

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Valorización de residuos sintéticos post-consumo para fibro-refuerzo de hormigón

M. Esther Fernández Iglesias⁽¹⁾, Gemma Rodríguez de Sensale⁽¹⁾,
Iracema Dávila Álvarez⁽¹⁾, Victoria Saravia Sosa⁽¹⁾
y Fernando Petrone Núñez⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de la Construcción, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Udelar, Uruguay.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5189>

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de la evaluación del desempeño de un hormigón C25 reforzado con diferentes macro-fibras sintéticas en relación al hormigón de referencia (HREF) sin fibras. Se estudiaron cuatro tipos de fibra; tres obtenidas mediante corte de residuos plásticos post-consumo (Tereftalato de Polietileno, Fibra Óptica y Policloruro de Vinilo) y una comercial de polipropileno. Para el fibro-refuerzo se adoptó la dosificación media dentro del rango establecido para fibras comerciales, determinándose la masa requerida para las fibras obtenidas de residuos de modo de no superar el volumen de fibra comercial adicionado. Se analizaron los valores obtenidos de resistencia compresión, resistencia a tracción por compresión diametral, resistencia a tracción por flexión, índice de tenacidad y resistencia a primera fisura. De los resultados obtenidos se concluye que los hormigones reforzados con fibras obtenidas de residuos de PET (HPET) presentan mayor resistencia a compresión y a tracción diametral que el hormigón utilizado como referencia (sin fibras) y que el hormigón reforzado con fibras comerciales. Sin embargo respecto al desempeño a flexión, los HPET presentan un 5,6 % menos de resistencia a flexo-tracción y cerca de 30% menos de Índice 30, respecto al hormigón reforzado con fibras comerciales.

PALABRAS CLAVE: hormigón fibro-reforzado, fibras sintéticas, residuos plásticos.

1.- INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería civil se continúa investigando sobre las posibilidades de mejorar el desempeño de las matrices cementicias fibro-reforzadas, particularmente en el diseño y producción de nuevas fibras, evaluando su desempeño.

A igual que en otros países, en Uruguay el volumen de plástico residual es importante, el uso de envases descartables sigue aumentando y, si bien existen polos de reciclaje, su destino final continúa siendo el vertedero o incluso queda librado a su suerte, terminando

por su baja densidad en cursos de agua e incluso en el mar. Según datos proporcionados por la Dirección Nacional de Medio Ambiente, DINAMA, la cantidad de envases plásticos (PP, PEAD, PEBD, PVC Y PET) supera a los envases de cartón/cartulina/papel en peso como en unidades por año. Por otra parte, el avance tecnológico en las comunicaciones, mediante cableado de fibra óptica, hace que en relativamente poco tiempo se requiera de tendidos más eficaces, a pesar de que el cableado existente no haya finalizado su vida útil. Por lo que, en base a los antecedentes de este tipo de comunicación, puede preverse que dentro de pocos años al residuo proveniente de las instalaciones, se le sumarán aquellos correspondientes al re-tendido.

Correspondiendo con estos factores, desde finales del siglo XX, existen investigaciones sobre formas para dar destino a los residuos sintéticos valorizándolos como refuerzo de micro-hormigones y hormigones de matriz cementicia. Particularmente la búsqueda continúa en cuanto a la obtención de fibras de materiales residuales de difícil gestión, tanto industrial como doméstico [1,2] entre los cuales se encuentran de autoría propia [3–5].

En este trabajo, que se enmarca en la línea de investigación comenzada en 2010 [6], se incursiona en el uso de fibras obtenidas de residuos post-consumo del cableado de telecomunicaciones (fibra óptica y su recubrimiento exterior, realizado en policloruro de vinilo, PVC) y de envases no retornables de agua mineral (Tereftalato de Polietileno) en el formato de macro- fibras para reforzar hormigón analizando su desempeño con hormigones realizados con la misma matriz sin reforzar y con hormigones reforzados con fibras comerciales de polipropileno comercializadas en el país.

2.- INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

En esta sección se presentan los materiales y procedimientos utilizados en la investigación experimental.

2.1.- Materiales

Los materiales empleados se pueden subdividir según su función dentro del material compuesto. Los empleados en la dosificación del hormigón correspondiente a la fase matriz, y el utilizado para las fibras en las distintas fases dispersas.

2.1.1.- Matriz

Para la matriz del *composite* se utilizó un hormigón C25 elaborado con los siguientes materiales:

- Cemento Pórtland Normal (CPN) - de procedencia local, cuyas propiedades físico-mecánicas y caracterización química se presentan en las Tablas 1 y 2, respectivamente.
- Agua - procedente de la red local de abastecimiento.
- Agregados - naturales. El árido fino constituido está por arena terciada proveniente de río, cuya granulometría se muestra en la Figura 1, quedando comprendida dentro de la clase 2

indicada en la norma UNIT 82-51[7], mientras que el árido grueso procede de roca granítica partida con tamaños de partícula comprendidos entre 5 y 15 mm.

Tabla 1 - Propiedades físicas y mecánicas del cemento Pórtland Normal

<i>Propiedad</i>	<i>CPN</i>
Finura Blaine, (cm ² /g)	3580
Inicio Fraguado (h,m)	3:15
Fin Fraguado (h,m)	5:25
Expansión (%)	0,05
F _c 28 días (MPa)	52,3

Tabla 2 - Composición Química del Cemento Pórtland Normal empleado

	%
CaO	63,89
Fe ₂ O ₃	3,30
SiO ₂	22,19
Al ₂ O ₃ (%)	3,83
MgO (%)	2,97
SO ₃ (%)	1,86
K ₂ O(%)	0,22
Na ₂ O(%)	0,05
Na ₂ O _{eq}	0,19
Residuo Insoluble	0,64
P.P.C.(%)	1,44
Compuestos (%)	
C ₃ S	55,70
C ₂ S	21,60
C ₃ A	4,56
C ₄ AF	10,04

Valorización de residuos sintéticos post-consumo para fibro-refuerzo de hormigón

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

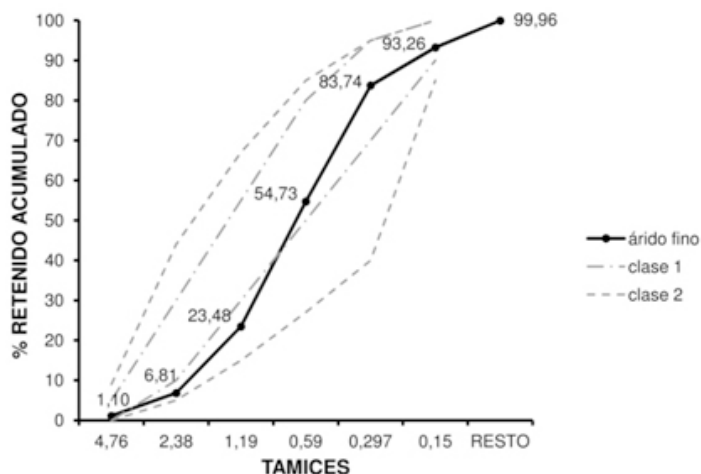


Figura 1 - Granulometría del árido fino utilizado.

2.1.2.- Fibras

Las mismas están conformadas por cuatro materiales sintéticos, siendo tres de ellos provenientes de residuos post-consumo.

Dentro de los residuos post-consumo de telecomunicaciones basados en el cableado de fibra óptica, se utilizó la fibra óptica en sí misma (FO), Figura 2a, de sección cilíndrica, compuesta de un núcleo silíceo y una capa exterior mezcla para lograr un bajo índice de refracción atenuando la pérdida en la transmisión; y la cubierta del cableado, funda exterior de protección secundaria (FP) realizada en material termoestable de alto módulo de Young, compuesto de policloruro de vinilo (PVC), Figura 2b. Dado que esta cubierta presenta forma de cilindro hueco, o tubo, para su utilización como fibra se seccionaron longitudinalmente en cuatro.

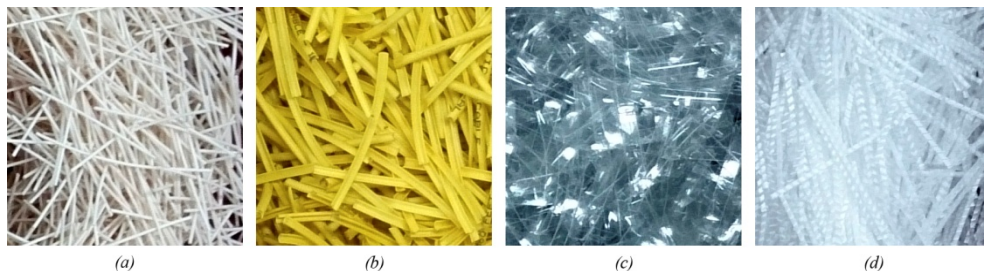


Figura 2 - Fibras sintéticas utilizadas: (a) fibra óptica, (b) policloruro de vinilo (c) tereftalato de polietileno, (d) polipropileno

Las fibras de Tereftalato de Polietileno (PET), Figura 2c, se obtuvieron de residuos post-consumo de envases de agua mineral. Las fibras comerciales utilizadas para hacer la muestra patrón fibro-reforzada, correspondían a polipropileno (PP), Figura 2d. En la Tabla 3 se pueden observar las características físicas y mecánicas de las cuatro fibras empleadas.

Tabla 3 - Características físicas y mecánicas de las fibras utilizadas.

<i>fibra</i>	<i>FO</i>	<i>FP</i>	<i>PET</i>	<i>PP</i>
<i>Diámetro equivalente (mm)</i>	0,92	0,77	0,62	1,03
<i>Longitud (mm)</i>	46,8	46,9	46,5	47,8
<i>Esbeltez</i>	50,9	60,9	75,0	46,4
<i>Densidad (g/cm³)</i>	0,99	1,42	1,36	0,92
<i>σ_T (MPa)</i>	24,5	8,2	118,4	> 550

Las fibras obtenidas de residuos post-consumo de cableado de telecomunicaciones (FO y FP), se obtuvieron mediante procedimiento de corte mecánico manual, seleccionando una longitud similar a la de las fibras comerciales empleadas. Asimismo, para las fibras de la funda de protección, FP, se les realizó un segundo corte longitudinal a los efectos de obtener cuatro tramos de mayor esbeltez y evitar la cavidad hueca que originalmente tenía con su forma tubular. En las fibras procedentes de residuos post-consumo de envases de agua gasificada, PET, el corte se realizó mediante una destructora de documentos que produce partículas de 4 mm por 50 mm, aproximadamente.

2.2.- Dosificación de hormigones

Como referencia se utilizó un hormigón utilizado tradicionalmente en Uruguay para obras con equipamiento básico (hormigonera eléctrica a pie de obra), con una dosificación de 350 kg/m³ de CPN, 1100 k/m³ de árido grueso, 770 k/m³ de árido fino y una relación agua/cemento de 0,50. Para la cuantía de fibras, se partió de la dosificación media establecida por el fabricante de las fibras comerciales, 5 kg/m³; se calculó la cantidad de fibras obtenidas de residuos necesaria para mantener el volumen de fibra en todas las dosificaciones, según la relación de densidad, correspondiendo a 6 kg/m³, 7,6 kg/m³ y 7,4 kg/m³ para FO, FP y PET respectivamente. En la búsqueda de evitar el uso de aditivos fluidificantes, de forma de que la producción del hormigón sea fácilmente apropiable, en los hormigones fibro-reforzados se optó por quitar el volumen de arena correspondiente al volumen de fibra incorporado. En peso esto consistió en colocar 8,7 kg menos de arena por cada metro cúbico de hormigón a elaborar.

3.- METODOLOGIA

Los hormigones fueron realizados en hormigonera eléctrica de eje inclinado. Todas las fibras se añadieron a la mezcla una vez homogeneizados los áridos con el cemento Pórtland y antes de adicionarle el agua.

Se realizaron 5 tipos de hormigón: hormigón patrón sin fibras (HREF), hormigón fibro-reforzado con Fibra Óptica (HFO), hormigón fibro-reforzado con Funda de Protección de Fibra Óptica (HFP), hormigón fibro-reforzado con Tereftalato de Polietileno (HPET) y hormigón fibro-reforzado con fibras comerciales (HPP). Con cada uno se elaboraron 3 probetas prismáticas de 10 cm x 10 cm x 40 cm y 6 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Todas las probetas fueron curadas durante 28 días en un ambiente con temperatura controlada, fijada en (20 ± 1) °C, y para impedir la pérdida de humedad se cubrieron todas las caras de las probetas con film de Policloruro de Vinilo (PVC).

En estado endurecido se determinó la resistencia a compresión [8], resistencia a la tracción simple por compresión diametral [9], resistencia a tracción por flexión a primera fisura, resistencia a tracción por flexión máxima [10], para las cinco dosificaciones, y tenacidad e índice 30 [10] para los hormigones fibro-reforzados.

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.- Resistencia a compresión.

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos a compresión, tomándose como referencia al hormigón sin fibro-reforzar (HREF).

Tabla 4 - Resistencia a compresión (σ_c) de los hormigones.

	σ_c (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coficiente de Variación (%)
HREF	26,3	1,4	5,2%
HFO	28,5	1,7	5,9%
HFP	25,4	0,3	1,0%
HPET	27,9	2,5	8,9%
HPP	24,8	1,9	7,8%

Se observa que los hormigones fibro-reforzados con Fibra Óptica (HFO) y Tereftalato de polietileno (HPET), presentan valores superiores al hormigón de referencia (HREF), en un 8,4 % y 6,0 %, respectivamente. Por otra parte, el hormigón reforzado con fibras comerciales (HPP) es quien presenta menor resistencia a compresión de todas las dosificaciones analizadas.

Asimismo, el hormigón reforzado con fibras de PET es quien presenta mayor dispersión de resultados, con un coeficiente de variación del 8,9 % seguido del hormigón reforzado con fibras comerciales de PP, con un coeficiente de variación del 7,8 %; mientras que el hormigón fibro-reforzado con Funda de Protección de Fibra Óptica (HFP) es el que presenta menor dispersión de resultados pero también menor resistencia a compresión.

4.2.- Resistencia a la tracción simple por compresión diametral.

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo a resistencia a tracción simple por compresión diametral de todos los hormigones estudiados, y la variación de resistencia ($\Delta\sigma_{Ti}$) en relación al hormigón sin reforzar (HREF). Se observa que los hormigones reforzados con fibras de envases post-consumo (HPET) y con fibras comerciales (HPP), presentan mayor resistencia que el hormigón de referencia (HREF), el hormigón reforzado con las fibras obtenidas de la protección de fibra óptica (HFP) menor mientras que el reforzado con fibra óptica (HFO) presenta igual resistencia que resistencia que el HREF.

Tabla 5 - Resistencia a tracción por compresión diametral (σ_{Ti}) de los hormigones

	σ_{Ti} (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coficiente de Variación (%)	$\Delta\sigma_{Ti}$ (%)
HREF	2,9	0,25	8,6	-
HFO	2,9	0,16	5,3	0,00
HFP	2,8	0,23	8,0	-3,45
HPET	3,3	0,30	9,5	+13,80
HPP	3,1	0,21	6,7	+6,90

4.3.- Resistencia a la tracción por flexión.

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos de la resistencia a tracción por flexión, tanto a primera fisura como su valor máximo, tomándose nuevamente como referencia el hormigón sin refuerzo (HREF).

Tabla 6 - Resistencia a tracción por flexión: a primera fisura (σ_{F1}) y máxima (σ_F)

	σ_{F1} (MPa)	δ (MPa)	C.V. (%)	σ_F (MPa)	δ (MPa)	C.V. (%)
HREF	3,00	0,15	5,0%	3,60	0,18	5,1%
HFO	2,96	0,10	3,3%	3,37	0,10	3,1%
HFP	2,86	0,27	9,3%	3,22	0,32	10,1%
HPET	3,07	0,23	7,5%	3,38	0,37	11,0%
HPP	3,07	0,22	7,3%	3,60	0,32	9,0%

Se puede observar que el hormigón reforzado con PET y con PP, presentan apenas un 2,3% más de resistencia a primera fisura que el hormigón de referencia, mientras que los hormigones reforzados con las fibras obtenidas de residuos de telecomunicaciones tienen una resistencia a primera fisura menor que dicha referencia. Los hormigones fibro-

reforzados, excepto el realizado con fibra óptica, muestran mayor dispersión de resultados que el hormigón de referencia. En cuanto a la resistencia máxima alcanzada, se observa que, excepto el hormigón reforzado con fibras comerciales (HPP), los otros hormigones fibro-reforzados, HFO, HFP y HPET, presentaron resistencias menores a las obtenidas por el hormigón de referencia, en porcentajes del 6,4 %, 6,1 % y 10,6 % respectivamente. En cuanto a la dispersión de resultados, los hormigones reforzados con fibras provenientes de la funda de protección de la fibra óptica (HFP) y de envases (HPET), son los más dispersos, presentando valores del coeficiente de variación superior al 10 %.

4.4.- Tenacidad.

En base a las curvas carga/deformación que se muestran en la Figura 3, para los hormigones fibro-reforzados se han determinado los valores de Tenacidad e Índice 30, siguiendo el procedimiento establecido en la norma UNE-83510:2004 [10]. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.

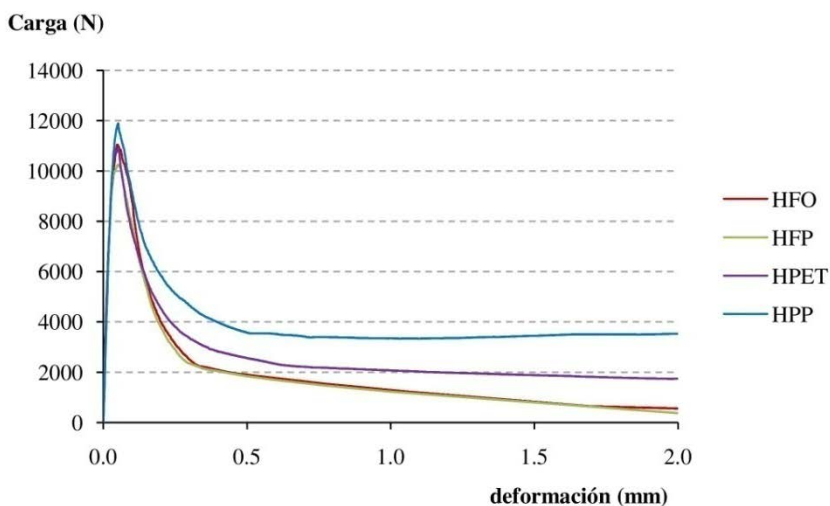


Figura 3 - Gráfica carga/deformación a flexión de los hormigones utilizados

En las curvas carga/deformación presentadas, se observa que los hormigones reforzados con fibras obtenidas de residuos de telecomunicaciones, HFO y HFP, presentan un desarrollo similar en cuanto a su comportamiento. De los resultados obtenidos se puede concluir que los hormigones reforzados con los residuos de telecomunicaciones, HFO y HFP, son quienes presentan menor tenacidad, correspondiendo al 49,9 % y 47,1 % del valor obtenido para la tenacidad del hormigón con fibras comerciales (HPP) mientras que el hormigón reforzado con fibras de PET (HPET), presenta el 69,4 % de la tenacidad obtenida por HPP. Asimismo, cabe destacar que el hormigón con fibras comerciales es quien presenta la mayor variación de resultados, con un 19,5 % de coeficiente de variación, seguido por el HPET.

Tabla 7 - Tenacidad e Índice 30 de los hormigones fibro-reforzados utilizados.

	<i>Tenacidad (Nm)</i>	δ (Nm)	<i>CV (%)</i>	I_{30}	δ	<i>CV (%)</i>
HFO	3,85	0,33	8,6%	10,63	0,32	3,0%
HFP	3,63	0,02	0,6%	12,25	2,45	20,0%
HPET	5,37	0,60	11,2%	12,88	1,26	9,8%
HPP	7,71	1,50	19,5%	17,89	3,88	21,7%

En cuanto al índice I_{30} , los hormigones reforzados con fibras obtenidas a partir del corte de los residuos estudiados, presentan índices menores que el hormigón con fibras comerciales; siendo el HFO, HFP y HPET menores en un 40,6 %, 31,5 % y 28,0 %, respectivamente, que el hormigón con fibras comerciales.

5.- CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de los hormigones estudiados permiten extraer las siguientes conclusiones:

- A pesar de que los hormigones fibro-reforzados cuentan con menor cantidad de árido fino que el hormigón de referencia sin fibras, la resistencia a compresión de todos los hormigones estudiados no varía significativamente.
- En cuanto al aporte de las fibras obtenidas mediante corte de residuos plásticos para resistir tracciones producidas por compresión diametral, se concluye que las fibras obtenidas de residuos de PET, presentan mejores prestaciones que las fibras comerciales de polipropileno, no siendo así con las obtenidas de residuos de telecomunicaciones.
- Frente a las solicitaciones de flexión, dentro de los hormigones reforzados con fibras obtenidas de residuos plásticos, el que presenta mejores prestaciones es el realizado con fibras de PET, fundamentalmente en lo que refiere a resistencia a tracción a primera fisura.
- En relación a la capacidad de absorber energía representada por el valor de Tenacidad, el hormigón reforzado con fibras de PET también es el que presenta mejores prestaciones dentro de los hormigones elaborados con fibras obtenidas de residuos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se puede concluir que de las fibras obtenidas de residuos post-consumo utilizadas en este trabajo, las procedentes de envases de PET producen un refuerzo que las posiciona como una alternativa viable a las fibras comerciales desde el punto de vista mecánico.

En cuanto a las fibras obtenidas de residuos de telecomunicaciones, si bien presentan algún aporte, se debe seguir investigando sobre las posibilidades de mejorar su desempeño, tanto sea por modificaciones en su superficie que mejoren la adherencia fibra-matriz, o por la determinación de una longitud de anclaje mayor que les permita trabajar en mejores condiciones sin ser un impedimento desde el punto de vista de elaboración del material.

REFERENCIAS

- [1] Orasutthikul, S., Unno, D. and Yokota, H., 'Effectiveness of recycled nylon fiber from waste fishing net with respect to fiber reinforced mortar', *Construction and Building Materials* **146** (2017) 594–602.
- [2] Fantilli, A.P., Sicardi, S. and Dotti, F., 'The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar', *Construction and Building Materials* **139** (2017) 562–569.
- [3] Fernández, M., Payá, J., Borrachero, M., Monzó, J. and Soriano, L. 'Valorización de residuos plásticos en matrices cementicias: influencia del tamaño de probeta y la forma de producción de la fibra en los resultados mecánicos del material compuesto', XIII Congr. Nac. Propiedades Mecánicas Sólidos. PMS2012. (2012).
- [4] FERNÁNDEZ IGLESIAS, M.E., 'Refuerzo de Matrices Cementicias mediante la Valorización de Fibras Sintéticas provenientes de Residuos Post-Consumo', Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, (2013).
- [5] Fernández, M.E., Payá, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Mellado, A. and Monzó, J. 'Degradation Process of Postconsumer Waste Bottle Fibers Used in Portland Cement-Based Composites', *Journal of Materials and Civil Engineering*, **29** (10) (2017).
- [6] Fernández, M. E., Payá, J., Borrachero, M. V. and Monzó, J., 'Valorización de Residuos Plásticos en Matrices Cementicias: Estudios Preliminares', II Simp. Aprovechamiento Residuos Agro-Industriales Como Fuente Sostenible de Materiales de Construcción, Valencia, España, (2010) 477–485.
- [7] Instituto Uruguayo de Normas Tecnicas. Granulometría de agregados finos para hormigones, UNIT 82, Montevideo (1951).
- [8] Asociación Española de Normalización y Certificación, Hormigones con fibras. Rotura por compresión. UNE 83507, Madrid, (2004).
- [9] Instituto Uruguayo de Normas Tecnicas, Hormigón. Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral. UNIT-NM 8, Montevideo (1998)
- [10] Asociación Española de Normalización y Certificación, Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura. UNE 83510, Madrid, (2004).