



## Empleo de Ultrasonidos y Esclerometría en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas

Ercolani, G.D.\*, Ortega N.F., Señas L.  
Departamento de Ingeniería  
Universidad Nacional del Sur  
Av. Alem 1253 - 8000 Bahía Blanca, Argentina  
Fax (54-291) 459 5110  
nfortega@criba.edu.ar

\* Becario Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires

### Resumen

En este trabajo se presentan las experiencias de laboratorio, reunidas en los ensayos de probetas de hormigón, que han sido expuestas a elevadas temperaturas. En particular, se exponen las determinaciones realizadas con los Ensayos No Destructivos, que se pueden aplicar en el diagnóstico de patologías estructurales, con el fin de desarrollar técnicas que luego pueden ser aplicadas en estructuras que hayan estado expuestas a temperaturas elevadas, este es el caso de las estructuras de hormigón que se encuentran en contacto con un incendio, donde actúan los bomberos, produciendo con su accionar, un enfriamiento brusco del hormigón sobrecalentado. La Esclerometría y la medición de la Velocidad de Propagación de los Impulsos Ultrasónicos permiten cuantificar este deterioro estructural, observándose notorios descensos del Índice Esclerométrico y de la Velocidad de Propagación. Siendo muy útiles en lugares donde no se pueden extraer testigos o no es conveniente hacerlo. No obstante, deben emplearse estos Ensayos No Destructivos con cuidado, por tener limitaciones inherentes a cada método.

### 1. Introducción

La exposición de una estructura de hormigón armado, a elevadas temperaturas producto, por ejemplo, de un incendio o por las condiciones de servicio que se registran en una industria, afectan su durabilidad y sus prestaciones mecánicas.

El hormigón, en forma similar a lo que ocurre con otros materiales, sufre cambios físicos y químicos, en muchos casos irreversibles, cuando se lo expone a un calor elevado, dependiendo este deterioro de la temperatura alcanzada, del tiempo de exposición, de la composición del hormigón (en especial, de los agregados), del tipo de enfriamiento, etc.

En la microestructura del hormigón se presentan fisuras y otras imperfecciones, que en muchos de los casos se extienden hasta la macroestructura. Cuando el material se somete a elevadas temperaturas, debido a que esta compuesto por distintos materiales, que poseen diferentes coeficientes de dilatación, se generan cambios volumétricos distintos, incrementándose las micro y macrofisuras, además surgen aumentos en la presión de poros y se descomponen los productos de hidratación. Todo esto genera una acción

combinada de contracción y expansión de la pasta cementicia, que afecta a su microestructura. Hasta los 105 °C, la pasta se deshidrata, por lo que se contrae. Cuando las temperaturas son más elevadas, los agregados se expanden y predomina la expansión de ellos, sobre la contracción de la pasta.<sup>(1)</sup> A 180 °C comienza la deshidratación del silicato de calcio hidratado; a partir de los 500 °C, la mayoría de los agregados dejan de ser estables y las afectaciones son irreversibles, con una importante densidad de microfisuras en la interface agregado-pasta.<sup>(2)</sup>

El proceso anteriormente descrito puede agravarse, en función del tipo de enfriamiento al que haya estado expuesta la estructura. Este es el caso del enfriamiento acelerado que se produce por la acción de los bomberos cuando, durante su accionar para apagar el incendio, rocían con agua a la estructura. Este cambio brusco de temperatura genera un shock térmico, con la consecuente aparición de microfisuras en la masa del hormigón, que afectan a su estructura interna. Por estos motivos, resulta importante poder determinar, con la mayor precisión posible, el estado en que se encuentra una estructura que ha sido dañada por esta situación. Uno de los métodos que se pueden utilizar en el diagnóstico de estructuras de hormigón, en este caso, afectadas por elevadas temperaturas, es la determinación de la Velocidad de Propagación de los Impulsos Ultrasónicos y el Índice de Rebote o Índice Esclerométrico. Estas dos técnicas permiten estimar la calidad del hormigón de una estructura, de una forma no destructiva, rápida, segura y económica.

En este trabajo se presentan los estudios efectuados en una serie de probetas de hormigón, realizadas con distintas relaciones agua / cemento, empleándose como agregado grueso, canto rodado. Cabe acotar que se empleó este agregado debido a que es el material más usado en el sur de la Argentina, existiendo pocos antecedentes internacionales, en los que se hayan realizado investigaciones usando esta clase de agregado grueso.

Con el fin de analizar las posibles situaciones, las probetas de hormigón se han expuesto a diferentes temperaturas (que van desde la temperatura ambiental, hasta 750 °C, durante un período de exposición de 1 hora) y, posteriormente, fueron enfriadas de varias formas: natural al aire o rociadas con distintas cantidades de agua.

Se realizó la determinación de la Velocidad de Propagación de Impulsos Ultrasónicos, se estableció el Índice de Rebote con un Esclerómetro (mediante un martillo tipo Schmidt), de las distintas probetas, antes y después de exponerlas a las condiciones descritas en el párrafo anterior, para estimar la resistencia del hormigón, contrastándose estos resultados con la rotura de estas probetas a compresión, a los efectos de analizar el ajuste de los resultados obtenidos en estos dos Ensayos No Destructivos (END).

Cabe acotar que los resultados aquí presentados son parte de un programa de ensayos más amplio, que actualmente se está desarrollando, que además de los END aquí presentados, también se determinarán la resistencia del hormigón a la compresión y a la tracción indirecta, variación del Módulo de Elasticidad, así como la Absorción Capilar y la Penetración del Agua a Presión. Estos dos últimos parámetros son importantes para establecer las alteraciones que se presentan en la estructura de poros del hormigón y que se encuentran estrechamente relacionadas con la durabilidad remanente, de una estructura de hormigón que se haya expuesto a elevadas temperaturas.

## 2. Metodología Experimental

### 2.1 Características de las probetas y de los ensayos

Se elaboraron probetas cilíndricas normalizadas de 15 x 30 cm., de acuerdo a la Norma IRAM 1534<sup>(3)</sup>. Se sometió a las probetas de hormigón a condiciones similares a las que se presentan habitualmente en la práctica. Por este motivo, no fueron curadas según las normas, realizando una inmersión en agua, sino que se las colocó dentro de bolsas plásticas, durante unos 60 días. Durante los primeros 7 días, se las humedeció con un rociado superficial, día por medio. Luego se las expuso al ambiente de laboratorio (Temperatura  $\cong$  20 °C, Humedad Relativa  $\cong$  50 %), hasta la realización de los ensayos, que se efectuaron entre 45 y 90 días después.

El hormigón empleado en la elaboración de todas las probetas respondió a las características mencionadas en la Tabla 1. En total se moldearon aproximadamente ochenta probetas cilíndricas y actualmente se continúa trabajando en la realización de ensayos mecánicos y para la caracterización de la estructura de poros de los hormigones.

**Tabla 1. Características de los materiales que componen los hormigones.**

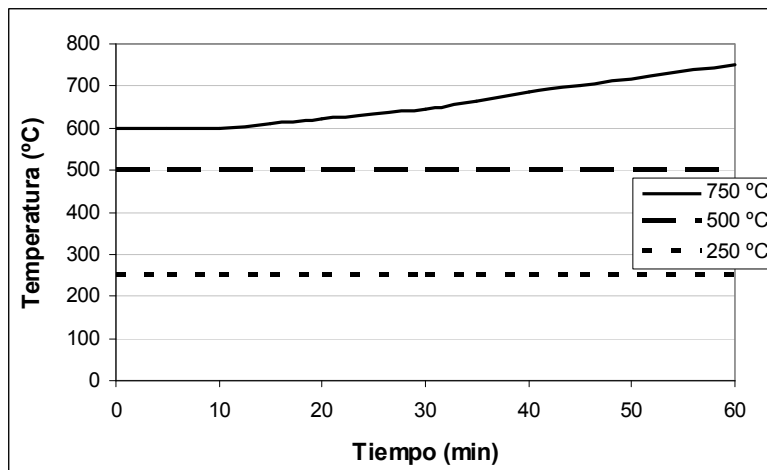
Mezcla N°	Kg de material / m <sup>3</sup> de hormigón		
	1	2	3
Contenido de cemento (Kg)	350	320	290
Árido fino (Arena natural granítica)	853	878	896
Árido grueso (Canto rodado silíceo, Tamaño Máx. Nominal: 25 mm)	1050	1050	1050
Relación Agua / Cemento	0,45	0,50	0,56
Aditivo Plastificante (% referido al peso de cemento)	0,35	0,35	0,35
Asentamiento (cm.)	8	9	9

En este estudio se consideraron como variables, los siguientes aspectos:

- Temperaturas de exposición: 20 °C (temperatura ambiente), 250 °C, 500 °C y 750 °C;
- Enfriamiento:
  - a) al aire: donde la temperatura ambiente es de aproximadamente 20 °C; y
  - b) en contacto con agua: se roció la probeta, una vez retirada del horno, con un volumen de 200 ml (Rociado 1) y 600 ml (Rociado 2) de agua, con el fin de simular el humedecimiento que se produce por la acción de los bomberos.

Cabe acotar que, originariamente, se había adoptado un tiempo de exposición a las altas temperaturas de 90 minutos, pero debió ser modificado, por que las probetas (que tenían la mayor relación agua/cemento) y habían estado expuestas a 750 °C, se rompían al sacarlas del horno, imposibilitándose la realización de cualquier tipo de ensayos. Esta

situación no es de extrañar, debido a que en este rango de temperaturas, la pérdida de resistencia es del orden del 70 % <sup>(1)</sup> o inferior, dependiendo del tipo de agregado. <sup>(4)</sup> Por estos motivos, se debió reducir el tiempo de exposición a 60 minutos. Además, no era intención trabajar con exposiciones más prolongadas, por ejemplo 24 hs, como se ha realizado en otras investigaciones, <sup>(1)</sup> debido a que se estaría simulando las acciones térmicas que se generan procesos industriales, más que las consecuencias que puede originar un incendio cuya duración, normalmente, es más limitada. En la Figura 2 se aprecia la ley de variación de la temperatura dentro del horno, para las tres temperaturas máximas adoptadas.



**Figura 2. Variación de la temperatura del horno, durante los ensayos.**

## 2.2 Método Esclerométrico

Este método de END permite determinar la dureza superficial del hormigón, con la que se puede inferir la resistencia mecánica del material que compone esta probeta. En ensayos en hormigón, habitualmente se usa el Esclerómetro tipo Schmidt, que consiste en un vástago, a lo largo del cual se desliza una masa puesta en movimiento por un resorte. Esta masa golpea contra un retén del vástago, con una cierta energía que se transmite al hormigón, el que sufre una deformación elastoplástica. Al recuperar el hormigón su deformación elástica, hace rebotar la masa, la que en movimiento arrastra una aguja sobre una escala graduada, donde se lee el Índice de Rebote o Índice Esclerométrico (IE).

En este trabajo se aplicaron 10 golpes, 5 en cada cara plana de la probeta, despreciándose las mediciones, para el promedio considerado, que diferían más de un 20 % del valor medio. Por otra parte, las probetas estaban ubicadas en posición horizontal y sostenidas, dentro de una prensa, que garantizó la inmovilidad de las probetas. Estas mediciones, al igual que las de la Velocidad de Propagación Ultrasónica se realizaron entre 48 y 72 hs. después de ser retiradas las probetas del horno.

## 2.3 Método de la Velocidad de Propagación Ultrasónica

El principio de funcionamiento de esta técnica consiste en un transductor transmisor electro-acústico, que produce ondas de alta frecuencia que se encuentra en contacto con

la superficie del hormigón. Estas atraviesan una distancia conocida hasta alcanzar a otro transductor receptor, que convierte la señal acústica en electrónica. Un circuito electrónico mide el tiempo de tránsito, con el que se determina la Velocidad del Impulso Ultrasónico (VU).

Para el hormigón endurecido, es posible demostrar teóricamente que cambios en la Velocidad de Propagación Ultrasónica, son proporcionales al contenido de cavidades, estructura de poros, fisuras y microfisuras en el hormigón de ensayo. Además, durante el proceso de fraguado, se demuestra experimentalmente que dicha velocidad se incrementa rápidamente, a medida que el hormigón gana resistencia. En términos generales, se puede decir que en los hormigones, a mayores Velocidades de Propagación se tienen mayores resistencias mecánicas. Por este motivo, esta es una de las técnicas más confiables y utilizadas como END.

En estas investigaciones se optó por emplear un equipo que trabaja con una frecuencia de 24 KHz, debido a que se realizaron mediciones con transductores que operan con 54 KHz, pero se descartó su uso, debido a que en varias de las probetas expuestas a 500 °C, no se pudieron realizar mediciones, por el grado de fisuración que presentaban. Mientras que con 750 °C, no se pudo realizar mediciones con ninguno de los dos transductores. La precisión de las lecturas fue de 0,1 µseg.

### 3. Resultados y Discusión

Como se puede apreciar en la Tabla 2, el valor del IE y de la VU es muy similar en los tres tipos de hormigón. Como es de imaginar, en función del tiempo transcurrido desde la realización de las probetas, no se puede esperar que se haya desarrollado un proceso de carbonatación superficial de estos hormigones, por lo que la resistencia inicial del hormigón estaría entre 180 y 200 kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 2. Valores medios del IE y VU del hormigón, antes de exponerse a temperaturas elevadas.**

Relación agua/cemento	Índice Esclerométrico	Velocidad Ultrasonidos (Km./seg.)
0,45	31	4,34
0,50	30	4,37
0,56	30	4,20

Realizando una inspección visual de las probetas, después de ser extraídas del horno, se aprecian cambios de color superficial de las mismas. Las expuestas a 250 °C, prácticamente, no poseen fisuras, pero poseen un color beige pálido, no apreciándose alteraciones en su interior. Mientras que la fisuración crece en la medida que aumenta la temperatura máxima de exposición y es mayor la relación agua / cemento. Las probetas que se expusieron a temperaturas de 500 °C poseen un color gris, mientras que las que estuvieron a 750 °C, tienen un color gris, un poco más claro que en el anterior escalón de temperatura y en el interior de estos dos grupos, aparecen variaciones en los colores de los agregados.

Por otra parte, cuando el hormigón sale del horno posee un determinado cuadro de fisuración; cuando se pone en contacto con el agua de rociado se incrementa, cuando se rocía el agua, esta casi instantáneamente se evapora, quedando algunos vestigios de humedad en las probetas, a las que se les aplicó 600 ml.

En la Figura 3 se aprecia una de las probetas que fue expuesta a una temperatura de 750 °C; se puede ver el importante cuadro de fisuración que presenta la misma y que el color de los agregados gruesos ha cambiado de color, debido a la acción del calor.

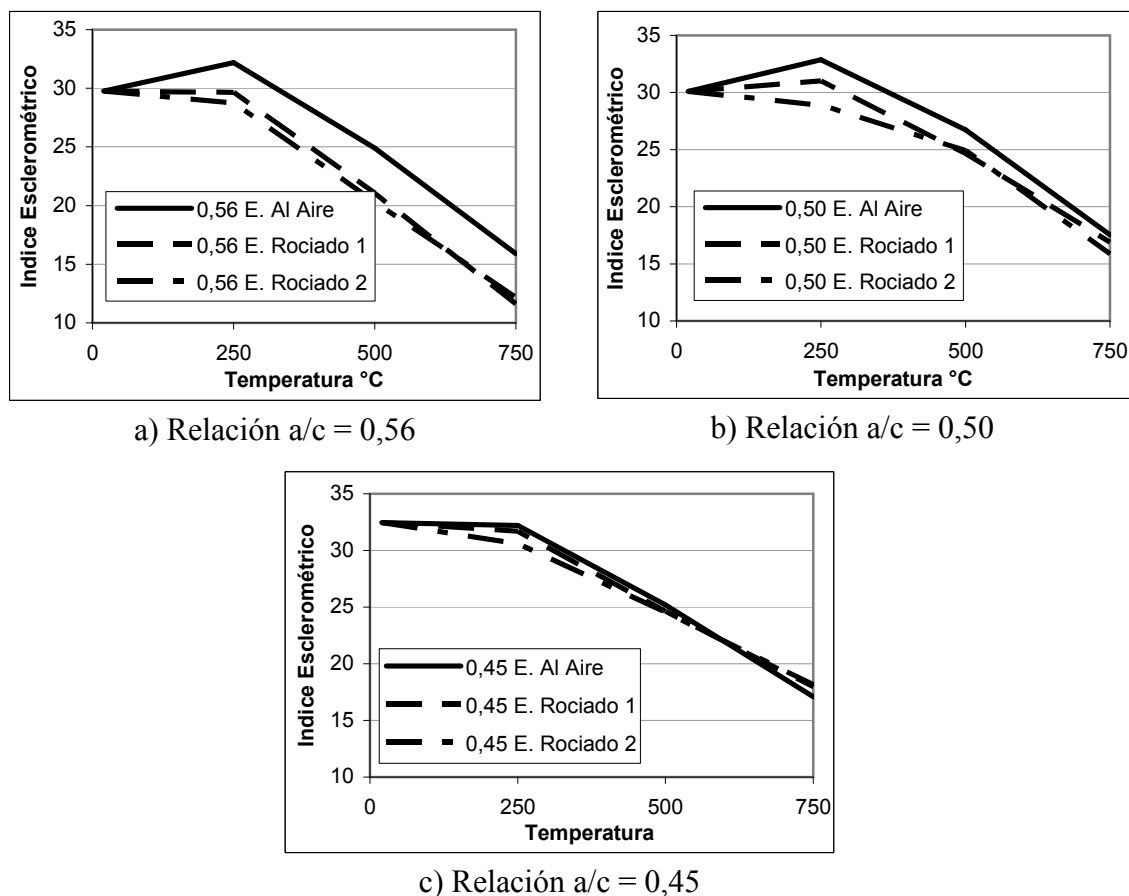


**Figura 3. Aspecto de una de las probetas con relación a/c = 0,55, enfriadas al aire y expuesta a 750 °C.**

### **3.2 Método Esclerométrico**

En la Figura 4 se presentan los resultados de las Esclerometrías realizadas, en función de la temperatura a la que estuvieron expuestas las probetas, agrupadas en función de la relación a/c del hormigón.

Como se puede apreciar la dureza superficial, que se mide con el IE, hasta los 250 °C, independientemente de la calidad del hormigón y del tipo de enfriamiento, se mantiene prácticamente constante. Existen pequeños incrementos, de hasta un 10 %, que se aprecian en la mayoría de los hormigones enfriados al aire. Esta aparente irregularidad se puede atribuir al hecho que, el hormigón dentro del horno perdió toda la humedad superficial, situación que hace que ficticiamente se incremente la dureza superficial, lo que podría llevar a pensar que el hormigón mejoró sus propiedades mecánicas. A partir de esta temperatura se produce un descenso brusco del IE, que en el caso de los hormigones con estructura de poros más abierta (a/c entre 0,50 y 0,56) se aprecia que el hormigón enfriado al aire posee un menor descenso del IE, mientras que los hormigones enfriados con los dos tipos de rociados, poseen un comportamiento similar.



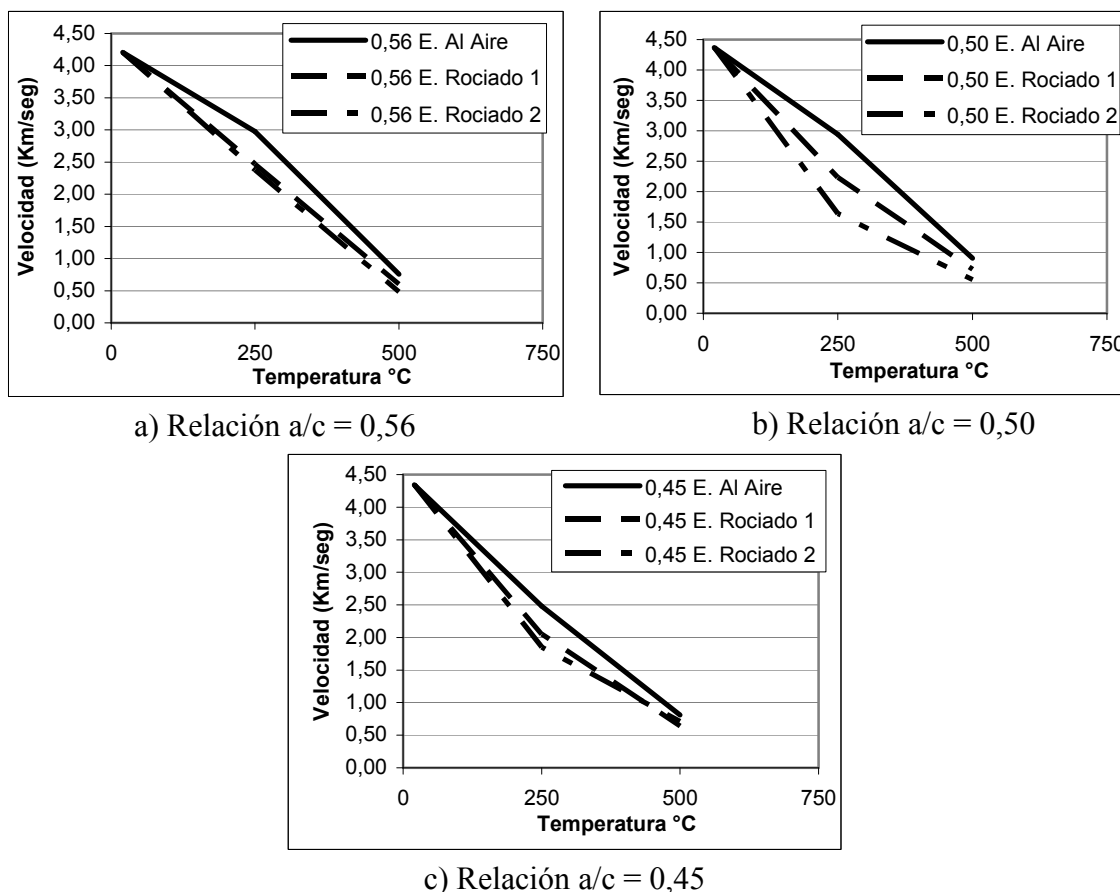
**Figura 4. Variación del IE, para las distintas relaciones a/c y diferentes formas de enfriamiento**

Con respecto al hormigón con estructura de poros más cerrada ( $a/c = 0,45$ ) y por ende más impermeable, el comportamiento es muy similar independientemente del tipo de enfriamiento, al que haya estado expuestas.

### 3.3 Método de la Velocidad de Propagación Ultrasónica

En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos en la medición de las Velocidades de Propagación de los Impulsos Ultrasónicos, en función de la temperatura a la que estuvieron expuestas las probetas, agrupados por la relación a/c.

Se aprecia que la VU desciende con una ley aproximadamente lineal, en función de la temperatura a la que fue expuesta la probeta del hormigón. La situación es similar en los dos tipos de rociados utilizados, mientras que, en forma similar a lo que se aprecia con el IE, el descenso de la VU es menor en la probeta enfriada al aire, que en las humectadas. No se pudieron realizar mediciones en las probetas expuestas a 750 °C, debido a la importante fisuración que presentan. Algo similar, también les ha ocurrido a otros autores, <sup>(5)</sup> con temperaturas algo inferiores, empleando procesos de calentamiento más lentos, por lo que el shock térmico había sido menor.



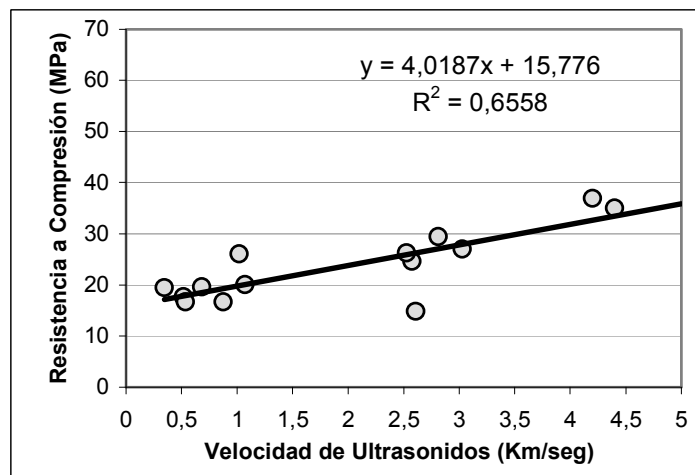
**Figura 5: Variación de la VU, para las distintas relaciones a/c y diferentes formas de enfriamiento**

Se considera que la determinación de la VU, es más representativa de la verdadera situación del hormigón de toda la probeta, que el IE, que solo tiene en cuenta lo que ocurre en la superficie, que en los casos presentados en este trabajo, es la zona más afectada por el calor.

Es importante destacar que cuando aparecen armaduras, las mediciones de la VU, se ve alterada, por la distinta densidad de armaduras. A mayor densidad de armaduras, mayor velocidad de propagación. Por este motivo, se la debe emplear con precaución.

Resulta interesante poder relacionar la Velocidad de Propagación de los Impulsos Ultrasónicos, con la Resistencia a Compresión del hormigón. Con este fin se realizó la Figura 6, donde se presenta una recta de regresión que se obtuvo con las determinaciones realizadas hasta el momento de redactar este trabajo, restando ensayar las probetas con una relación a/c = 0,45. Como se puede apreciar esta recta marca una tendencia, tal que con el incremento de la Velocidad, aumenta la Resistencia a Compresión. No obstante, debido a la existencia de una cierta dispersión de los resultados, es riesgoso dictaminar, para una determinada medición de Velocidad, un solo valor de Resistencia, sino que debería fijarse un intervalo de posibles Resistencias.





**Figura 6: Relación entre la Resistencia a Compresión y la Velocidad de Ultrasonidos.**

Es interesante comentar que cuando se sometieron a compresión, hasta llegar a la rotura, las probetas cilíndricas, siguiendo lo prescrito por la Norma IRAM 1546, <sup>(6)</sup> las que no habían estado sometidas a elevadas temperaturas (probetas testigos) y las que habían estado expuestas a 250 °C, rompieron en forma de cónica, como habitualmente ocurre. Mientras que las expuestas a temperaturas mayores, se rompieron siguiendo un plano de rotura casi horizontal. Este comportamiento anormal, evidentemente se debe a la influencia de las fisuras que presentan estos hormigones, después de ser expuestos a un sobrecalentamiento.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se muestra el grado de afectación que presenta el hormigón, ante las temperaturas elevadas, incrementándose los daños por la aparición de fisuras y microfisuras, cuando el enfriamiento se realiza con agua.

Como se ha podido apreciar, para el estudio y auscultación de estructuras de hormigón los dos END, que son de uso corriente para el análisis de este tipo de estructuras, permiten cuantificar este deterioro estructural, observándose notorios descensos del Índice Esclerométrico y de la Velocidad de Propagación de los Impulsos Ultrasónicos. No obstante, deben emplearse con cuidado, por tener limitaciones inherentes a cada ensayo. Se considera que para analizar el estado de deterioro es más confiable, el uso de la Velocidad de Propagación de los Impulsos Ultrasónicos, para cuantificar el deterioro mecánico.

#### Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur, por el apoyo brindado para el desarrollo de estas investigaciones.

## Referencias

1. Giaccio G., Tobes J.M., Torrijos M.C., Zerbino R.; “Comportamiento Mecánico de Hormigones Dañados por Temperatura”, Proceeding VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción CONPAT 2005, Cap. II, 17-24.
2. Bazant Z.P., Kaplan M.F.; “Concrete at High Temperatures. Material properties and mathematical models”. Concrete Design and Construction Series, Longman, 1996, p. 412.
3. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales; “Norma N° 1534, Hormigón: preparación y curado de probetas para ensayos de laboratorio”, 1985.
4. Barragán B., Di Maio A., Giaccio G., Traversa L., Zerbino R.; “Hormigones elaborados con distintos tipos de agregados expuestos a altas temperaturas”, Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, 7, 27-41, 1999.
5. Barragán B., Di Maio A., Giaccio G., Traversa L., Zerbino R.; “Características de hormigones expuestos a altas temperaturas”, Proceeding I Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón, AATH, Buenos Aires, 379-392, 1998.
6. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales; “Norma N° 1546, Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión”, 1992.