

Efecto del contenido de agua sobre la resistencia y la velocidad de pulso ultrasónico del concreto

Effect of the Water Content on the Strength and the Ultrasonic Pulse Velocity of Concrete

LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ

Ingeniera metalúrgica, especialista en Docencia Universitaria, magíster en Ingeniería Metalúrgica, docente de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Contacto: luzquint@uis.edu.co

RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ

Ingeniero civil, doctor en Ciencias Técnicas, docente de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Contacto: racruz@uis.edu.co

DEYCI YAMILE PEÑA SANTOS

Ingeniera metalúrgica, especialista en Soldadura, coordinadora de proyectos de ingeniería de la Compañía de Gerenciamiento de Integridad S.A.A. Bogotá, Colombia.

Contacto: deyci.penasantos@cgin.co

Fecha de recepción: 31 de mayo de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 14 de marzo de 2014

Financiamiento: Universidad Industrial de Santander

Palabras clave: concreto, curado, resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico

Keywords: concrete, compressive strength, curing, ultrasonic pulse velocity

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es determinar correlaciones entre el contenido de agua del con-

creto, la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Se estudiaron probetas cilíndricas de concreto de 200 mm de largo x 100 mm de diámetro, elaboradas a partir

de una mezcla de cemento Portland tipo I y una relación agua/cemento (a/c) de 0,5. El curado de las muestras se realizó en condiciones estándar y en condiciones ambientales bajo techo, determinando el contenido de agua en cada probeta por diferencia de pesos y sometiendo las muestras a ensayos ultrasónicos y de resistencia a la compresión durante los primeros 28 días después del fraguado. A partir de los resultados obtenidos, se encontró que un modelo de tipo logarítmico puede describir adecuadamente el comportamiento del contenido de agua, la VPU y la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para cada condición estudiada. Adicionalmente, se verificó que las condiciones de curado investigadas afectan significativamente el contenido de agua del concreto y los valores de resistencia a la compresión y VPU alcanzados.

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine correlations among content of concrete water, compressive resistance and Ultrasonic Pulse Velocity (UPV). Cylindrical concrete specimens, 200 mm long and 100 mm in diameter made from a mixture of Portland cement type I, and a water/cement ratio (w/c) 0.5, have been studied. The curing of the specimens was performed under standardized conditions and indoor environmental conditions. It determines the water content in each specimen by difference in weight and subjecting them to UPV tests and to compressive resistance test during the first 28 days after the setting. The results show a model of logarithmic type that describes the relationship between the compressive strength with the water content of concrete and the UPV during the curing stages proposed.

* * *

INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más utilizados por la industria de la construcción en el mundo. Este material puede desarrollar gran variedad de propiedades con un campo de aplicación muy amplio. Por ello la importancia de estudiar su comportamiento y desarrollar nuevas tecnologías de monitoreo e inspección que sean confiables y permitan ejercer un control rápido y efectivo sobre estas propiedades, sin alterarlas (Kim, 2009; Shah y Ribakov, 2009).

Durante el proceso de fabricación, el concreto está expuesto a varias condiciones que pueden afectar sus propiedades mecánicas y por tanto su durabilidad. Por esta razón, es conveniente ejercer un control adecuado de la temperatura, las características de los materiales, las dosificaciones de la mezcla y las condiciones de curado, siendo este último, un factor clave para el desarrollo de las propiedades finales (Kovler y Roussel, 2011;

Wang y Subramaniam, 2011; Carcaño y Moreno, 2005). En las estructuras existentes se requiere la determinación de las características físicas, químicas y mecánicas, entre otras, de los materiales que las componen, con el fin de conocer su estado, su resistencia y su comportamiento ante las diversas sollicitaciones a las que son sometidas durante su vida útil, en particular en los procesos de evaluación de vulnerabilidad y rehabilitación estructural. Esta caracterización se puede realizar por medio de ensayos destructivos, o por técnicas no destructivas como la VPU que ha sido empleada exitosamente para evaluar la calidad del concreto durante más de 60 años (Kraub y Hariri, 2006). Debido a la heterogeneidad del material se deben aplicar bajas frecuencias, ya que estas se ven limitadas por el tamaño máximo del agregado en la mezcla (Carcaño, Moreno y Castillo, 2004). Generalmente se emplean palpadores con frecuencias entre 25 y 100 kHz para medir la velocidad de pulso en el concreto (Kraub y Hariri, 2006; Icontec, 2006; Malhotra y Carino, 2004).

La velocidad de una onda de compresión a través de un material sólido depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio en que se propague (Qasrawi, 2000; Kim y Kim, 2009; Carcaño y Moreno, 2008).

Para la realización de este ensayo no destructivo (END) se puede emplear el método de transmisión directa, en el cual un palpador transmite una onda de compresión dentro del concreto, mientras otro palpador ubicado a una distancia L en la cara opuesta recibe la señal transmitida. El instrumento de medición muestra el tiempo de tránsito Δt que le tomó a la onda viajar a través del concreto, de manera que la velocidad de pulso se define mediante la ecuación (1).

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde:

L = longitud de la trayectoria

Δt = tiempo que requiere el pulso para atravesar tal longitud.

Adicionalmente a las propiedades del concreto, es necesario tener en cuenta varios factores que pueden influir en la VPU, como la porosidad, el tamaño de agregados y los aditivos utilizados, entre otros (Malhotra y Carino, 2004; Qasrawi, 2000; Carcaño y Moreno, 2008; Mehta y Monteiro, 2006). En el presente trabajo se enfatizó en las condiciones de curado y en el contenido de agua a través de la etapa de curado, factores que ejercen efectos de gran importancia al establecer correlaciones para estimar la resistencia a la compresión del concreto (Malhotra y Carino, 2004; Popovics, 2005; Quintero, Herrera, Corzo y García, 2011). La resistencia a la compresión es un indicador de calidad del concreto, de allí el interés de usar pulsos ultrasónicos para estimar dicha resistencia (Popovics, 2005; Del Río, Jiménez, Lopez, Rosa, Ruffo y Paniaqua, 2004).

Por lo anterior, en esta investigación se planteó estudiar el contenido de agua presente en muestras de concreto, asociado con diferentes condiciones de curado, y su evaluación empleando ensayos destructivos y no destructivos. Las correlaciones halladas en el presente trabajo permiten evaluar la resistencia a la compresión del concreto a edades tempranas, a partir de medidas de velocidad de pulso ultrasónico, empleando un diseño de mezcla determinado y curado en dos ambientes.

METODOLOGÍA

El concreto utilizado en el presente trabajo se diseñó a partir de una relación a/c de 0,5, empleando cemento Portland tipo I, agregado grueso de $\frac{3}{4}$ ", agregado fino con un módulo de finura de 2,92 y agua potable. Se elaboraron probetas cilíndricas de 200 mm de largo x 100 mm de diámetro (Icontec, 1995). Una parte de las muestras se dejaron curar en condiciones estándar (sumergidas en agua y temperatura promedio de 23,5 °) (Icontec, 1995) y las restantes se dejaron en condiciones ambientales bajo techo a una temperatura promedio de 27 °C.

Las probetas fueron ensayadas durante la etapa de curado en los días 2, 4, 6, 9, 14, 21 y 28. Para cada día de prueba se ensayaron tres probetas curadas en condiciones estándar y dos curadas en condiciones ambientales. Inicialmente, a cada probeta se le determinó el contenido de agua por diferencia de pesos, entre un peso inicial después del desencofrado y el peso final en cada día de ensayo. A las probetas se les aplicó el ensayo no destructivo mediante la VPU y el ensayo a la compresión (destructivo). A cada probeta se le pulieron las superficies transversales, para lograr un mejor acoplamiento de los palpadores y una mejor exactitud en la medición de velocidad. La VPU se midió por el método de transmisión directa, con el equipo de baja frecuencia *CNS Farnell Punditplus*, en tres puntos diferentes del área transversal de los cilindros, tomando dos lecturas por punto. Se

emplearon palpadores de 54 kHz de frecuencia, modo de pulso continuo y 500 v (Casali, Caravaca, Acevedo, Niño, Bizzotto y Torra, 2007).

Los ensayos destructivos se realizaron en la máquina análoga de ensayos a compresión Amsler, inmediatamente después de los ensayos no destructivos.

RESULTADOS

Las figuras que se presentan fueron obtenidas a través del *software* estadístico Statgraphics Centurion XV versión 15.2.06, en el cual se realizó una regresión simple con los valores promedio por día de ensayo para el contenido de agua, la VPU y la resistencia a la compresión, hallándose un modelo de comportamiento para cada condición de curado con un nivel de confianza del 95% en cada caso. Los parámetros de dichos modelos fueron estimados por el método de mínimos cuadrados.

En la figura 1 se presenta el comportamiento del contenido de agua a través de la etapa de curado.

De la figura 1 a) se puede observar la línea de ajuste logarítmico, en la cual el contenido de agua (CA) presenta un comportamiento ascendente a

través del tiempo de curado, debido al fenómeno de absorción experimentado por las probetas sumergidas en agua, mostrando un mayor crecimiento hasta el día 9, a partir del cual la ganancia en el contenido de agua se hace en menor proporción. Esto podría deberse a que las probetas tienden a alcanzar un punto de saturación y por lo tanto no siguen absorbiendo más agua del medio y llegan a un peso constante (Malhotra y Carino, 2004). Este fenómeno explicaría el comportamiento asintótico descrito por el modelo logarítmico propuesto en la ecuación (2) para probetas curadas en agua, donde (t) representa el tiempo en días.

$$CA=0,65236+0,09066*\ln(t) \quad (2)$$

En la figura 1 b) para las probetas curadas al aire se representa el contenido de agua que aún está presente en la mezcla y no se ha evaporado en la atmósfera circundante. La línea de ajuste logarítmico define un comportamiento descendente del contenido de agua en la mezcla, a través del tiempo de curado, en donde las diferencias en el contenido de agua son considerables hasta el día 14, a partir del cual la curva se vuelve más suave, mostrando un comportamiento asintótico. La pérdida de agua se debe al consumo por reacción de hidratación en el concreto y a la evaporación

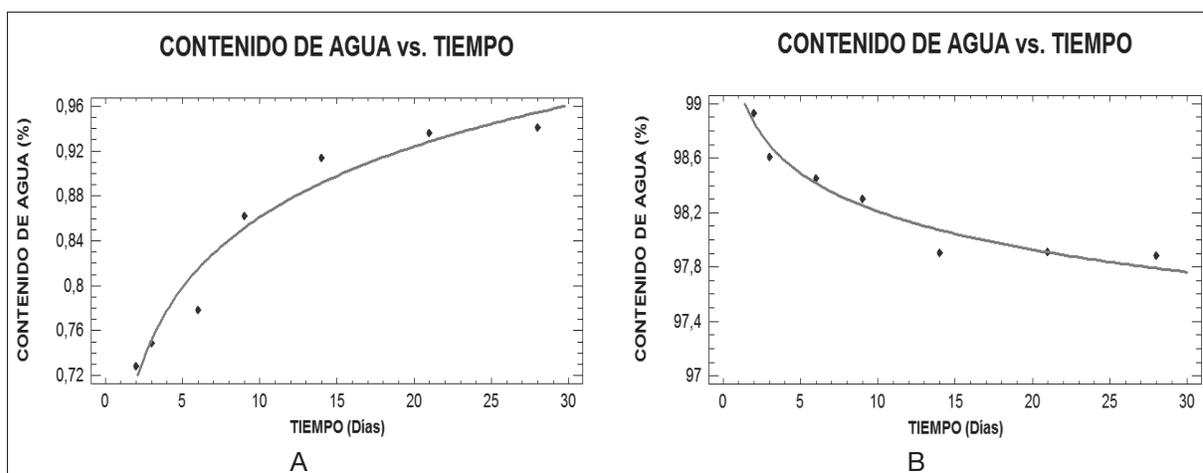


Figura 1. Variación del contenido de agua vs. tiempo de curado en probetas a) curadas en agua y b) curadas al aire
Fuente: elaboración propia.

de agua libre por capilaridad y difusión. Este fenómeno ocurre hasta que las probetas alcancen un peso constante, lo cual está de acuerdo con lo expresado por Rodríguez y Bonal (2002). Hacia los extremos de cada gráfica se observa un punto límite que corresponde al contenido de agua en la mezcla (figura 1a) y otro relacionado con la cantidad máxima de agua que se puede perder por evaporación (figura 1b) (Rodríguez y Bonal, 2002). El modelo logarítmico propuesto en la ecuación (3) permite determinar el cambio en el contenido de agua en la mezcla a través del tiempo en probetas curadas al ambiente.

$$CA=99,139-0,405*\ln(t) \quad (3)$$

En la tabla 1 se encuentran los parámetros del modelo obtenido para cada condición de curado. Se observa que los altos coeficientes de correlación muestran una fuerte relación entre las variables mencionadas, demostrando que los modelos logarítmicos propuestos en las ecuaciones (2) y (3) se ajustan en un 95,241 y 94,641 %, respectivamente, con bajos errores de estimación.

La figura 2 muestra la variación de la VPU durante los 28 primeros días después del fraguado.

En la figura 2 a) se observa la línea de ajuste logarítmico que muestra la variación de la VPU durante la etapa de curado. Esta velocidad presenta un aumento significativo hasta el día 9, a partir

Tabla 1. Parámetros experimentales del modelo obtenido para el contenido de agua vs. tiempo en condiciones estándar y ambientales

Parámetro	Curadas en agua	Curadas en aire
Coefficiente de correlación	0,976	0,973
R cuadrada (%)	95,241 %	94,641 %
Error estándar	0,022	0,104

Fuente: elaboración propia.

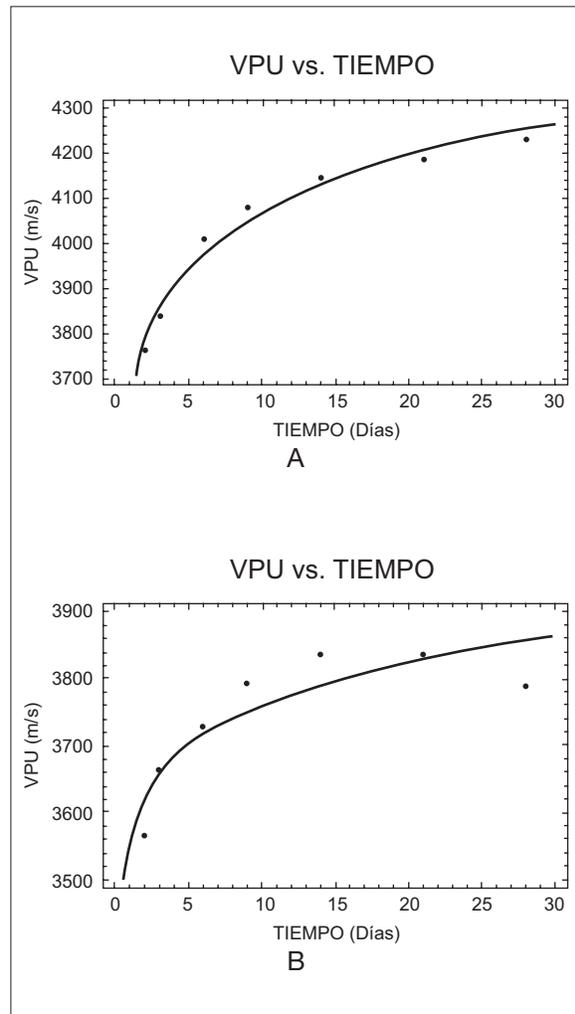


Figura 2. Variación de la VPU vs. tiempo de curado en probetas a) curadas en agua y b) curadas al aire

Fuente: elaboración propia.

del cual los valores de VPU están relativamente más cercanos. Teniendo en cuenta la figura 2 a), se deduce que la velocidad alcanza su valor máximo en el punto donde las probetas tienen el mayor contenido de agua. El modelo logarítmico propuesto en la ecuación (4) explica el fenómeno físico que indica que las probetas deben alcanzar un punto de saturación, para el cual la velocidad deberá llegar a su valor máximo asintóticamente, a medida que aumenta el tiempo de curado (Rodríguez y Bonal, 2002).

$$VPU=3.652,840+180,816*\ln(t) \quad (4)$$

La figura 2b), para las probetas curadas al aire, muestra un aumento de la VPU hasta el día 14, a partir del cual se observa un decrecimiento en dicha velocidad. Este fenómeno se puede deber a la presencia de agua en la probeta hasta este día, permitiendo tiempos de vuelo cortos y por consiguiente altas velocidades. Sin embargo, en los días 21 y 28 estas velocidades disminuyen debido al fenómeno de secado, que deja espacios capilares vacíos o llenos de aire en la matriz de concreto, aumentando el tiempo de propagación de la onda. El modelo logarítmico propuesto en la ecuación (5) puede describir adecuadamente el fenómeno físico ocurrido.

$$VPU=3.551,570+91,027*\ln(t) \quad (5)$$

Los parámetros del modelo obtenido para la variación de la VPU a través de la etapa de curado se presentan en la tabla 2. En la figura 3 se muestra la influencia de las condiciones de curado sobre la VPU. Esta variable tiene un comportamiento logarítmico a través del tiempo, con independencia de las condiciones en las que se realice el curado. Se puede apreciar además que la curva de las probetas curadas en condiciones estándar se encuentra por encima de la curva de las probetas curadas en condiciones ambientales, sobrepasando los 4200 m/s a los 28 días de curado.

Por otro lado, las probetas curadas en condiciones ambientales no alcanzan a los 28 días los

Tabla 2. Parámetros del modelo obtenido para la VPU vs. tiempo de curado en condiciones estándar y ambientales

Parámetro	Curadas en agua	Curadas en aire
Coefficiente de correlación	0,991	0,903
R cuadrada (%)	98,152	81,564
Error estándar	26,690	46,555

Fuente: elaboración propia.

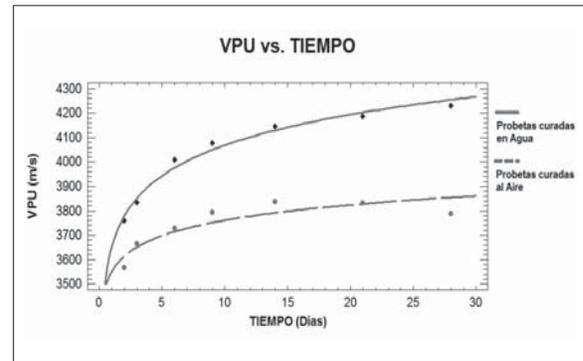


Figura 3. Influencia de las condiciones de curado sobre la VPU a través del tiempo

Fuente: elaboración propia.

3900 m/s, logrando las anteriores una ventaja del 11,73 %, aproximadamente, sobre estas últimas.

Teniendo en cuenta que la velocidad ultrasónica depende de las propiedades elásticas y la densidad del medio en el cual se propague la onda (Malhotra y Carino, 2004), la señal ultrasónica gasta menos tiempo en propagarse en sólidos (concreto y productos de hidratación) y líquidos (agua contenida en los poros y espacios capilares) que en gases (poros llenos de aire o fisuras) (Kim y Kim, 2009). La onda al pasar de un medio sólido a gas se dispersa, causando un aumento en el tiempo de recorrido y por lo tanto afecta los valores de VPU.

En las probetas curadas en agua, la VPU se ve favorecida por la ganancia en el contenido de agua y la formación de productos de hidratación que permiten que la onda ultrasónica viaje con la menor interferencia posible, lo que se refleja en un crecimiento de la VPU. Las probetas curadas al aire solo se ven favorecidas por la formación de productos de hidratación en el interior de la matriz de concreto, arrojando valores bajos de VPU. Por otro lado, en estas últimas probetas la evaporación del agua deja como resultado una cantidad de poros vacíos (o llenos de aire) en la parte exterior que afectan la VPU.

El comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto en el tiempo de curado se muestra en la figura 4. El valor promedio del diámetro para las muestras curadas en agua fue de 103,996 mm y para las curadas al aire 103,697 mm.

En la figura 4 a), para probetas curadas en condiciones estándar, se observa claramente el crecimiento de la resistencia a la compresión a través del tiempo de curado, apreciándose un alto crecimiento hasta el día 14, a partir del cual la ganancia es poca, en concordancia con los resultados de estudios reportados por diversos autores (Carcaño, Moreno y Castillo, 2004). El modelo logarítmico propuesto en la ecuación (6) describe el comportamiento de la resistencia con el tiempo.

$$f'c=11,219+6,436*\ln(t) \quad (6)$$

En la figura 4 b) la línea de ajuste también presenta un crecimiento de la resistencia a la compresión a través del tiempo de curado. En probetas curadas al aire, el aumento en la resistencia a la compresión es bastante significativo hasta

el día 6, después del cual el incremento continúa hasta el día 28 a intervalos menos pronunciados. El modelo logarítmico propuesto en la ecuación (7) describe el comportamiento de la resistencia en el tiempo en probetas curadas en condiciones ambientales. En la tabla 3 se presentan los parámetros de los modelos obtenidos.

$$f'c=13,090+4,338*\ln(t) \quad (7)$$

Según se observa en la figura 5, las resistencias alcanzadas por las probetas durante los tres primeros días de curado son prácticamente iguales. A partir de ese momento, la curva de resistencia para los cilindros curados en agua se desplaza por encima de la curva de resistencia para las probetas curadas al aire. Con independencia de las condiciones en las que se realice el curado de las muestras de concreto, los valores de la resistencia a la compresión aumentan en esta etapa debido a la formación de productos de hidratación, apreciándose un mayor crecimiento en las probetas curadas en condiciones estándar. Es así que la resistencia obtenida por las probetas curadas en condiciones ambientales es menor en un 19,5%

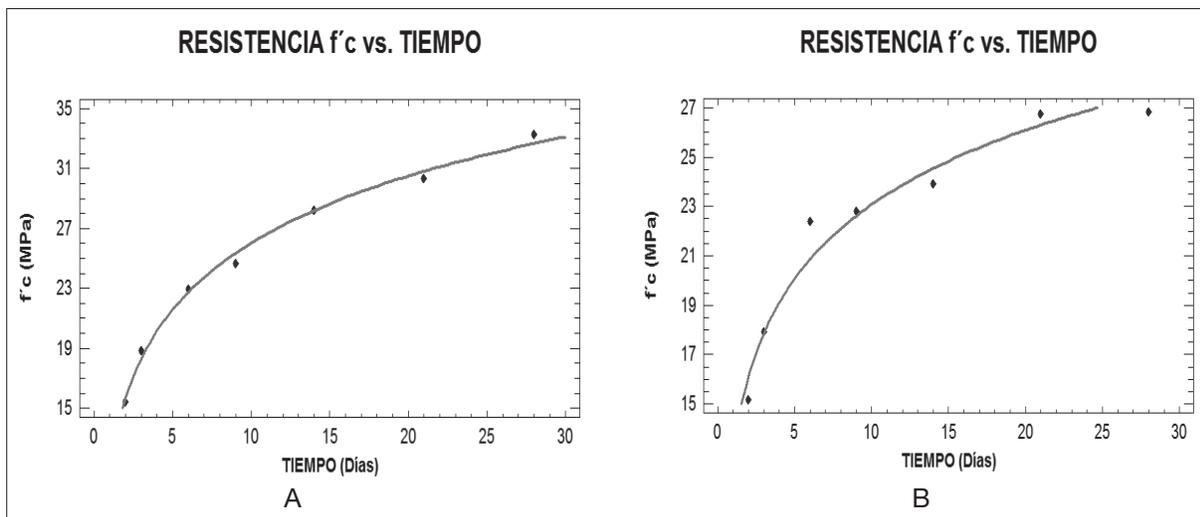


Figura 4. Variación de la resistencia a la compresión vs. tiempo de curado en probetas a) curadas en agua y b) curadas al aire

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. tiempo de curado en condiciones estándar y ambientales

Parámetro	Curadas en agua	Curadas en aire
Coefficiente de correlación	0,997	0,980
R cuadrada	99,335%	96,070%
Error estándar	0,566	9,444

Fuente: elaboración propia.

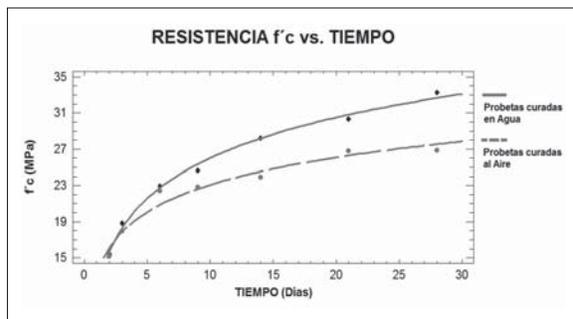


Figura 5. Influencia de las condiciones de curado sobre la resistencia a la compresión a través del tiempo

Fuente: elaboración propia.

a la obtenida en los cilindros curados en agua evaluada a los 28 días de curado.

Comparando el comportamiento de la VPU y la resistencia a la compresión, se establece una correlación gráfica entre estas dos variables que se presenta en la figura 6. Se observa que un ajuste lineal describe de mejor manera la relación entre la VPU y la resistencia a la compresión.

En la figura 6 a) se observa un crecimiento de la resistencia a la compresión a medida que aumenta la VPU en las probetas curadas en condiciones estándar. El modelo lineal muestra una relación directamente proporcional entre la resistencia a la compresión y la VPU durante el proceso de curado. Este modelo ha sido reportado por diferentes autores en algunos de sus trabajos de investigación (Malhotra y Carino, 2004; Popovics, 2005). La ecuación propuesta en la ecuación (8)

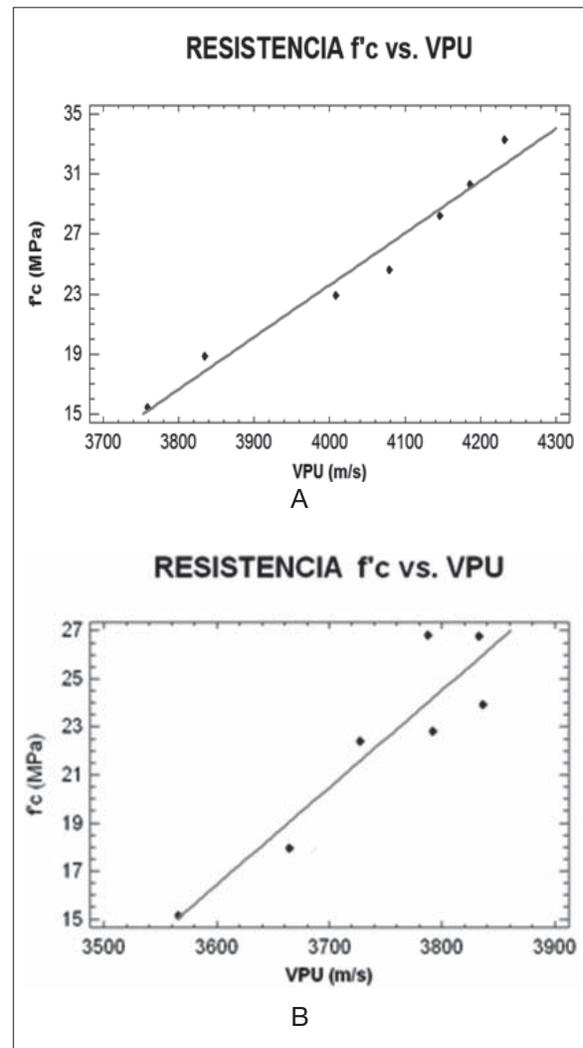


Figura 6. Correlación entre la resistencia a la compresión y la VPU en probetas a) curadas en agua y b) curadas al aire

Fuente: elaboración propia.

puede ser empleada para predecir la resistencia a la compresión en probetas curadas en condiciones estándar para el diseño de mezcla empleado en este estudio.

$$f'c = -115,597 + 0,035 * VPU \quad (8)$$

Al igual que con las probetas curadas en agua, en la figura 6 b) se observa un crecimiento en la resistencia a la compresión a medida que aumenta

la VPU en las probetas curadas en condiciones ambientales. El modelo lineal propuesto en la ecuación (9) describe el comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la VPU durante el proceso de curado.

$$f'c = -129,511 + 0,041 * VPU \quad (9)$$

La tabla 4 muestra los parámetros del modelo obtenido para cada condición de curado. En la figura 7 se muestra la influencia de las condiciones de curado sobre la relación entre la resistencia a la compresión y la VPU. De la observación de esta gráfica se puede decir que existe una dependencia lineal (Malhotra y Carino, 2004) durante la etapa de curado, entre la resistencia a la compresión y la VPU en probetas curadas, tanto en condiciones estándar como en condiciones ambientales. Además, se observa que la línea correspondiente a las muestras curadas en agua está desplazada hacia la derecha de la línea de las muestras curadas en aire, lo cual indica mayores valores de VPU en estas y por tanto mayores resistencias.

El modelo lineal puede verse afectado por diversos factores como la relación a/c, las proporciones de la mezcla, el contenido y tipo de cemento, así como el contenido, la forma y el tamaño de agregados. El estudio de la influencia de estos factores ha sido abarcado por otros autores (Carcaño, Moreno y Castillo, 2004; Popovics, 2005), los cuales han establecido diversas correlaciones de acuerdo con los resultados de sus investigaciones.

Tabla 4. Parámetros del modelo obtenido para la resistencia a la compresión vs. la VPU en condiciones estándar y ambientales

Parámetro	Curadas en agua	Curadas en aire
Coefficiente de correlación	0,984	0,923
R cuadrada (%)	96,739	85,216
Error estándar	1,254	1,831

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo observado en las figuras anteriores, un curado húmedo favorece la propagación de las ondas ultrasónicas y la formación de los productos de hidratación encargados de otorgarle resistencia al concreto. En la predicción de la resistencia a la compresión del concreto mediante técnicas no destructivas, entre mayor información se tenga sobre la mezcla, más precisos serán los modelos obtenidos. Por lo anterior, se estableció una correlación entre el contenido de agua (CA), la VPU y la $f'c$, realizando una regresión múltiple mediante el software Statgraphics, tomando el CA y la VPU como variables independientes y la $f'c$ como variable dependiente.

Los modelos lineales propuestos en las ecuaciones (10) y (11) pueden ser empleados para determinar la resistencia a la compresión durante la etapa de curado en función del CA y la VPU en probetas curadas en condiciones estándar y ambientales, respectivamente.

$$f'c = -96,8142 + 16,6054 * CA + 0,02667 * VPU \quad (10)$$

$$f'c = 739,811 - 7,703 * CA + 0,0106 * VPU \quad (11)$$

Los parámetros de los modelos obtenidos se presentan en la tabla 5.

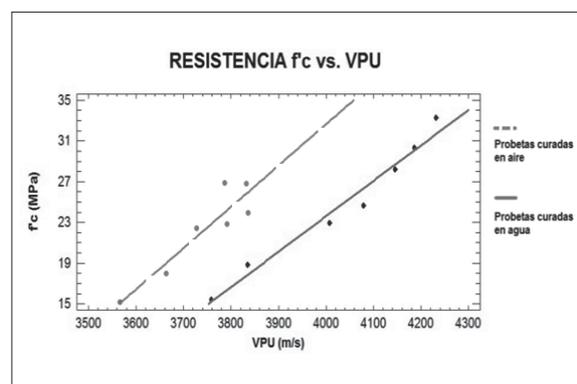


Figura 7. Comparación de la resistencia a la compresión vs. VPU en diferentes condiciones de curado

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Parámetros del modelo obtenido para la correlación entre resistencia a la compresión, la VPU y el contenido de agua en condiciones estándar y ambientales

Parámetro	Curadas en agua	Curadas en aire
R cuadrada (%)	97,168%	90,955%
Error estándar	1,307	1,60

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Para edades tempranas del concreto, el diseño de mezcla empleado y las condiciones de curado estudiadas, se puede concluir que:

- Un modelo logarítmico puede describir adecuadamente el comportamiento del contenido de agua, la VPU y la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado, para cada condición de estudio.
- Se verificó que, con independencia de las condiciones de curado, tanto la VPU como la resistencia a la compresión presentan un crecimiento durante los 28 días de curado, debido a la formación de los productos de hidratación en el concreto.
- Los valores de VPU y de resistencia a la compresión alcanzada por las probetas a los 28 días de curado son mayores en los especímenes curados en condiciones estándar que en los curados en condiciones ambientales. Esto demuestra la importancia de suministrarle al

concreto las condiciones de humedad necesarias para la ocurrencia de las reacciones químicas responsables del endurecimiento.

- Una correlación gráfica entre la resistencia a la compresión y la VPU muestra que el modelo lineal puede predecir con alto nivel de confiabilidad la relación entre las dos variables para cada condición de curado.
- Al realizar una correlación entre las tres variables estudiadas, tanto el contenido de agua como la VPU presentan una relación directamente proporcional a la resistencia a la compresión durante la etapa de curado y para cada condición de estudio.

FINANCIAMIENTO

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación denominado “Efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de factores que afectan la durabilidad del concreto”, código 5.443, la cual tuvo apoyo económico de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y al ingeniero Edwin Raúl Durán Moreno.

REFERENCIAS

Carcaño, S. y Moreno, E., “Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido sub-húmedo”, *Ingeniería Revista Académica*, Vol. 9, No. 3, 2005, pp. 5-17.

Carcaño, R. y Moreno, E., “Evaluation of Concrete Made with Crushed Limestone Aggregate Base on Ultrasonic Pulse Velocity”, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 6, 2008, pp. 1225-31.

- Carcaño, R., Moreno, E. y Castillo, W., “Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados”, *Ingeniería Revista Académica*, Vol. 8, No. 2, 2004, pp. 41-52.
- Casali, R., Caravaca, M., Acevedo, C., Niño, J., Bizzotto, M y Torra, R., *IV Conferencia Panamericana de Ensayos no Destructivos. Predicción de la resistencia compresión y determinación de propiedades estructurales a partir de ensayos no destructivos*, Buenos Aires, 2007.
- Del Río, L., Jiménez, A., Lopez, F., Rosa, F. J., Ruffo, M. M. y Paniaqua, J. M. “Characterization and Hardening of Concrete with Ultrasonic Testing”, *Ultrasonics*, Vol. 42, No. 1-9, 2004, pp. 527-30.
- Icontec, NTC 1377, *Elaboración y curado de espímenes de concreto para ensayos de laboratorio*, 1995.
- Icontec, NTC 4325, *Método de ensayo para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto*, 2006.
- Kim, B. C. y Kim, J. Y, “Characterization of Ultrasonic Properties of Concrete”, *Mechanics Research Communications*, Vol. 36, No. 2, 2009, pp. 207-14.
- Kovler, K. y Roussel, N., “Properties of Fresh and Hardened Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 7, 2011, pp. 775-92.
- Kraub, M. y Hariri, K., “Determination of Initial Degree of Hydration for Improvement of Early-Age Properties of Concrete Using Ultrasonic Wave Propagation”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, No. 4, 2006, pp. 299-306.
- Malhotra, V. M. y Carino, N. J., “The Ultrasonic Pulse Velocity Method”, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 2004, pp. 181-99.
- Mehta, K. P. y Monteiro, P. J., *Nondestructive Methods*, Nueva York: McGraw-Hill, 2006.
- Popovics, J., “Ultrasonic Testing of Concrete Structures”, *Materials Evaluation*, Vol. 63, No. 1, 2005, pp. 50-55.
- Qasrawi, H., “Concrete Strength by Combined Nondestructive Methods Simply and Reliably Predicted”, *Cement & Concrete Research*, Vol. 30, No. 5, 2000, pp. 739-46.
- Quintero, L. A., Herrera, J., Corzo, L. y García, J., “Relación entre la resistencia a compresión y la porosidad del concreto evaluada a partir de parámetros ultrasónicos”, *ION*, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 69-76.
- Rodríguez, G. M. y Bonal, C. R., *XXI Congreso Nacional de Ensayos no Destructivos. El contenido de agua en el concreto y su incidencia sobre el valor de la velocidad de pulso ultrasónico*, Republica de El Salvador, 2002.
- Shah, A. y Ribakov, Y., “Non-Destructive Evaluation of Concrete in Damaged and Undamaged States”, *Materials and Design*, Vol. 30, No. 9, 2009, pp. 3504-11.
- Wang, X. y Subramaniam, K. V., “Ultrasonic Monitoring of Capillary Porosity and Elastic Properties in Hydrating Cement Paste”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 33, No. 3, 2011, pp. 389-401.