

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Nuevos hormigones para premoldeados en Uruguay

G. Rodríguez de Sensale⁽¹⁾⁽²⁾, I. Rodríguez Viacava⁽²⁾, R. Rolff⁽²⁾,
L. Segura-Castillo⁽³⁾ y M. E. Fernández⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de la Construcción, Fac. de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República, Uruguay.

⁽²⁾ Instituto de Ensayo de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

⁽³⁾ Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5257>

RESUMEN

La versatilidad de las aplicaciones de los hormigones reforzados con fibras (HRF) y los autocompactantes (HAC) en lugar del convencional los convierten en una alternativa de máximo interés para mejorar prestaciones y procesos industriales de elementos premoldeados existentes, mediante la aplicación de nuevos hormigones. Por ello se estudian ellos y la combinación de ambos (hormigón autocompactante con fibras, HACRF). Como referencia se tomó un H, usual en premoldeados locales, y en base a él se diseñó un HAC. Las variables analizadas fueron el tipo de fibras estructurales y su cuantía. Se estudiaron propiedades de los hormigones en estado fresco y endurecido. Los resultados obtenidos muestran claramente las diferencias de comportamiento en estado fresco y endurecido entre los hormigones estudiados. El empleo de HAC y la incorporación de fibras influyen significativamente en la reología, mejorando en estado endurecido la resistencia mecánica en relación al hormigón convencional. En relación a la permeabilidad al aire y la resistencia a penetración de cloruros, los resultados obtenidos en todas las mezclas fueron similares.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reforzado con fibras; Hormigón autocompactante; Fibras estructurales; Hormigones especiales.

1.- INTRODUCCIÓN

Las ventajas del empleo de nuevos hormigones en lugar de hormigón convencional ha sido demostrada a nivel internacional [1-4]. En los últimos años, la optimización de la calidad de los premoldeados se ha basado principalmente en el empleo de 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 (HC), que determina características técnicas de los productos finales y condiciona aspectos productivos de fabricación y montaje. La versatilidad de las aplicaciones de los HRF [5-10] los convierten en una alternativa de máximo 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 de las empresas constructoras por optimizar los tiempos de ejecución, hacen que este tipo de tecnología sea necesario desarrollarlo y utilizarlo, por lo que surge el objetivo del Proyecto ANII FMV_1_2014_1_104566 “Aplicación de nuevos hormigones para premoldeados” que consiste en mejorar prestaciones y procesos industriales de elementos premoldeados existentes, mediante la aplicación de nuevos hormigones.

Para hacer viable dicha aplicación, se tratará de brindar con este proyecto una respuesta integral a nivel del material y estructural, abarcando aspectos numéricos y experimentales. Con ello se dará un nuevo impulso a la industria de la prefabricación nacional, garantizando una producción de mayor calidad técnica, basada en mejoras en cuanto a durabilidad, rapidez de elaboración de elementos, costos y sostenibilidad.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos hasta la fecha en el Proyecto; ellos corresponden a parte de la etapa correspondiente al material en sí. Como referencia se tomó un hormigón convencional (HC) en premoldeados de nuestro país, de resistencia a compresión a los 28 días de edad de 35 MPa y también un autocompactante (HAC) usado en obras de nuestro medio. En el programa experimental las variables analizadas fueron el tipo de fibras estructurales (dos; metálicas y sintéticas) y su cuantía (se emplearon dos cuantías diferentes para cada tipo de fibra), por lo que se estudiaron además hormigones reforzados con fibras (HRF) y autocompactantes reforzados con fibras (HACF). En ellos se estudió propiedades en estado fresco y endurecido (resistencia a compresión, a tracción por flexión, tenacidad, módulo de elasticidad), y aspectos de durabilidad relativos a permeabilidad al aire por el método Torrent y resistencia a ión cloruro.

2.- INVESTIGACION EXPERIMENTAL

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

2.1.- Materiales

Para la realización de los hormigones se emplearon los siguientes materiales:

- Cemento Portland: Cemento Portland Normal (CPN) de fábrica local, cuyas características se presentan en la Tabla 1.
- Adiciones: a los efectos de mejorar la reología y economía de los hormigones se empleó polvo de electrofiltro (PEF), residuo de la misma fábrica que el cemento, cuyas características se encuentran en la Tabla 1, el Índice de Actividad Puzolónica (IAP) fue determinado con el cemento empleado [11] observándose que la adición no es puzolánica.
- Agua: proveniente de la red de abastecimiento local
- Aditivo: superplastificante en base a carboxilatos con un 35% de sólidos, compatible con el aditivo y la adición empleada.
- Agregados: naturales, estando el agregado fino formado por una arena fina y una gruesa provenientes de río, mientras que el agregado grueso es una piedra partida de origen grani-

Tabla 1. Características del cemento y la adición empleados

	CPN	PEF
<u>Propiedades físicas</u>		
Masa espec. absoluta, kg/m ³	3070	2750
Superficie específica, Blaine, m ² /kg	249	687
<u>Análisis químico, %</u>		
Óxidos de sílice (SiO ₂)	20	12
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	< 2	2,8
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	2,1	1,7
Óxido de calcio Total (CaO)	57	46
Óxido de magnesio (MgO)	3,6	1,9
Óxido de manganeso (MnO)	0,35	0,28
Óxido de sodio (Na ₂ O)	0,27	-
Óxido de potasio (K ₂ O)	1,24	<2
Óxido de azufre (SO ₃)	2,5	0,37
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	-	-
Óxido de cal libre (CaO)	1,10*	-
Pérdida al fuego	4,6	33
Índice de Actividad Puzolánica (IAP), %	100	57

tico cuyos tamaños están comprendidos entre 5 y 14 mm; sus características se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Peso específico y absorción de los agregados

Agregado	Peso Específico (kg/m ³)	Absorción (%)
Arena Fina	2650	0,5
Arena Gruesa	2650	0,5
Piedra Partida	2590	0,8

- Fibras: metálicas y sintéticas, siendo las dos únicas fibras estructurales que se comercializan en el país. Las fibras metálicas (M) son de acero de bajo contenido de carbono, trefilado a frío, con ganchos; las fibras sintéticas (S) son macrofibras de poliolefina, corrugadas; sus características se presentan en la Tabla 3, los datos fueron suministrados por los fabricantes de las fibras, 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 sólo que es mayor a 9 GPa [12].

Tabla 3. Características de las fibras empleadas

Fibras	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	L/d	Resistencia a tracción (MPa)	Peso Específico (kg/m ³)
Metálicas	1	50	50	> 1100	7,85
Sintéticas	1,37	48	35	> 550	0,92

2.2.- Dosificación de los hormigones

Como referencia se tomó un hormigón convencional (HC) de resistencia a compresión a los 28 días de edad de 35 MPa, empleada en Uruguay normalmente para premoldeados, y un autocompactante (HAC) de uso en nuestro medio, a los que se le incorporaron fibras estructurales sintéticas y metálicas. Se elaboraron en total diez tipos de hormigones: el HC referencia sin fibras (HC 35) y el HAC, dos HC y dos HAC reforzados con fibras sintéticas (HRFS y HACFS, respectivamente) con cuantías de 4kg y 8 kg de fibras por metro cúbico de hormigón (mínima y máxima recomendada por el fabricante), dos HC y dos HAC reforzados con fibras metálicas (HRFM y HACFM, respectivamente) con cuantías de 20kg y 30 kg por metro cúbico de hormigón, siendo las recomendadas por el fabricante para premoldeados en general de baja responsabilidad estructural. En la Tabla 4 se presentan las dosificaciones empleadas.

Tabla 4. Dosificación de los hormigones (kg/m³)

Hormigón	Fibras	CPN	Adición	Arena Fina	Arena Gruesa	Agregado Grueso	Agua	Aditivo
HC 35	0							2,8
HRFS	4							3,24
	8	350	40	240	580	960	160	3,35
HRFM	20							3,35
	30							3,35
HAC sin/con fibras		390	175	395	375	765	175	6,7

2.3.- Metodología

Los hormigones fueron realizados en hormigonera de eje inclinado. En estado fresco se estudió: asentamiento con cono de Abrams [13] en los HC sin y con fibras mientras que en los HAC cono de flujo [14], anillo J [15] y resistencia a la segregación con ensayo de tamiz [16], en todos los hormigones peso por unidad de volumen. Se hicieron tres probetas de cada tipo de hormigón para estudiar cada propiedad, excepto para evaluar la resistencia a compresión donde se realizaron cinco probetas. 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 la resistencia a compresión [17, 18]; la resistencia a flexión por tracción [19], 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 [20]. También se estudiaron parámetros vinculados a la durabilidad: permeabilidad al aire [21] y resistencia a la penetración de cloruros [22]

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 baja, baja, moderada, alta, muy alta). En la evaluación de la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros se mide la corriente eléctrica en Coulombs que pasa a través de la probeta por un período de 6 horas sometida a un voltaje estándar 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 4000 Coulombs), moderada (4000-2000 Coulombs), baja (2000-1000 Coulombs), muy baja (1000-100 Coulombs), y despreciable (menor a 100 Coulombs).

3.- RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en estado fresco. Si bien no existe diferencia significativa en el Peso Unitario Volumétrico (PUV) de los hormigones estudiados, se observa diferencias significativas con la incorporación de fibras y el HAC sin y con fibras en relación al HC 35.

Tabla 5. Resultados obtenidos en estado fresco

	Asentamiento (cm)	PUV (kg/m ³)	Cono de flujo D(cm)	Anillo J Dj (cm)	Segregación GTM (%)
HC 35	11	2390	-	-	-
HRFS 4	14	2384	-	-	-
HRFS 8	14	2384	-	-	-
HRFM 20	20	2386	-	-	-
HRFM 30	20,5	2394	-	-	-
HAC	-	2313	66,5	67	7,71
HAC FS4	-	2356	69,0	66	14,17
HAC FS8	-	2369	76,0	60	22,50
HAC FM20	-	2401	70,0	66	11,67
HAC FM30	-	2410	74,0	66,5	15,83

En relación a los resultados de los ensayos “ad hoc” para HAC, el cumplimiento de requisitos para la autocompactabilidad [23] 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 [24]. En relación a la fluidez todos los HAC cumplen con el requisito necesarios para la autocompactabilidad, la resistencia al bloqueo empleando el anillo J sólo la cumplen 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 HAC FS8 que presenta un porcentaje mayor que el adecuado para HAC [24], se observan diferentes grados de segregación en los HAC con fibras presentando mayores porcentajes de segregación los hormigones con mayores cantidades de fibras.

Tabla 6. Cumplimiento de requisitos para HAC

	HAC	HAC FS4	HAC FS8	HAC FM20	HAC FM30
Escurrimiento	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Anillo J	Cumple	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple
Segregación	SR1-SR2	SR1-SR2	>20%	SR1-SR2	SR1

En la Tabla 7 se presentan los parámetros estadísticos básicos de los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y módulo de elasticidad, siendo F_c y E_c los valores medios respectivos, σ la desviación estándar y CV el coeficiente de variación. Los coeficientes de variación obtenidos son bajos, validando los resultados obtenidos. Se observa que el HAC y la incorporación de fibras mejora la resistencia a compresión en relación al HC35, brindando mayores beneficios cuanto mayor es la cantidad de fibras. En relación a los tipos de fibras empleadas se puede ver claramente en los HRF las metálicas brindan mejores resultados y más homogéneos que las sintéticas, mientras que en los HAC el tipo de fibras empleadas no brinda diferencias significativas en cuanto a los resistencia a compresión. En relación al módulo de elasticidad si bien se observa que la incorporación de fibras aumenta el valor en el HC y el HAC, los resultados obtenidos no difieren significativamente entre sí.

Tabla 7. Resistencia a compresión y módulo elástico de los hormigones

	F_c (MPa)	σ (MPa)	CV (%)	E_c (MPa)	σ (MPa)	CV (%)
HC 35	36,86	0,93	2,53	33,00	0,22	0,01
HRFS 4	40,89	0,91	2,24	32,77	0,25	0,01
HRFS 8	44,39	0,75	1,71	34,50	0,79	0,02
HRFM 20	46,11	0,22	0,49	35,60	0,17	0,00
HRFM 30	43,57	0,49	1,12	36,53	0,92	0,03
HAC	48,13	0,54	1,13	33,27	0,17	0,01
HAC FS4	52,60	1,37	2,61	35,02	0,44	0,01
HAC FS8	54,63	1,74	3,18	36,54	1,53	4,19
HAC FM20	55,45	1,09	1,97	35,61	1,54	4,31
HAC FM30	54,69	1,81	3,30	36,83	0,21	0,57

Los resultados obtenidos en ensayos de vigas [23] se presentan en la Tabla 8, donde $F_{m\acute{a}x}$ es la carga máxima alcanzada en el ensayo y R es el módulo de rotura. Se observa claramente que la incorporación de fibras mejora los resultados obtenidos de resistencia a flexión en relación al HC sin fibras. 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.

En relación a los resultados de permeabilidad al aire por el método Torrent y resistencia a la penetración de cloruros, todas las probetas dieron resultados similares perteneciendo a la misma categoría para el ensayo respectivo (Figuras 1 y 2, respectivamente).

Tabla 8. Resultados de ensayos de vigas [23]

	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	R (MPa)	Tenacidad _{total} . (kN/mm)
HC 35	35,06	4,82	
HRFS 4	36,38	4,88	26053
HRFS 8	39,21	5,14	38507
HRFM 20	41,49	5,57	20882
HRFM 30	39,43	5,62	57993
HAC	34,54	4,40	
HAC FS 4	42,36	6,00	10888
HAC FS 8	39,84	5,42	33959
HAC FM 20	44,95	6,02	55985
HAC FM 30	35,51	4,90	66970

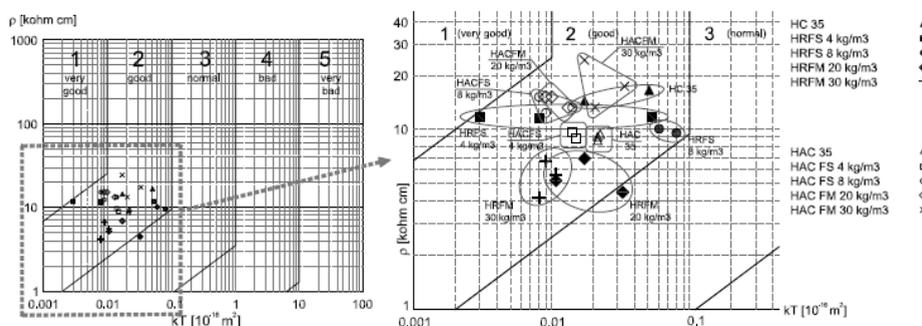


Figura 1. Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad al aire Torrent.

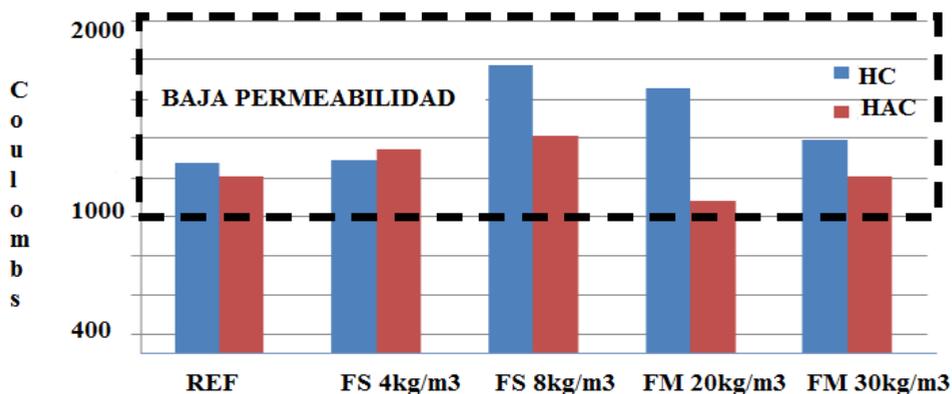


Figura 2. Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad al ión cloruro

4.- CONCLUSIONES

Los resultados presentados permiten extraer las siguientes conclusiones:

- En estado fresco hay diferencia significativa con el empleo de fibras y de HAC, en relación al hormigón convencional (HC 35), dependiendo el comportamiento del contenido y tipo de fibras.
- En estado endurecido el empleo de fibras y de HAC influye en las propiedades relacionadas con la resistencia mecánica, brindando mayores beneficios cuanto mayor es la cantidad de fibras empleada.
- Los módulos de elasticidad de todos los hormigones estudiados no difirieron significativamente entre sí.
- El empleo de nuevos hormigones (HRF, HAC y HAC con fibras) no influyó en las propiedades de durabilidad estudiadas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se puede afirmar que la aplicación de nuevos hormigones para premoldeados en Uruguay, como es el caso de los HAC, los HRF, y sus combinaciones, ha demostrado ventajas en relación al convencional sin fibras, convirtiéndolos en una alternativa de máximo interés. Por ello el estudio de la aplicación de HRF en elementos premoldeados, es de gran importancia y se trabajará con dos niveles (el material en sí y prototipos) 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.

REFERENCIAS

- [1] De la Fuente A, Domingues de Figueiredo A, Aguado A, Molins C, Chama Neto, P.J., 'Experimentación y simulación numérica de tubos de hormigón con fibra', *Materiales de Construcción* 61(302) (2011) 275-288.
- [2] De la Fuente A, Aguado A, Molins C, Armengou J., 'Innovations on components and testing of precast panels of retained earth retaining walls', *Construction and Buildings Materials* 25(5) (2011) 2198-2205.
- [3] De la Fuente A, Blanco A, Pujadas A, Aguado A., 'Dovelas de hormigón reforzado con fibras para el soporte de túneles y pozos verticales', VI Congreso ACHE, Madrid, Junio, 2014, (Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Madrid, 2014) 233- 240

- [4] Rojas LD., '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).
- [5] American Concrete Institute, 'Fiber-reinforced concret', Report 544.1R, MCP-5, ACI Committee 544.Nueva York, Estados Unido (1996).
- [6] American Concrete Institute, 'State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete.ACI 544.1R-96', ACI Committee 544.Nueva York, Estados Unidos, (2002).
- [7] Zerbino R., 'Hormigón reforzado con fibras: Propiedades y aplicaciones estructurales', En: Hormigones Especiales, Ed. Edgardo F. Irassar, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH), Argentina, (2004)
- [8] Di Prisco M, Plizzari G, Vandewalle L., 'Fibre reinforced concrete: new design perspectives', *Mater Struct*, 42(4) (2009)1261–1281.
- [9] Serna P, Arango S, Ribeiro T, Nunez AM, Garcia-Taengua E., 'Structural cast-inplace SFRC: technology, control criteria and recent applications in Spain', *Mater.Struct.* 42(9) (2009)1233–1246.
- [10] Johnston, C.D., 'Fiber-reinforced cements and concretes', Taylor & Francis, (2010).
- [11] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 'Materiales puzolánicos. Determinación de actividad puzolánica con cemento', UNIT 1035, 1ª. Edición, Montevideo, (1998).
- [12] Alberti, W.G., Enfedaque, A., Galvez, J.C., 'Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete', *Construction and Building Materials* 85 (2015) 182-194.
- [13] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 'Hormigón. Determinación de la consistencia mediante el asentamiento del tronco de cono', UNIT-NM 67, Montevideo, Uruguay (1998).
- [14] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 'Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento', UNE-EN 12350-8, Madrid, España (2011).
- [15] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 'Ensayos de hormigón fresco - Parte 12: Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés', UNE-EN 12350-12, Madrid, España (2011).

Nuevos hormigones para premoldeados en Uruguay

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [16] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 'Ensayos de hormigón fresco. Parte 11: Hormigón autocompactante. Ensayo de segregación por tamiz', UNE-EN 12350-11, Madrid, España (2010).
- [17] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 'Hormigón: Ensayo de compresión de probetas cilíndricas', UNIT NM 101, Montevideo, Uruguay (1998).
- [18] Asociación Española de Normalización y Certificación, 'Hormigones con fibras. Rotura por compresión', UNE 83507, Madrid, España (2004).
- [19] Asociación Española de Normalización y Certificación, 'Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura', UNE 83510, Madrid, España (2004).
- [20] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 'Hormigón. Determinación del módulo estático de elasticidad y de deformación y de la curva tensión – Deformación', UNIT 1088, Montevideo, Uruguay (2004).
- [21] Swiss Standard, 'Construction en béton – Spécifications complémentaires, Annexe E: On Site Air Permeability, according to the Torrent method', SIA 262/1, Zurich, Swiss (2003).
- [22] 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, West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos (2012).
- [23] Asociación española de normalización y certificación, 'Anejo 17: Recomendaciones para la utilización de hormigón autocompactante', Instrucción Española de Hormigón Estructural. EHE-2008, Madrid, (2008)555 – 568.
- [24] SCC European Project Group, 'The european guidelines for self-compacting concrete. Especification, production and use', BIBCM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO, (2005) en www.efnarc.org/pdf/SCC_guidelinesMay2005.pdf.