

PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

# Estimación del Módulo de Elasticidad por medio de la Velocidad de Pulso Ultrasónico 2<sup>da</sup> parte.

**E**n la primera parte de este documento (presentada en la edición anterior), se abordó la posibilidad de estimar el módulo de elasticidad dinámico del concreto, realizando mediciones de pulso ultrasónico en elementos en donde previamente se conoce la densidad del material.



Si fuera conveniente en muestras de concreto endurecido extraídos de elementos estructurales,  $E_d$  (Módulo dinámico), éste puede ser evaluado experimentalmente a partir del método de resonancia y de la densidad del material ( $\rho$ ), estimada a partir de la masa y de la relación de volumen de las muestras extraídas. Sin embargo, no es posible que se lleve a cabo directamente en elementos estructurales "completos" donde se justifica la medición de la velocidad de ondas de cortante, medida igual que la velocidad de onda longitudinal usando el mismo equipo con diferentes transductores. Esta velocidad de onda de cortante también puede ser relacionada con el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ).

$$C_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1-\sigma)}}$$

En otro orden, de la relación entre el coeficiente de Poisson y las velocidades de pulso ultrasónico longitudinal ( $C_L$ ) y de cortante ( $C_s$ ), respectivamente, se puede definir que:

$$\sigma = \sqrt{\frac{C_L^2 - 2C_s^2}{(C_L^2 - 2C_s^2)}}$$

Por otra parte, si denominamos  $d$ , al espesor del elemento, entonces:

$$C_L = \frac{d}{t_L} \text{ y } C_s = \frac{d}{t_s}$$

Siendo en estas expresiones  $t_L$  y  $t_s$ , el tiempo de vuelo del pulso ultrasónico de las ondas longitudinal y de cortante, respectivamente, medidas con el instrumento en la muestra de concreto estudiada. De acuerdo a lo anterior, la Relación de Poisson puede transcribirse como:

$$\sigma = \frac{t_s^2 - t_L^2}{2(t_s^2 - t_L^2)}$$

Esta ecuación se puede utilizar para determinar la Relación de Poisson de un elemento estructural de concreto, en el que se desconoce el espesor. Si la constante de rigidez y el módulo de elasticidad estático, se obtienen por medio de la relación:  $k = 1.7E_c - 6.7$  (GPa).

Entonces, con el efecto de la relación de Poisson definido previamente, el módulo de elasticidad dinámico podrá ser obtenido por medio de:

$E_d = 1.5E_c - 5.9$  (GPa), de donde despejando  $E_c$  se puede llegar a:

$$E_c = \frac{2}{3} E_d + 3.93 \text{ (GPa)},$$

Es decir que, conocido el módulo de elasticidad dinámico obtenido mediante pruebas de ultrasonido, es posible conocer el módulo de elasticidad estático.

En el presente trabajo se proporciona una metodología para la determinación de los módulos de elasticidad dinámico y estático del concreto. Por otra parte se demuestra que al evaluar la relación de Poisson en elementos estructurales, no se requiere conocer el espesor del elemento estructural que se estudia. Sin duda, la aplicación de los aspectos presentados resultan útiles para la predicción de la rigidez del material, así como de otras propiedades elásticas de éste. **■**

**Referencia:** Choudhari N. K.; Kumar A.; Kumar Y.; Gupta R., "Evaluation of elastic moduli of concrete by ultrasonic velocity", NDE2002 predict. assure. Improve, en National Seminar of ISNT (Indian Society for Not-Destructing Testing) Chennai, 5-7 12. 2002. [www.nde2002.org](http://www.nde2002.org).

## CONCRETOS RECICLADOS

# Concretos reciclados elaborados con canto rodado

Uno de los factores que se debe tomar en cuenta en el tema de la resistencia del concreto, es la textura superficial del agregado grueso, la cual actúa sobre la zona de interface, modificando la adherencia entre éste y el mortero. Los agregados reciclados obtenidos de la trituración de concretos de desecho, debido a su composición presentan una mayor porosidad y una textura superficial más rugosa que los agregados naturales; hecho que afecta tanto a las propiedades y características de los agregados reciclados, como a las de los concretos con ellos elaborados.

En este escrito se presentan los resultados de una investigación desarrollada en el Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, de la Plata en Argentina. Se elaboran en esta concretos considerando 50, 75 y 100% de reemplazo del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado proveniente de la trituración de un concreto elaborado con canto rodado, y se establece una comparativa con las prestaciones resultantes; asociadas a un concreto convencional elaborado con agregado grueso natural.

El concreto convencional (HC) fue elaborado con una relación agua-cemento (a/c) de 0.50. Como agregado grueso se usó canto rodado silíceo, y como agregado fino, arena silícea de río con Módulo de Finura 2.32, utilizándose además cemento Portland compuesto. A partir de este concreto, y luego de determinar sus propiedades físico-mecánicas, se procedió a su trituración para obtener los agregados reciclados y elaborar concretos reciclados (HR) de igual relación a/c; reemplazando el agregado grueso natural con los porcentajes en volumen antes mencionados, y manteniendo constante las proporciones de los demás materiales.

Con cada una de las mezclas elaboradas fueron moldeadas probetas cilíndricas y prismáticas para la caracterización físico-mecánica de los concretos, como también para la determinación de parámetros relacionados con la capacidad de transporte de agua a través de la estructura porosa del material. Las muestras fueron desmoldadas a las 24 horas y colocadas en



cámara húmeda a temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , con humedad relativa del 95% y ensayadas a la edad de 28 días.

Puede concluirse que el agregado grueso reciclado presenta menor densidad y mayor absorción de agua y pérdida de peso por abrasión que el agregado grueso natural, debido a la presencia de mortero como parte constituyente de dichos agregados. En tal medida, en estado fresco se observa una reducción del revenimiento a medida que se incrementa el porcentaje de agregado grueso reciclado utilizado, lo cual pone de manifiesto una notable influencia de la textura superficial de los mismos. Este hecho es atribuido a que el agregado natural está constituido por partículas de forma redondeada y textura lisa, mientras que el agregado reciclado presenta una mayor rugosidad superficial e irregularidad producto del mortero adherido.

Asimismo, los concretos reciclados elaborados con hasta un 75% de agregados reciclados, presentan un comportamiento resistente, similar o superior al del HC, hecho que debe ser atribuido a una mayor adherencia entre la nueva matriz cementicia y el agregado reciclado; a pesar de poseer este último una calidad inferior respecto al agregado natural. Sin embargo, debe considerarse que en los HR se produce una disminución del módulo de elasticidad estático, la cual es más importante cuando se incrementa el porcentaje de agregado reciclado.

Respecto al desempeño durable de los HR, se observó un comportamiento satisfactorio y similar al del HC frente al transporte de agua bajo presión; mientras que en el ensayo de absorción de agua por capilaridad se aprecia un aumento significativo en los valores de la velocidad y capacidad de succión capilar para reemplazos superiores al 50%, aspecto que está directamente relacionado con la mayor porosidad de los agregados reciclados.

Considerando estos resultados puede inferirse que concretos de a/c iguales o menores a 0.50, elaborados con agregados gruesos reciclados de similares características a los utilizados en este estudio en porcentajes menores al 50%, presentarían un adecuado comportamiento resistente y durable; por lo que su empleo en la construcción constituye una alternativa ventajosa tanto desde el punto de vista económico como ecológico. **C**

**Referencia:** Zega C. J.; Taus V. L.; Di Maio A. A., "Comportamiento físico-mecánico de concretos reciclados elaborados con canto rodado", en *Boletín Técnico IMME*, vol.44, núm. 3, Caracas, noviembre de 2006, ISSN 0376-723X.

MODELOS NEURONALES

# Modelo de redes neuronales para predecir la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica del concreto

**S**e exponen en este texto los resultados de una investigación en la que fue desarrollado un modelo de redes neuronales para predecir la resistencia a la compresión del concreto, mediante el peso unitario y la velocidad de pulso ultrasónico, y donde fueron ensayados especímenes elaborados con 41 mezclas diferentes a 28 días. Además se predice la resistividad del concreto mediante el peso unitario, la velocidad de pulso ultrasónico, y la resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión es el parámetro más usado para definir las características del concreto en estado endurecido. Por su parte, la resistividad es definida como la resistencia eléctrica de un conductor de volumen unitario y área transversal constante, en la cual la corriente es continua y uniformemente distribuida. El inverso de la resistividad es la conductividad, que corresponde a una medida de la facilidad con la que la corriente pasa a través de un material.

La modelación del concreto en estado fresco y endurecido mediante herramientas teóricas y matemáticas ha crecido en los últimos años. El poder de cálculo que ofrecen hoy los computadores personales ha permitido desarrollar estas tareas, y entre las técnicas de inteligencia artificial que más se ha difundido y aplicado en el área de los materiales se encuentran las redes neuronales artificiales.

Una red neuronal artificial es un modelo computacional que por su arquitectura intenta imitar las relaciones del comportamiento del cerebro. Consiste en un número limitado de elementos interconectados entre sí (neuronas) y distribuidos en una capa de entrada, una o más capas ocultas, y una capa de salida. La capa de entrada tiene la función de recibir la información desde el exterior,

mientras que las neuronas de la capa de salida son las encargadas de entregar los resultados de las predicciones realizadas por la red. Las capas ocultas generan las relaciones de encadenamiento entre las de entrada y salida, extraen y refinan las relaciones y características de las variables de entrada para predecir las de salida; que son de interés para el problema. Con el fin de encontrar los modelos de redes neuronales artificiales óptimos para predecir la resistencia y la resistividad del concreto, se ensayaron las mezclas en las que se varió la dosificación. Se fabricaron entre 5 y 7 cilindros por cada mezcla, con un mismo cemento, y agregados de la misma fuente. El contenido de cemento se varió en tres cuantías: 250, 300 y 350 kg/m<sup>3</sup>; asimismo se consideraron tres relaciones agua/cemento (a/c): 0.45, 0.55 y 0.67.

En el caso de la arena se trabajó con dos granulometrías: una con un módulo de finura (MF) de 3,3, y la otra con MF de 2,2. El agregado grueso se utilizó con tres tamaños máximos diferentes 1", ¾", y ½". En las mezclas secas, con poca trabajabilidad se utilizaron dosis muy bajas de aditivo plastificante. Sobre cada uno de los cilindros obtenidos se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, velocidad de pulso, peso unitario, y resistividad eléctrica. Cabe decir que la obtención de las arquitecturas de las redes neuronales se realizó mediante la aplicación comercial denominada *Neural Network Toolbox* del MATLAB®.

Puede concluirse que de todas las variables experimentalmente medidas, la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica mostraron una dispersión alta (coeficiente de variación > 20%), mientras que el peso unitario y la velocidad de pulso ultrasónico mostraron dispersiones bajas (coeficiente de variación < 4%).

Los materiales utilizados en estas mezclas son representativos de los utilizados normalmente en la ciudad de Bogotá, por lo que los modelos desarrollados pueden ser aplicables a mezclas de concreto coladas con materiales de naturaleza similar. Aunque en la literatura se menciona una estrecha relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico para el concreto, y que algunos investigadores muestran estudios con muy buenas correlaciones; los datos experimentales medidos, mostraron que el coeficiente de determinación para una regresión lineal de mínimos cuadrados para estas dos variables solo tiene un valor de  $R^2 = 0.37$ . En general, los resultados mostraron que los modelos de redes neuronales para predecir la resistencia a la



compresión y la resistividad eléctrica del concreto funcionan adecuadamente. **C**

**Referencia:** Lizarazo Marriaga J. M.; Gómez Cortés J. G.; "Desarrollo de un modelo de redes neuronales artificiales para predecir la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica del concreto", en *Ingeniería e Investigación*, vol. 27, núm. 1, Bogotá, Colombia, enero-abril de 2007.

## REFORZAMIENTO DEL CONCRETO

# Materiales compuestos para reforzar elementos de concreto

**E**l concreto reforzado es el material compuesto más utilizado en la industria de la construcción ya que combina las propiedades básicas de resistencia del concreto (compresión) con las del acero de refuerzo (tensión). Su durabilidad y comportamiento dependen, entre otras cosas, de la proporción de sus constituyentes, de su fabricación y del medio ambiente.

El advenimiento de los materiales compuestos a base de polímeros, impone el estudio de cómo aplicarlos a elementos de concreto para usarlos como refuerzo y evaluar si se logra aumentar la vida útil del elemento. Se exponen a continuación los resultados de un estudio para conocer los aspectos teóricos del uso de los polímeros y definir su factibilidad de empleo en elementos de concreto sujetos a flexión.

Los materiales constituyentes del compuesto utilizado son la fibra de vidrio tipo E, poliéster ResinmexMR 250, y catalizador K2000, que sirve para lograr el fraguado y curado del poliéster; resultando en lo que se conoce como matriz.

Partiendo del hecho de que la resistencia del concreto a la tensión es baja, el compuesto se colocará en la zona de tensión y la eficacia de la transmisión de los esfuerzos dependerá de la adherencia entre el concreto y el material compuesto. Como material de unión se usó el propio poliéster-catalizador, de ahí la importancia de lograr una impregnación uniforme.

La Norma ASTM C 78 (1994) refiere la prueba de un elemento de concreto induciendo falla por

flexión, que utiliza una pieza de concreto simple de 15 x 15 cm de sección transversal y 45 cm de longitud entre apoyos. La carga puede ser aplicada en el centro del claro o dos cargas aplicadas en los tercios. Esta última fue la utilizada en este trabajo por inducir flexión pura en el tercio medio de la pieza.

Se procedió a dosificar el concreto para una resistencia de 175 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, usando cemento tipo I. Se llegó a una proporción en volumen, con relación agua-cemento (a/c) de 0.8, y revenimiento de 8 cm; en donde se alcanzó una resistencia de 143 kg/cm<sup>2</sup> a los 7 días, y de 203 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días. Fueron analizadas las características y propiedades de los elementos del material compuesto para su integración a las vigas. A una de las vigas ensayadas no se le adicionó material compuesto, a la segunda se le proporcionó 15 cm longitudinales de compuesto al centro en una de las caras, y a la tercera igual a la anterior más cuatro tiras longitudinales en las caras laterales. Este proceso inicial se hizo a fin de observar las posibles dificultades en la realización de las pruebas.

Con la experiencia lograda se elaboraron otras ocho vigas con las mismas características de sección y longitud, y tres cilindros de prueba; arrojando una resistencia de 240 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días. A las vigas se les proporcionó curado por inmersión en agua por 7 días, dejándolas luego bajo techo; a los 28 días se procedió a la integración de la fibra de vidrio y a la impregnación del poliéster. Se colocaron fibras en el sentido longitudinal de dos tipos (16 y 22 tiras); en algunas vigas se colocaron tiras en sentido transversal y/o en caras laterales.

En general, en todas las vigas con material compuesto, la falla ocurrió al instante de separarse el compuesto de la superficie del concreto, sin ocurrir ruptura de las fibras, ni alcanzar la deformación calculada en investigaciones precedentes; por lo que es muy importante la adecuada adhesión entre el compuesto y el concreto para lograr mayor resistencia. Pudo constatarse que el uso de material compuesto proporciona mayor resistencia, y que al colocarse el refuerzo en las caras laterales se incrementa la carga de ruptura. Asimismo se verifica que a mayor densidad de fibra le corresponde mayor carga de ruptura, así como que la colocación de fibras transversales no incrementa la resistencia de forma considerable. **C**

**Referencia:** Aguilar Conde J. T.; "Elementos de concreto reforzados con materiales compuestos", en *Ingeniería, Revista Académica de la Universidad Autónoma de Yucatán*. Merida, México. 6-1, 2002.

