



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

EMPLEO DE LAS PRUEBAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO, ESCLEROMETRÍA Y FRECUENCIA DE RESONANCIA PARA EL ANÁLISIS DE CONCRETO HIDRÁULICO ELABORADO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS LOCALES Y CEMENTO CPC30R RS

H. L. Chávez García¹, E. M. Alonso Guzmán¹, W. Martínez Molina¹, M. A. Navarrete Seras², J. A. Guzmán Torres², N. Díaz González², M. A. Mondragón Ornelas² y M. Arreola Sánchez²

1. Cuerpo Académico Consolidado CAC147UMSNH, Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040
2. Ingenieros estudiantes del Programa de Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040

RESUMEN

En la actualidad existen pruebas diversas para las obras civiles que están sustituyendo las pruebas tradicionales de control de calidad, como es el caso de las pruebas no destructivas. Este trabajo comprende una investigación realizada a mezclas de concreto elaboradas en obra y a mezclas elaboradas en laboratorio. Se emplearon pruebas destructivas: prueba de resistencia a la compresión, a la tensión y a la flexión; y no destructivas: velocidad de pulso ultrasónico, esclerometría y frecuencia de resonancia. La innovación del trabajo es la combinación de estas 3 técnicas no destructivas en el estudio del concreto hidráulico hecho en obra y en laboratorio, con el objetivo de verificar su calidad para su aplicación en la obra.

Palabras claves: Concreto, pruebas destructivas, pruebas no destructivas.

ABSTRACT

At present there are several tests for civil constructions that are replacing the traditional tests of quality control, such as nondestructive testing. This work includes a research performed on concrete mixtures prepared in situ and in laboratory. Were used destructive tests: test of compressive strength, tensile strength and flexion, and not destructive tests: ultrasonic pulse velocity, rebound number and resonance frequency. The innovation of this work is the combination of these 3 nondestructive techniques in the study of hydraulic concrete made on site and in laboratory, in order to verify its quality for use in the work.

Key words: Concrete, nondestructive testing, destructive testing

INTRODUCCIÓN

Las pruebas no destructivas son sumamente importantes en el continuo desarrollo industrial. Gracias a ellas es posible determinar la presencia de defectos en los materiales por ejemplo en las soldaduras de equipos tales como recipientes a presión, en los cuales una falla microscópica puede representar grandes pérdidas en dinero, vidas humanas y daños al medio ambiente¹.

Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos en los materiales tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción, o cualquier otro tipo de prueba que permita evaluar o detectar una determinada propiedad en el material. Los ensayos no destructivos juegan un papel que está aumentando en la ingeniería civil, en la actualidad hay varios métodos no destructivos, por ejemplo, los acústicos y los electromagnéticos que abarcan gran área de aplicación y que pueden ser utilizados de manera complementaria. Pero en la mayoría de los casos sólo un método es aplicado para resolver un problema distinto².

Estas técnicas abren la posibilidad de responder a preguntas prácticas sobre equipos específicos y/o procedimientos, tales como su precisión cuando son utilizados para medir espesores, la localización de imperfecciones, es decir, sus alcances y limitaciones³.

Entonces, la precisión en las pruebas no destructivas está aumentando constantemente, por otro lado algunas de las pruebas destructivas para determinar propiedades mecánicas de los materiales, por ejemplo la determinación del Módulo de Young son costosas por el hecho de requerir numerosas muestras y aditamentos a los equipos, además no deja la posibilidad de repetir la prueba si fuera necesario⁴. Es sabido que en todas las obras civiles es necesario llevar un control de calidad de los materiales empleados en su construcción, por otro lado se dan casos en los que ya se tiene terminada la obra o parte de la misma pero surgen cuestiones sobre la calidad de los materiales que se emplearon, de tal manera que es necesario el empleo de pruebas para verificar el estado de la obra o inmueble. Las pruebas físicas empleadas generalmente requeridas para verificar la calidad de los materiales o empleadas para determinar las condiciones en que se encuentra un material tienen el gran inconveniente, que es la destrucción del material estudiado y esto en muchos edificios no se permite ya que se podría afectar la integridad del elemento o simplemente porque la obra civil es considerada un monumento histórico ó patrimonial. Un ejemplo muy claro de la ventaja más importante que tienen las pruebas no destructivas sobre las destructivas es precisamente que se pueden determinar ciertas características de materiales empleados en monumentos de importancia histórica sin dañarlo, pero no sólo de monumentos históricos si no obras civiles importantes que son relativamente jóvenes, obras hechas a base de concreto hidráulico reforzado, por ejemplo del siglo XX.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Previo a la elaboración de los especímenes se realizaron las pruebas de calidad marcadas para los agregados pétreos, estos datos son requeridos para el diseño del concreto. El diseño del concreto se realizó de acuerdo al procedimiento establecido por el ACI. El cemento empleado fue de la marca tolteca CPC 30R RS, y se diseñaron mezclas para un $f'c = 250\text{kg/cm}^2$ y un $f'c = 170\text{kg/cm}^2$.

En una primera etapa de la investigación se elaboraron especímenes de concreto hidráulico cilíndricos y prismáticos con relaciones agua cemento de 0.55 y otra de 0.76, entonces, se realizaron 2 mezclas diferentes con materiales del banco denominado “Joyitas”, que se localiza aproximadamente a 14+000 km del antiguo camino de Morelia-Quiroga en las coordenadas siguientes: 101° 23’ 55’’ de longitud y 19° 44’15’’.

Se fabricaron cilindros de concreto hidráulico con dimensiones de 10cm de diámetro por 20cm de altura, cilindros de 15cm de diámetro por 30cm de altura y vigas de 15cm x 15cm x 60cm. En una primera etapa de la investigación se fabricaron los tres tipos de muestras, descritas anteriormente, teniendo como parámetro la trabajabilidad del concreto hidráulico, de manera que estos cilindros se consideran como concreto elaborado en obra. El número de muestras elaboradas en esta etapa fue de 70 cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura, 69 cilindros de 15cm de diámetro por 30cm de altura y 20 vigas de 15cm x 15cm x 60cm. Las relaciones agua cemento de estas muestras varían de 0.55 a 0.76, para simular condiciones controladas y en obra.

Posteriormente se elaboraron los mismos tres tipos de muestras pero con un control de calidad estricto. Estas muestras tienen relaciones agua cemento de 0.50 y 0.65. En esta etapa se fabricaron 35 cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura con una relación agua cemento de 0.50, 35 cilindros de 15cm de diámetro por 30cm de altura con una relación agua cemento de 0.50 y 20 vigas de 15cm x 15cm x 60cm con una relación agua cemento de 0.50; 35 cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura con una relación agua cemento de 0.65, 35 cilindros de 15cm de diámetro por 30cm de altura con una relación agua cemento de 0.65 y 20 vigas de 15cm x 15cm x 60cm con una relación agua cemento de 0.65. El curado que se dio a las muestras fue por inmersión de los especímenes en agua hasta el día de la prueba.

Los especímenes cilíndricos empleados para la realización de las pruebas no destructivas se extraían de la pila de curado y se cubrían con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad, la primera prueba realizada fue la velocidad de pulso ultrasónico. El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B, marca CONTROLS. En ambas etapas de la investigación, las primeras lecturas se tomaron en los cilindros de 10cm de diámetro x 20cm de altura, posteriormente en los cilindros de 15cm de diámetro x 30cm de altura y finalmente en las vigas de 15cm x 15cm x 60cm, para lo cual se empleó la norma ASTM C597-02⁵. Las tomas de lecturas en los cilindros se realizaron acoplado los transductores en las caras planas opuestas del cilindro de manera que la longitud entre éstos era de 20cm o 30cm, según el tipo de cilindro; en las vigas las lecturas se tomaron en forma transversal y la distancia entre transductores fue de 15cm.

En la primera etapa del trabajo, las pruebas de velocidad de pulso ultrasónico a los tres días de edad para cilindros consistieron simplemente en la determinación de la velocidad, sin embargo, las pruebas de 7 días en adelante consistieron en la determinación de la velocidad de pulso más la resistencia a la compresión de la muestra de manera no destructiva. Se realizó una prueba combinada de esclerometría con ultrasonido. Pero se presentó un problema en la obtención de las lecturas del esclerómetro, si se aplicaba el procedimiento descrito para el esclerómetro o martillo de Schmidt directamente en el cilindro no se detectaban rebotes en el esclerómetro y por tanto no se obtenía resistencia alguna. Para resolver el problema, de acuerdo a la bibliografía revisada, es necesario aplicar al cilindro una precarga de sujeción del 15% aproximadamente del esfuerzo de

falla y posteriormente realizar la tomas de lecturas con el esclerómetro, con esto se obtenían los rebotes del esclerómetro del mismo equipo de ultrasonido.

Las frecuencias de resonancia fueron determinadas después de la velocidad de pulso, con un equipo E-meter C-4959 Mark II de James Instruments del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.M.S.N.H.

En ambas etapas se determinaron frecuencias fundamentales longitudinales y transversales para vigas, y frecuencias fundamentales longitudinales para cilindros. El aparato de prueba es el requerido por la ASTM C 215-85, titulada Método de prueba para frecuencias fundamentales longitudinales, transversales, y torsionales de especímenes de concreto⁶. El aparato consiste principalmente de dos secciones: una genera vibraciones mecánicas y la otra detecta estas vibraciones⁷.

Terminadas las lecturas con los equipos de pruebas no destructivas se reservaron los especímenes programados para las pruebas destructivas. En la primera etapa de la investigación para cada fecha de prueba se consideraron de cada mezcla 5 cilindros de 10cm de diámetro x 20cm de altura, 5 cilindros de 15cm de diámetro x 30cm de altura, y 2 vigas. En la segunda etapa solamente se destinaron 3 cilindros de 10cm de diámetro x 20cm de altura, 3 cilindros de 15cm de diámetro x 30cm de altura, y 2 vigas para las pruebas destructivas. De tal manera que se tienen 20 muestras cilíndricas para continuar con la investigación a edades tardías.

En la primera etapa, un transcurso de 7 horas aproximadamente pasó de las pruebas no destructivas a la realización de las destructivas, ya que las no destructivas se llevaban a cabo durante la mañana y las destructivas durante la tarde, pero siempre se tuvo la precaución de mantener las muestras húmedas, sumergidas en agua. En la segunda etapa de la investigación, debido a que se probaba un menor número de muestras, una vez terminadas las pruebas no destructivas inmediatamente se realizaban las pruebas destructivas.

Las edades de pruebas fueron de 3, 7, 14, 21 y 28 días. Primero se realizó la resistencia a la compresión en los especímenes cilíndricos de acuerdo a la norma ASTM C 39/C 39M – 03, obteniendo conjuntamente el Módulo de Elasticidad Estático de acuerdo a la norma ASTM C 469 – 02, posteriormente la resistencia a la tensión indirecta en cilindros de acuerdo a la norma ASTM C 496/C 496M – 04 y finalmente la resistencia a la flexión en los especímenes prismático de acuerdo a la norma ASTM C 78-02.

RESULTADOS

Se generaron gráficas comparativas de las propiedades mecánicas medidas vs las pruebas no destructivas realizadas. Las gráficas fueron obtenidas con valores puntuales de las lecturas correspondientes a cada edad y mezcla.

La Figura 1, es típica de los resultados obtenidos en las lecturas de velocidad de pulso, se compara la resistencia a la compresión con la velocidad de pulso ultrasónico obtenida en cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura elaborados en la primera etapa de la investigación. En estas gráficas se describe una tendencia que indica el aumento de la velocidad de pulso con la edad, sin embargo, se tienen lecturas mayores a edades de 14 o 21 días que las

obtenidas a 28 días, esto debido a que la relación A/C no fue controlada en las mezclas de la primera etapa, para emular las condiciones de obra real, por lo que tenemos variaciones en la relación agua cemento, la explicación de obtener resistencia mayores a 21 días que a 28 días es porque al probar un cilindro de 21 días este se elaboró con una menor relación agua cemento que los seleccionados a 28 días.

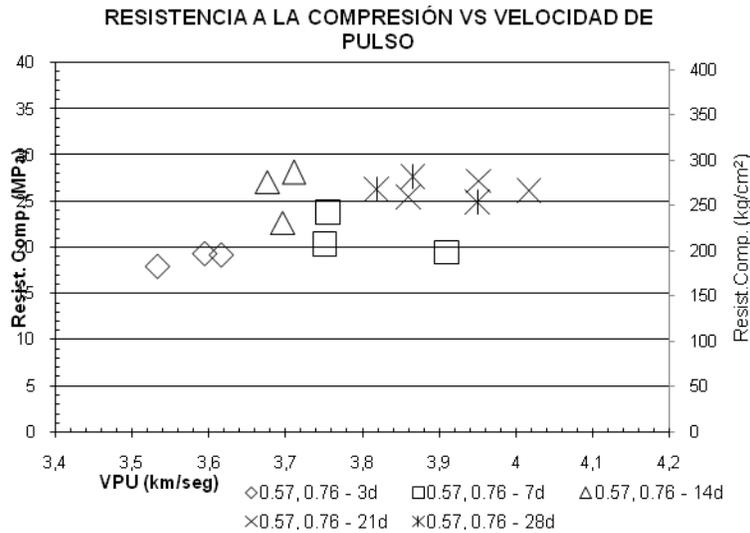


Figura 1. Gráfica de resistencia a compresión vs velocidad de pulso ultrasónico de cilindros de 10cm de diámetro x 20cm de altura con relaciones a/c=0.57 y 0.76, para edades de 3 días a 28 días.

La Figura 2 corresponde a los cilindros de 15cm de diámetro x 30cm de altura de la segunda etapa de la investigación, se tiene una diferencia en la tendencia ascendente bien definida y marcada en comparación con las muestras de la primera etapa, se alcanzan los mayores valores de velocidad de pulso ultrasónico y por tanto mayores valores de resistencia a la compresión a los 28 días de edad, se tiene poca dispersión en las lecturas tomadas cada edad de prueba.

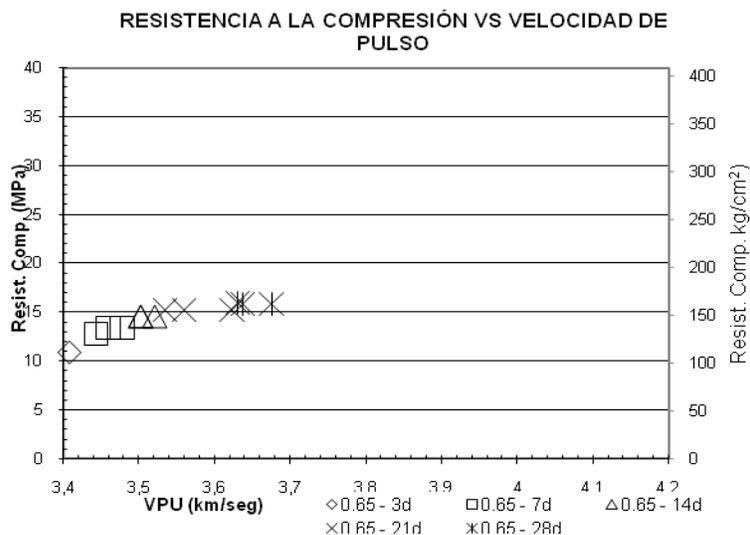


Figura 2. Gráfica de resistencia a compresión vs velocidad de pulso ultrasónico obtenido para cilindros de 10cm de diámetro x 20cm de altura con una relación a/c=0.65, para edades de 3 días a 28 días

La prueba de esclerometría solamente se realizó en las muestras cilíndricas de la primera etapa, en donde el parámetro a determinar fue la trabajabilidad, en base al revenimiento de la mezcla. Los resultados obtenidos en los cilindros de 10cm de diámetro x 20cm de altura se muestran en la figura 3, es posible definir una tendencia que indica un aumento del rebote con la edad del concreto, debido a que no se controló la relación a/c en estas muestras, se presentan prácticamente los mismos valores de resistencia a la compresión en las edades de 14, 21 y 28 días, no sucede lo mismo con el número de rebote obtenido ya que los mayores valores de rebotes se tienen a la edad de 21 y 28 días

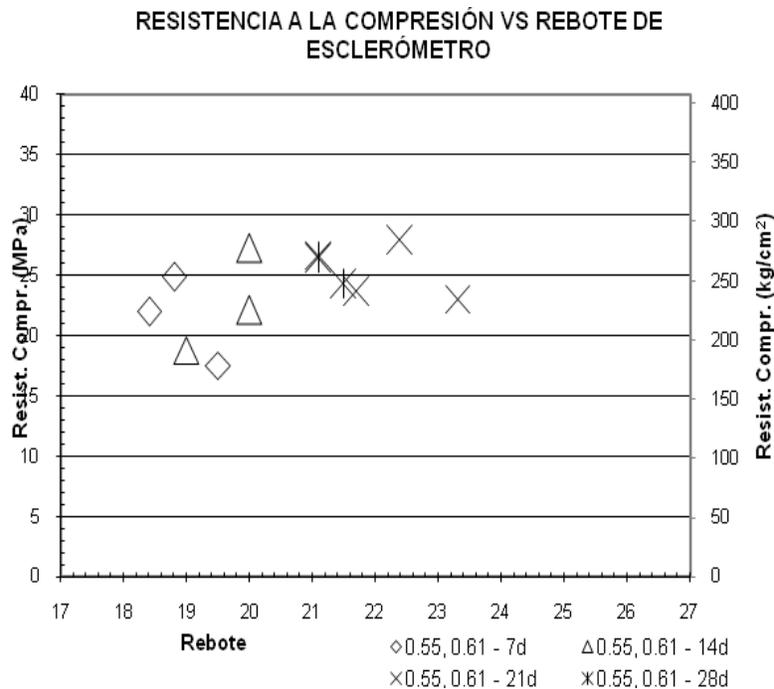


Figura 3. Gráfica de resistencia a compresión vs rebote del esclerómetro obtenido en cilindros de 10cm de diámetro x 20cm de altura con relaciones a/c=0.55 y 0.61, para edades de 7 días a 28 días.

En las lecturas de frecuencia de resonancia fundamental en el modo longitudinal para todos los cilindros de las dos etapas no se puede obtener una tendencia que se repita en las muestras, las lecturas no se obtiene de acuerdo a lo reportado en la bibliografía⁸.

Las frecuencias de resonancia fundamental longitudinal y transversal descritas por las vigas de la segunda etapa presentan un aumento del módulo de ruptura y por lo tanto de la frecuencia medida con respecto al tiempo, los valores para la frecuencia longitudinal de las vigas con una relación agua cemento de 0.50 son mayores que las frecuencias obtenidas en las vigas con una relación agua cemento de 0.65, figura 4, lo cual indica que en las muestras más porosas debido a un mayor volumen de vacíos, las vibraciones mecánicas inducidas en el concreto no se propagan.

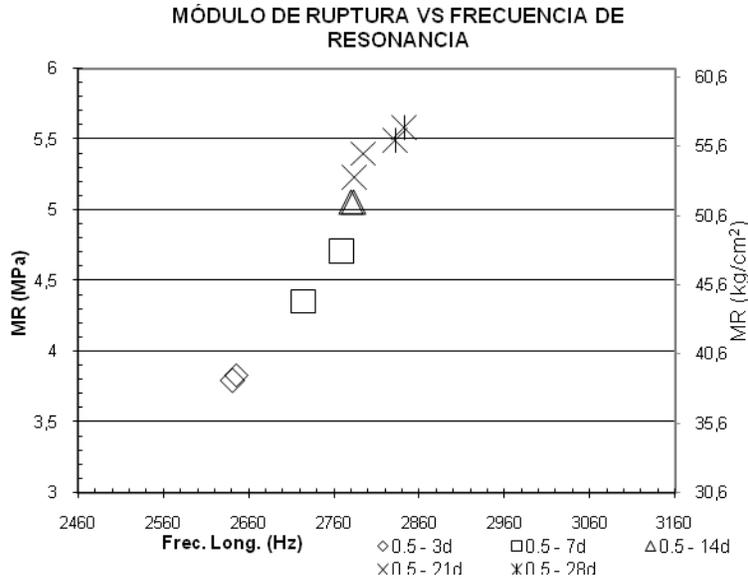


Figura 4. Módulo de ruptura vs frecuencia de resonancia en el modo longitudinal obtenida en vigas de 15cm x 15cm x 60cm con una relación a/c=0.50, para edades de 3días a 28 días

CONCLUSIONES

La velocidad de pulso ultrasónico, es una de las pruebas no destructivas con más consistencia en sus resultados. Las muestras de la segunda etapa indican velocidades de pulso en rangos diferentes, para muestras con $a/c = 0.50$ la velocidad esta en un rango de 3.6 a 3.9 km/seg, mientras que para las muestras con $a/c = 0.65$ la velocidad esta en un rango de 3.3 a 3.6 km/seg. En esta prueba no influye la morfología o geometría de la muestra analizada.

La esclerometría es un método que debe ser empleado para determinar la homogeneidad del concreto más no su resistencia a la compresión ya que se basa en las propiedades de superficie del concreto y estas pueden estar afectadas por el medio ambiente, como por ejemplo puede estar carbonatada, además esta prueba da información de la capa exterior del concreto con una profundidad de hasta 5cm. El rebote del esclerómetro sí aumenta con la edad del concreto.

La frecuencia de resonancia es la prueba más afectada por la morfología o geometría de las muestras analizadas. Por tanto, la frecuencia de resonancia debe ser empleada solamente si se tienen muestras prismáticas que cumplan con las dimensiones indicadas en la literatura, de otro modo será difícil obtener las frecuencias, además esta prueba no puede aplicarse en campo.

Existe una diferencia clara entre una mezcla elaborada sin llevar un control en la relación a/c y una mezcla con una relación a/c bien controlada. En un concreto con relación a/c controlada se pueden obtener tendencias en las pruebas aplicadas, esto indica que esa prueba es un parámetro que de manera indirecta da información de la calidad del concreto, como es caso de las pruebas no destructivas aplicadas en este estudio.

Se sugiere que estos ensayos pueden servir para que, dentro de los nuevos criterios de durabilidad que se imponen en la ingeniería moderna, se califique los materiales que se emplean en el

concreto con una mayor precisión. También se pueden emplear para predecir la vida útil que tendrá con el correr del tiempo el material.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de la Coordinación de la Investigación Científica y del Proyecto de Redes SEP-PROMEPE, Nombre de la Red: Red Temática Promep para la Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico; Cuerpo Académico Iniciador de la Red: CAC- UMSNH- 147 Ciencias, Ingeniería y Tecnología de Materiales para la Construcción.

REFERENCIAS

1. Parnasov V. S. and Dobromyslov V. A., “DNT methods, equipment, and technology for polymer composite products”, *Measurement Techniques* 40, 11,(1997), pp 1076-1083.
2. Kohl C., Krause M., Maierhofer C. and Wostmann J., “2D- and 3D-visualisation of NDT-data using data fusion technique”, *Materials and Structures*, Federal Institute for Materials Research and Testing, (2005), pp 817-826
3. Beutel, R., Reinhardt, H.-W., Grosse, C.U., Krause, M., Algernon, D., Streicher, D., Maierhofer, C., Glaubitt, A., “Quantitativer Verfahrensvergleich. In: Bergmeister, K.”, Wörner, J.-D, eds. *Betonkalender 2007*, Ernst & Sohn, (Berlin, 2007):pp. 567–573
4. Kwang-Myong L., Dong-Soo K. and Jee-Sang K., “Determination of Dynamic Young's Modulus of Concrete at Early Ages by Impact Resonance Test”, *KSCE, Journal of Civil Engineering*, 1. 1 (1997), pp 11-18
5. ASTM Test Designation C 597-02, “Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete”, *Annual Book of ASTM Standard*, 04, 02, (2003), West Conshohocken, PA.
6. ASTM C 215-02, “Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens, *Annual Book of ASTM Standards*, 04, 02, (2003), West Conshohocken, PA
7. Malhotra, V. M., *Testing of Hardened Concrete: Nondestructive Methods*, ACI Monograph 9, American Concrete Institute, (Detroit, MI. 1976).
8. Jones, R., “Non-Destructive Testing of Concrete”, Cambridge University Press, (London, 1962).