



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

MÉTODO SIMPLE Y NO DESTRUCTIVO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL CONCRETO A PARTIR DE UNA EXCITACIÓN POR IMPACTO

S. Apodaca García¹, J.R. Orduño Apodaca¹, D.C. Gámez García¹, J.M. Gómez Soberón², S.P. Arredondo Rea¹, J.L. Almaral Sánchez¹, R. Corral Higuera^{1,*}

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis, Fuente de Poseidón y Ángel Flores s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 81223, Los Mochis, Sinaloa, México, rmn1779@gmail.com.

²Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, Avenida Gregorio Marañón 44-50, Z.C. 08028, Barcelona, España.

RESUMEN

Tradicionalmente, el módulo de Young o de elasticidad (E) y la relación de Poisson (μ), son medidos con técnicas extensiométricas, sometiendo las muestras a esfuerzos de compresión y midiendo las deformaciones resultantes longitudinales y transversales. La determinación de las curvas esfuerzo – deformación suele resultar engorrosa e imprecisa, ya que debe hacerse por escalones de carga y en el cálculo se conjugan los errores de medición de la carga, la deformación, la sección, la longitud de base etc. El módulo de rigidez (G) es difícil determinar en el concreto mediante ensayos destructivos por la dificultad en la aplicación de esfuerzos de corte. El presente trabajo muestra un método no destructivo para determinar E , G y μ a partir de pequeñas perturbaciones mecánicas producidas a probetas de concreto. El procedimiento sigue básicamente las instrucciones fijadas en la norma ASTM C215 y su simplicidad, rapidez y precisión en los resultados obtenidos con las variables medidas permiten concluir que esta metodología es de aplicación directa para determinar las principales constantes elásticas del concreto a partir de probetas prismáticas rectangulares normalizadas.

Palabras claves: Frecuencia de Resonancia por Impacto, Método no destructivo, Módulo de rigidez, Módulo de Young, Relación de Poisson,

ABSTRACT

Traditionally, the modulus of elasticity (E) and Poisson's ratio (μ), are measured by techniques gage, subjecting the samples to compression stress and measuring the resulting longitudinal and transverse deformation. The determination curves of stress - strain tends to be cumbersome and inaccurate, because it must be done for load steps, and in the calculation are combined, the measurement errors of the load, the deformation section, the base length. The shear modulus (G) is difficult to determine in concrete by destructive testing because of the difficulty in applying shear. This paper shows a nondestructive method to determine E , G and μ from small mechanical

disturbances, produced concrete specimens. The procedure basically follows the instructions given in ASTM C215, and its simplicity, speed and accuracy in the results obtained with the measured variables, it can be concluded that this methodology is directly applicable to determine the main elastic constants of concrete, from of standardized rectangular prisms.

Key Words: Impact Resonance Test, Nondestructive method, Poisson's ratio, Shear modulus, Young's modulus.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades elásticas del concreto son un parámetro sumamente importante que refleja la capacidad del concreto de deformarse mecánicamente, dichos conocimientos son útiles en la prevención de deformaciones excesivas, proveyendo de servicio y proporcionando el mejor diseño costo-beneficio¹

Las propiedades elásticas pueden ser caracterizadas por métodos estáticos (métodos destructivos), dinámicos y ultrasónicos (métodos no destructivos). El principio de los métodos dinámicos consiste en calcular los módulos elásticos a partir de las frecuencias naturales de vibración del cuerpo de prueba y sus parámetros geométricos. En conjunto con las dimensiones y la masa, poseen una relación unívoca con los módulos elásticos. Poseen la ventaja que se pueden emplear pequeñas muestras, son rápidos y no destructivos. Básicamente son tres modos de vibración empleados: longitudinal, transversal o flexional y torsional. Los dos primeros permiten obtener el módulo de elasticidad y el último el módulo de rigidez y la relación de Poisson².

El módulo de elasticidad se define como la razón entre la carga aplicada y la deformación sufrida por el cuerpo al que se le aplica la carga, para esfuerzos a tensión y compresión se denomina módulo de elasticidad longitudinal, módulo de Young, o simplemente módulo de elasticidad, para esfuerzo a torsión y cortante se denomina módulo de elasticidad transversal, módulo de rigidez o módulo de cizallamiento^{2,3}.

El módulo de elasticidad dinámico (E_d) y el estático (E_c) son cercanos cuando las mediciones se toman por debajo de $0,4F'_c$, ya que la relación esfuerzo-deformación exhibe un comportamiento lineal en ese intervalo⁴, sin embargo a pesar de su cercanía en dicho intervalo, el E_d resulta ser mayor que el E_c ^{4,5,6}, esto se puede atribuir a la presencia del esfuerzo aplicado en la determinación del módulo de elasticidad estático, que da como resultado micro grietas que dispersan en el concreto⁴.

Los ensayos no destructivos proporcionan un conjunto de resultados interesantes por sí mismos y para su contrastación en la estimación de otros parámetros del material⁷. La evaluación directa del módulo de elasticidad estático de acuerdo con la norma ASTM C469 es complicada e implica un procedimiento que consume tiempo durante el endurecimiento del concreto. Las diferencias en el contenido de agregado grueso, agregado máximo de tamaño y el comportamiento reológico de AR pueden afectar el comportamiento esfuerzo-deformación⁸.

Comparando el método de resonancia por impacto con el método de pulso ultrasónico, constatamos que el modo dinámico (acústico) estima con mayor precisión la deformabilidad del

material que el pulso ultrasónico, dado que las longitudes de onda generadas por la perturbación son muy superiores a las discontinuidades, lo que minimiza el efecto de no homogeneidad del material estudiado⁷, por lo que los ensayos no destructivos proveen de ventajas importantes al momento de analizar el comportamiento elástico del concreto, además debido a su naturaleza no destructiva, se requiere la utilización de menor cantidad de probetas, dando a este ensayo un fin sustentable.

El presente trabajo trata sobre el método utilizado para calcular las propiedades elásticas dinámicas en el concreto mediante el método Frecuencia de Resonancia por impacto, el cual está estipulado en la Norma ASTM C 215.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las frecuencias resonantes fundamentales son determinadas usando dos procedimientos alternativos: (1) el método de resonancia forzada y (2) el método de resonancia por impacto, en este caso el método utilizado es el método de resonancia por impacto. En éste, un espécimen es apoyado sobre soportes e impactado por un pequeño martillo, la respuesta del espécimen es medida por un acelerómetro e interpretadas por un analizador de frecuencias. Las frecuencias fundamentales para los tres diferentes modos de vibración son obtenidas por localización propia del punto de impacto y el acelerómetro⁶. La metodología puede ser dividida en dos partes; la primera es la excitación, detección y obtención de las frecuencias de resonancia, y la segunda, es el empleo de las relaciones matemáticas y de los procedimientos computacionales, para la obtención de módulos elásticos a partir de frecuencias de resonancia².

Significado y uso.

Este método de ensayo está destinado primeramente para detectar cambios significativos en el modulo de elasticidad dinámico en especímenes de ensayo tanto de laboratorio como de campo⁶.

Especímenes de ensayo.

Preparación: Se elaboran los especímenes de ensayo prismáticos o cilíndricos, de acuerdo con la Norma C 192, C 31, C 42 u otro procedimiento especificado⁶.

Medida del peso(o masa) y dimensiones: Se determina el peso (o masa) y la longitud promedio de los especímenes dentro de ± 0.5 %. Se determinan las dimensión de la sección transversal promedio dentro de ± 1 %.

Limitaciones en la razón dimensional. Especímenes que tengan relaciones de longitud a dirección transversal máxima muy pequeña o muy grande, frecuentemente son difíciles de excitar en el modo fundamental de vibración. Mejores resultados son obtenidos cuando esta relación está entre 3 y 5.

Equipo

El Martillo Impactador deberá ser de metal o plástico rígido y elaborará una duración impacto que es suficientemente corto para excitar las frecuencias más altas para ser medido.

El sensor será un acelerómetro piezoeléctrico con una masa inferior a 30g y que tiene un intervalo de frecuencia de 100 a 10 000 Hz.

El analizador de frecuencias deberá permitir analizar la señal medida por el sensor, debe tener una tasa de muestreo de al menos 20 kHz y hará constar al menos 1024 puntos de la forma de onda.

Los Apoyos deberán permitir al espécimen que vibre libremente. Esto se puede lograr mediante la colocación de la muestra en soportes de goma situados cerca de los puntos nodales⁶. En la figura 1 se muestra el arreglo y el equipo utilizado en el ensayo de resonancia por impacto.

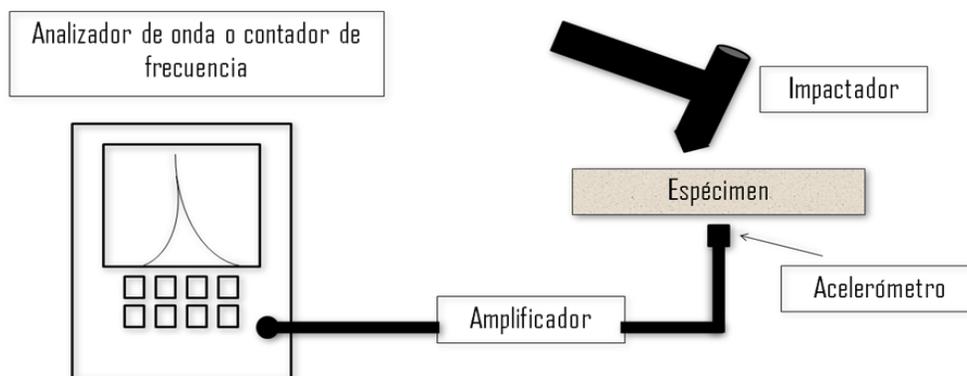


Figura 1. Arreglo y equipo utilizados en el ensayo de Frecuencia de Resonancia por Impacto

Es importante conocer y escoger los elementos que formarán parte del ensayo dinámico, como por ejemplo el martillo percutor, su punta puede ser de acero o madera dura y su peso debe ser tal que evite un desplazamiento físico de las probetas en el momento del golpeo; se considera un peso aproximado del martillo percutor de un 5% el peso de la probeta, también son fundamentales en el ensayo los elementos de soporte de las probetas o muestras a ensayar, éstos ejercen una importante función, ya que aíslan las probetas de mortero de las vibraciones externas y, según su colocación, definen el modo de vibración de las muestras⁷.

DETERMINACIÓN DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES.

Frecuencia transversal. Se apoya el espécimen de modo que pueda vibrar libremente en el modo transversal, posteriormente se sujeta el acelerómetro cerca del extremo del espécimen, se prepara el analizador de frecuencias para registrar la información. Usando el impactador, se golpea el espécimen en los puntos nodales como se muestra en la figura 2⁶. El modo transversal de vibración es el más completo de los tres modos en consideración, en relación al modo de frecuencia de resonancia es afectada, no solamente por el grosor y la sección transversal, sino por la razón entre los dos. En el caso de las barras delgadas es más fácil excitar la vibración transversal que la vibración longitudinal, por lo que se recomienda más la primera para la obtención del módulo de Young en barras delgadas⁵.

Hay una serie de nodos (puntos de amplitud cero, interferencia destructiva) y de antinodos (máxima amplitud, interferencia constructiva) a lo largo de la barra apoyada libremente. En la menor frecuencia de resonancia o frecuencia fundamental los puntos nodales están localizados a $0.224L$ de cada extremidad, como los antinodos en el centro y en cada extremidad⁵.

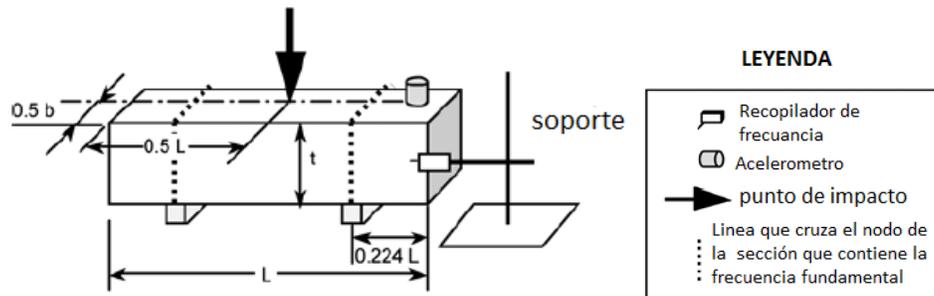


Figura 2. Arreglo para el modo transversal de vibración

Frecuencia longitudinal. Se apoya el espécimen para que pueda vibrar libremente en el modo longitudinal, se adhiere el acelerómetro en el centro de la superficie del espécimen, en un extremo, como se muestra en la figura 3, se leen las frecuencias del analizador de frecuencias y se registra la información⁶. Las ondas longitudinales son aquellas en que la vibración ocurre en la misma dirección del movimiento de la onda. La vibración longitudinal es recomendada en las barras de sección transversal cuadrada o circular como el método de mayor precisión en la determinación del módulo de Young. Si la sección es muy diferente de la geometría cuadrada, los errores de cálculo de las propiedades elásticas pueden ser grandes⁵.

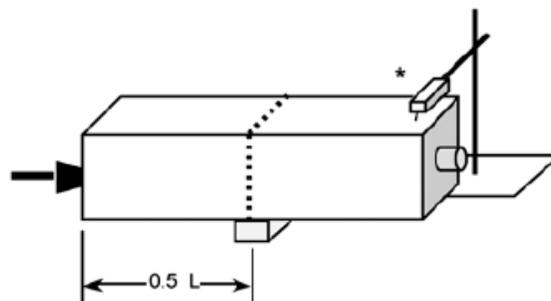


Figura 3. Arreglo para el modo longitudinal de vibración

Frecuencia torsional. Se apoya el espécimen para que pueda vibrar en el modo de torsión. Se adhiere el acelerómetro cerca de un borde del espécimen en una sección transversal que contenga un punto nodal para vibración transversal fundamental como se muestra en la figura 4. Se leen las frecuencias en el analizador de frecuencias y se registra la información⁶.

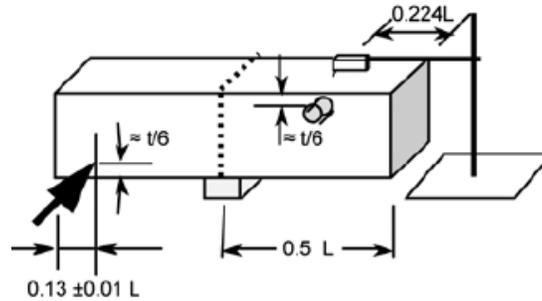


Figura 4. Arreglo para el modo torsional de vibración

En la tabla 1, se muestra un análisis comparativo entre los métodos de caracterización para obtener las propiedades elásticas del concreto.⁵

Tabla 1. Análisis comparativo de los métodos estáticos, dinámicos y ultrasónicos.

	Ensayo destructivo	Incerteza en la medida	Tiempo de la medida	Muestras a caracterizar	Constantes elásticas medibles	En función de temperatura
Métodos estáticos	Si	15% o más	**	Principalmente metales	E	difícil
Métodos dinámicos	No	<2%	Segundos	Cualquier material sólido	E, G y m (simultáneamente)	fácil
Métodos por ultrasonido	No	hasta 15%	Segundos	Cualquier material sólido	E (con μ estimado y no medido)	difícil

CÁLCULOS

- Cálculo del módulo elasticidad dinámico o módulo de Young, E, en pascles de la frecuencia fundamental transversal como sigue:

$$Ed = CM (n')^2 \quad (1)$$

Donde

M = masa de la muestra, kg,

n' = frecuencia fundamental transversal, Hz,

$C = 1.6067 (\frac{3}{4})^{-1}$ para un cilindro, o
 $= 0.9464 (\frac{3}{3})^{-1}$ para un prisma,

L = longitud de la muestra, m,

d = diámetro del cilindro, m,

t, b = dimensiones de la sección transversal del prisma, m, t está en la dirección en la que es impulsada, y

T = factor de corrección que depende de la relación del radio de giro, K (el radio de giro para un cilindro es $d/4$ y de un prisma es $t/3.464$), a la longitud de la probeta, L, y el coeficiente de Poisson.

- Cálculo del módulo elasticidad dinámico o módulo de Young, E, en pascales de la frecuencia fundamental longitudinal como sigue:

$$E_d = DM (n')^2 \quad (2)$$

Donde:

M= Masa de la muestra en kg

n' = Frecuencia longitudinal de resonancia, Hz

$D = 5.093L/d^2$, m^{-1} , para cilindro y para prisma,
 $4 (L/ bt)$, m^{-1} .

- Cálculo del módulo de rigidez dinámico, G, en pascales a partir de la frecuencia fundamental de torsión, como sigue:

$$G_d = BM(n'') \quad (3)$$

Donde:

$''$ = Frecuencia fundamental de torsión, Hz,

$B = (4LR/A)$, m^{-1}

R = factor de forma

=1 para un cilindro circular,

=1.183 para un prisma con sección cuadrada,

A = Área de la sección transversal del espécimen, m^2 .

- Cálculo de la relación de Poisson, en pascales a partir de E_d y G_d .

$$\mu = (E/2G)-1 \quad (4)$$

CONCLUSIONES

El método de Resonancia por Impacto, si se efectúa de forma correcta, garantiza resultados confiables, de manera rápida y sencilla, a su vez, su naturaleza no destructiva, lo convierte en una opción sustentable de estudio, ya que, no es necesario utilizar gran número de especímenes para estudiar el comportamiento elástico del concreto periódicamente.

Además de ser un procedimiento económico, fácil de realizar, pero sobre todo confiable, arroja información que define completamente el comportamiento elástico del concreto, ya que, en un mismo ensayo, se obtiene el módulo de Young, el módulo de rigidez y la relación de Poisson.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Mochis, de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

REFERENCIAS

- [1] M. Tia, Y. Liu, D. Brown, “Modulus of elasticity, creep and shrinkage of concrete”, Final Reporte: U.F. Proyect No. 49104504973-12 (2005), Gainesville, FLORIDA.
- [2] L.C. Cossolino, A.H. Pereira, “Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização” Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP, publicado online www.atcp.com.br, (2010).
- [3] Beer, F. P., Johnston, E. R. Jr., DeWolf, J.T., Capítulo 2: Esfuerzo y deformación. Carga axial. Mecánica de materiales, McGraw Hill. México. 47-121. (2004).
- [4] A. Malaikah, K. Al-Saif, R. Al-Zaid, “Prediction of the dynamic modulus of elasticity of concrete under different loading conditions”. International Conference On Concrete Engineering and Technology, (2004), Kuala Lumpur: MALAYSIA.
- [5] L.C. Cossolino, A.H. Pereira, “Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização” Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP, publicado online www.atcp.com.br, (2010).
- [6] ASTM C215 test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens.
- [7] J.R. Rosell, I.R. Cantalapiedra, “Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto, aplicado a morteros de cal y cemento”, Materiales de construcción 61, 301 (2011): pp. 312-42.
- [8] D.K. Panesar, B. Shindman, “Elastic properties of self consolidating concrete”, Elsevier construction and building materials 25 (2011): pp. 3334-3344.