

## INCORPORACIÓN DE FIBRAS AL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

Tobes, J. M.<sup>1</sup>, López, A.<sup>2</sup>, Giaccio, G.<sup>3</sup> y Zerbino, R.<sup>4</sup>

### RESUMEN

Diversos trabajos han demostrado la factibilidad de elaborar hormigones autocompactantes reforzados con fibras (HACRF), de este modo se consigue un material de altas prestaciones que da lugar a nuevas alternativas de aplicación. En este trabajo se presentan experiencias destinadas a explorar las posibilidades de diseño de HAC cuando se deben seleccionar diferentes tipos de fibras y ajustar su contenido para lograr las propiedades mecánicas deseadas. Se analizan mezclas con dos tipos de fibras de acero y tres fibras sintéticas estructurales. La caracterización en estado fresco se realiza por los métodos habitualmente aplicados a HAC mientras que la resistencia y las tensiones residuales en estado endurecido se evalúan a través de ensayos de flexión con carga central con control por lazo cerrado sobre vigas entalladas. Los resultados permiten apreciar el efecto del tipo y contenido de refuerzo sobre las propiedades del hormigón y las potenciales ventajas de cada fibra. El método de diseño adoptado para obtener el HAC de base (sin fibras) dio lugar a una mezcla con la robustez necesaria para, con pequeñas modificaciones, lograr las condiciones de autocompactabilidad y resistencia deseada conforme los diferentes tipos y contenidos de fibras utilizados.

### INTRODUCCION

Diversos trabajos han demostrado que es posible incorporar fibras al hormigón autocompactante (HACRF); de este modo se consigue un material de altas prestaciones con excelentes propiedades en estado fresco y mejoras substanciales en las propiedades mecánicas y en el control de la fisuración, lo que otorga mayor durabilidad a las construcciones. El HACRF combina las ventajas de un mejor y más fácil llenado de los encofrados con la posibilidad de reducir las barras de refuerzo, en especial las armaduras secundarias, lo que adquiere particular interés en elementos de delgado espesor.

En un artículo previo (1) se presentaron algunas experiencias realizadas con el fin de obtener HACRF con diversas fibras disponibles en Argentina. Más recientemente se han estudiado problemáticas específicas como la homogeneidad en la distribución de las fibras y el efecto sobre las propiedades mecánicas de la orientación del refuerzo en prototipos representativos de distintos tipos de elementos estructurales.

---

<sup>1</sup> Docente Facultad de Ingeniería UNLP.

juanmatobes@yahoo.com.ar

<sup>2</sup> Becario CONICET - UTN-FRC, GINTEMAC.

<sup>3</sup> Investigador LEMIT-CIC. Profesor Facultad de Ingeniería UNLP.

<sup>4</sup> Investigador CONICET, LEMIT. Profesor Facultad de Ingeniería UNLP.

En este artículo se analiza el diseño de hormigones autocompactantes reforzados con diferentes tipos y contenidos de fibras, considerando que el productor puede muchas veces tener la necesidad de ajustarse en forma simultánea a las premisas de autocompactabilidad y a los requerimientos de resistencia y respuesta post-pico.

Se aborda el diseño de mezclas a partir de un método previamente desarrollado para HAC (2) basado en la optimización de la fase mortero hasta conseguir los niveles de fluidez y cohesión adecuados. El procedimiento ha demostrado ser altamente efectivo para lograr mezclas con condiciones de autocompactabilidad empleando arenas con diferentes texturas y contenidos de finos (3), adaptarse a cambios en el tipo de agregado grueso (4), ajustar el nivel de resistencia (5) o incorporar otros finos como por ejemplo pigmentos (6).

En este sentido el presente trabajo analiza la robustez del método para lograr mezclas que mantengan la capacidad de llenado y de pasaje, como así también la resistencia a la segregación cuando se les incorporan diferentes tipos y contenidos de fibras. Se analiza la influencia de las fibras en las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, incluyendo un estudio comparativo de la respuesta de las fibras de acero y sintéticas estructurales disponibles en el mercado.

## OBTENCIÓN DEL HACRF

### Materiales y Series

Se elaboraron cinco series de hormigones incorporando dos fibras de acero (D y M) y tres fibras sintéticas de tipo estructural (P, S y E), cada una en dos contenidos diferentes, a un mismo hormigón de base (sin reforzar). En la Fig. 1 se muestran los cinco tipos de fibras empleadas.

Las fibras de acero tienen una forma similar, ambas con extremos en forma de gancho (tipo hooked end), y longitudes del mismo orden, pero presentan una importante diferencia en cuanto a la esbeltez (aspecto geométrico). La relación longitud/diámetro alcanza valores iguales a 80 y 50 para D y M respectivamente. En consecuencia, para un mismo peso de fibras incorporado al hormigón, es de esperar que la fibra D afecte en mayor medida las propiedades en estado fresco ya que aumenta la cantidad de fibras por unidad de volumen; pero por otro lado, la capacidad de control de fisuración debiera ser mayor.

En cuanto a las fibras sintéticas, las fibras identificadas como P y E no presentan mayores diferencias entre sí, mientras que la fibra S posee un ancho mayor, sección transversal plana y una textura lisa.

Los hormigones elaborados se agrupan en cinco series que se identifican conforme la fibra incorporada, P, S, E, D y M. Se adoptó un hormigón de base que fue preparado con  $330 \text{ kg/m}^3$  de cemento tipo CPF40,  $300 \text{ kg/m}^3$  de filler calcáreo,  $165 \text{ kg/m}^3$  de agua,  $5,5 \text{ kg/m}^3$  de superfluidificante del tipo policarboxílico modificado,  $742 \text{ kg/m}^3$  de arena y  $856 \text{ kg/m}^3$  de piedra partida granítica de tamaño máximo 20 mm. Dicha mezcla presentó una alta fluidez y estabilidad suficiente, que lo clasifican como un HAC del tipo SF2 según las recomendaciones EFNARC del año 2005 (7).

Fibra	Longitud (mm)
M	50
D	60
P	54
S	42
E	52

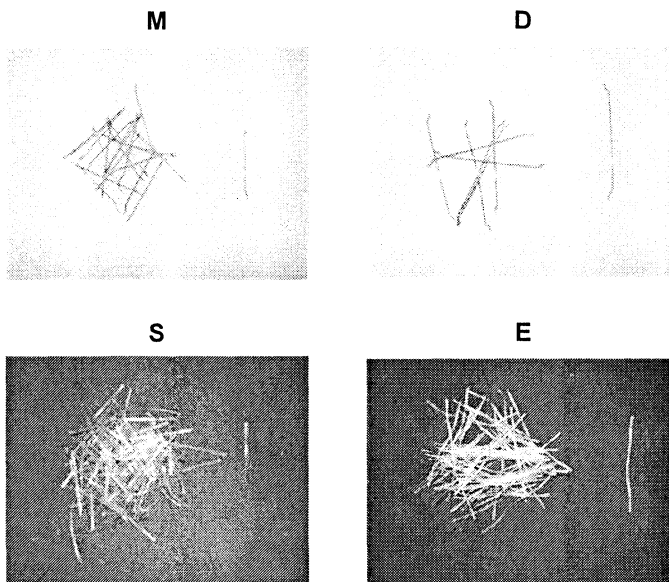


Figura. 1. Fibras empleadas.

Dado que contenidos elevados de fibras pueden afectar severamente la capacidad de fluir del hormigón, incrementar el riesgo de bloqueo y de este modo comprometer la autocompactabilidad, se emplearon para las fibras de acero dosis de 20 y 40 kg/m<sup>3</sup>, mientras que cuando se utilizaron fibras sintéticas se incorporaron 1.5 y 3 kg/m<sup>3</sup>. Estas cantidades corresponden a dosis bajas y medias, respectivamente, si se toma en cuenta la experiencia sobre hormigón con fibras vibrado convencional. La Tabla 1 sintetiza las mezclas previstas en el programa experimental. En cada caso se identifican de acuerdo al tipo de fibra incorporada y el subíndice indica el contenido de fibras por metro cúbico.

Uno de los objetivos planteados era comparar el efecto del uso de distintas fibras en las propiedades en estado fresco y endurecido del HAC, considerando que los volúmenes incorporados son pequeños (menores a 0.5 %) se buscó utilizar siempre el mismo hormigón de base, esto es, no se variaron las proporciones de los demás materiales. Solamente, y como se analizará más adelante se incrementaron ligeramente las dosis de aditivo en los hormigones E<sub>3</sub> y M<sub>40</sub>, con el fin de apreciar se la mezcla era lo suficientemente estable como para soportar una mayor dosis sin segregar. Cada serie se realizó en una misma jornada. En todas las series para apreciar el efecto de la incorporación de fibras se repitió la evaluación de las propiedades en estado fresco del hormigón de base.

### Propiedades del hormigón fresco

Sobre el hormigón fresco se realizaron ensayos de escurrimiento, determinando el diámetro final (D<sub>f</sub>) y el t<sub>50</sub>, de embudo en V determinando el tiempo de pasaje (T<sub>v</sub>) y en algunos casos de escurrimiento con anillo japonés (D<sub>j</sub>), como indicativo de la resistencia al bloqueo. En la Tabla 2 se informan los resultados obtenidos.

Se puede apreciar que la variabilidad entre los hormigones de base de las distintas series es pequeña, los diámetros de escurrimiento oscilan en el orden de  $700 \pm 20$  mm, los tiempos  $t_{50}$  dentro de  $1.8 \pm 0.4$  s, y los tiempos  $T_V$  en el orden de  $5.6 \pm 0.7$  s

A excepción del hormigón  $S_3$ , todos los hormigones cumplen con los valores exigidos en el ensayo de escurrimiento para clasificarse como autocompactante. Considerando las fibras sintéticas estructurales, la fibra S fue la que afectó en mayor medida la fluidez. Por el contrario con la fibra E, el hormigón  $E_{1.5}$  no presentó modificaciones importantes en el escurrimiento respecto del hormigón simple. En el hormigón  $E_3$  se comprobó que es posible mantener la clase de fluidez del hormigón de base aumentando ligeramente la dosis de aditivo (16 %) sin que se produzca segregación. En la serie P se obtuvo un comportamiento intermedio. De manera ilustrativa, el hormigón  $P_3$ , que incorpora  $3 \text{ kg/m}^3$  de fibra P, presentó el mismo valor de escurrimiento que la mezcla  $S_{1.5}$ , con  $1.5 \text{ kg/m}^3$  de fibra S.

En la mayoría de los casos la incorporación de fibras al hormigón redujo el escurrimiento dando lugar a un cambio de la clase SF2 a la clase SF1 (7). Además la incorporación de fibras produjo incrementos en los tiempos  $t_{50}$  y  $T_V$ , evidenciando una mayor tendencia al bloqueo y disminución de la capacidad de pasaje, lo que puede ser un inconveniente si se utiliza el hormigón en zonas densamente armadas. Este último efecto se vio magnificado con la fibra S, donde con  $3 \text{ kg/m}^3$  el hormigón no pasó a través del embudo.

Considerando las fibras de acero, la comparación entre  $M_0$  y  $M_{20}$  muestra que la fibra M no produce grandes modificaciones en la respuesta en estado fresco; en el caso de  $M_{40}$  se optó por incrementar la cantidad de aditivo a fin de verificar la robustez de la mezcla encontrando también en este caso que se puede lograr una buena fluidez sin segregación, aunque no se alcanzó el diámetro de escurrimiento del hormigón de base. Por el contrario cuando se utilizó la fibra D se verificaron cambios significativos. Esto puede justificarse si se toma en cuenta que la esbeltez de la fibra M es sensiblemente menor a la de la fibra D. En esta última serie, si bien los HACRF presentaron un comportamiento aceptable en el ensayo de escurrimiento, no pasaron a través de la abertura del embudo en V.

A modo de síntesis en la Fig. 2 se presenta la variación del diámetro de escurrimiento y del tiempo  $t_{50}$  para las cinco series estudiadas. Se ve claramente que a medida que la cantidad de fibras aumenta, tanto la fluidez del hormigón como la velocidad de deformación son menores. En HAC un aumento del tiempo en el ensayo de escurrimiento o en el embudo en V, se asocia a un incremento de la viscosidad del hormigón, cuando se mantiene constante el volumen y características del agregado (8). En este caso el aumento en el tiempo de pasaje del HACRF se debe atribuir principalmente a la interacción del conjunto agregados-fibras, y no a cambios en la viscosidad plástica de la matriz, ya que al incorporar las fibras al hormigón de base la misma no fue substancialmente modificada. Esto debe tenerse en cuenta a la hora del diseño de este tipo de hormigones, dado que generalmente un aumento de la viscosidad del hormigón reduce el riesgo de segregación de los materiales componentes.

No es usual encontrar en la bibliografía muchos resultados de ensayos destinados a evaluar el paso del HACRF a través de pequeñas aberturas u obstáculos como el escurrimiento con anillo o la caja en L. Esto se debe a que, por un lado las dimensiones de las fibras son comparables a la separación de las barras y a que la incorporación de fibras en elementos con gran cuantía de acero sólo se justifica en casos excepcionales (sismos,

explosiones). Habitualmente el desempeño del hormigón con fibras se evalúa sólo a través del ensayo de escurrimiento, midiendo la velocidad de deformación a través del  $t_{50}$  y la tendencia a la segregación con el índice de estabilidad visual (VSI) que es una apreciación realizada a partir del ensayo de escurrimiento. No obstante, y con el propósito de obtener información complementaria respecto a la mayor o menor propensión al bloqueo, se realizó el ensayo de escurrimiento con anillo en algunas mezclas. Como era previsible, en mezclas con los mayores contenidos de fibras, la diferencia entre diámetros  $D_f$  y  $D_j$  resultó superior a la recomendable ( $< 50$  mm indica que no se produce bloqueo).

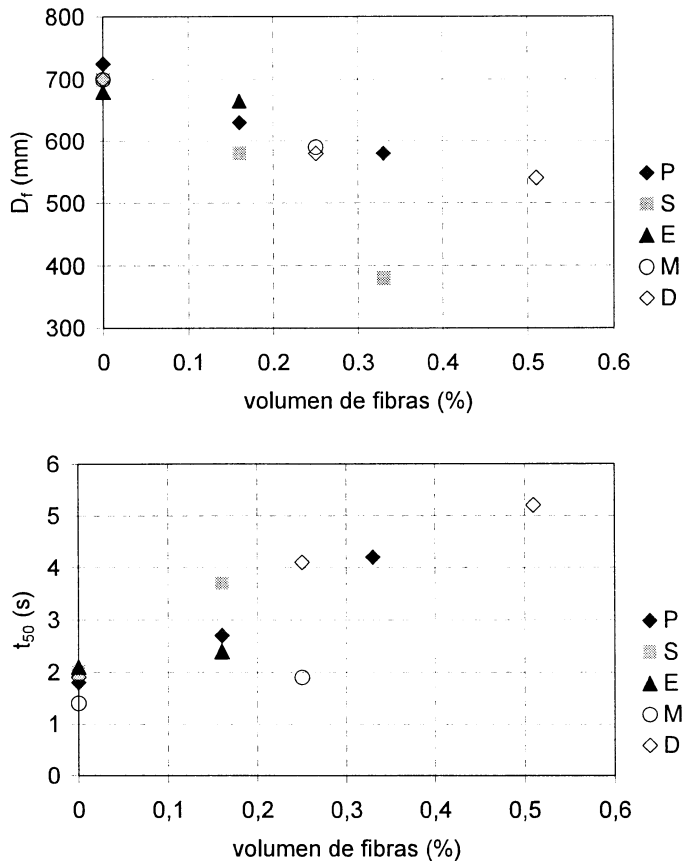


Figura 2. Variación del diámetro de escurrimiento y del  $t_{50}$  con la dosis de fibra.

Los resultados verifican en primera instancia que aunque las fibras afectan la fluidez cuando los contenidos incorporados no son muy elevados la matriz del HAC posee suficiente robustez para mantener condiciones de autocompactabilidad. De este modo será posible diseñar distintos HACRF a partir de un mismo hormigón de base y buscar los contenidos y tipo de refuerzo conforme la resistencia y capacidad residual deseada en estado endurecido.

Sin embargo la realidad es que en un sentido estricto al incorporar fibras se varía, aunque sea en pequeña medida, la cantidad de matriz. Ferrara et al. (9) presentaron un método para diseñar hormigones con fibras de acero, donde la fibra es considerada como una fracción del agregado, atribuyéndole un diámetro equivalente ( $d_{eq-fibra}$ ) de acuerdo con la ecuación [1]. El  $d_{eq-fibra}$  depende de la densidad relativa entre la fibra y el agregado y de geometría de la fibra utilizada (longitud y diámetro).

$$d_{eq-fibra} = \frac{3L_f * \gamma_{fibra}}{1 + 2 * \frac{L_f}{d_f} * \gamma_{agregado}} \quad [1]$$

Luego, el método calcula el diámetro medio de agregados ( $d_{av}$ ) que, cuando se incorporan fibras se obtiene mediante la expresión [2]. En este caso,  $d_i$  y  $m_i$  son el diámetro y la masa de cada fracción de agregados, obtenidas de la curva granulométrica.

$$d_{av} = \frac{\sum d_i * m_i + d_{eq-fibra} * m_{fibra}}{\sum m_i + m_{fibra}} \quad [2]$$

Finalmente, se calcula un espaciamiento medio entre agregados, que es el valor utilizado en el diseño de mezclas. Este valor, que depende de las proporciones de los materiales en el metro cúbico de hormigón, del diámetro medio de los agregados y de su porcentaje de vacíos, se calcula como [3], donde  $V_p$  es el volumen de pasta,  $V_c$  el volumen total de hormigón y  $V_{oid}$  es el volumen de vacíos del esqueleto granular.

$$d_{ss} = d_{av} \left( \sqrt[3]{1 + \frac{V_p - V_{oid}}{V_c - V_p}} \right) \quad [3]$$

Mediante este procedimiento se puede considerar con mayor rigor la incorporación de las fibras y ajustar el contenido de agregados, logrando de este modo la fluidez requerida sin perder estabilidad. Por ejemplo en el caso de las fibras M y D utilizadas en estas experiencias, los diámetros equivalentes alcanzan valores iguales a 4.32 mm y 3.24 mm respectivamente y, de acuerdo con el modelo, la incorporación de 20 ó 40 kg/m<sup>3</sup> de estas fibras equivale a sumar al hormigón esa misma cantidad de la fracción más gruesa de la arena. Los nuevos  $d_{av}$  y  $d_{ss}$  calculados se muestran en la Tabla 3, las ligeras reducciones en los valores de  $d_{ss}$  cuando se utilizan las fibras, indican una mayor fricción del conjunto y un menor grado de suspensión de los agregados en la matriz, que se traduce en una menor movilidad. No obstante, las diferencias no parecen ser demasiado importantes. Cabe notar que el modelo no tiene en cuenta un contenido máximo de fibras.

A pesar de la escasa variación en  $d_{av}$  y  $d_{ss}$ , y considerando el comportamiento que presentó el hormigón reforzado, está claro que difiere del de un hormigón con un contenido mayor de agregado de un diámetro aproximado al diámetro equivalente de la fibra, especialmente en aquellos ensayos donde se evalúa la velocidad de deformación y la capacidad de pasar a través de obstáculos.

Tabla 3. Modelo de ajuste del efecto de la incorporación de fibras: cálculo del dss.

Hormigón	Fibras (kg/m <sup>3</sup> )	d <sub>eq-fibras</sub> (mm)	d <sub>av</sub> (mm)	d <sub>ss</sub> (mm)
D <sub>0</sub> = M <sub>0</sub>	0	-	6.353	0.517
D <sub>20</sub>	20	3.24	6.315	0.514
D <sub>40</sub>	40	3.24	6.277	0.511
M <sub>20</sub>	20	4.32	6.328	0.515
M <sub>40</sub>	40	4.32	6.303	0.513

A modo de ejemplo en la Fig. 3 se muestra el aspecto de los hormigones de la Serie P en estado fresco, incluyendo el hormigón simple y los dos hormigones que incorporan 1.5 y 3 kg/m<sup>3</sup> de fibras; en ningún caso hay evidencia de segregación y las fibras se encuentran distribuidas uniformemente dentro de la matriz. El aspecto del resto de las series fue similar.

Finalmente es importante reiterar que el hormigón diseñado en base al método de ajuste sobre morteros fue lo suficientemente robusto para mantener las condiciones autocompactabilidad con la incorporación de las fibras y con el incremento en la dosis de superfluidificante; esto último se dio para los mayores contenidos de fibra sin segregar.

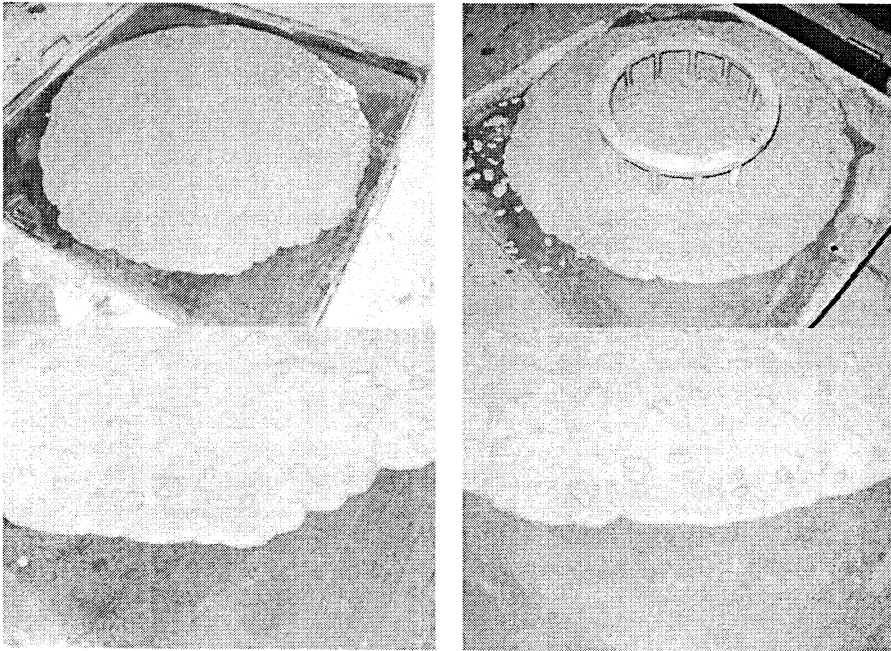
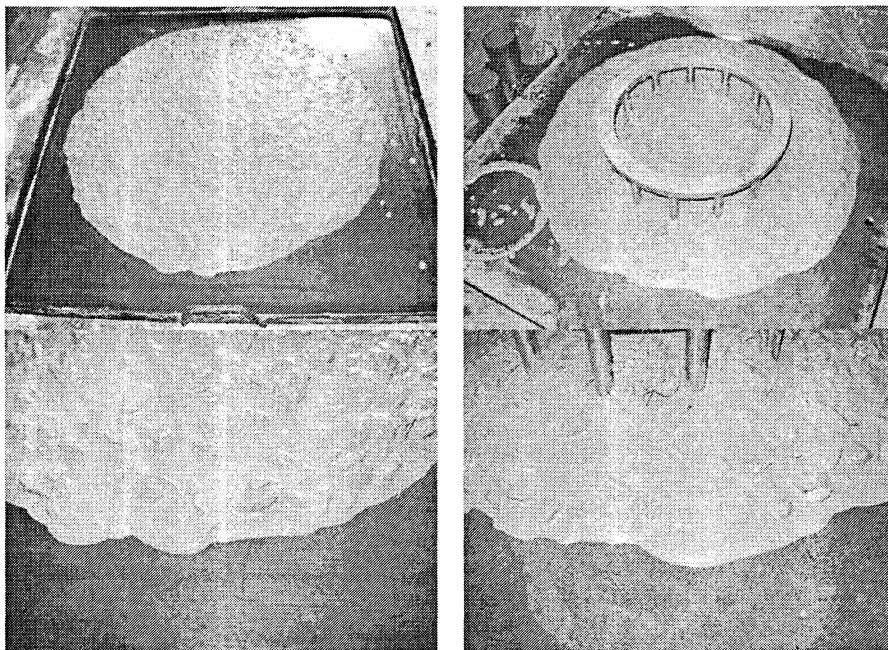
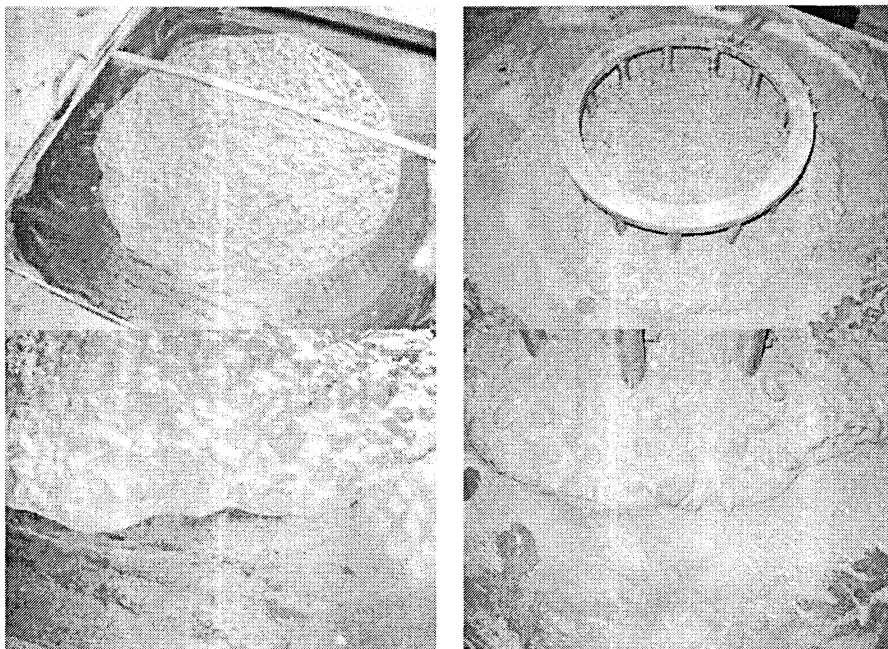
Ensayo de escurrimiento y escurrimiento con anillo hormigón P<sub>0</sub>

Figura 3. Aspecto de los hormigones en estado fresco.



Ensayo de escurrimiento y escurrimiento con anillo hormigón P<sub>1,5</sub>



Ensayo de escurrimiento y escurrimiento con anillo hormigón P<sub>3</sub>

Figura 3 (continuación). Aspecto de los hormigones en estado fresco.

## Propiedades mecánicas

Sobre el hormigón endurecido se realizaron ensayos de compresión, sobre probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura determinando la resistencia y el módulo de elasticidad. Como referencia las resistencias a compresión de los hormigones de base en las series P, S, E, D y M fueron iguales a 47, 44, 46, 44 y 45 MPa respectivamente. Cabe indicar que no se encontraron mayores diferencias de resistencia a compresión entre los hormigones de una misma serie; en la serie M se notó un leve incremento en los hormigones  $M_{20}$  y  $M_{40}$  (47 MPa) con respecto del hormigón simple, pero en la serie D se produjo lo opuesto (38 MPa en  $D_{40}$ ). Esto último se atribuye a una menor compacidad por deficiencias en el llenado, es conocido que muchas veces en HAC las propiedades en estado endurecido son mejores en los elementos estructurales que en las probetas, debido a que en estas últimas el efecto del peso propio del material es mucho menor y no se aprovecha para la compactación.

El comportamiento bajo sollicitaciones de flexión fue evaluado sobre vigas entalladas al centro, con dimensiones 100 x 75 x 430 mm. El ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la recomendación RILEM TC-162 TDF (10) registrando, conjuntamente con la carga, la apertura de fisura (CMOD) mediante un clip-gage, esta deformación se utilizó como parámetro de control de la velocidad de ensayo. Para el cálculo de la resistencia residual los valores CMOD fueron corregidos en función de la altura de las vigas de manera de hacer comparables las resistencias residuales a la de una viga de dimensiones normalizadas (11).

La Fig. 5 presenta las curvas tensión – CMOD. A partir de ellas es posible apreciar en forma cualitativa el comportamiento del material en el post-pico, luego de la fisuración del hormigón simple.

Considerando los HAC elaborados con fibras sintéticas estructurales P, en todas las vigas la tensión de la primera fisura ( $MR_{1f}$ ) constituye la tensión máxima registrada durante el ensayo. Superada la primera fisura, la capacidad portante decrece hasta hacerse prácticamente constante para todo el post-pico, dependiendo esta capacidad del contenido de fibras incorporado.

Del mismo modo que el caso anterior, en la serie de hormigones reforzados con la fibra S la capacidad de carga disminuye considerablemente luego de aparición de la primera fisura y se mantiene prácticamente constante hasta finalizar el ensayo.

Para el caso de los HACRF de acero, en los ensayos correspondientes a la serie D se pueden observar según la cantidad de fibras incorporadas dos comportamientos bien diferenciados. En el hormigón  $D_{20}$  la respuesta es similar a la obtenida con fibras sintéticas, esto es, un descenso continuo una vez alcanzada la primera fisura, pero la capacidad residual es más elevada, mientras que en el hormigón  $D_{40}$  con mayor cantidad de fibras, la tensión de fisuración es superada ampliamente (respuesta tipo endurecimiento), se alcanza un valor máximo y luego desciende. Por su parte en la serie M, el hormigón  $M_{20}$  muestra una reducción substancial de la capacidad resistente una vez producida la primera fisura; por el contrario, en  $M_{40}$  la capacidad de carga se mantiene (y en algunas probetas incluso crece) cuando aumenta la deformación.

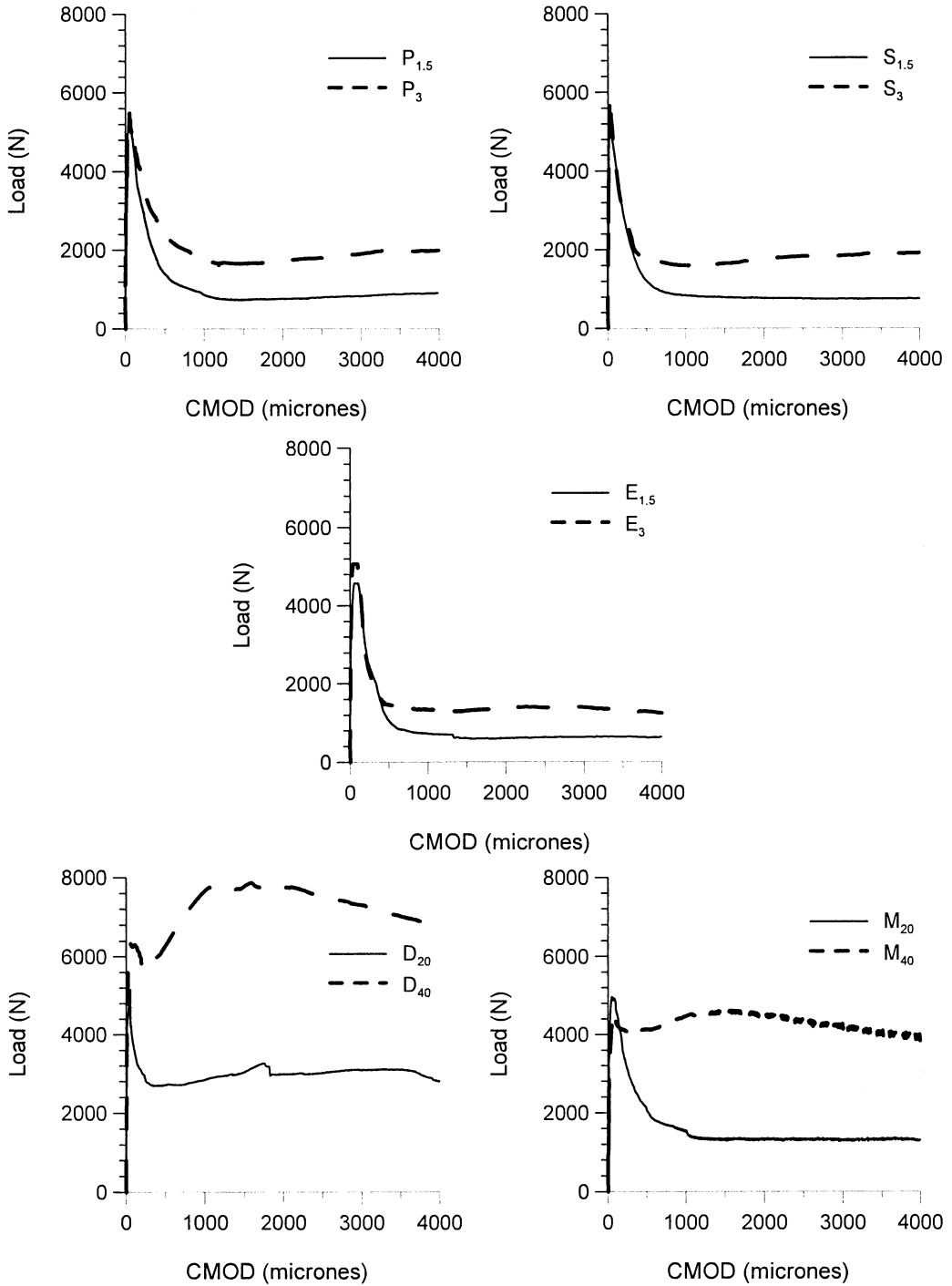


Figura. 5. Curvas tensión – CMOD.

Tabla 5. Parámetros resistentes y de post-pico obtenidos en ensayos de flexión.

	MR <sub>1f</sub> (MPa)	MR (MPa)	R <sub>CMOD1</sub> (MPa)	R <sub>CMOD2</sub> (MPa)	R <sub>CMOD3</sub> (MPa)	R <sub>CMOD4</sub> (MPa)
P <sub>1.5</sub>	5.2	5.2	1.3	0.6	0.6	0.6
desvío	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2
P <sub>3</sub>	5.0	5.0	2.0	1.4	1.5	1.7
desvío	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
S <sub>1.5</sub>	5.1	5.1	1.2	0.6	0.5	0.5
desvío	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1
S <sub>3</sub>	5.1	5.1	1.8	1.5	1.6	1.6
desvío	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5
E <sub>1.5</sub>	4.3	4.3	1.1	0.7	0.7	0.7
desvío	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2
E <sub>3</sub>	4.6	4.6	1.3	1.1	1.2	1.3
desvío	0.6	0.6	0.2	0.2	0.1	0.1
D <sub>20</sub>	4.8	4.8	2.5	2.4	2.4	2.2
desvío	0.6	0.6	0.3	0.7	0.8	0.8
D <sub>40</sub>	5.9	7.3	6.1	6.9	6.6	6.0
desvío	0.3	0.8	0.9	0.7	0.3	0.7
M <sub>20</sub>	4.5	4.6	2.1	1.6	1.4	1.2
desvío	0.4	0.4	0.1	0.4	0.5	0.5
M <sub>40</sub>	4.8	5.1	4.3	4.2	3.9	3.6
desvío	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6

A partir de estas curvas se calculan los valores de resistencia en el primer pico (MR<sub>1f</sub>), la resistencia máxima (MR) y las tensiones residuales (R<sub>CMOD1</sub>, R<sub>CMOD2</sub>, R<sub>CMOD3</sub>, y R<sub>CMOD4</sub>) para aperturas iguales a 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm; mediante estos parámetros, especialmente propuestos para ser utilizados en el cálculo, se cuantifica la capacidad de control del proceso de propagación de fisuras. La Tabla 5 detalla los valores promedio que surgen de los ensayos de flexión, en todos los casos fueron obtenidos sobre un mínimo de 4 determinaciones. Dado que los valores de resistencia a compresión de los hormigones se encuentran en un rango suficientemente acotado, las diferencias en el comportamiento en flexión se atribuyen únicamente a la cantidad y propiedades de las diferentes fibras.

Al comparar los valores de MR<sub>1f</sub> se observa que en general no varían de manera significativa (4.8 ± 0.5 MPa), con la excepción del mayor contenido de las fibras de acero D, donde se registra un aumento apreciable. Con las fibras sintéticas se obtuvo el mismo valor independientemente de la cantidad de fibras incorporada. Si bien el MR<sub>1f</sub> es una propiedad vinculada a la matriz que se relaciona con la aparición de la primera fisura, el procedimiento de cálculo define la carga de fisuración como el valor más elevado que se registra para una deformación de 0.05 mm, por lo que si la cantidad de fibras es elevada y éstas producen una respuesta con endurecimiento, el valor puede verse incrementado.

La serie P presenta valores de MR cercanos a 5 MPa. La tensión residual  $R_{CMOD1}$  es algo mayor que las restantes, alcanzando la misma un 25 y un 40 % de la resistencia en el primer pico (igual a MR), para  $P_{1.5}$  y  $P_3$ , respectivamente. Cuando se incorpora una mayor cantidad de fibras, si bien no se producen cambios en el MR, sí se ven incrementadas las resistencias residuales.

Como se observara en las curvas, la serie S muestra el mismo comportamiento que la serie anterior, la tensión residual  $R_{CMOD1}$  es mayor que las demás, alcanzando un nivel del 29 y 41 % del MR para  $S_{1.5}$  y  $S_3$ , respectivamente.

Es interesante destacar que si bien la serie E sigue las mismas tendencias que las otras series con fibras sintéticas, presenta menores diferencias entre las tensiones residuales y no muestra un incremento sustancial de la capacidad de carga en el post-pico por la incorporación de una mayor cantidad de fibras.

De los párrafos anteriores se desprende que el comportamiento de las fibras sintéticas fue similar en todos los casos, registrándose luego de la tensión de fisuración un marcado descenso de la capacidad resistente. La capacidad residual final (para grandes aperturas de fisuras) alcanza valores constantes respecto de la tensión máxima que oscilan entre el 11 y el 16 % para los contenidos de  $1.5 \text{ kg/m}^3$  de fibra y entre el 25 y el 30% para los contenidos de fibras de  $3.0 \text{ kg/m}^3$ . Cabe destacar que, para resultados similares en estado endurecido, la serie S presentó un comportamiento más desfavorable en estado fresco.

En lo que respecta a las fibras de acero, en la serie D la incorporación de  $20 \text{ kg/m}^3$  de fibras se traduce en tensiones residuales del orden del 50 % de  $MR_{1f.}$ , coincidiendo este con MR. La capacidad de carga en el post-pico es constante y del orden de 2.4 MPa. Cuando la cantidad de fibras incorporadas es de  $40 \text{ kg/m}^3$  se registra un postpico con endurecimiento y la tensión máxima crece con respecto a la tensión de la primera fisura (24 % mayor considerando los valores promedio). Además a medida que se desarrolla la fisuración las tensiones residuales  $R_{CMOD2}$  y  $R_{CMOD3}$  presentan valores 11 % mayores que la tensión residual  $R_{CMOD1}$  y 15 % mayores que la tensión correspondiente a la primera fisura.

En el caso de la serie M, cuando se incorporaron  $20 \text{ kg/m}^3$  de fibras, la  $R_{CMOD1}$  alcanzó el 46 % de la resistencia a flexión (MR). En cambio  $R_{CMOD2}$  y  $R_{CMOD3}$  representaron alrededor de 30 y 35 % de la tensión de primera fisura. Al incrementar el contenido de fibras se observó en todos los casos un ligero endurecimiento, especialmente para aperturas de fisura menores a las correspondientes a la tensión residual  $R_{CMOD1}$ , es decir, inmediatamente luego de producida la primera fisura. Las tensiones residuales  $R_{CMOD1}$  y  $R_{CMOD2}$  presentan valores similares y la tensión  $R_{CMOD3}$  algo menores.

Comparando las dos fibras de acero, se observa que para iguales contenidos la fibra D es más eficaz durante la respuesta post-pico, obteniéndose en todos los casos mayores resistencias residuales. Este comportamiento puede explicarse por la mayor esbeltez (longitud/diámetro) de dicha fibra, que para un mismo contenido por metro cúbico de hormigón representa un número mayor del Factor de Fibra (volumen\*longitud/diámetro), este número se relaciona en forma directa con la respuesta resistente del hormigón reforzado. Por otro lado y considerando las propiedades en estado fresco de los hormigones, se ve claramente que las fibras M afectan la trabajabilidad en menor medida (el número de fibras es menor), permitiendo seguramente incorporar un mayor contenido por

metro cúbico de hormigón sin perder las características de autocompactabilidad. Cabe notar que en el caso del hormigón  $M_{40}$  el promedio de las tensiones residuales equivale a un 86 % de la tensión de primera fisura, con lo que el material prácticamente mantiene la capacidad de carga para las deformaciones consideradas en el ensayo.

## CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo se han presentado experiencias que muestran el efecto del tipo y contenido de fibras sobre el comportamiento de hormigones autocompactantes. Se analizaron las propiedades en estado fresco y endurecido de HAC reforzados con dos fibras de acero y con tres fibras sintéticas del tipo estructural. Las principales conclusiones se indican a continuación.

El HAC de base obtenido a partir de un método de diseño que parte de la premisa de optimizar el mortero fue lo suficientemente robusto como para soportar la incorporación de contenidos intermedios de fibras ( $40 \text{ kg/m}^3$  de fibras de acero y  $3 \text{ kg/m}^3$  de fibras sintéticas estructurales) sin modificar las proporciones de los materiales componentes. Este hecho, refuerza la validez del procedimiento de optimización de la matriz mediante los ensayos sobre morteros.

Cuando se introducen fibras se modifican las propiedades del hormigón en estado fresco, en general se verifican menor fluidez y mayor tendencia al bloqueo. Como era previsible y del mismo modo que ocurre en hormigón convencional vibrado reforzado con fibras, los cambios en estado fresco son más notorios cuando el contenido de fibras aumenta y dependen del tipo de fibra empleada. Desde el punto de vista del diseño, el HAC de base deberá tener un extendido mayor al pretendido en el hormigón con fibras.

De la comparación entre los dos tipos de fibras analizados surge que las fibras sintéticas estructurales aún con los contenidos más elevados ( $3 \text{ kg/m}^3$ ) presentan un comportamiento residual inferior en cuanto a la capacidad de controlar el desarrollo de la fisuración que las fibras de acero incorporadas en bajos contenidos. Cuando estas últimas fueron empleadas en cantidades mayores ( $40 \text{ kg/m}^3$ ) se obtuvo una excelente capacidad residual en el post-pico, para las fibras D se produjo incluso una respuesta tipo endurecimiento con un crecimiento de la capacidad de carga, mientras que para las fibras M aunque la resistencia disminuyó ligeramente se mantuvo en el orden del 86 % de la tensión de primera fisura. Las respuestas observadas son consistentes con la esbeltez de cada una de las fibras de acero analizadas.

## REFERENCIAS

- (1) Tobes, J.M., Monetti, D., López, A., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Hormigones autocompactables reforzados con fibras", Ciencia y Tecnología del Hormigón N 14, 2007, pp. 37-56.
- (2) Tobes, J. M., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Diseño de hormigones autocompactables: efecto del volumen de pasta y granulometría de la arena", Revista Hormigón 44, 2007, pp. 39-49.

- (3) Tobes, J. M., López, A., Barragán B., Giaccio, G. and Zerbino, R. "Effect of sand particle size distribution on fluidity and passing ability of highly flowable mortars", en 5<sup>th</sup> Int. RILEM Symposium on SCC, Ghent, Belgium, ISBN: 978-2-35158-050-9, Vol. 1, 2007, pp. 163-168.
- (4) Tobes, J. M., López, A., Giaccio, G. and Zerbino, R. "Effect of coarse aggregate shape and texture on self compactability" in 5<sup>th</sup> ACI-CANMET International Conference High Performance Concrete Structures and Materials. Ed. E. Pazzini Figueiredo, T.C. Holland, V.M. Malhotra, P. Helene. Ed Production: L. K. Kennedy, ACI International, SP-253-2, ISBN 978-0-87031-277-9, 2008, pp. 13-23.
- (5) Tobes, J.M., López, A., Perrone, F., Giaccio, G., Violini, D. y Zerbino, R. "Diseño de hormigones autocompactantes de alta resistencia", en Proc. III Congreso Internac y 17° Reunión Técnica AATH, Córdoba, Argentina, Eds. V Rahhal y J. Sota, 2008, pp.95-102.
- (6) López, A., Tobes, J.M., Positieri, M.J., Oshiro, Á., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Diseño de hormigón autocompactante coloreado: efecto de la incorporación de diversos pigmentos", en Proc. III Congreso Internac. y 17° Reunión Técnica AATH, Córdoba, Argentina, Eds. V Rahhal y J. Sota, pp.127-134.
- (7) EPG 2005. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use, en <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
- (8) Zerbino, R., Barragán, B., Garcia, T., Agulló, L. and Gettu, R. "Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete", Materials and Structures, 2008, doi:10.1617/s11527-008-9434-2.
- (9) Ferrara L., Park Y. and Shah S. "A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete", Cement and Concrete Research 37, 2007, pp. 957-971.
- (10) RILEM TC 162-TDF 'Test and design methods for steel fibre reinforced concrete bending test, final recommendation' Materials and Structures, 35, 2002, pp. 579-582.
- (11) Giaccio G., Tobes, J. M., and Zerbino R. "Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete" Cement and Concrete Composites, 30, N 4, 2008, pp. 297-306.

*A nuestros lectores*

La Revista *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, que edita el LEMIT, tiene como misión fundamental dar a conocer rápidamente al medio académico y productivo los resultados de las investigaciones en marcha correspondientes a diversos proyectos que se desarrollan en nuestro laboratorio.

El personal científico, dentro del cual se incluye a los becarios, pertenece a los dos sistemas científicos más importantes de Argentina: el CONICET (organismo nacional de ciencia y tecnología) y la CIC (organismos de la Provincia de Buenos Aires), institución de la cual depende el LEMIT.

Muchos resultados de los distintos proyectos de investigación y desarrollo son luego publicados en Revistas indexadas, ya que los autores por su pertenencia necesitan indefectiblemente publicar en revistas que posean esas características y que tengan el mayor índice de impacto. Las evaluaciones periódicas a la que son sometidos los investigadores para la permanencia o la promoción en sus carreras científicas emplean indefectiblemente el análisis del tipo de revistas en los cuales se ha publicado.

La situación antes descrita es planteada de forma amena pero profunda por Roberto Oyarzun, Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Madrid, España, en su artículo "*Ciencia, Revistas Científicas y el Science Citation Index: o cómo volvernos locos a golpe de números*". Se ha considerado importante divulgarlo dentro del ámbito en el cual se distribuye *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, pero fundamentalmente esperamos que se produzca una discusión sobre los conceptos vertidos en el artículo.

Como conclusión podemos plantear que no se debe confundir el medio que es la Revista en la cual se publican las investigaciones, con el fin intrínseco de la investigación y del trabajo de la comunidad científica, en especial cuando los proyectos de investigación y desarrollos son solventados con fondos públicos. La función del investigador, además de incrementar el conocimiento disponible, es difundir dichos resultados en la comunidad para el aprovechamiento de los mismos, empleando todos los medios a su disposición como pueden ser las revistas indexadas, los congresos nacionales o internacionales y las revistas especializadas de directa llegada a los interesados, como es el caso de *Ciencia y Tecnología del Hormigón* que se distribuye a diversos actores vinculados a la industria de la construcción tanto de nuestro país como del exterior.

Ing. Luis P. Traversa  
Director del LEMIT