758	25465
14	41.28	27146	29376	34489	30315
28	43.56	33926	29908	35113	31754
90	44.57	35716	30137	35382	31955
365	63.31	52080	33877	39774	37297

Tabla VI: Valores experimentales y estimados para el módulo de elasticidad longitudinal

Edad (días)	Tensión (MPa)					
	5	10	15	20	25	30
7	0.15/0.010	<b>0.15/0.011</b>	0.14/0.012	0.15/0.010	0.15/0.012	0.15/0.012
14	0.19/0.011	0.18/0.010	<b>0.19/0.010</b>	0.18/0.011	0.19/0.012	0.19/0.013
28	0.23/0.010	0.24/0.010	<b>0.24/0.011</b>	0.25/0.009	0.27/0.014	0.27/0.015
90	0.25/0.010	0.27/0.012	<b>0.27/0.012</b>	0.27/0.010	0.28/0.013	0.28/0.014
365	0.28/0.009	0.28/0.011	0.28/0.012	<b>0.29/0.011</b>	0.29/0.014	0.29/0.015

Tabla VII: Evolución en el tiempo del cociente entre la deformación transversal y la deformación longitudinal

estimados y los experimentales, sobreestimando de una forma considerable las normas el valor del módulo de elasticidad. Sin embargo, a la edad de 365 días, todas las normas infravaloran el valor del módulo de elasticidad.

A continuación se indican las ecuaciones de regresión que relacionan el módulo de elasticidad experimental con la edad (6) y con la resistencia media a compresión (7), junto a su coeficiente de determinación.

$$E_c=1038.9f_{cm}-12942 \quad R^2=0.97 \quad (6)$$

$$E_c=7953.2\ln t+4048.7 \quad R^2=0.94 \quad (7)$$

Ambas ecuaciones presentan un coeficiente de determinación muy alto por lo que puede predecirse el módulo de elasticidad longitudinal en función de la edad o cuando se conoce la resistencia media a compresión.

En la Tabla 7 se muestran los valores obtenidos experimentalmente como cociente entre la deformación transversal y longitudinal de cada probeta (coeficiente de Poisson) en función del nivel de tensión aplicado y de la edad de ensayo. Solo tiene sentido hablar de coeficiente de Poisson cuando los materiales trabajan en régimen lineal, aproximadamente hasta el 33% de la tensión de rotura en el caso del hormigón. En este caso se ofrecen valores hasta los 30MPa, más allá del régimen

lineal. Para cada edad se ha marcado en negrita el valor correspondiente al 33% de la tensión de rotura y que debería tomarse como coeficiente de Poisson.

El análisis de la Tabla 7 permite comprobar que la variación del cociente entre la deformación transversal y longitudinal es mínima cuando se incrementa el nivel de tensión y aumenta conforme se incrementa la edad del ensayo (manteniendo constante la tensión). Los valores obtenidos al 33% de la tensión de rotura varían de una forma muy importante con la edad del ensayo, desde 0.15 a 7 días hasta 0.29 a 365 días, prácticamente el doble. Si se compara el valor obtenido a 28 días (0.24) con el indicado por la norma EHE08 (0.20), puede comprobarse que el valor experimental es superior en un 20% al indicado por la norma.

## 5. CONCLUSIONES

Debido a la enorme versatilidad y flexibilidad de los métodos de fabricación actuales, el HACRFA es un material de construcción económico y útil, resultando su uso ventajoso en muchas aplicaciones respecto al hormigón convencional. Por ejemplo, los paneles delgados prefabricados de HACRFA son viables económicamente en USA y Europa. En soleras, minería, túneles y aplicaciones en excavación, se ha utilizado HRFA en lugar de los reforzados con mallas de acero electrosolda-

das. Recientemente también se han empleado con éxito en losas prefabricadas.

En España el mayor campo de aplicación del HRFA corresponde al hormigón proyectado y a los pavimentos. La enorme tenacidad de este tipo de hormigones puede aconsejar su uso en zonas sísmicas o en elementos sometidos a impacto, como en aplicaciones militares. Su extraordinario comportamiento frente a retracción y la mejora que se produce en el comportamiento a flexión lo hacen muy competitivo en grandes soleras o en soleras sometidas a grandes cargas.

El campo de aplicación del HACRFA se encuentra en las mismas aplicaciones del HRFA donde además, debido a las dificultades de hormigonado por la complejidad del elemento o la cuantía de acero, se precisen para el hormigón características de autocompactable.

Lamentablemente no existe una doctrina recogida en las normas acerca del comportamiento a compresión del HACRFA. En este trabajo se ha pretendido aportar información útil al respecto. Con los resultados obtenidos, se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

- En el caso de probetas cúbicas, el crecimiento de la resistencia a compresión del hormigón con el tiempo se produce de forma más gradual que en el caso de probeta cilíndrica.
- La estimación de la resistencia a compresión utilizando la expresión de EHE08 ofrece valores que no difieren en más de un 5% con los reales para edades de 14 y 90 días, en el caso de una edad de 7 días la diferencia obtenida es de un 22% mayor la estimada que la real.
- A ninguna edad del hormigón se alcanza el valor de 0.90 como coeficiente de conversión de las resistencias en probetas cilíndricas y cúbicas indicado por EHE08. A la edad de 14 días la diferencia entre los valores experimentales y el valor de la norma es mínimo, mientras que a las edades de 7 y 90 días las diferencias son apreciables (24% y 12%, respectivamente).
- Se han obtenido ecuaciones de regresión que relacionan la resistencia a compresión y la edad con coeficientes de determinación muy altos.
- Solamente a la edad de un año se ha obtenido un coeficiente de paso de 0.90, para el resto de edades los coeficientes son inferiores.
- Se ha encontrado una buena función de regresión para el coeficiente de paso entre probeta cilíndrica y

cúbica.

- Las estimaciones que realizan las normas estudiadas para evaluar el módulo de elasticidad longitudinal tienen un pésimo ajuste al valor real obtenido a los 7 días, mientras que se aproximan más, aun siendo todos superiores, a los 14 días y ofrecen un buen ajuste a la edad de 28 días, siendo el valor obtenido por el Código Modelo siempre superior al real obtenido.
- Se han obtenido funciones de regresión con coeficientes de determinación muy altos para predecir el valor del módulo de elasticidad longitudinal en función de la edad o de la resistencia a compresión.

### PARA SABER MÁS

[1] Burón M, Fernández J, Garrido I. "Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización". *Hormigón*. 2006. Nº 887. p. 52-64.

[2] ACI Committee 544. *State of the art report on fiber reinforced concrete*. Detroit USA, American Concrete Institute, 1996

[3] Banthia N, Sappakittipakom M. "Toughness enhancement in steel fiber hybridization". *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37. p. 1366-1372.

[4] Wang ZL, Liu YS, Shen RF. "Stress-strain relationship of steel fibre reinforced concrete under dynamic compression". *Constr Build Mater*. 2008. Vol. 22-5. p.811-819.

[5] Altun F, Haktanir TA. "Comparative experimental study of steel fibre-additive reinforced concrete beams". *Mater Construcc*. 2004. Vol 54-276. p. 5-15.

[6] Johnston C D. "Definitions and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete". *ASTM, Cement, Concrete and Aggregates*. 1982. Vol. 4-2. p. 53-60.

[7] Brandshaug T, Ramakrishnan V, Coyle W V, Schrader E K. "A Comparative Evaluation of Concrete Reinforced with Straight Steel Fibers and Collated Fibers with Deformed Ends". Report No. SDSM&T-CBS 7801, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City. May 1978, p. 52.

[8] Johnston, C D. "Steel Fiber Reinforced Pavement Trials". *Concrete International: Design & Construction*, V. 6-12. p. 39-43.

[9] Kaltakci MY, Arslan MH, Yilmaz US. "The effects of steel fibre reinforced concrete on system ductility". *Mater Construcc*. 2007. Vol. 57. p. 71-84.

[10] Yazici S, Inan G, Tabak V. "Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC". *Constr Build Mater*. 2007. Vol. 21-6. p. 1250-1253.

[11] Rizzuti L, Bencardino F. "Effects of fibre volume fraction on the compressive and flexural experimental behavior of SFRC". *Contro Eng Sci* 2014. Vol. 7-8. p. 379-390.

[12] Turmo J, Banthia N, Gettu R, Barragán B. "Study of the shear behaviour of fibre reinforced concrete beams". *Mater Construcc*. 2008. Vol. 58- 292. p. 5-15.

[13] Wang ZL, Shi ZM, Wang JG. "On the strength and toughness properties of SFRC under

static-dynamic compression". *Composites: Part B*. 2011. Vol. 42 p.1285-1290.

[14] Blaszczyński T, Przybylska-Falek M. "Steel fibre reinforced concrete as a structural material". *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 122. p. 282-289.

[15] Barros JAO, Sena Cruz JM. "Fracture energy of steel fibre reinforced concrete". *Journal of Mechanics Composite Materials and Structures*. 2001. Vol 8-1. p. 29-45.

[16] Ministerio de Fomento. *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08*. Madrid, 2008.

[17] CEN. *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization. Brussels, 2010.

[18] FIP. *Fib Model Code for Concrete Structures 2010* Lausanne, Switzerland, 2010.

[19] ACI. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*. American Concrete Institute Farmington Hills, MI 48331, 2008.