

RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA POROSIDAD DEL CONCRETO EVALUADA A PARTIR DE PARÁMETROS ULTRASÓNICOS

RELATIONSHIP BETWEEN COMPRESSIVE STRENGTH AND POROSITY OF CONCRETE EVALUATED FROM ULTRASONIC PARAMETERS

LUZ AMPARO QUINTERO ORTÍZ*; JULIAN HERRERA; LAURA CORZO;
JOHANA GARCÍA

Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales (GIMAT)
Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Universidad Industrial de Santander (UIS),
Cra. 27 Calle 9, Bucaramanga, Colombia.
*luzquint@uis.edu.co

Fecha Recepción: 20 de septiembre de 2010
Fecha Aceptación: 8 de abril de 2011

RESUMEN

El propósito de la presente investigación fue evaluar la resistencia a la compresión y la porosidad en muestras de concreto empleando medidas de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y posteriormente establecer relaciones entre las propiedades estudiadas y la VPU. Las muestras fueron preparadas con diferentes relaciones agua/cemento (a/c) y curadas durante 28 días en condiciones ambientales bajo techo. El trabajo se planteó teniendo en cuenta que la porosidad es un factor importante que influye en el material, ya que permite el ingreso de agentes agresivos dentro de la matriz del concreto afectando su resistencia a la compresión, y en general disminuyendo el tiempo de vida útil proyectado para la estructura. Estudios anteriores han demostrado que la porosidad depende entre otros factores de la relación a/c empleada en la mezcla. Uno de los métodos para evaluar las estructuras sin afectarlas es el ultrasonido, por medio de este se puede estimar la resistencia mecánica tanto in situ como en laboratorio. La técnica ultrasónica de mayor aplicación es la de VPU. En el presente trabajo se midió la resistencia a la compresión, la porosidad y la VPU a probetas de concreto fabricadas con cemento Portland tipo I y relaciones a/c de 0,45, 0,50, 0,55 y 0,60. Los experimentos fueron llevados a cabo a 7, 14 y 28 días de curado. Este primer trabajo acerca de la aplicación de la técnica de VPU como ensayo no destructivo para la evaluación de la calidad del concreto, permitió verificar el potencial de la técnica como medio para estimar el comportamiento del material durante el tiempo de este estudio.

Palabras Clave: *pruebas no destructivas, velocidad de pulso ultrasónico, durabilidad*

ABSTRACT

The purpose of this research was to evaluate the compressive strength and porosity of concrete samples using ultrasonic pulse velocity (UPV) measurements and then establish relationships between the studied properties and the UPV. The samples were prepared with different water/cement ratios (w/c) and cured for 28 days at indoor environmental conditions. This work was raised taking into account that porosity is an important factor that influences the material, allowing aggressive agents to enter the concrete matrix affecting its compressive strength, and in general decreasing the projected lifetime of the structure. Previous studies have proved that porosity strongly depends on the water/cement ratio (w/c) used for the mixture. One method to evaluate structures without affecting them is ultrasounds. Through this technique, mechanical resistance can be estimated both in situ and in laboratory. The ultrasonic technique that is widely used is the ultrasonic pulse velocity (UPV). In this paper the compressive strength, the porosity, and the ultrasonic pulse velocity were measured in concrete test tubes manufactured with Portland cement type I, using water/cement ratios of 0.45, 0.50, 0.55, and 0.60. The experiments were carried out at 7, 14 y 28 curing days. This first work about UPV technique application as a non-destructive testing for assessing concrete quality, allowed studying the potential of technique itself, as a means to estimate the material behavior, in this case during the curing stage under environment conditions.

Keywords: *nondestructive testing, ultrasonic pulse velocity, durability*

INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más utilizados debido a las propiedades mecánicas y físicas adquiridas durante su proceso de endurecimiento, el cual se lleva a cabo durante los primeros 28 días de su fabricación. Por lo anterior, es importante su estudio a través de este periodo, pues es allí donde se adquieren significativamente sus propiedades. Dos de las más importantes son: la resistencia a la compresión y la porosidad.

La resistencia a la compresión mide la calidad del concreto de una manera sencilla, rápida, eficaz y es empleada con frecuencia en los cálculos para el diseño de las estructuras. Esta propiedad cambia significativamente con la variación de algunos parámetros, tales como: la relación (a/c), el tamaño máximo del agregado, las condiciones de humedad y temperatura durante el curado, la edad del concreto y la velocidad de carga, entre otros [1].

Con respecto a la porosidad, se debe tener cuenta que el concreto es un material inherentemente poroso, debido principalmente a la formación de canales capilares como consecuencia de la evaporación de agua durante el proceso de fraguado, a la porosidad del agregado y a la reducción gradual de volumen de la pasta cuando ocurre la reacción química entre el agua y el cemento [2]. Esta propiedad se puede definir como aquellos sistemas de vacíos presentes en la estructura interna del concreto endurecido, los cuales no contienen materia sólida. Esta característica es la que condiciona el comportamiento posterior del concreto para absorber líquidos y su capacidad de flujo a través de él, siendo por lo tanto un factor de vital importancia para el estudio de la durabilidad del concreto. La porosidad depende a su vez de la relación a/c, de la calidad del cemento y de los agregados [2, 3].

La porosidad de cualquier concreto se puede clasificar en dos tipos: porosidad cerrada y porosidad abierta. La *porosidad cerrada* se considera como los poros que no se comunican entre ellos ni con el exterior y la *porosidad abierta* como aquellos que se comunican entre ellos y con el medio exterior permitiendo la absorción y transferencia de fluidos o intercambio de sustancias disueltas entre el interior del concreto y el ambiente circundante [3].

Para la evaluación de la calidad del concreto se emplean tradicionalmente tanto ensayos destructivos como no destructivos. Entre la gran variedad de pruebas no destructivas aplicadas al concreto, se encuentra la técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) [4, 5], la cual mide el tiempo de vuelo de una onda ultrasónica que viaja a través del material, permitiendo establecer la homogeneidad del mismo [6,7], medir profundidad de grietas ó daño [5], determinar el módulo elástico y estimar la resistencia a la compresión del concreto, mediante el uso de correlaciones apropiadas [8], entre otros.

La técnica permite determinar la velocidad de propagación de los pulsos de una onda longitudinal a través del material. La velocidad de pulso (V) se calcula dividiendo la longitud (L) que recorre la onda, sobre el tiempo (t) que gasta en recorrerla [4].

$$V = L / t \quad (1)$$

La velocidad de pulso V , de una onda longitudinal en un concreto macizo está relacionada con las propiedades elásticas del material y su densidad, como se indica en la siguiente ecuación [5].

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2)$$

Donde: E = módulo de elasticidad, μ = módulo de Poisson, ρ = densidad.

De acuerdo con la posible ubicación de los transductores para realizar las mediciones, existen tres posibles métodos de operación: el de transmisión directa, semidirecta e indirecta [1, 4, 5, 9]. El método directo, el cual implica la ubicación de dos transductores enfrentados en las caras opuestas del material en estudio, permite que la máxima energía del pulso que es transmitida sea recibida. Este es uno de los métodos de operación más utilizado para la evaluación del concreto, debido a los resultados satisfactorios que se han obtenido con su uso.

Aunque la VPU es una técnica empleada desde hace largo tiempo, la aplicación de la misma como método de evaluación de estructuras de concreto no ha sido muy extendido, debido probablemente a la variedad de factores que influyen sobre la técnica, entre ellos la gran heterogeneidad que presenta este material.

Lo anterior ha motivado el desarrollo de varias investigaciones, en las cuales se ha buscado establecer la influencia que tienen algunos factores asociados a las materias primas, el proceso de fabricación, las condiciones ambientales y de uso del concreto, sobre las medidas de VPU, además de establecer correlaciones entre ésta y la resistencia a la compresión.

Dentro de las investigaciones desarrolladas utilizando la VPU para el estudio del concreto, se encuentra la realizada por Del Rio y col. [6], quienes caracterizaron muestras de concreto cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de largo, empleando relaciones a/c entre 0,48 y 0,8, realizando curado en cámara húmeda, todo esto con el fin de obtener muestras con diferentes resistencias a la compresión. El estudio permitió confirmar una relación de tipo exponencial para la VPU y la resistencia a la compresión y la existencia de una dependencia significativa de estas dos variables con la relación a/c. Adicionalmente se estableció un modelo matemático dependiente del tiempo de curado del concreto, el cual permite estimar la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días para las muestras analizadas, a partir de datos de VPU a edades tempranas de 2 y 5 días de su fabricación.

Solís Cárcamo y col. [7, 8] evaluaron en sus trabajos la influencia del tipo de agregados utilizados en la fabricación del concreto sobre las propiedades del mismo, prepararon mezclas de concreto con agregados de diferente calidad y determinaron la relación entre la VPU y la resistencia a la compresión para estos concretos. A partir de estos estudios pudieron concluir que la VPU es un buen indicador de la resistencia a la compresión y de la calidad del agregado utilizado en la fabricación del mismo. Además establecieron que la relación a/c es la principal fuente de varianza tanto sobre la velocidad como sobre la resistencia y por lo tanto a ella se puede atribuir la correlación entre las variables.

Hernández y col. [10, 11], introdujeron en su estudios sobre porosidad en morteros, el uso de un modelo micromecánico. En su primer trabajo aplicaron un modelo bifásico sobre mortero, considerándolo como material constituido por la pasta de cemento más inclusiones gaseosas (poros), con el fin de estimar la porosidad a través de medidas de velocidad de ondas ultrasónicas

tanto longitudinales como transversales. De la investigación se concluyó, que el modelo utilizado permite estimar la porosidad en muestras de mortero y que la determinación de la porosidad es más precisa si se conoce la composición del concreto. En el segundo trabajo aplicaron el modelo considerando ahora el mortero como un material constituido por tres fases; pasta de cemento sin poros e inclusiones de arena y de poros. La investigación permitió estimar la porosidad de las muestras con un error promedio del 10% y pudo concluir que al aumentar la porosidad (aumentar la relación a/c en el mortero) disminuye la VPU en las muestras, mientras que un incremento en la resistencia del cemento y en la fracción de volumen de arena utilizada en la fabricación del mortero, incrementa la VPU.

Por otra parte se han llevado a cabo estudios que permiten relacionar la porosidad, la permeabilidad y la VPU, como es el caso de Lafhaj Z. y col. [12] quienes utilizaron siete mezclas de mortero con diferentes relaciones a/c, realizando ensayos de VPU y de permeabilidad para determinar esta correlación a los 28 días. Se concluyó que a mayor relación a/c la porosidad en el mortero es mayor y además que el concreto entre más permeable es más poroso.

Por otra parte, Lafhaj y col. [13] investigaron la relación entre la porosidad y parámetros ultrasónicos, con el fin de observar la sensibilidad de la técnica para captar los cambios microestructurales ocurridos en el concreto, cuando se trabaja con frecuencias ultrasónicas en el intervalo de 0,6 a 1,2 Mhz. El material investigado estuvo constituido por muestras de mortero con diferentes relaciones a/c, (diferentes niveles de porosidad) y muestras con porosidad inducida por daño químico acelerado, lograda empleando solución de nitrato de amonio. Los resultados experimentales mostraron que es posible establecer relación entre las características físicas y los parámetros acústicos, mostrándose una disminución de la velocidad con el aumento de la porosidad, y que este incremento debido al daño químico inducido no afecta la relación existente entre los parámetros ultrasónicos con la porosidad, manteniéndose siempre un comportamiento de tipo lineal.

Lo anterior permite confirmar la existencia de una relación directa entre la relación a/c, con la porosidad presente en el concreto, lo cual ha sido

corroborado por otros autores [14, 15], además de la sensibilidad de la VPU para la identificación de cambios en el sistema heterogéneo tan característico del concreto.

A pesar que los resultados obtenidos de estos y muchos otros trabajos realizados en esta área, han contribuido a la caracterización del concreto a través de ensayos no destructivos, los estudios en el campo todavía no son concluyentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se emplearon agregados provenientes de la zona de Pescadero, Santander, y la caracterización de los mismos se llevó a cabo mediante pruebas para determinar el módulo de finura y el tamaño máximo de agregado grueso, así como gravedades y pesos específicos y absorción para cada tipo de agregado teniendo como base las normas NTC 92 [16], NTC 176 [17], NTC 237 [18], NTC 77 [19] y NTC 78 [20]. Se escogió cemento Portland tipo I y agua potable del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga para la mezcla.

Para la medición de la velocidad de pulso se utilizó el método directo y el equipo marca James Instruments tipo V-Meter Mark II; para el ensayo de compresión se empleó la máquina universal marca Trébel, (siguiendo la norma NTC 673 [21] y para el ensayo de porosidad se empleó un porosímetro de campo Ruska, (basado en la ley de Boyle), el cual permite determinar la porosidad abierta de la muestra.

Se emplearon cuatro relaciones agua/cemento: 0,45, 0,50, 0,55, y 0,60, elaborando 12 probetas para cada una de estas. Para su fabricación fue necesario realizar un diseño de la mezcla, utilizando un tamaño máximo nominal (TMN) de agregado de 12,5 mm. Se fabricaron probetas cilíndricas de 7,5 cm de diámetro y 15 cm de longitud, las cuales se desencofraron a las 24 h de fraguado y se dejaron curar en condiciones ambientales bajo techo por 28 días. Las diferentes muestras fueron ensayadas en los días 7, 14 y 28 de curado. A los especímenes de concreto se le realizaron ensayos de porosidad, resistencia a la compresión y medidas de velocidad de pulso ultrasónico.

A partir de los resultados obtenidos se realizó un análisis estadístico utilizando el paquete Statgraphics, teniendo como factores la relación a/c y el tiempo de curado, y como variables de respuesta la porosidad, la resistencia a la compresión y la VPU.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presenta el diagrama de Pareto para la porosidad, en el cual se aprecia la influencia de los factores sobre la variable de estudio. De acuerdo con este diagrama la relación a/c presenta un efecto positivo, indicando que a medida que aumenta esta relación se presenta un aumento en la porosidad, mientras que para el tiempo de curado ocurre lo contrario (presenta una influencia negativa).

En la Figura 2, se presenta el comportamiento de la porosidad en función de la relación a/c y se confirma lo dicho anteriormente, al mostrarse un comportamiento creciente de la porosidad con el aumento de la relación a/c, lo cual está acorde con los resultados reportados por otros investigadores [6, 8, 11, 13].

Aunque en los resultados encontrados se aprecia un comportamiento lineal entre la porosidad y la relación a/c en el intervalo estudiado, esto difiere de lo expresado por Lafhaj y co. [12], quienes reportan una relación no lineal en su intervalo de estudio. Sin embargo es importante anotar que tanto el rango de porosidades como el de relaciones a/c difieren en los dos estudios, así como los métodos de determinación de la porosidad, empleándose en el primer caso un método basado en el uso de mercurio como medio de análisis y en el segundo el empleo de agua como medio de evaluación (basado en la pérdida de agua de la muestra).

En general se puede decir que el aumento en la relación a/c da lugar a una mayor formación de canales capilares como resultado de la evaporación de agua durante el proceso de fraguado y curado. Por otro lado se aprecia como la porosidad va disminuyendo a medida que transcurren los días de curado, como ya ha sido reportado por otros autores [12]. Esto último se podría asociar con el avance de la reacción cuyos productos ocupan el espacio dejado por el agua.

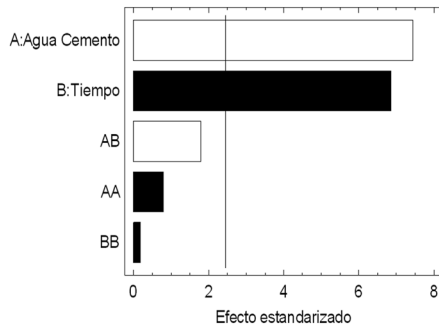


Figura 1. Diagrama de Pareto estandarizado para la porosidad. Efecto positivo sobre el factor $\square+$
Efecto negativo sobre el factor $\blacksquare-$

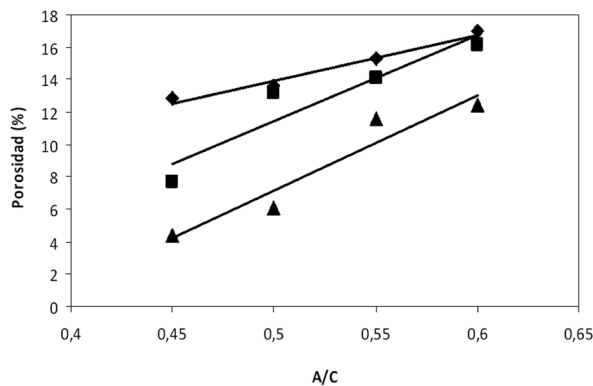


Figura 2. Comportamiento de la porosidad en función de la relación a/c para los respectivos días de curado. Día 7 (◆), Día 14 (■), Día 28 (▲)

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión vs porosidad se presentan en la Figura 3. En ella se observa, como era de esperarse, que al aumentar la relación a/c, aumenta la porosidad y disminuye la resistencia a la compresión, lo cual está de acuerdo con los resultados logrados por Hernández [11] y Abo-Qudais [14], quienes analizaron muestras de mortero en el primer caso y especímenes de concreto entre 3 y 90 días de curado, en el segundo caso, obteniéndose una disminución en la resistencia al compresión al aumentar la relación a/c en los días evaluados. Sin embargo, en estos estudios, no se propuso un modelo para explicar el comportamiento seguido por las variables.

Los datos experimentales obtenidos en la presente investigación permitieron obtener el modelo lineal con pendiente negativa presentado en la Ecuación 3. A éste se le realizó al análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95%, obteniéndose un coeficiente de correlación

de $-0,963$ lo cual indica una fuerte relación entre estas variables estudiadas. Además el estadístico R^2 obtenido, permite explicar en un 92,7% que la variabilidad de la F_c se debe a la porosidad.

En este estudio como en otros realizados sobre cemento endurecido y en mortero [1], se confirmó la existencia de una relación inversa entre la porosidad y la resistencia de estos materiales. Sin embargo, considerando que el concreto es un material compuesto, su resistencia no depende solamente de las propiedades de la matriz y de sus agregados sino también de la calidad de la interfase entre estos [1], aspecto no analizado en la literatura revisada.

Por otra parte, en la Figura 4 se observa el comportamiento seguido por los valores de VPU según las relaciones a/c. En esta figura se aprecia un comportamiento decreciente de la velocidad de pulso ultrasónico a medida que aumenta la relación a/c, lo cual se debe, entre otros factores, a que la porosidad aumenta con el valor de la relación a/c, como se ilustró en la Figura 2. También se presenta en la Ecuación 4 el modelo lineal obtenido para la VPU y la relación a/c. El comportamiento observado comprueba lo alcanzado en la investigación de Vergara y Miralles [15] quienes a través de curvas obtenidas experimentalmente demostraron, que al aumentar la relación a/c disminuye la VPU. En las Figuras 3 y 4 la línea del centro indica la tendencia lograda de acuerdo a los resultados obtenidos, las curvas intermedias son el intervalo de confianza con el cual se realizó el análisis estadístico y las líneas exteriores corresponden a los límites de predicción del modelo.

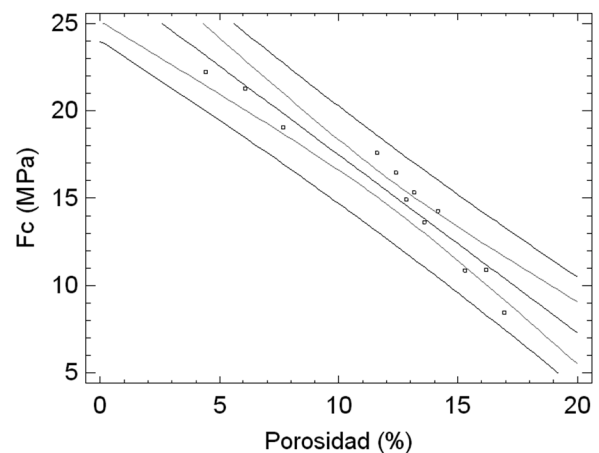


Figura 3. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la porosidad

$$F_c = 27,6368 - 1,01657 * Porosidad \quad (3)$$

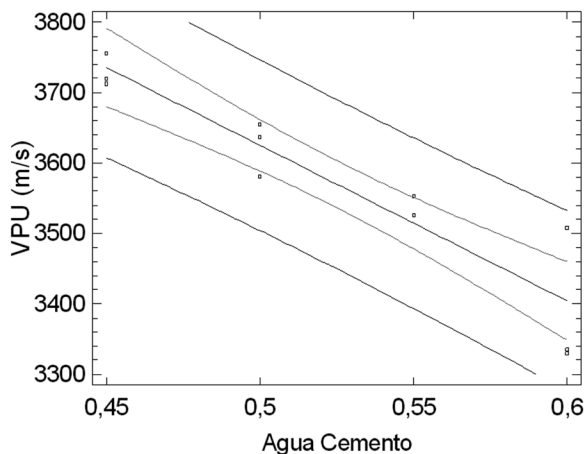


Figura 4. Comportamiento de la velocidad de pulso en función de la relación a/c

$$VPU = 4728,81 - 2207,51 * Agua / Cemento \quad (4)$$

Este modelo presentó una relación significativa entre las variables mencionadas, coeficiente de correlación de -0,934, y explica en un alto porcentaje (87,2%) que la variabilidad de la VPU es influenciada por la relación a/c. Del Rio y Col. [12], además de Lafhaj y otros [15], han propuesto para estos parámetros modelos de tipo lineal con diferentes coeficientes de correlación. Los resultados presentados en este trabajo permitieron obtener coeficientes de correlación superiores a los reportados por Del Rio [12].

Con el fin de establecer relaciones con los resultados obtenidos se presentan las Figuras 5, 6 y 7. En la Figura 5 se observa, para cada día de ensayo, como a medida que aumenta el porcentaje de porosidad de las muestras ensayadas disminuye la resistencia a la compresión F_c , confirmando lo mostrado en la Figura 3. Por lo anterior, se deduce que la porosidad, la relación a/c y la resistencia a la compresión están interrelacionadas entre sí.

En la Figura 6 se observa como a medida que aumenta el porcentaje de porosidad de las muestras, disminuyen los valores de VPU. Esto se produce debido a la relación a/c, la cual al aumentar, permite que exista mayor probabilidad de que se produzcan más poros o vacíos los cuales obstaculizan el viaje de la onda ultrasónica, ocasionando, por las diferencias en

las impedancias acústicas, que aumente el tiempo de vuelo del haz sonoro.

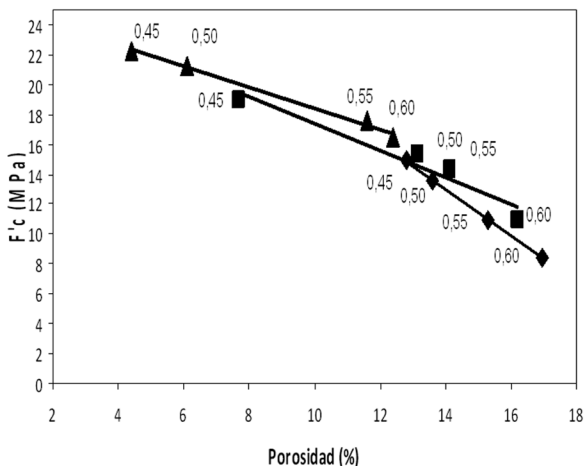


Figura 5. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la porosidad en los respectivos días de curado. Los valores de cada relación a/c se encuentran en los puntos de las líneas de tendencia. Día 7 (◆), Día 14 (■), Día 28 (▲)

Los resultados obtenidos permitieron confirmar la existencia de una relación lineal entre estas variables, lo cual coincide con lo expresado por algunos de los autores consultados [1, 10, 11, 12, 13].

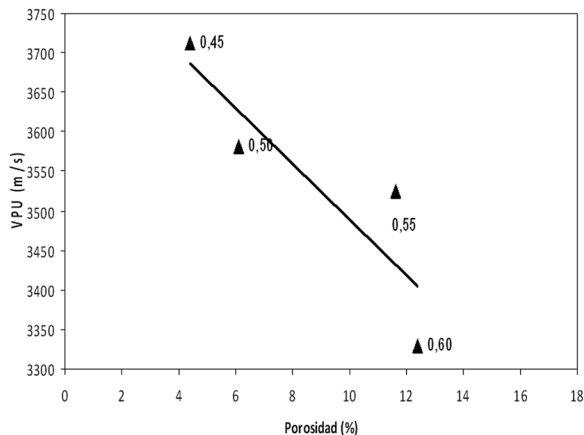


Figura 6. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en función de la porosidad para el día 28 de ensayo. Los valores de cada relación a/c se encuentran en los puntos de las líneas de tendencia

La última relación que se efectuó fue entre la resistencia (F_c) y la VPU, la cual se puede observar en la Figura 7, y en ella los valores altos de resistencia y de VPU se obtienen con relaciones a/c bajas, en este caso con 0,45.

En la figura se observa un comportamiento de tipo lineal entre la F_c y la VPU, en el intervalo de relaciones a/c seleccionadas (0,45 a 0,6). Aunque este comportamiento ha sido reportado por algunos autores, difiere de lo expresado por Del Rio y col. [6], quienes encontraron en su estudio un modelo de tipo exponencial. Lo anterior puede ser debido al empleo de un intervalo de estudio más amplio (relaciones a/c entre 0,48 y 0,8), lo cual permitió evidenciar el comportamiento indicado.

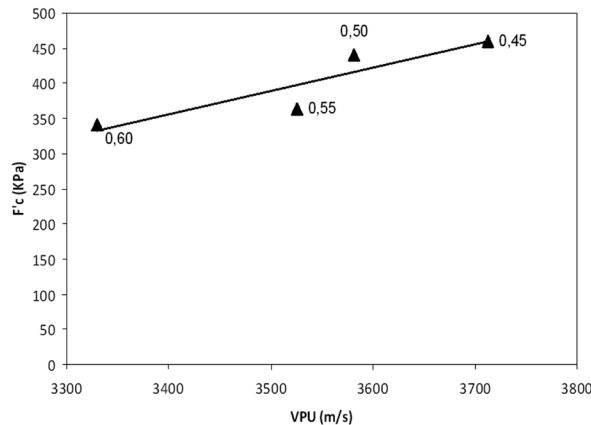


Figura 7. Comportamiento de la resistencia a la compresión en función de la velocidad de pulso ultrasónico para el día 28 de ensayo

CONCLUSIONES

El estudio de muestras de concreto fabricadas con diferentes relaciones a/c y curadas bajo condiciones ambientales, permitieron confirmar que al incrementar la relación a/c, se incrementa el valor porcentual de la porosidad y disminuye la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico.

En el presente trabajo se pudo establecer con alto grado de correlación, la existencia de un modelo lineal entre la resistencia a la compresión y la porosidad, y entre la VPU y la de relación a/c, para las muestras de concreto analizadas.

La velocidad de pulso ultrasónico es una técnica no destructiva que permite conocer el estado interno de las estructuras, posibilitando confirmar el contenido de porosidad en el concreto por medio del tiempo de vuelo de una onda ultrasónica. De acuerdo con los resultados obtenidos la disminución de la

velocidad de pulso ultrasónico (aumento del tiempo de vuelo), se debe al aumento en el porcentaje de porosidad en las probetas, ocasionado porque los poros obstaculizan el paso del pulso ultrasónico en el material retardando su viaje.

La velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión dependen en gran medida de la porosidad, la cual a su vez para el presente estudio depende de la relación agua/cemento empleada.

La investigación permitió verificar la capacidad de la técnica no destructiva de VPU como herramienta para la valoración de estructuras fabricadas en concreto, con la cual se puede hacer seguimiento de la evolución de este material durante su etapa de curado.

REFERENCIAS

- [1] Mehta P. Kumar; Paulo J. M. Monteiro. *Concrete, Microstructure, properties, and materials*. Editorial Mc Graw Hill, United States of America, 2006, 49-53.
- [2] Asociación Colombiana De Productores De Concreto (ASOCRETO) *Tecnología y propiedades*. Instituto del Concreto, Colombia, 2005, 142-143
- [3] Diego Sánchez. *Durabilidad y patología del concreto*. Instituto del concreto, Colombia, 2006, 36-40
- [4] Atomic Energy Agency. *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. IAEA, Austria, 2000, 100-128
- [5] V.M. Malhotra; N.J. Carino. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. ASTM International CRC Press, United States of America, 2004, 8-1,8-19.
- [6] L.M. Del Rio; A. Jimenez; F. López; F.J. Rosa; M.M. Ruffo. "Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing". *Ultrasonics*, 42 (1-9), 2004, 527-530
- [7] Rómel Solis-Carcaño; Eric I. Moreno. "Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity". *Construction and Building Materials*, 22 (6), 2008, 1225-1231.

- [8] Rómel G. Solis Carcaño; Eric Ivan Moreno; William R.Castillo PAK. "*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, 8 (2), 2004, 41-52.
- [9] American Society For Testing and Materials, "Standard Test method for pulse velocity through concrete". ASTM C597-03, USA, 2003.
- [10]M.G. Hernández; M.G.A. Izquierdo; A. Ibañez; J.J. Anaya; L.G. Ullate. "*Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE*". Ultrasonics, 38 (1-8), 2000, 531-533.
- [11]M.G. Hernández; J.J. Anaya; L.G. Ullate; M. Cegarra; T. Sánchez. "*Application of a micromechanical model of three phases to estimating the porosity of mortar by ultrasound*". Cement and concrete research, 36 (4), 2006, 617-624.
- [12]Z. Lafhaj; M. Goueygou; A. Djerbi; M. Kaczmarek . "*Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water / cement ratio and water content*". Cement and Concrete Research, 36 (4), 2006, 625-633.
- [13]Zoubeir Lafhaj; Marc Goueygou. "*Experimental study on sound damaged mortar: variation of ultrasonic parameter with porosity*". Construction and building materials, 23 (2), 2009, 953-958.
- [14]Saad A. Abo-Qudais. "*Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves*". Construction and building materials, 19 (4), 2005, 257-263.
- [15]L. Vergara, R. Mirales, J. Gosálbez, F.J. Juanes, L.G. Ullate, J.J. Anaya, M.G. Hernandez, M.A.G. Izquierdo. "NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar". NDT & E International, 34 (8), 2001, 557-562
- [16]Instituto Colombiano de Normas Técnicas "Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado". NTC 92, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.
- [17]Instituto Colombiano de Normas Técnicas. "Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso". NTC 176, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.
- [18]Instituto Colombiano de Normas Técnicas." Método para determinar el peso específico y la absorción del agregado fino". NTC 237, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.
- [19]Instituto Colombiano de Normas Técnicas. "Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos)". NTC 77, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1994.
- [20]Instituto Colombiano de Normas Técnicas. "Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje del material que pasa tamiz". NTC 78, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 1995.
- [21]Instituto Colombiano de Normas Técnicas. "Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto". NTC 673, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 2000.