

EVALUACION DE HORMIGONES MEDIANTE ULTRASONIDO/ ESCLEROMETRIA

Por: Miretti, Romeo E. - Grether, Rudy O. - Passerino, Carlos R. - Carrasco, María F.

Resumen El presente trabajo sintetiza un programa de investigación referido a la aplicabilidad del método combinado ultrasonido-esclerometría para la estimación de la resistencia a compresión del hormigón, en el marco de la evaluación de estructuras.

Se analizan distintos tipos de correlación, estudiando para cada caso la confiabilidad de la estimación, de manera de establecer la situación que produzca menores valores de error. El análisis se efectúa dividiendo las muestras solamente en función del tipo de árido utilizado (canto rodado o piedra chancada). Se intenta así cuantificar la incertidumbre en las estimaciones que prescindan del empleo de otros factores de corrección (por ejemplo en función de el contenido de humedad, dosis de cemento, aditivos empleados, etc.).

Se concluye que, para ambos tipos de árido, la utilización del método combinado implica mejoras en la correlación y reducción de la amplitud de los intervalos de confianza de las estimaciones. No obstante, aún con el método combinado la amplitud de los intervalos de confianza obtenidos se considera elevada e inaceptable para una correcta estimación de la resistencia, cuando los valores de la resistencia del hormigón elaborado con árido chancado son inferiores a 30 MPa.

1. INTRODUCCION

La evaluación de estructuras con diferentes patologías, que hayan sufrido algún siniestro o sean objeto de un cambio de destino o uso, o cuyo hormigón posee una resistencia incierta es una situación que se presenta con una significativa frecuencia. En estos casos la estimación de la resistencia a compresión como indicador de la calidad, obviamente no el único, es de particular importancia y para ello el empleo de métodos no destructivos es de suma utilidad.

Las ventajas de los ensayos no destructivos radican en su relativa simplicidad, rapidez y en la posibilidad de realizar un gran número de determinaciones sobre la estructura sin alterar su resistencia y funcionalidad. De esta manera es factible evaluar la homogeneidad de la misma sin comprometer su integridad, como sí sucede en los casos en que es necesaria la extracción de testigos de hormigón endurecido para determinar su resistencia efectiva mediante su posterior ensayo a compresión en laboratorio.

Como contrapartida presentan el inconveniente de la compleja interpretación de sus resultados, habida cuenta

de las distintas variables que los afectan sobre todo cuando se hacen determinaciones sobre estructuras concretas y no a nivel de laboratorio. Esto es permanentemente constatado por trabajos de especialistas nacionales (Di Maio, 1982; Klaric y Fava, 1987; Colombino y Cáceres, 1987) que, por otra parte, ponen de manifiesto la amplia difusión que tienen los métodos de esclerometría y determinación de la velocidad de pulsos ultrasónicos en la Argentina.

En la bibliografía disponible referida a este tema se presentan factores de corrección cuya función es la de modificar las ecuaciones de estimación en base a un análisis detallado de distintas variables (Cianfrone y Faccaoru, 1979; Gallo-Curcio y Morelli, 1985). La utilización de estos factores exige un conocimiento de diversas características del hormigón a ensayar (tipo y tamaño de los áridos, clase de cemento, dosificación, relación agua/cemento, curado, aditivos empleados, etc.), que en la mayoría de los casos se ignoran por completo.

De esta manera la estimación de la resistencia efectiva del hormigón a partir de la sola aplicación de los ensayos no destructivos de esclerometría y ultrasonido conduce habitualmente a resultados con una incertidumbre muy elevada. Por estas razones se consideran más adecuados como un complemento, sumamente eficaz, para acompañar la extracción y ensayo de testigos, permitiendo correlacionar los resultados no destructivos y destructivos, y reducir sensiblemente la magnitud de estos últimos trabajos.

Cualquiera sea el caso, la implementación del análisis combinado de ambos ensayos no destructivos se estima permitirá reducir la incertidumbre en la estimación de la resistencia, con relación a las estimaciones hechas con ambos métodos en forma independiente.

2. OBJETIVO

El objetivo principal del presente trabajo es analizar la factibilidad y limitaciones para la aplicación del método combinado (ultrasonido - esclerometría) como procedimiento de estimación de la resistencia a compresión del hormigón

El estudio se realiza sobre un numeroso conjunto de resultados de ensayos que incluye hormigones de diversas características utilizados habitualmente en la zona, de manera de obtener estimadores (de validez general) que permitan su aplicación sin necesidad de recurrir a los diversos factores de corrección que generalmente se proponen (Gallo-Curcio y Morelli, 1985; Klaric y Fava, 1987).

3. TECNICA DE ENSAYO

3.1 Equipos

a) Ultrasonido

La determinación de la velocidad de pulsos ultrasónicos se realizó con un instrumento portátil Controls, modelo 58 E0046/Z, con una frecuencia de trabajo de 54 kHz. El equipo posee un display digital para indicación del tiempo de traspaso del pulso con una precisión 0.1 μ s. Se emplearon palpadores cilíndricos (emisores - receptores) con una frecuencia nominal de 54 kHz y una tensión de trabajo de 2.5 kV. La frecuencia de repetición del pulso seleccionada fue de 1 pulso/s.

Como medio de acople se utilizó gel de electromedicina con una consistencia tal que permitiera la correcta aplicación de los palpadores sin que se produzcan escurrimientos.

b) Esclerometría

Para la determinación del índice esclerométrico se empleó un esclerómetro tipo N, (energía de impacto 0,225 kgm), marca Cosacov, número 180587-2.

c) Compresión

Para la determinación de la resistencia a compresión se empleó una prensa hidráulica con una capacidad de carga de 1200 KN, marca MACOTEST-COSACOV.

3.2 Calibración de los equipos

a) Instrumento para la medición del tiempo de paso del pulso ultrasónico:

La calibración se realizó en forma rutinaria, con anterioridad a la realización de mediciones. Para esto, se utilizó la barra patrón correspondiente al instrumento. Es una pieza cilíndrica que se ubica entre los dos palpadores, haciendo contacto sobre sus caras planas, debiendo obtenerse una determinada lectura de tiempo de traspaso. En caso de no ser así el equipo permite la calibración mediante un ajuste de las lecturas.

b) Esclerómetro:

Se tomaron lecturas con el instrumento sobre un yunque de acero, en su cara plana y pulida. En este caso se constata la constancia de lecturas a través del tiempo a fin de detectar una eventual alteración del equipo y proceder a su ajuste.

c) Prensa hidráulica:

Se realizó el contraste de la prensa utilizando una celda tipo Emery, calibrada por el CITSAFE (Centro de Investigación Tecnológica de la Provincia de Santa Fe) del Sistema INTI.

3.3 Procedimientos de ensayo

Para la determinación del índice esclerométrico se

aplicó el procedimiento especificado en la Norma IRAM 1694:1989 "Hormigón de cemento Portland. Método de ensayo de la dureza superficial del hormigón endurecido mediante la determinación del número de rebote empleando el esclerómetro de resorte."

Para la determinación de la velocidad de pulsos ultrasónicos se siguió el procedimiento especificado en la Norma IRAM 1683:1990 "Hormigón de cemento Portland. Método para la determinación de la velocidad de pulsos ultrasónicos."

Para la determinación de la resistencia a compresión se utilizó el procedimiento especificado en la Norma IRAM 1546:1992 "Hormigón de cemento Portland. Método de ensayo a compresión".

3.4 Elementos ensayados

Se ensayaron 313 probetas, determinándose para cada una de ellas los correspondientes valores de velocidad de pulso ultrasónico, índice esclerométrico y resistencia a compresión.

Las muestras evaluadas fueron probetas ensayadas en el Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe, en el marco de las tareas de servicios prestadas a diferentes instituciones y empresas constructoras. Debido a que los hormigones estudiados provienen en su totalidad de obras de la zona, puede decirse que esta investigación tiene un carácter de aplicación regional. Por otra parte, esta condición hace que estos hormigones sean suficientemente representativos de aquellos con los cuales se han construido las estructuras a estudiar y además que se reduzca la influencia de diversos factores ya que las características de los materiales involucrados (cemento, árido grueso, árido fino, agua de amasado) pueden considerarse suficientemente homogéneas.

Todos los elementos ensayados fueron probetas cilíndricas normales (diámetro y altura promedio de 15 cm y 30 cm respectivamente). La determinación de la altura de la probeta se realizó con una precisión de ± 1 mm y la del diámetro con una precisión de $\pm 0,1$ mm. Las probetas fueron ensayadas a edades comprendidas entre los 7 y 28 días.

Los áridos gruesos constituyentes de las mismas fueron:

- piedra chancada granítica
- canto rodado silíceo

Debido a que las probetas fueron moldeadas por terceros, no se tuvo conocimiento de la dosificación correspondiente, así como tampoco de las características de los materiales componentes del hormigón, a excepción del tipo de árido grueso utilizado, apreciado visualmente.

3.5 Determinaciones y Resultados

Se realizaron análisis estadísticos de la longitud de traspaso (altura) y dimensiones transversales de las probetas, cuyos resultados se detallan a continuación:

Variación de las dimensiones transversales

- El diámetro más frecuente estuvo comprendido entre los valores de 15,00 y 15,05 cm, que corresponde al 26,2% de las probetas.
- Los valores de los límites inferior y superior para el diámetro se encuentran comprendidos en los intervalos correspondientes a [14,85 ; 14,90) y [15,35 ; 15,40), respectivamente.
- El 93,6% de los diámetros se encuentran comprendidos entre 14,90 y 15,25 cm.

Variación de la longitud de traspaso

- La longitud de traspaso más frecuente está comprendida entre los valores de 30,0 y 30,2 cm, que corresponde al 49,00% de las probetas.
- Los valores de los límites inferior y superior para la longitud de traspaso se encuentran comprendidos en los intervalos correspondientes a [29,0 ; 29,2) y [30,4 ; 30,6), respectivamente.
- El 96,17% de las longitudes de traspaso se encuentran comprendidas entre 29,6 y 30,6 cm.
- La precisión de la determinación de la altura de la probeta (longitud de traspaso) ya señalada de ± 1 mm, puede inducir un error máximo de aproximadamente 0,3 % en la determinación de la velocidad del pulso, considerando una longitud de traspaso de 30 cm.

3.6 Velocidad del pulso ultrasónico

La determinación de la velocidad del pulso ultrasónico se realizó en todos los casos empleando la medición en forma directa, colocando los palpadores en las caras opuestas de las probetas, dado que la energía máxima del pulso es dirigida directamente hacia el transductor receptor, obteniéndose la mayor sensibilidad (Comisión END-AATH 1988). Para cada probeta sometida al estudio se realizaron 3 determinaciones del valor de tiempo de paso, que luego se promediaron.

En los casos en que la superficie destinada al apoyo de los palpadores no era suficientemente lisa se utilizó una piedra de desgaste para obtener condiciones adecuadas en ese área, empleándose luego gel de electromedicina como interfase de contacto.

La velocidad de traspaso se obtiene según la fórmula:

$$V = \frac{L \cdot 10^6}{T}$$

siendo:

V = velocidad de los pulsos ultrasónicos, en m/s

L = longitud de paso, en m.

T = tiempo de paso promedio, en μ s.

3.7 Índice esclerométrico

Debido a que la edad de las probetas no superó los 28 días, no se consideró la influencia de la carbonatación en las lecturas, ni se procedió a realizar desgaste en la zona de

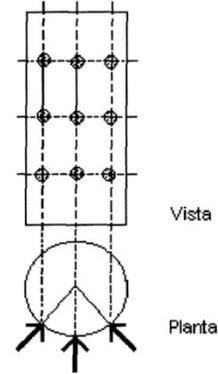


Figura 1. Determinaciones de rebote

aplicación del instrumento. Estudios anteriores realizados por este laboratorio indican que la influencia de la carbonatación es despreciable para probetas jóvenes (de 25 a 60 días) (Miretti, 1995)

Las mediciones se realizaron con el esclerómetro en posición horizontal, aplicándose sobre la probeta una carga de compresión de aproximadamente un 15 % del valor estimado de rotura. Se realizaron 9 determinaciones, según la Figura 1, obteniéndose luego el promedio correspondiente a cada probeta.

3.8 Resistencia a compresión

Se determinó la resistencia a compresión cilíndrica de las probetas en las cuales previamente se tomaron lecturas de velocidad del pulso ultrasónico e índice esclerométrico, según las especificaciones de la Norma IRAM 1546(1992).

4. CORRECCIONES

4.1 Influencia de las dimensiones transversales

La norma IRAM 1683 (1990) indica que la velocidad del pulso ultrasónico es independiente del tamaño y forma de la muestra a menos que la medida lateral sea menor que un cierto valor mínimo. Por debajo de ese valor, la velocidad del pulso puede reducirse apreciablemente. Esta reducción depende principalmente de la relación entre la longitud de onda del pulso y la medida lateral, pero resulta insignificante si esta relación es menor que la unidad.

Dado que:

$$\lambda = \frac{V}{F}$$

donde:

λ = longitud de onda del pulso, en m

V = velocidad de los pulsos ultrasónicos, en m/s

F = frecuencia, en Hz

y considerando para el presente caso una velocidad máxima

de propagación de 4.500 m/s y la frecuencia de 54 kHz empleada, la longitud de onda resulta:

$$\lambda = \frac{4.500 \text{ m/s}}{54.000 \text{ Hz}} = 0.083 \text{ m}$$

Debido a que en todos los casos el diámetro rondó el valor de 0,15 m, la relación resultante entre la longitud de onda y el diámetro de las probetas no superó el valor de:

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{0.083 \text{ m}}{0.150 \text{ m}} = 0.55$$

en virtud de lo cual no se efectuaron correcciones por influencia de las dimensiones transversales.

4.2 Influencia de las dimensiones longitudinales

La norma IRAM 1683 (1990) recomienda que la longitud de traspaso de los elementos de hormigón estudiados mediante mediciones de pulsos ultrasónicos realizadas en forma directa no sea menor que 0,15 m. Indica, asimismo, que la aplicación de ecuaciones de estimación obtenidas para una determinada longitud de traspaso induce errores cuando se las utiliza en piezas cuya dimensión longitudinal varía sensiblemente.

Otros investigadores (Di Maio et al) han cuantificado la incidencia de la longitud de traspaso sobre la velocidad del pulso obtenida, informando incrementos del orden del 2 al 3 % en la velocidad para longitudes de traspaso variando entre 15 y 30 cm.

Dado que en las probetas estudiadas la variación máxima en la longitud de traspaso fue de tan sólo 1,6 cm, no se consideró necesario realizar correcciones por variación de las dimensiones longitudinales.

No obstante debería contemplarse esta influencia si se pretende aplicar los resultados de estas pruebas a evaluaciones in situ, en las que las longitudes de traspaso difieran sensiblemente de las empleadas.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis estadístico de los resultados obtenidos se realizó mediante curvas de correlación empleando el método de los mínimos cuadrados.

Primeramente se realizaron correlaciones simples entre la resistencia y los resultados de los ensayos no destructivos, en forma separada para cada uno de ellos, para plantear luego la aplicación del método combinado mediante combinaciones lineales de ambas regresiones.

En una segunda etapa se realizaron correlaciones dobles (multivariables) que permitieron obtener directamente los estimadores del método combinado como funciones de los resultados de ambos ensayos no destructivos.

5.1 Correlaciones simples (análisis bivariable)

En este caso se relacionó la resistencia a compresión, en forma independiente, con la velocidad de pulso ultrasónico y con el índice esclerométrico, obteniéndose en cada caso el valor de la resistencia como función de cada uno de estos parámetros.

En las Figuras 2 y 3 se muestran las gráficas de las funciones de regresión obtenidas para el conjunto total de probetas ensayadas (ultrasonido y esclerometría respectivamente).

Los mismos resultados se presentan en las Figuras 4 y 5 para los hormigones con árido de piedra chancada y en las Figuras 6 y 7 para los hormigones con árido de canto rodado.

En todos los casos se estudiaron las regresiones con funciones lineales y potenciales, seleccionando aquellas con mejor nivel de correlación.

Se puede observar que las determinaciones del índice esclerométrico tienen una mejor distribución que las de la velocidad de pulso ultrasónico, tanto para el análisis de los hormigones con árido de piedra chancada como para el análisis general. En el caso de hormigones con árido de canto rodado la situación es inversa: es la correlación con la velocidad de pulso ultrasónico la que resulta más confiable.

El grado de ajuste de las distintas funciones de regresión se analizó a través del coeficiente de determinación definido por la siguiente expresión (Chou 1977):

$$r^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT} = \frac{SCR}{SCT}$$

donde:

$$SCE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

$$SCE = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$$

$$SCR = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

siendo:

SCE = suma de cuadrados por errores residuales

SCT = variación total

SCR = variación explicada

Y = observación individual

\hat{Y}_i = valor estimado

\bar{Y} = valor medio de todas las observaciones

El coeficiente de determinación se obtiene por el método de análisis de la varianza, descomponiéndola en porciones significativas y distintas. La variancia se separa en tres valores que representan las distancias de las observaciones individuales respecto del valor medio de la muestra (SCT), del valor estimado (SCE) y de los valores estimados respecto del valor medio de la muestra (SCR), respectivamente.

En la ecuación anterior se aprecia que el valor de r^2 varía entre 0 y 1. Si SCE = 0, entonces $r^2 = 1$, lo que indica

que todos los puntos del diagrama de dispersión se encuentran sobre la línea de regresión de la muestra. Si $SCE = SCT$, entonces $r^2 = 0$, lo que indica que el error total de la estimación es producto del error residual, esto es, el error debido a la dispersión no explicada de las observaciones.

Se observó que los coeficientes de determinación más cercanos a 1 se obtienen para funciones potenciales en el caso de la velocidad de pulso ultrasónico y para funciones lineales en el caso del índice esclerométrico.

En base a estas curvas de correlación se estableció un estimador de la resistencia a compresión cilíndrica del hormigón como combinación lineal de las ecuaciones de regresión individuales. Las combinaciones lineales se formularon con coeficientes de ponderación de cada una de las ecuaciones de estimación (ultrasonido y esclerometría), proporcionales a sus respectivos coeficientes de determinación. Los resultados se sintetizan en la Tabla 1.

Como era dable esperar, las expresiones de la resistencia en función de los resultados de ambos ensayos no destructivos son funciones espaciales convexas (de curvatura doblemente positiva). Este es el tipo de función que corresponde habitualmente a estas correlaciones (Cianfrone y Faccaoru, 1979; Gallo-Curcio y Morelli, 1985).

5.2 Correlaciones dobles (análisis multivariable)

Para el análisis de correlación múltiple se ensayaron funciones lineales y potenciales, obteniéndose los mejores resultados para las funciones lineales aplicadas a ambos parámetros.

La representación gráfica de los parámetros analizados puede realizarse en el espacio empleando dos ejes ($x - y$) para los resultados de los ensayos no destructivos y un tercer eje (z) para las resistencias de ensayo y resistencias estimadas. En este sistema de representación la función de regresión se manifiesta como una superficie (un plano en el caso de regresión doblemente lineal) que compensa una nube espacial de puntos correspondientes a los valores de ensayo.

Dada la dificultad que presenta este tipo de representación para apreciar cualitativamente el grado de correlación obtenido, se optó por representar en el plano la resistencia estimada con las funciones de correlación, en función de la resistencia real obtenida en el ensayo a compresión.

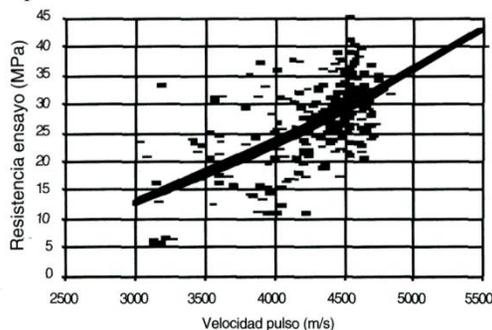


Fig. 2. Correlación general entre la resistencia a compresión y la velocidad del pulso ultrasónico.

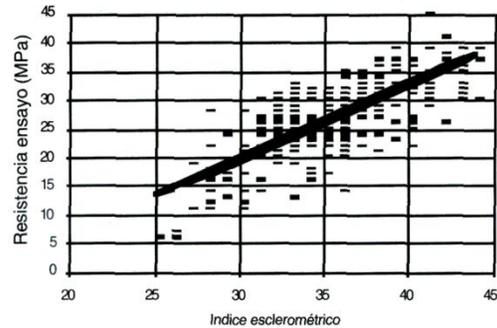


Fig. 3. Correlación general entre la resistencia a compresión y el índice esclerométrico.

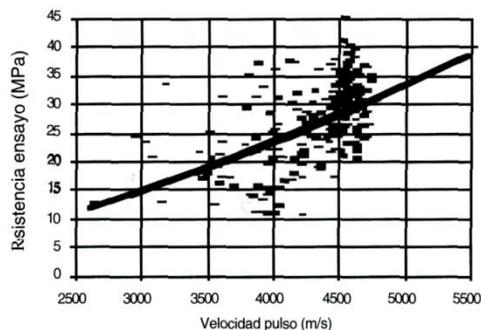


Fig. 4. Correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad del pulso ultrasónico para hormigones con árido grueso tipo piedra chancada.

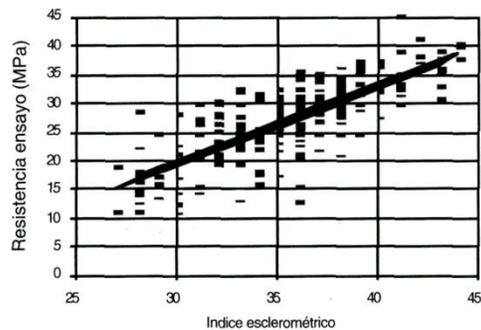


Fig. 5. Correlación entre la resistencia a compresión y el índice esclerométrico para hormigones con árido grueso tipo piedra chancada.

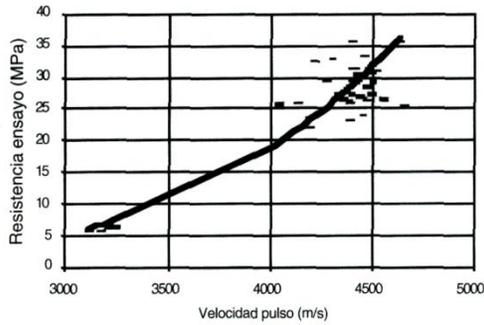


Fig. 6. Correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad del pulso ultrasónico para hormigones con árido grueso tipo canto rodado.

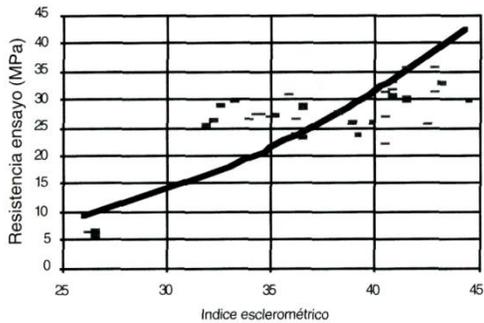


Fig. 7. Correlación entre la resistencia a compresión y el índice esclerométrico para hormigones con árido grueso tipo canto rodado.

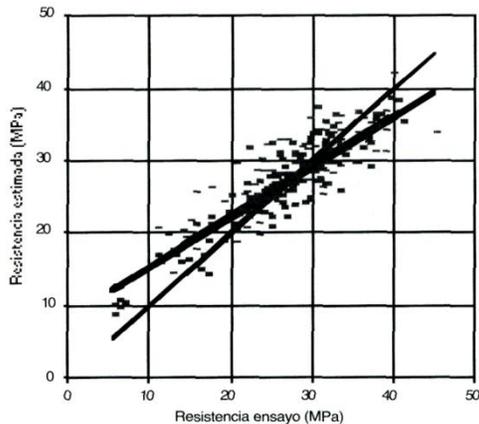


Fig. 8. Comparación general entre la resistencia de ensayo y la resistencia estimada mediante una correlación múltiple de tipo lineal con los END.

En las Figuras 8 y 9 se representan los resultados obtenidos para el total de probetas ensayadas, mientras que los resultados correspondientes a los grupos con distinto tipo de árido grueso se representan en las Figuras 10 y 11 (piedra chancada) y 12 y 13 (canto rodado).

En el caso de la regresión múltiple, la evaluación de la calidad de la correlación se realizó mediante el coeficiente de determinación definido por la siguiente expresión (Chou, 1997):

$$r^2 = \frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}$$

donde cada uno de los r_{ij} indica el coeficiente de determinación parcial, es decir, referido sólo al comportamiento de la variable i respecto de la variable j .

Cada uno de los coeficientes de determinación parciales está definido de la misma forma que los coeficientes indicados para el caso de regresión simple, es decir en función del método de análisis de la varianza.

Las diferentes funciones de correlación y sus coeficientes de determinación (r^2) se encuentran sintetizados en la Tabla 2.

Al igual que en el caso de las funciones obtenidas a partir de regresiones simples, las ecuaciones de regresión son funciones espaciales convexas (de curvatura doblemente positiva).

5.3 Determinación de intervalos de confianza:

En base a las regresiones múltiples, para las que se obtuvieron coeficientes de determinación más cercanos a 1, se calcularon los límites de los intervalos de confianza del 90% para la resistencia "real" o de ensayo como función de la resistencia estimada a partir de los ensayos no destructivos. Para esta evaluación se procedió a dividir los valores de resistencia estimada en intervalos de 5 MPa de amplitud, efectuando el cálculo de los valores límites de resistencia a compresión de ensayo, aplicando las técnicas habituales de estimación de parámetros en cada uno de los intervalos así definidos.

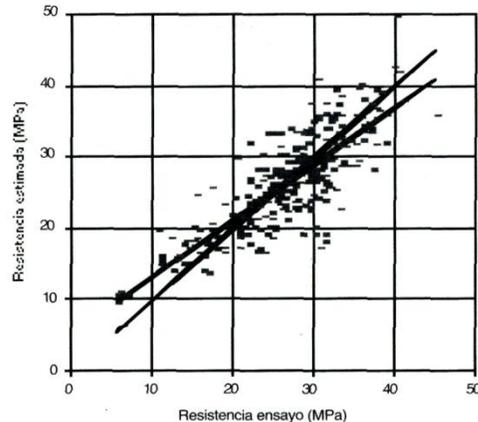


Fig. 9. Comparación general entre la resistencia de ensayo y la resistencia estimada mediante una correlación múltiple de tipo potencial con los END.

Tabla 1. Funciones de correlación y coeficientes de determinación entre resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico e índice esclerométrico (análisis bivariable).

Método	Función de correlación	Error estándar de la estimación
Árido: piedra chancada		
Ultrasonido	$\sigma = 4,31 \times 10^{-5} \cdot V^{1,59}$	$r^2 = 0,280$
Esclerometría	$\sigma = 1,35 \cdot N - 21,1$	$r^2 = 0,610$
Método combinado	$\sigma = 1,35 \times 10^{-5} \cdot V^{1,59} + 0,925 \cdot N - 14,4$	$r^2 = 0,726$
Árido: canto rodado		
Ultrasonido	$\sigma = 9,26 \times 10^{-16} \cdot V^{4,53}$	$r^2 = 0,927$
Esclerometría	$\sigma = 6,93 \times 10^{-4} \cdot N^{2,91}$	$r^2 = 0,705$
Método combinado	$\sigma = 5,26 \times 10^{-16} \cdot V^{4,53} + 2,98 \times 10^{-4} \cdot N^{2,91}$	$r^2 = 0,908$
Árido: general		
Ultrasonido	$\sigma = 1,5 \times 10^{-6} \cdot V^{1,95}$	$r^2 = 0,358$
Esclerometría	$\sigma = 1,29 \cdot N - 19,3$	$r^2 = 0,587$
Método combinado	$\sigma = 5,69 \times 10^{-7} \cdot V^{1,99} + 0,801 \cdot N - 12,0$	$r^2 = 0,694$

donde:

- σ = Resistencia a compresión, en MPa
- V = Velocidad de pulso ultrasónico, en m/s
- N = Índice esclerométrico, en unidades para esclerómetro tipo "N"

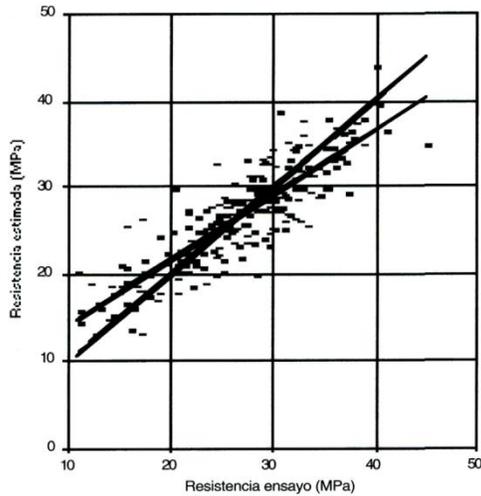


Fig. 10. Comparación general entre la resistencia de ensayo y la resistencia estimada mediante una correlación múltiple lineal con los END, para hormigones con árido tipo piedra chancada.

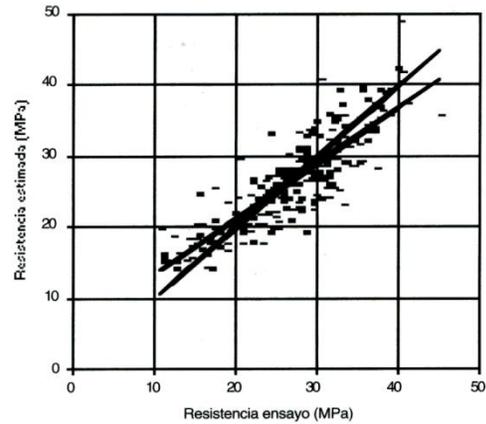


Fig. 11. Comparación general entre la resistencia de ensayo y la resistencia estimada mediante una correlación múltiple de tipo potencial con los END, para hormigones con árido tipo piedra chancada.

Tabla 2. Funciones de correlación y coeficientes de determinación entre resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico e índice esclerométrico (correlación múltiple mediante análisis multivariable)

Método	Función de correlación	Error estándar de la estimación
Árido: piedra chancada		
Método combinado	$\sigma = 0,00680 \cdot V + 1,21 \cdot N - 45,3$	$r^2 = 0,748$
	$\sigma = 2,45 \times 10^{-6} \cdot N^{1,75} \cdot V^{1,15}$	$r^2 = 0,711$
Árido: canto rodado		
Método combinado	$\sigma = 0,0127 \cdot V + 0,581 \cdot N - 49,2$	$r^2 = 0,925$
	$\sigma = 1,10 \times 10^{-13} \cdot N^{1,03} \cdot V^{3,51}$	$r^2 = 0,904$
Árido: general		
Método combinado	$\sigma = 0,00603 \cdot V + 1,10 \cdot N - 37,9$	$r^2 = 0,624$
	$\sigma = 1,19 \times 10^{-6} \cdot N^{1,75} \cdot V^{1,27}$	$r^2 = 0,632$

donde:

- σ = Resistencia a compresión, en MPa
- V = Velocidad de pulso ultrasónico, en m/s
- N = Índice esclerométrico, en unidades para esclerómetro tipo "N"

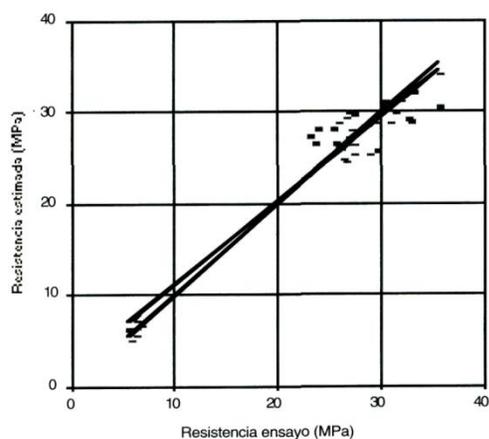


Fig. 12. Comparación entre la resistencia de ensayo y la resistencia estimada mediante una correlación múltiple de tipo lineal con los END, para hormigones con árido tipo canto rodado.

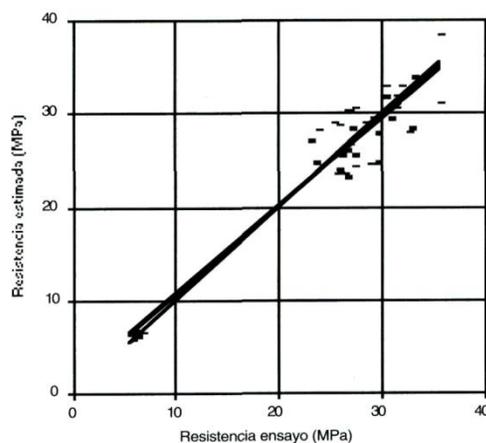


Fig. 13. Comparación entre la resistencia estimada mediante una correlación múltiple potencial con los END, para hormigones con árido tipo canto rodado.

En la Tabla 3 se detallan los resultados de este análisis, cuya finalidad es evaluar el grado de incertidumbre que afecta las estimaciones de la resistencia a compresión efectuadas en función de las determinaciones del índice esclerométrico y la velocidad de los pulsos ultrasónicos. En las figuras 14 y 15 se representan gráficamente los mismos resultados.

Del análisis de las Tablas 1 y 2 se desprende claramente que las características mineralógicas del árido grueso del hormigón evaluado tienen un efecto muy importante sobre las estimaciones de la resistencia a compresión ya que las curvas de correlación responden a funciones muy diferenciadas para cada uno de los grupos

analizados (piedra chancada y canto rodado). Debe descartarse, por lo tanto, la posibilidad de emplear una única curva o función de correlación que incluya a ambos tipos de árido.

En efecto, las correlaciones se ven afectadas por dispersiones que pueden conducir a errores en las estimaciones de la resistencia a compresión cuya semiamplitud máxima, para valores de estimación con 90% de confianza, varía entre 19 % para hormigones con árido de canto rodado y 32% para hormigones con árido de piedra chancada. **La inclusión de ambos tipos de árido en un análisis único eleva esta semiamplitud a un 62 %.**

Tabla 3. Máxima amplitud de intervalo de confianza (90%) para las estimaciones de resistencia mediante el método combinado

Tipo de árido grueso del hormigón	Tipo de correlación multivariable $\sigma = f(V, N)$	Intervalo de mayor dispersión (MPa)	Límites para valores de estimación con 90% de confianza		
			Inferior (MPa)	Superior (MPa)	Semiamplitud relativa (%)
General	Potencial - Potencial	15	7,2	25,7	± 61,7
Piedra chancada	Lineal - Lineal	20	13,57	26,43	± 32,0
Canto rodado	Lineal - Lineal	5	5,08	6,96	± 18,8

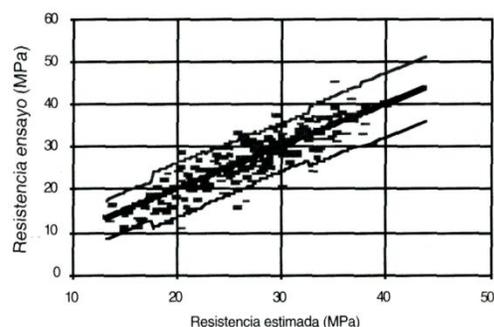


Fig. 14. Intervalos de confianza correspondientes al 90% para hormigones con árido tipo piedra chancada.

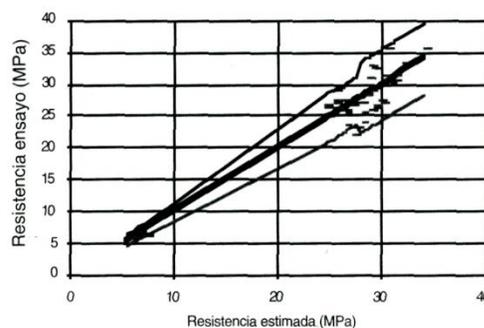


Fig. 15. Intervalos de confianza correspondientes al 90% para hormigones con árido tipo canto rodado.

Sin embargo, se verificó en todos los casos que el comportamiento de las curvas de correlación mejora cuando se trabaja con ambas determinaciones en forma combinada, reduciéndose de esta manera los errores en las estimaciones.

Esto se aprecia claramente por el aumento que manifiestan los coeficientes de determinación r^2 al pasar de una correlación simple a una correlación múltiple (ver Tablas 1 y 2), como así también por la reducción que presenta la amplitud de los intervalos de confianza en el mismo caso, excepto en el caso del hormigón con árido de canto rodado para el cual la estimación realizada mediante la velocidad de pulsos ultrasónicos presenta un mejor comportamiento.

En la Tabla 3 se han indicado las **máximas** amplitudes de los intervalos de confianza (correspondientes en general a los menores niveles de resistencia) que, según el caso, pueden reducirse sensiblemente. A modo de ejemplo, se representa en la Figura 16 la variación de estas amplitudes en función de los distintos niveles de resistencia, para el grupo de probetas de hormigón con piedra chancada, donde se aprecia que la semiapertura máxima del 32 % se reduce en general a menos del 20%. Lo mismo sucede para el caso del canto rodado (Figura 17) y para el conjunto total de probetas.

Formas de representación de fácil visualización y practicidad son las constituídas por curvas de igual velocidad de pulso ultrasónico o isoresistentes, las primeras en función de la resistencia y el número de rebote y la segunda en función de la velocidad y el número de rebote, como se ejemplifica en la Figura 18

6. CONCLUSIONES

A partir de las consideraciones mencionadas, relativas a las experiencias concretas motivo del presente estudio, puede concluirse que:

- para los hormigones con árido de piedra chancada las estimaciones de la resistencia a compresión cilíndrica a partir del índice esclerométrico presentan mejor correlación que las realizadas a partir de la velocidad de pulso ultrasónico. Para los hormigones con árido de canto rodado la situación se invierte.
- debe descartarse la posibilidad de realizar estimaciones de resistencia que prescindan del tipo de árido, ya que se obtienen incertidumbres demasiado elevadas, tanto si se emplea uno solo de los ensayos no destructivos como si se emplean ambos en forma combinada.
- para ambos tipos de árido, la utilización del método combinado implica mejoras en la correlación y reducción de la amplitud de los intervalos de confianza de las estimaciones, con relación a las correlaciones simples de la resistencia con uno solo de los ensayos no destructivos, con excepción de la estimación realizada para el árido de canto rodado mediante la velocidad de pulsos ultrasónicos.
- aún con el método combinado la amplitud de los intervalos de confianza obtenidos ($\alpha = 0.1$) se considera elevada e inaceptable para una correcta estimación de la resistencia, salvo para niveles medios de resistencia del hormigón, en que puede reducirse a niveles del 20 % de

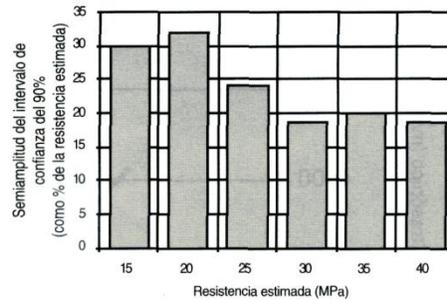


Fig. 16. Semiapertura de los intervalos de confianza del 90 % para la estimación de la resistencia a compresión. Método combinado, hormigón con árido de piedra chancada.

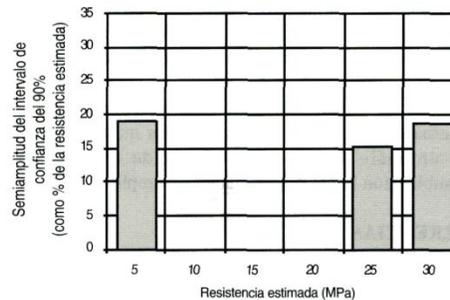


Fig. 17. Semiapertura de los intervalos de confianza del 90 % para la estimación de la resistencia a compresión. Método combinado, hormigón con árido de canto rodado.

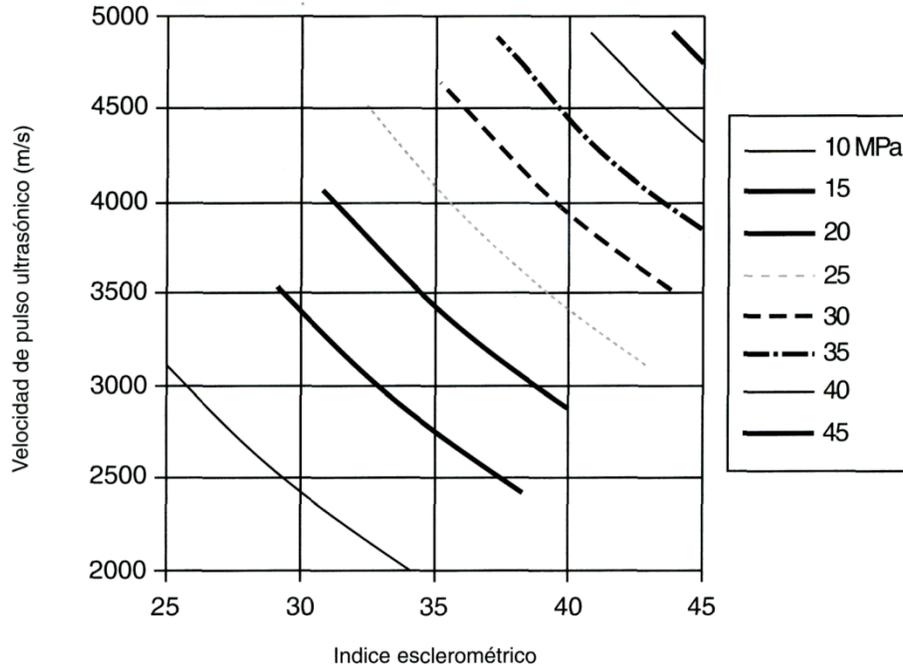


Fig. 18. Curvas de igual resistencia, en función del índice esclerométrico y de la velocidad del pulso ultrasónico. Método combinado, hormigón con árido de piedra chancada.

la resistencia estimada (hormigones de piedra chancada con resistencias del orden de 30-35 MPa) o del 15-20% (hormigones de canto rodado con resistencias del mismo orden).

No surge una diferencia significativa entre la alternativa de emplear una correlación múltiple basada en un análisis multivariable o la de emplear una combinación lineal de correlaciones simples.

REFERENCIAS

- [Cianfrone F., Facaoaru I. (1979)] **Study on the introduction into Italy in the combined non-destructive method, for the determination of in situ concrete strength.** Materials and Structures, Vol. Nro. 71, pp. 413-424. Ed. Bordas-Dunod.
- [Colombino C., Cáceres E. (1987)] **Parámetros obtenidos por medios ultrasónicos y electromagnéticos en hormigones de estructuras resistentes. Experiencia regional.** 8° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Villa Carlos Paz (Argentina).
- [Comisión de END - AATH (1988)] **Recomendación: método de los pulsos ultrasónicos.** Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Buenos Aires (Argentina).
- [Chou, Ya Lun (1977)] **Análisis estadístico.** Nueva Editorial Interamericana, Buenos Aires (Argentina).
- [Di Maio A. (1982)] **Evaluación de las características de**

los hormigones por métodos no destructivos. 5° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, La Plata (Argentina).

- [Di Maio A., Giovambattista A., Traversa L. (1983)] **Aplicación de métodos combinados para estimar la resistencia del hormigón en estructuras construídas.** Proceedings XII Reunión del Grupo Latinoamericano de RILEM. Santiago (Chile).

- [Gallo-Curcio A., Morelli G. (1985)] **Recherche statistique paramétrique du rapport résistance-índice sclérométrique: essai de définition de la classe des bétons.** Materials and Structures, Vol. 18, Nro. 103, pp. 67-73, Ed. Gauthier-Villars.

- [Klaric M., Fava C. (1987)] **Parámetros de referencia para la evaluación del hormigón en estructuras mediante ultrasonido.** 8° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Villa Carlos Paz (Argentina).

- [Miretti, R. y otros (1995)] **Experiencias para la puesta a punto del esclerómetro aplicado a probetas jóvenes de hormigón.** Informe interno CECOVI

Miretti, Romeo E., Ingeniero Civil. Docente de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) y de la Universidad Nacional del Litoral (UNL). Profesor Titular de la Cátedra de Tecnología del Hormigón de la UTN (Facultad Regional

Santa Fe). Director del Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI) de la Universidad Tecnológica Nacional. Este Centro es el foco de relacionamiento de la UTN con el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, del cual es Miembro Correspondiente. El Ing. Miretti es miembro de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón y del American Concrete Institute.

Grether, Rudy O., Ingeniero en Construcciones. Docente de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) y de la Universidad Católica de Santa Fe. Profesor Titular de la Cátedra de Tecnología de los Materiales de la UTN (Facultad Regional Santa Fe). Director del Área Servicios y Transferencia de Tecnología del CECovi (UTN).

Passerino, Carlos., Ingeniero en Construcciones. Docente investigador de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Director del Área Materiales del CECovi (UTN).

Carrasco, María F., Técnica Constructora Nacional. Estudiante de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Becaria del CECovi (UTN)

Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI)

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe

Lavalse 610 - (3000) Santa Fe - Argentina

Miembro Correspondiente del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (España)