

## **CONTROL DE LAS FISURAS PRODUCIDAS POR LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS EN HORMIGONES FIBRADOS**

Lilia Señas<sup>1</sup>, Néstor Ortega<sup>1</sup>, Carla Priano<sup>2</sup>, Juan F. Valea<sup>1</sup>  
Universidad Nacional del Sur – Av. Alem 1253 – Bahía Blanca, Argentina.  
(0291) 4595100, interno 3225- e-mail: [lseñas@uns.edu.ar](mailto:lseñas@uns.edu.ar)

**Palabras claves:** Fisuras, Hormigón, Fibras, Corrosión

### RESUMEN

La durabilidad de una estructura es sinónimo de cumplir en forma óptima con la vida útil para la cual fue diseñada. En el caso de las de hormigón es vital el conocimiento de las distintas afecciones que las debilitan, siendo la corrosión de sus armaduras una de las más importantes.

Como es sabido, el hormigón del recubrimiento es el encargado de proteger a las armaduras de la acción de los agentes externos. La calidad de este recubrimiento tiene una directa relación con su desempeño, como una posibilidad de mejorarlo se consideró la incorporación de fibras de polipropileno de alto módulo.

Con el fin de establecer su comportamiento, se realizaron ensayos con hormigones que poseen distintas relaciones agua / cemento, usándose diferentes contenidos de fibras. Para acelerar la corrosión de las armaduras se utilizó un galvanostato, aplicando una corriente constante a través de ellas, usándolas como ánodo. Se determinaron los cuadros de fisuración en los distintos tipos de hormigón, en vigas atacadas por corrosión, analizando el efecto de costura que las fibras producen.

Considerando los resultados obtenidos se puede concluir que, en elementos estructurales realizados con hormigones de baja resistencia no es necesario emplear contenidos elevados de fibras; mientras que en los hormigones de mejor calidad, para obtener diferencias en el cuadro de fisuración resultante, son necesarios mayores porcentajes de fibras.

1- Profesor, Departamento Ingeniería, Universidad Nacional del Sur.

2- Asistente de docencia, Departamento Ingeniería, Universidad Nacional del Sur.

## 1. INTRODUCCIÓN

La vida en servicio de las estructuras de hormigón, tanto en ambiente urbano como en ambiente marino, se ve disminuida por diversas causas. Las reparaciones de las obras afectadas provocan pérdidas económicas y a su vez se transforman en un problema ambiental debido a la mayor utilización de recursos naturales y combustibles. Es por ello que se ha generado la necesidad de exigirle a este material no solo requisitos de resistencia, sino que además debe ser durable en el tiempo. Para prolongar la vida útil de las estructuras de hormigón es vital el conocimiento de las distintas afecciones que lo debilitan, siendo la corrosión de sus armaduras una de las más importantes.

Los agentes agresivos procedentes del medio ambiente, donde se ubica el elemento estructural, se introducen en el hormigón utilizando su red porosa, ya sea por difusión, absorción y/o permeabilidad. Cuando toman contacto con las armaduras se inicia el proceso de corrosión de las mismas, generándose productos expansivos. Estos producen tensiones internas que llevan a la fisuración del recubrimiento de hormigón, y posteriormente, pueden ocasionar el desprendimiento del mismo, facilitando así el ingreso de sustancias agresivas desde el exterior, que aceleran el proceso degradatorio de la estructura de hormigón.

Para disminuir esta fisuración y evitar el posible desprendimiento del recubrimiento, se estudió la influencia que tiene, en el proceso de fisuración del hormigón, la incorporación de fibras de polipropileno de alto módulo, con el fin de coser las fisuras, que le permite tener una mayor integridad a la pieza de hormigón afectada. Este tema resulta de interés, debido a que no se han encontrado referencias de otros autores que acrediten la realización de estudios de este tipo, en hormigones con fibras.

## 2. TRABAJO EXPERIMENTAL

Se fabricaron vigas de hormigón armado, en la cuales se variaron algunos parámetros para estudiar el grado de influencia que éstos tienen en el inicio del proceso de corrosión de las barras y durante todo su desarrollo. En particular, resulta de interés analizar la influencia de la calidad del hormigón del recubrimiento. Por este motivo se proyectaron

hormigones con diferentes relaciones a/c (0,41; 0,51 y 0,60) a los que se les incorporaron distintas cantidades (400 g , 750 g y 1000 g por m<sup>3</sup> de hormigón) de fibras de polipropileno.

Se moldearon grupos de probetas cilíndricas con el objeto de caracterizar el comportamiento mecánico del hormigón frente a sollicitaciones de compresión y tracción. Con el mismo tipo de muestra se hicieron ensayos para obtener valores de permeabilidad y capilaridad, ya que se consideró que estas características podrían afectar directamente al proceso de corrosión y en consecuencia, a la vida útil de la estructura en estudio.

### 2.1 Hormigón

*Clase:* Se elaboraron tres tipos de hormigón manteniendo constante, en todas las mezclas, el tipo de cemento, la calidad del agua de curado y de mezclado, la clase de arena y agregado grueso. Sólo se varió la relación a/c, y en los que contenían fibras la cantidad de éstas. Se elaboraron en total doce clases de hormigón, tres sin fibras (patrones) y nueve fibrados, cuyas características se detallan en la tabla I. Cabe acotar que en la realización de los pastones se observó que las fibras no modificaban apreciablemente la trabajabilidad del material fresco.

En las dosificaciones se utilizaron materiales con las siguientes características:

Cemento: Portland Normal (IRAM 50000) [1].

Agua: potable tomada de la red de abastecimiento a la ciudad (IRAM 1601) [2].

Arena: arena natural silíceas que responde a una curva granulométrica continua comprendida entre los límites A y B de la norma IRAM 1627 [3] y con módulo de finura de 2,33.

Agregado Grueso: piedra partida granítica [4] que cumple con los límites granulométricos indicados en la norma IRAM 1627 [3], y con tamaño máximo de 12,5 mm.

Fibras de polipropileno: haces fibrilados de alto módulo de elasticidad, de longitud 25 mm y Resistencia a la tracción de 61 MPa [5].

### 2.2 Probetas

Se moldearon dos tipos de probetas:

- Vigas de hormigón armado de 8 x 16 x 110 cm, con barras de acero de dureza natural

(ADN 420, IRAM-IAS U 500-528) [6], de diámetro nominal: 4,2 mm y estribos de acero liso, diámetro nominal: 2,1 mm con un recubrimiento constante de 10 mm. El llenado de los encofrados se hizo en dos capas, compactándose cada una con vibrador de laboratorio. Estas vigas fueron utilizadas en los ensayos de corrosión acelerada.

b. Probetas cilíndricas moldeadas y curadas según IRAM 1534 [7]. Estas probetas fueron utilizadas para la realización de ensayos de resistencia a compresión (IRAM 1546) [8], tracción indirecta (IRAM 1658) [9], penetración (IRAM 1554) [10] y absorción capilar [11-12].

**Tabla I :** Tipos de hormigón y resultados obtenidos en los distintos ensayos.

Vigas	P1	P2	P3	I1	I2	I3	M1	M2	M3	F1	F2	F3
Relación a/c	0,60	0,51	0,41	0,60	0,51	0,41	0,60	0,51	0,41	0,60	0,51	0,41
Asentamiento (cm)	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Contenido fibras (g/m <sup>3</sup> h <sup>o</sup> )	0	0	0	400	400	400	750	750	750	1000	1000	1000
Permeabilidad (mm)	14	7	7	12	7	6	11	6	7	9	6	6
A24 (g/m <sup>2</sup> seg <sup>1/2</sup> ) (*)	39,1	30,6	39,1	27,2	28,9	34,0	26,9	27,4	33,6	25,5	25,5	28,9
Agua Absorbida (g/cm <sup>2</sup> )	2,00	1,95	1,80	1,70	1,75	1,80	1,65	1,70	1,80	1,50	1,70	1,75
Res. Compresión (MPa)	24,6	28,2	38,6	26,1	31,0	41,2	26,0	31,9	41,1	26,6	32,5	41,6
Res.Tracción (MPa)	2,6	2,8	3,6	2,5	2,7	3,9	2,4	2,7	3,8	2,5	2,6	3,9

(\*) Coeficiente de absorción a 24 hs.

### 2.3 Método acelerado de corrosión

Para acelerar la corrosión de las armaduras se aplicó una corriente constante a través de ellas, usándolas como ánodo, mediante un galvanostato. La densidad de corriente aplicada fue de  $i_{corr} = 100 \mu A/cm^2$ , valor correspondiente a unas diez veces el valor máximo de la densidad de corrosión, medido en estructuras de hormigón, con importantes grados de corrosión y contaminadas con cloruros [13]. Este valor se aplicó con el objeto de obtener, en un periodo de aproximadamente 130 días, una profundidad media teórica de la corrosión en las barras de al menos 0,40 mm. Estos óxidos difundieron llenando los poros y luego generaron la fisuración del recubrimiento de hormigón, por el aumento de volumen que produce su aparición. La profundidad media teórica del ataque a las barras se determinó a partir de la Ley de Faraday [13-14], suponiendo una corrosión uniforme de las armaduras de acero de las características químicas de uso habitual en la construcción, puede estimarse mediante la expresión:  $x = 0,0116 i_{corr} t$

donde:

x: profundidad del ataque [mm];

0,0116: factor de conversión de unidades;

$i_{corr}$ : densidad de corriente de corrosión [ $\mu A/cm^2$ ]

t: duración del ataque [años].

La zona afectada por la corrosión fue definida por contraelectrodos, realizados con una malla de acero inoxidable, colocados en la parte superior de la viga, cubriendo los 50 cm centrales. Con el propósito de

aumentar la conductividad del medio, el contacto de los contraelectrodos con el hormigón, se efectuó a través de una esponja mojada con una solución con NaCl (3 g / litro de solución).

### 2.4 Medidas de la fisuración

La evolución de las fisuras se analizó mediante inspecciones oculares, midiendo periódicamente con una escala graduada, cuya precisión es de 0,05 mm. Se registró la geometría de las fisuras mediante dibujos que indican cómo discurrían.

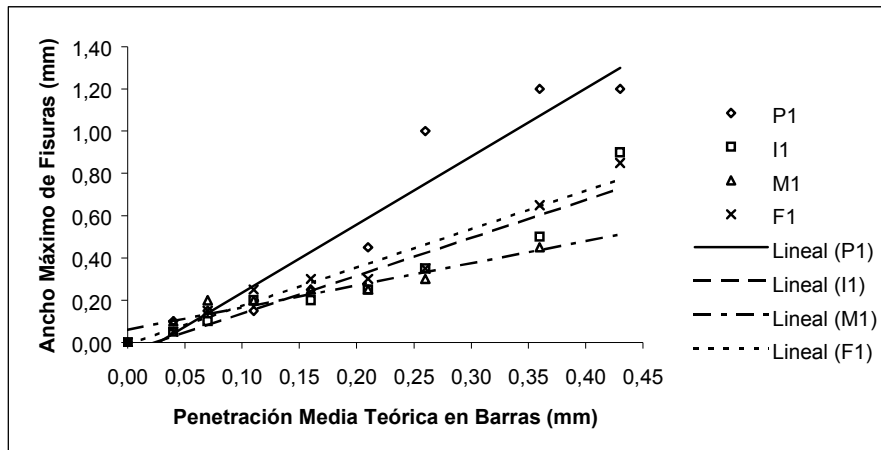
## 3. RESULTADOS

En la tabla I se muestran los resultados obtenidos en los distintos ensayos que caracterizaron al hormigón. Los resultados de los ensayos mecánicos y los de penetración y capilaridad [12], fueron obtenidos promediando tres probetas de cada uno, habiéndose descartado las muestras cuyos resultados difirieron en más del 15 % del promedio.

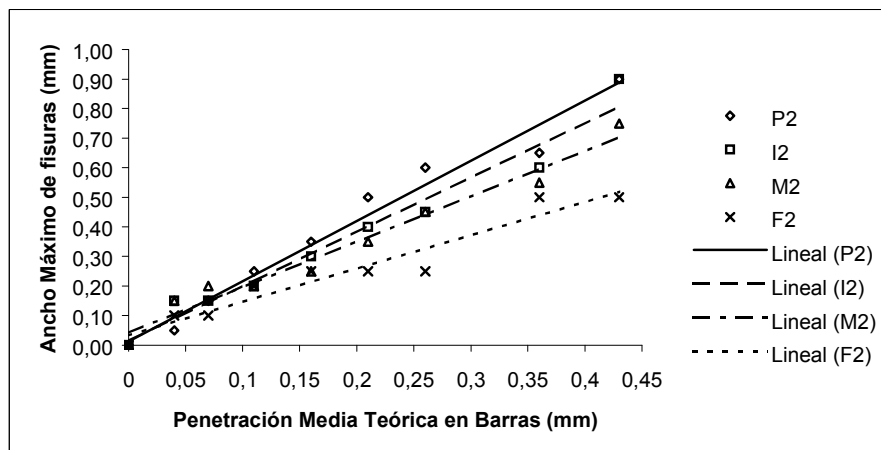
Las figuras 1, 2 y 3 presentan la variación del ancho máximo de fisuras, mientras que en las figuras 4, 5 y 6 se muestra la evolución del área de fisuración. En todos los casos están en función de la profundidad media teórica del ataque sobre las barras. Estas vigas fueron realizadas con hormigones cuyas relaciones a/c son 0,60, 0,51 y 0,41, respectivamente. En la tabla II, se presentan rectas determinadas por

cuadrados mínimos, que aproximan la variación del ancho máximo de fisuras y del área de fisuración, en

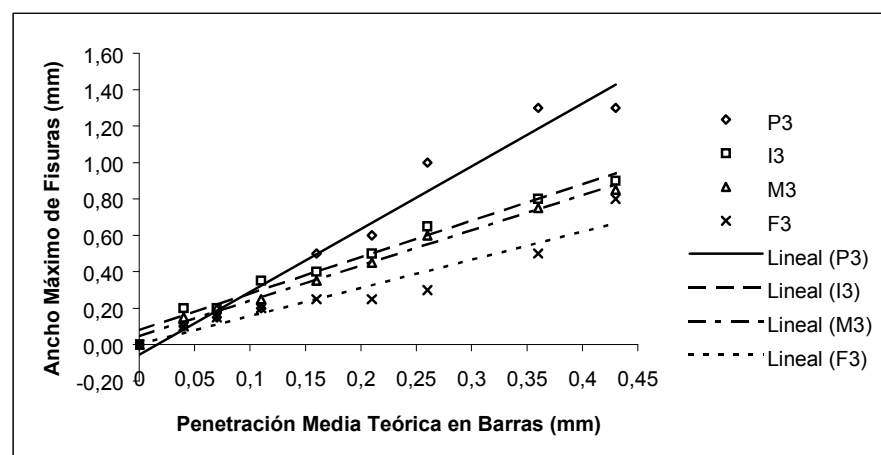
función de la profundidad media teórica del ataque a las barras, para los casos anteriores.



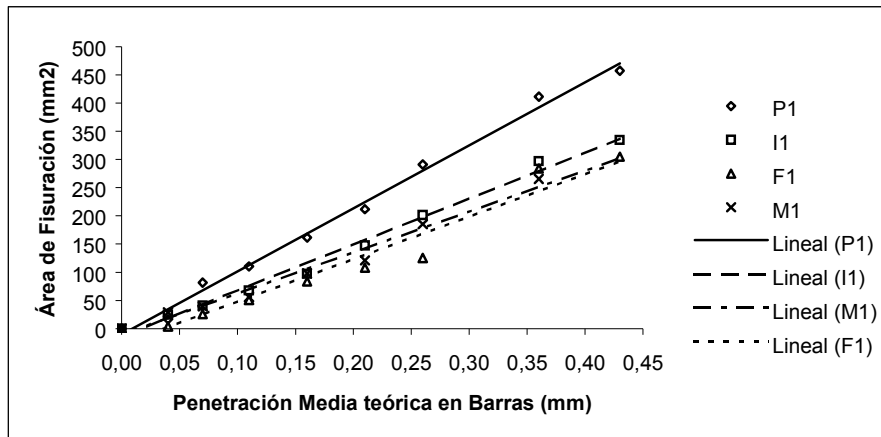
**Figura 1:** Variación del ancho máx. de fisuras, en hormigones con relación  $a/c = 0,60$ .



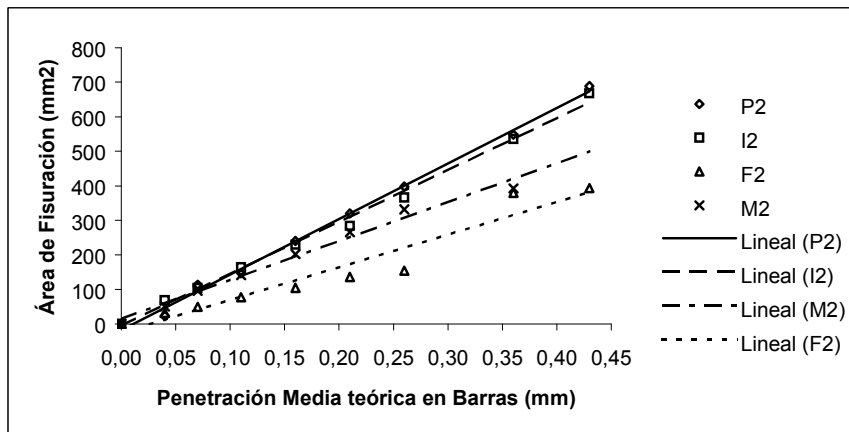
**Figura 2:** Variación del ancho máx. de fisuras, en hormigones con relación  $a/c = 0,51$ .



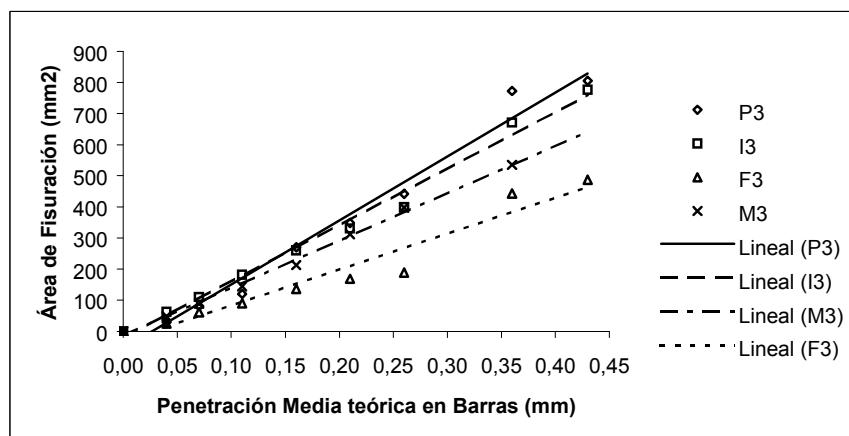
**Figura 3:** Variación del ancho máx. de fisuras, en hormigones con relación  $a/c = 0,41$ .



**Figura 4:** Variación del área de fisuración, en hormigones con relación a/c = 0,60



**Figura 5:** Variación del área de fisuración, en hormigones con relación a/c = 0,51



**Figura 6:** Variación del área de fisuración, en hormigones con relación a/c = 0,41.

**Tabla II :** Ecuaciones que aproximan la variación del ancho máximo de fisuras (w) y el área de fisuración (y), en función de la profundidad media teórica de ataque a barras (x).

Relac. a/c	Tipo de Hormigón	Ancho Máximo Fisuras		Áreas de Fisuración	
		Ecuación	R <sup>2</sup>	Ecuación	R <sup>2</sup>
0,60	P1	$W = 3,2264 x - 0,0879$	0,916	$y = 1118,8 x - 10,489$	0,993
	I1	$W = 1,8002 x - 0,0447$	0,904	$y = 817,6 x - 14,551$	0,991
	M1	$W = 1,5447 x + 0,0185$	0,952	$y = 729,5 x - 11,177$	0,979
	F1	$W = 1,8248 x - 0,0103$	0,951	$y = 755,7 x - 28,095$	0,953
0,51	P2	$W = 2,0363 x + 0,0123$	0,974	$y = 1608,4 x - 17,948$	0,996
	I2	$W = 1,8449 x + 0,0138$	0,965	$y = 1507,6 x - 6,257$	0,995
	M2	$W = 1,5421 x + 0,0412$	0,970	$y = 1132 x + 13,716$	0,986
	F2	$W = 1,1292 x + 0,0331$	0,935	$y = 949,7 x - 25,880$	0,929
0,41	P3	$W = 3,4453 x - 0,0556$	0,963	$y = 2056,1 x - 55,736$	0,979
	I3	$W = 2,0087 x + 0,0784$	0,970	$y = 1817,6 x - 21,069$	0,990
	M3	$W = 1,944 x + 0,0458$	0,990	$y = 1527,2 x - 13,658$	0,997
	F3	$W = 1,5525 x + 0,0004$	0,909	$y = 1159,7 x - 33,373$	0,944

#### 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En función de los resultados obtenidos, se observa que la evolución de los anchos máximos de fisuración, en función de la profundidad media teórica del ataque a las barras, se la puede aproximar mediante una recta con un buen ajuste, debido a que los índices de correlación (R<sup>2</sup>), en todos los casos, son superiores a 0,90. Comparando los grupos de probetas realizados con idénticas relaciones a/c, se aprecia que los anchos máximos de fisuras medidos en las vigas sin fibras, poseen pendientes que indican un crecimiento mayor que en los hormigones realizados con fibras. Las pendientes disminuyen, en la medida que se incrementa el contenido de fibras, debido a esto se observa que la incorporación de fibras posee un efecto benéfico, originando una disminución del cuadro de fisuración. Un comportamiento similar, se aprecia al analizar las figuras 4, 5 y 6, donde se presenta la variación de las áreas de fisuración.

En la viga moldeada con hormigón de relación a/c= 0,60 sin fibras (viga P1), tanto los anchos máximos de fisuras como las áreas de fisuración son superiores a los obtenidos cuando al material se le incorporan diferentes cantidades de fibras (vigas I1, M1 y F1). Estas últimas, poseen comportamientos muy similares, esto indica que es indistinto colocar cualquiera de los tres porcentajes de fibras elegidos. Es decir, que con un contenido de fibra de 400 g por m<sup>3</sup> de hormigón sería suficiente.

El comportamiento de las vigas realizadas con hormigones con menores relaciones a/c (0,51 y 0,41) y con un contenido intermedio de fibras (vigas I2 e I3) es similar al de las patrones (vigas P2 y P3). Por ello para apreciar una mejora proveniente de la incorporación de fibras, debe colocarse un contenido mayor de las mismas, del orden de los 1000 g por m<sup>3</sup> de hormigón.

Si se comparan entre sí, las áreas de fisuración de las vigas con el mismo contenido de fibras, se aprecia que estas áreas se incrementan, con el aumento de la resistencia de los hormigones. Esto se debe a que la porosidad es inferior, existiendo una menor disponibilidad de volumen para rellenar con los productos de corrosión, generándose un cuadro de fisuración mayor. Por otro lado los hormigones de mayor porosidad facilitan la salida de dichos productos de corrosión hacia el exterior, generando cuadros de fisuración menores. Cabe acotar que en hormigones sometidos a corrosión natural, el inicio de la misma se retarda con la disminución de la porosidad.

#### 5. CONCLUSIONES

Observando los resultados obtenidos en este trabajo experimental, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las fibras de polipropileno de alto módulo colaboran en la disminución del cuadro de fisuración que se produce debido a la corrosión de las armaduras metálicas, lo que se traduce en una mejora en la vida útil de la estructura afectada.
- En el diseño de las mezclas se debe tener en cuenta que, en la medida que se incrementa la resistencia del hormigón, se debe aumentar el contenido de fibras, a los efectos de obtener una disminución significativa del cuadro de fisuración.

### Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur y a los Sres. Juan P. Gorordo (Laboratorios de Modelos Estructurales) y Diego Smith (Laboratorio de Estudio y Ensayos de Materiales) por su colaboración en la ejecución de las probetas y ensayos.

### Referencias bibliográficas

1. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 50000. "Cemento: Cemento para uso general". (2000).
2. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1601. "Agua para morteros y hormigones de cemento portland". (1982).
3. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1627. "Agregados. Granulometría de los agregados para hormigón". (1997).
4. Marfil S.A. y Maiza P.J. "Los agregados gruesos utilizados en la zona de Bahía Blanca (Prov. De Buenos Aires), en relación con la reacción Alkali-Agregado". (1993), p.p. 4-8.
5. Señas L.; Maiza P. "Hormigones con fibras de polipropileno", Congreso Internacional de Ingeniería Estructural y Tecnología del Hormigón. (1993), pp.101.
6. Instituto de racionalización de Materiales- Instituto Argentino de Siderurgia U 500-528. "Barras de acero conformadas de dureza natural, para hormigón armado". (1998).
7. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1534. "Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio". (1985).
8. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1546. "Hormigón de cemento Pórtland. Método de ensayo de compresión". (1992).
9. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1658. "Hormigón. Método de ensayo de tracción simple por compresión diametral". (1995).
10. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1554. "Hormigón de cemento portland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido". (1983).
11. Señas L., Gil E.: "Aire incorporado en hormigón". Publicación UNS – 620.136se59, (1986), p.p 68-71.
12. Schierloh María Inés: "Porosidad y Permeabilidad del hormigón endurecido" Publicación UNS – 620.136-Sc32, (2001), p.p 40.
13. Rodríguez J., Ortega L.M. y García A.M.: "Medida de la velocidad de corrosión de las armaduras en estructuras de hormigón, mediante un equipo desarrollado dentro del proyecto Eureka EU-40"1. Hormigón y Acero N° 189. (1993), p.p. 79-91.
14. Feliú S.; González J. A.; Feliú S. Jr. y Andrade C.: "Confinement of the electrical signal for insitu measurement of polarization resistance in reinforced concrete". ACI Materials Journal, (1990), p.p. 457-460.