

Hormigón autocompactante con fibras para premoldeados

Fibre reinforced self-compacting concrete for precast

Gemma Rodríguez de Sensale^{a,*}, Luis Segura-Castillo^b, Iliana Rodríguez Viacava^c,
Rosana Rolfi Netto^d, Darío Míguez Passada^e y María Esther Fernández Iglesias^f

^a Doctor, Facultad de Arquitectura-Facultad de Ingeniería, Udelar, Uruguay, Profesor Titular, Montevideo, Uruguay

^b Doctor, Facultad de Ingeniería, Udelar, Uruguay, Profesor Adjunto, Montevideo, Uruguay

^c Arquitecto, Facultad de Arquitectura-Facultad de Ingeniería, Udelar, Uruguay, Asistente, Montevideo, Uruguay

^d Arquitecto, Facultad de Ingeniería, Udelar, Uruguay, Asistente, Montevideo, Uruguay

^e Arquitecto, División Hormigón, Cementos Artigas, Uruguay, Director Departamento Técnico, Montevideo, Uruguay

^f Doctor, Facultad de Arquitectura, Udelar, Uruguay, Profesor Agregado, Montevideo, Uruguay

Recibido el 6 de abril de 2017; aceptado el 25 de abril de 2017

Disponible en Internet el 26 de junio de 2017

Resumen

Como referencia se tomó un hormigón autocompactante (HAC) usual en premoldeados. Las variables analizadas fueron el tipo de fibras y su cuantía. Se estudiaron propiedades de los hormigones en estado fresco y endurecido. La incorporación de fibras en estado fresco influye significativamente en la reología; en estado endurecido mejora la resistencia mecánica en relación al HAC sin fibras. En relación a la permeabilidad al aire y la resistencia a penetración de cloruros, los resultados obtenidos no difieren significativamente entre sí.

© 2017 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Hormigón autocompactante; Fibras estructurales

Abstract

A self-compacting concrete (SCC), which is usual in local precast, was used as reference. The variables analysed were the type of fibres and their amount. Properties of concretes in fresh and hardened state were studied. The use of fibres, compared to the SCC without fibres, significantly influences the rheology in the fresh state and improves mechanical resistance in the hardened state. As regards the air permeability and the resistance to chloride penetration, the results obtained do not differ significantly between the two states.

© 2017 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Self-compacting concrete; Structural fibres

1. Introducción

La experiencia internacional en premoldeados ha demostrado las ventajas del empleo de nuevos hormigones en lugar del hormigón convencional [1–6]. En los últimos años, parte de la optimización de la calidad de los premoldeados se ha basado

en el empleo de fibras con los hormigones reforzados con fibras (HRF). En Uruguay, las mayores experiencias en premoldeados datan de la década de 1960, y se basan en sistemas de prefabricación pesada, cuyo desempeño ha sido variable. El material utilizado en todos los casos es el hormigón convencional, que determina características técnicas de los productos finales y condiciona aspectos productivos de fabricación y montaje; por ello se ha empezado a usar hormigón autocompactante (HAC). La versatilidad de las aplicaciones de los hormigones reforzados con fibras [7–12] los convierten en una alternativa de gran

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: gemma@fing.edu.uy (G. Rodríguez de Sensale).

Tabla 1
Propiedades físicas y mecánicas del cemento y la adición empleados

Propiedad	CPN	Adición
Densidad (g/cm ³)	3,07	2,75
Finura Blaine (cm ² /g)	2.490	6.873
Agua para consistencia normal (%)	28,90	
Tiempo de fraguado inicial (min)	245	
Tiempo de fraguado final (min)	325	
Resistencia a compresión (MPa) a 2 días	19,2	
Resistencia a compresión (MPa) a 7 días	32,7	
Resistencia a compresión (MPa) a 28 días	40,8	
Índice de actividad puzolánica	100	56,7

interés para nuestro país. Además, teniendo en cuenta la escala del medio, que el sector de la construcción se encuentra en una etapa de elevada demanda, con escasez de mano de obra calificada, falta de materiales como el hierro y una creciente necesidad por optimizar los tiempos de ejecución, surge la motivación del Proyecto ANII FMV_1_2014_1_104566 «Aplicación de nuevos hormigones para premoldeados». El objetivo del Proyecto es mejorar prestaciones y procesos industriales de elementos premoldeados existentes mediante la aplicación de nuevos hormigones. Para hacer viable dicha aplicación se trata de brindar una respuesta integral a nivel del material en sí y estructural, abarcando aspectos numéricos y experimentales. Con ello se pretende dar un nuevo impulso a la industria de la prefabricación nacional.

En este trabajo se presentan parte de los resultados obtenidos hasta la fecha en el Proyecto; ellos corresponden a parte de la etapa correspondiente al material en sí, siendo estudiados los hormigones autocompactantes con fibras (HACRF). Como referencia se tomó un HAC que está siendo empleado en premoldeados de nuestro país. En el programa experimental las variables analizadas son el tipo de fibras estructurales (dos: metálicas y sintéticas) y su cuantía (dos diferentes para cada tipo de fibra). Se estudian sus propiedades en estado fresco y endurecido (resistencia a compresión, a tracción por flexión,

Tabla 2
Composición química del cemento y la adición empleados

Elemento	CPN		Adición		Unidades
	EDXRF	Análisis tradicional	EDXRF	Análisis tradicional	
SiO ₂	19 ± 2	—	—	11 ± 1	%
Al ₂ O ₃	< 2	—	2,3 ± 0,5	—	%
Fe ₂ O ₃	1,9 ± 0,2	—	1,6 ± 0,1	—	%
MnO	351 ± 35	—	282 ± 20	—	μg/g
MgO	—	3,1 ± 0,9	—	1,9 ± 0,2	%
CaO	55,2 ± 5,0	55,1 ± 2,8	40 ± 4	42 ± 4	%
Na ₂ O	—	0,22 ± 0,05	No det.	—	%
K ₂ O	1,2 ± 0,1	1,24 ± 0,05	< 2	—	%
SO ₃	2,5	—	0,3736(*)	—	%
P ₂ O ₅	< 2	—	< 0,2	—	%
Cl	0,15	—	< 0,2	—	%
Ti	1077 ± 105	—	996 ± 90	—	μg/g
Cu	7,2 ± 0,5	—	20,4 ± 2,0	—	μg/g
Zn	46,5 ± 4,5	—	37,8 ± 3,5	—	μg/g
Pb	17,2 ± 1,5	—	15,3 ± 1,5	—	μg/g
P.P.C.	—	4,6 ± 0,4	—	34 ± 1	%

Tabla 3
Peso específico y absorción de los agregados

Agregado	Peso específico (kg/m ³)	Absorción (%)
Arena fina	2.650	0,5
Arena gruesa	2.650	0,5
Piedra partida	2.590	0,8

tenacidad, módulo de elasticidad, permeabilidad al aire por el método Torrent y resistencia a ion cloruro).

2. Investigación experimental

En esta sección se presentan los materiales, la dosificación de los hormigones con y sin fibras, y los métodos empleados en la investigación experimental.

2.1. Materiales empleados

Los materiales empleados para la realización de los hormigones fueron:

- Cemento Portland: cemento Portland normal (CPN) de fábrica local, cuyas características se presentan en las [tablas 1 y 2](#).
- Adiciones: se empleó polvo de electrofiltro (PEF), de la misma fábrica de cemento, que cumple con las características para filler indicadas en UNE-EN 12620 [13]; sus características se encuentran en las [tablas 1 y 2](#). El tamaño medio de partículas fue determinado a través de difracción de luz láser, equipo Coulter LS 230, y el índice de actividad puzolánica [14], con el cemento empleado. Es de observar que la adición no es puzolánica, siendo empleada para mejorar la reología y la economía del HAC, ya que es un residuo de la industria cementera.
- Agregados: naturales, cuyas características se presentan en la [tabla 3](#). El agregado fino está formado por una arena fina

Tabla 4
Características de las fibras empleadas

Fibras	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	L/d	Resist. tracción (MPa)	Peso específico (kg/m ³)
FM	1	50	50	> 1.100	7,85
FS	1,37	48	35	> 550	0,92

Tabla 5
Resultados obtenidos en estado fresco

	PUV (kg/m ³)	Escurrimiento D (cm)	Embudo VTv (s)	Anillo JDj (cm)	Caja en LH2/H1	Segregación(%)
REF	2.313	66,5	5,59	67,0	0,96	7,71
FS4	2.356	70,0	12,70	66,0	0,14	14,17
FS8	2.369	76,0	—	66,0	Bloqueo	22,50
FM20	2.401	69,0	11,90	66,0	Bloqueo	11,67
FM30	2.410	74,0	10,00	66,5	Bloqueo	15,83

y una gruesa provenientes de río. El agregado grueso es una piedra partida de origen granítico cuyos tamaños están comprendidos entre 5 y 14 mm.

- Agua: proveniente de la red de abastecimiento local.
- Aditivo: superplastificante en base a carboxilatos con un 35% de sólidos, siendo compatible con el cemento y la adición empleada.
- Fibras: metálicas y sintéticas, siendo las dos únicas fibras estructurales que se comercializan en el país. Las fibras metálicas (FM) son de acero de bajo contenido de carbono, trefilado a frío, con ganchos (Wirand FF1); las fibras sintéticas (FS) son macrofibras de poliolefina, corrugadas (FiberForce PP-48). Las características de las mismas se presentan en la [tabla 4](#).

Los datos fueron suministrados por los fabricantes, conociéndose de las fibras metálicas además la deformación en ruptura, que es menor al 4%, y el módulo elástico, que es de 210 GPa, mientras que del módulo elástico de las sintéticas se sabe solo que es mayor de 9 GPa [\[15\]](#).

2.2. Dosificación de los hormigones

Como referencia se tomó un HAC de uso en nuestro medio para premoldeados, con 390 kg/m³ de CPN, 175 kg/m³ de adición, 375 kg/m³ de arena, 765 kg/m³ de agregado grueso, 175 kg/m³ de agua y 6,7 kg/m³ de aditivo. Se elaboraron en total cinco tipos de hormigones: el HAC de referencia sin fibras, dos reforzados con fibras sintéticas con cuantías de 4 y 8 kg de fibras por metro cúbico de hormigón (mínima y máxima recomendada por el fabricante) y dos HAC reforzados con fibras metálicas con cuantías de 20 y 30 kg/m³ de hormigón, siendo dosificaciones habituales para aplicaciones de responsabilidad estructural baja, como pavimentos o premoldeados de mediano y bajo porte.

2.3. Metodología

Los hormigones fueron realizados en hormigonera de eje inclinado. En estado fresco se estudió la fluidez mediante ensayos de escurrimiento [\[16\]](#) y embudo V [\[17\]](#), la resistencia al

Tabla 6
Cumplimiento de requisitos para HAC

	REF	FS4	FS8	FM20	FM30
Escurrimiento	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Embudo V	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Anillo J	Cumple	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple
Caja en L	Cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple
Segregación	SR1-SR2	SR1-SR2	>20%	SR1-SR2	SR1

bloqueo mediante ensayos de escurrimiento con anillo J [\[18\]](#) y caja en L [\[19\]](#), y la resistencia a la segregación (estabilidad) con ensayo de tamiz GTM [\[20\]](#), peso por unidad de volumen (PUV); también se determinaron propiedades reológicas empleando un reómetro rotacional de paletas ICAR [\[21\]](#).

Se hicieron tres probetas de cada tipo de hormigón para estudiar cada propiedad en estado endurecido, excepto para evaluar la resistencia a compresión, donde fueron cinco las probetas realizadas. Todas las probetas fueron curadas en cámara húmeda hasta la edad de ensayo (28 días), excepto las sometidas a ensayo de permeabilidad al aire, que fueron retiradas 7 días antes de la cámara húmeda y dejadas en ambiente de laboratorio hasta la edad de ensayo por así requerirlo el procedimiento de ensayo.

En estado endurecido se estudió a los 28 días de edad la resistencia a compresión [\[22\]](#); la resistencia a flexión por tracción [\[23\]](#), con cargas a un tercio de la luz entre ejes de apoyos, determinándose la tenacidad y el índice de tenacidad, mediante el análisis de la curva carga-flecha obtenida en el ensayo de los hormigones reforzados con fibras; y el módulo de elasticidad [\[24\]](#).

También se estudiaron dos parámetros vinculados a la durabilidad: permeabilidad al aire [\[25\]](#) y resistencia a la penetración de cloruros [\[26\]](#). La permeabilidad al aire por el método Torrent se basa en la medición de la permeabilidad al aire del hormigón de recubrimiento (kT) y la conductividad eléctrica del hormigón (ρ), que es afectada por la humedad de la probeta; con ello se establece una valoración de la calidad del recubrimiento en categorías (muy mala, mala, normal, buena, muy buena). Para la evaluación de la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros se mide la corriente eléctrica en culombios, que pasa a través de la probeta por un período de 6 h sometida a un voltaje estándar

Tabla 7
Resultados obtenidos con reómetro rotacional de paletas

	Parámetros relativos				Parámetros Bingham	
	Esf. fluencia estático(Pa)	Fluencia(Nm)	Viscosidad(Nm.s)	R ²	Esf. fluencia dinámico τ_0 (Pa)	Viscosidad plástica μ (Pa.s)
REF	91,4	0,21	1,42	0,97	33,4	27,9
FS4	93,0	−0,51	3,32	0,99	0,1	44,1
FS8	126,6	0,04	2,35	0,98	4,7	47,7
FM20	229,0	0,35	2,62	0,99	53,6	52,4
FM30	387,9	0,61	2,85	1,00	107,2	52,7

Tabla 8
Resistencia a compresión y módulo elástico de los hormigones

	Fc (MPa)	σ (MPa)	CV (%)	Ec (GPa)	σ (GPa)	CV (%)	ΔFc (%)	ΔEc (%)
REF	48,13	0,54	1,13	33,27	0,17	0,01		
FS4	52,60	1,37	2,61	35,02	0,44	0,01	+9	+5
FS8	54,63	1,74	3,18	36,54	1,53	4,19	+14	+10
FM20	54,69	1,81	3,30	35,61	1,54	4,31	+14	+7
FM30	55,45	1,09	1,97	36,83	0,21	0,57	+15	+10

de 60 VDC. El valor obtenido como resultado es indicador de la resistencia a la penetración de iones cloruros del hormigón. La norma establece categorías relativas a la permeabilidad frente a ion cloruro: alta (mayor a 4.000 culombios), moderada (4.000-2.000 culombios), baja (2.000-1.000 culombios), muy baja (1.000-100 culombios) y despreciable (menor a 100 culombios).

3. Resultados obtenidos y discusión

3.1. Resultados en estado fresco

En la [tabla 5](#) se presentan resultados obtenidos en estado fresco del HAC sin fibras, tomado como referencia (REF) los HAC con fibras sintéticas (siendo denominados FS4 y FS8 los que contienen 4 y 8 kg/m³, respectivamente), y los HAC con fibras metálicas (denominados FM20 y FM30, pues sus contenidos de fibras son de 20 y 30 kg/m³, respectivamente).

La incorporación de fibras no influye significativamente en el peso unitario volumétrico (PUV).

En relación a los resultados de los ensayos *ad hoc* para HAC que figuran en la [tabla 5](#), el cumplimiento de requisitos para la autocompactabilidad [27] en los ensayos para evaluar la fluidez y la resistencia al bloqueo se presenta en la [tabla 6](#), mientras que para la resistencia a la segregación allí se menciona la categoría en que se clasifican los resultados [28].

En relación a la fluidez, todos los HAC estudiados, sin y con fibras, cumplen con los requisitos necesarios para la autocompactabilidad. La resistencia al bloqueo mediante el ensayo de la caja en L no se cumple en los hormigones que contienen fibras, mientras que empleando el anillo J solo los HAC con menor contenido de fibras cumplen requisitos para HAC.

En relación a la resistencia a la segregación, si bien todas las mezclas están en la categoría SR1 —excepto el hormigón FS8, que presenta un porcentaje mayor que el adecuado para HAC [29]—, se observan diferentes grados de segregación en

los HAC con fibras; los hormigones con mayores cantidades de fibras presentan los mayores porcentajes de segregación.

Resultados obtenidos con reómetro ICAR se presentan en la [tabla 7](#) y en la [figura 1](#). El esfuerzo de fluencia estático es el esfuerzo de corte requerido para iniciar el flujo cuando el hormigón se encuentra en estado de reposo. Se observa claramente que la incorporación de fibras aumenta dichos valores, siendo dependiente de la cantidad (aumenta con el contenido de fibras incorporadas) y del tipo de fibras (es mayor con fibras metálicas que con sintéticas).

Desde el punto de vista reológico se observan diferencias de comportamiento con la incorporación de fibras en el HAC. El empleo de fibras sintéticas ocasiona menores esfuerzos de fluencia dinámicos y mayor viscosidad plástica que en el HAC sin fibras, por lo que con estas fibras los hormigones resultan ser más fluidos y presentar mayor tendencia a la segregación; ello se corrobora con los resultados obtenidos en los ensayos *ad hoc*. El empleo de fibras metálicas produce mayores esfuerzos de fluencia dinámicos, requiriendo mayor esfuerzo de corte para mantener el flujo, y también más alta viscosidad plástica que el resto de los hormigones estudiados brindando un comportamiento reológico muy diferente a ellos. Cuanto mayor es el contenido de fibras metálicas más se aleja su comportamiento del HAC sin fibras (REF), por lo que se debe tener cuidado, ya que puede llegar a requerirse energía adicional para que el hormigón se consolide al ir aumentando la torsión mecánica [29].

3.2. Resultados en estado endurecido

En la [tabla 8](#) se presentan los parámetros estadísticos básicos de los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y módulo de elasticidad, siendo Fc y Ec los valores medios respectivos, σ la desviación estándar y CV el coeficiente de variación. ΔFc y ΔEc son los aumentos de los valores de Fc y Ec en relación a la referencia

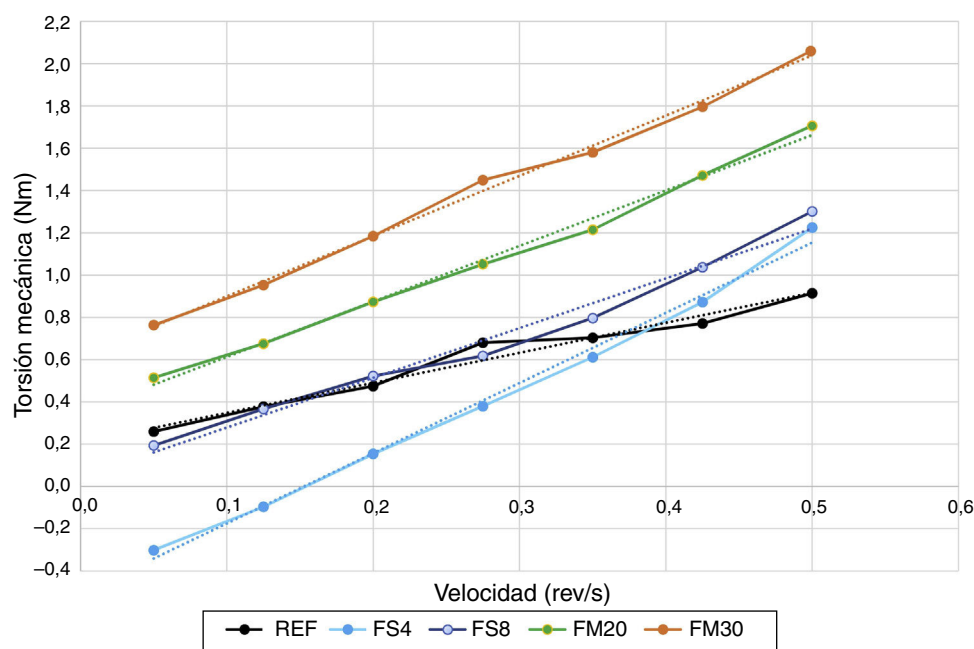


Figura 1. Resultados obtenidos con réómetro rotacional de paletas.

Tabla 9
Resultados de ensayos de vigas

	R (MPa)	ΔR (%)	T (KN/mm)	ΔR_{HRF} (%)	T_{HRF} (KN/mm)
REF	4,70				
FS4	5,94	+26,38	26,05	+1,24	10,88
FS8	5,42	+15,32	74,53	+6,64	38,51
FM20	5,77	+22,77	62,82	+16,60	20,88
FM30	4,90	+4,25	67,04	+15,56	57,99

Tabla 10
Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad al aire Torrent

	Kt (10^{-16} m^2)	ρ (k Ω cm)	Calidad
REF	0,022	8,9	Buena
FS4	0,015	9,6	Buena
FS8	0,015	14,0	Buena
FM20	0,014	13,8	Buena
FM30	0,021	14,0	Buena

Se observa un moderado aumento de la resistencia a compresión, entre el 9 y el 15%, y del módulo de elasticidad, entre el 5 y el 10%, en las mezclas con fibras en relación a la referencia. Si bien varios autores registran ligeros aumentos en la resistencia a compresión [12,30], estos normalmente se producen con cuantía de fibras mayor al 1% en volumen, ya que para cuantías bajas el comportamiento está dominado por la matriz. En este trabajo, el incremento se puede justificar debido a la mayor compacidad obtenida con el empleo fibras, como se ve en la [tabla 5](#).

Los resultados obtenidos en ensayos de vigas [23] se presentan en la [figura 2](#) y en la [tabla 9](#), siendo R el módulo de rotura, T la tenacidad total a 3 mm y ΔR el incremento de R en relación al HAC de referencia.

Se muestra claramente que la incorporación de fibras mejora los resultados obtenidos de resistencia a flexión en relación al HAC sin fibras (REF).

Si bien con bajos contenidos de fibras el módulo de rotura tiene un incremento en relación a la referencia cercano al 20%, al aumentar el contenido de fibras se reduce posiblemente por la tendencia a disminuir la aleatoriedad en la orientación de las fibras en los HACRF [30].

La tenacidad alcanzada en cada una de las muestras reforzadas con fibras reafirma que con el aumento del dosaje se obtiene un hormigón más tenaz.

A los efectos de valorar la introducción de las fibras en el comportamiento mecánico del HAC en la [tabla 9](#) se presentan ΔR_{HRF} y T_{HRF} , siendo los incrementos de resistencia a flexión y la tenacidad de hormigones convencionales con iguales materiales y porcentajes de fibras que los de este trabajo, los cuales fueron obtenidos en la primera parte del Proyecto [31]. Hay un comportamiento diferenciado entre fibras sintéticas y metálicas. La introducción de fibras sintéticas en el HAC brinda una mejora adicional desde el punto de vista mecánico en relación al HRF, obteniéndose incrementos mayores de resistencia a flexión y tenacidad, ya que $\Delta R > \Delta R_{HRF}$ y $T > T_{HRF}$. En el HAC el empleo de fibras metálicas brinda una mejora adicional de la tenacidad en relación al HRF, siendo $T > T_{HRF}$, mientras que en relación al incremento de resistencia a flexión, si bien con más bajos contenido de fibras $\Delta R > \Delta R_{HRF}$ a medida que aumenta dicho contenido se revierte la situación, llegando a ser $\Delta R < \Delta R_{HRF}$.

Los resultados de los dos aspectos de durabilidad estudiados se presentan en la [tabla 10](#) y en la [figura 3](#), siendo Kt la permeabilidad al aire del hormigón de recubrimiento y ρ la resistividad eléctrica. Para ambos aspectos los resultados fueron similares, perteneciendo a la misma categoría (baja permeabilidad) todos los hormigones estudiados.

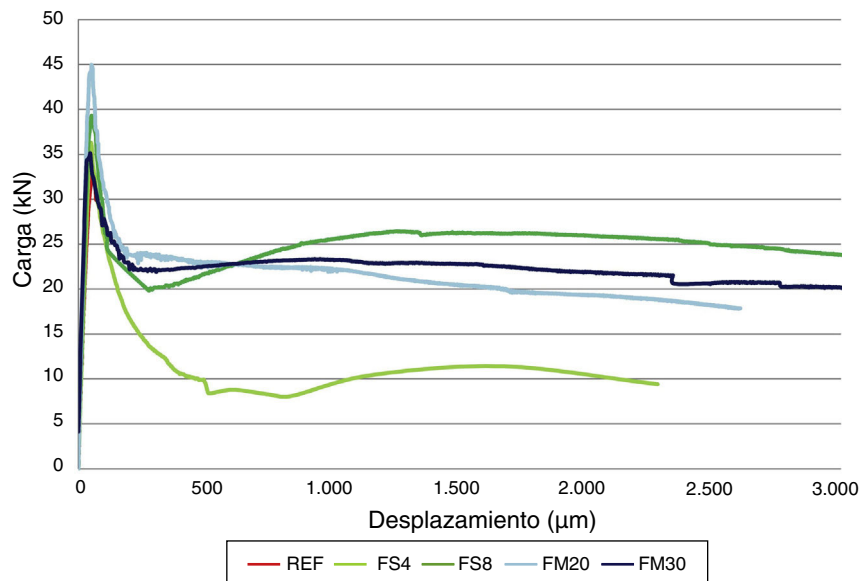


Figura 2. Diagrama carga-desplazamiento en ensayos de vigas.

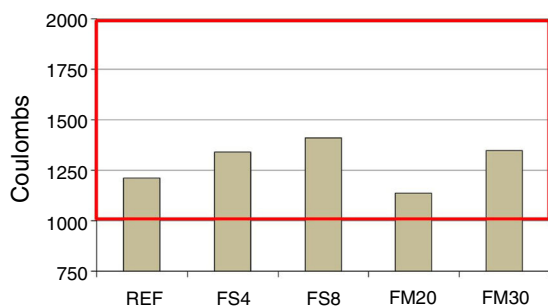


Figura 3. Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad al ion cloruro.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en los hormigones estudiados permiten concluir que:

- En estado fresco hay diferencias significativas cuando se le incorpora fibras al HAC, dependiendo el comportamiento del contenido y del tipo de fibras.
- La incorporación de fibras en el HAC aumenta el esfuerzo de fluencia estático y la viscosidad plástica, siendo los valores proporcionales al contenido de fibras, y mayores con fibras metálicas que con sintéticas.
- La incorporación de fibras sintéticas disminuye los esfuerzos de fluencia dinámicos en relación al HAC, mientras que el empleo de fibras metálicas los aumenta.
- En estado endurecido el empleo de fibras influye en las propiedades relacionadas con la resistencia mecánica; incrementa muy modestamente la resistencia a compresión y mejora los resultados de resistencia a flexión en relación al hormigón de referencia sin fibras (HAC).
- El empleo de fibras no influye en las propiedades de durabilidad estudiadas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se puede afirmar que el estudio de la aplicación de nuevos hormigones para premoldeados, como puede ser el HAC con fibras (HACRF), ha demostrado tener características diferenciadas del HAC sin fibras, convirtiéndolos en una alternativa de gran interés. Por ello la importancia del estudio de estos HACRF para elementos premoldeados en el Proyecto ANII FMV «Aplicación de nuevos hormigones para premoldeados».

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) el apoyo financiero para la realización del Proyecto, a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) por posibilitar la presentación del trabajo en este Congreso, y a Hormigones Artigas por la realización de los hormigones.

Bibliografía

- [1] A. De la Fuente, A. Domingues de Figueiredo, A. Aguado, C. Molins, P.J. Chama Neto, Experimentación y simulación numérica de tubos de hormigón con fibra, *Materiales de Construcción*. 61 (302) (2011) 275–288.
- [2] A. De la Fuente, A. Aguado, C. Molins, J. Armengou, Innovations on components and testing of precast panels of retained earth retaining walls, *Construction and Buildings Materials*. 25 (5) (2011) 2198–2205.
- [3] A. de la Fuente, S.H.P. Cavalaro, L. Liao, A. Aguado, Steel fibre reinforced concrete precast segments for vertical shafts, 7th International Conference Fibre Concrete 2013, Technology, Design, Application. Page (2013), CD-Rom, 10 pp.
- [4] A. De la Fuente, A. Blanco, A. Pujadas, A. Aguado, Advances on the use of fibres in precast concrete segmental linings, *Fib Symposium: Engineering a Concrete Future: Technology, Modeling & Construction*. (2013) 691–694.
- [5] A. De la Fuente, A. Blanco, A. Pujadas, A. Aguado, Dovelas de hormigón reforzado con fibras para el soporte de túneles y pozos verticales, VI Congreso ACHE (2014) 233–240.
- [6] L.D. Rojas, Estudio de viabilidad de utilización de fibras de acero para hormigones convencionales y autocompactantes [tesis de Máster en Ingeniería

- Estructural y de la Construcción], Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2014.
- [7] American Concrete Institute, Fiber-reinforced concret, Report 544.1 R, MCP-5, ACI Committee 544. Nueva York, 1996.
- [8] American Concrete Institute, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.1R-96, ACI Committee 544. Nueva York, 2002.
- [9] R. Zerbino, *Hormigón reforzado con fibras: Propiedades y aplicaciones estructurales*, en: E.F. Irassar (Ed.), *Hormigones Especiales, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH)*, Argentina, 2004.
- [10] M. Di Prisco, G. Plizzari, L. Vandewalle, *Fibre reinforced concrete: New design perspective*, *Materials & Structures*. 42 (4) (2009) 1261–1281.
- [11] P. Serna, S. Arango, T. Ribeiro, A.M. Nunez, E. Garcia-Taengua, *Structural cast-inplace SFRC: Technology, control criteria and recent applications in Spain*, *Materials & Structures* 42 (9) (2009) 1233–1246.
- [12] C.C. Johnston, *Fiber-Reinforced Cements and Concretes*, Taylor & Francis, 2010, pp. 248.
- [13] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Áridos para hormigón*, UNE-EN 12620. Madrid, España, 2003.
- [14] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, *Materiales puzolánicos. Determinación de actividad puzolánica con cemento*, UNIT 1035, 1.ª edición, Montevideo, 1998.
- [15] W.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Galvez, *Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete*, *Construction and Building Materials*. 85 (2015) 182–194.
- [16] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento*, UNE-EN 12350-8, Madrid, 2011.
- [17] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Ensayos de hormigón fresco - Parte 10: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo V*, UNE-EN 12350-10, Madrid, 2011.
- [18] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Ensayos de hormigón fresco - Parte 12: Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés*, UNE-EN 12350-12, Madrid, 2011.
- [19] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Ensayos de hormigón fresco - Parte 9: Hormigón autocompactante. Método de la caja en L*, UNE-EN 12350-10, Madrid, 2011.
- [20] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 11: Hormigón autocompactante. Ensayo de segregación por tamiz*, UNE-EN 12350-11, Madrid, 2010.
- [21] American Society of the International Association for Testing and Materials Standard, *Standard Guide for Measurement of the Rheological Properties of Hydraulic Cementious Paste Using a Rotational Rheometer*, ASTM C1749-12, Pennsylvania, 2012.
- [22] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Hormigones con fibras. Rotura por compresión*, UNE 83507, Madrid, 2004.
- [23] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura*, UNE 83510, Madrid, 2004.
- [24] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, *Hormigón, Determinación del módulo estático de elasticidad y de deformación y de la curva tensión - Deformación*, UNIT 1088, Montevideo, 2004.
- [25] Swiss Standard, *Construction en béton – Spécifications complémentaires, Annexe E: On Site Air Permeability, according to the Torrent method*, SIA 262/1, Zurich, 2003.
- [26] American Society of the International Association for Testing and Materials Standard, *Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, ASTM C1202, Pennsylvania, 2012.
- [27] Asociación Española de Normalización y Certificación, *Anexo 17: Recomendaciones para la utilización de hormigón autocompactante*, Instrucción Española de Hormigón Estructural. EHE-2008, Madrid, 2008, 555-568.
- [28] SCC European Project Group, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, production and use*. BIBCM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO (2005) [consultado 22 Mar 2017]. Disponible en: www.efnarc.org/pdf/SCC_guidelinesMay2005.pdf.
- [29] E.P. Koelher, D.W. Fowler, *Development on a portable rheometer for fresh Portland cement concrete*, en: *Research Report ICAR-1'5-35, International Center for Aggregates Research*, 2004, pp. 321.
- [30] A. Bentur, S. Mindess, *Fiber Reinforced Cementitious Composites*, 2 nd edition, Taylor & Francis, 2007, pp. 601.
- [31] G. Rodríguez, M.E. Fernández, I. Rodríguez, R. Rolfi, D. Míguez, L. Segura, *Efectos del empleo de fibras en hormigones*, en: *XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, ASAAE*, 2016, pp. 13.