

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS CON LA POROSIDAD EN PROBETAS DE MORTERO

REFERENCIA PACS: 43.60.Bf

González Hernández, Margarita ^{1,2}; Anaya Velayos, José Javier ¹; García Izquierdo, Miguel Ángel¹; Gómez-Ullate Alvear, Luis¹.

1 Instituto de Automática Industrial, CSIC, España.
Carretera de Campo Real, km. 0,200 – La Poveda..
28500 Arganda Del Rey. Madrid. España
Tel: 34 918 711 900 Fax: 34 918 717 050
E-mail: marga@iai.csic.es

2 Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF), CITMA
Calle 15 N° 551 e/ C y D, Vedado. 10400 Plaza de la Revolución
Ciudad de la Habana..Cuba
Tel: 537 320 771. Fax: 537 333 373

ABSTRACT

The quality of mortar is related to mechanical properties, which depend on water/cement ratio. In this work, an ultrasonic NDE technique to analyze mechanical properties of mortar is developed. The method is based on the analysis of the mechanical behavior of mortar probes, which are built with calibrated sand. Concentration of water-cement mixture has been varied in order to obtain mortar with different mechanical properties. From micromechanics, curves of Modulus of Elasticity and Compressive Strength from porosity have been obtained.

RESUMEN

La calidad del hormigón está asociada a sus propiedades mecánicas, las cuales dependen de la relación agua/cemento fundamentalmente. En este trabajo se expone una técnica de ensayos no destructivos por ultrasonidos para estudiar las características mecánicas de probetas de mortero, a las cuales se le ha variado la concentración agua/cemento (A/C). A partir de la micromecánica se han obtenido curvas del módulo de elasticidad y de la resistencia a la compresión en función de la porosidad.

INTRODUCCIÓN

La estimación de la calidad de una estructura de hormigón se encuentra estrechamente relacionada con las características físicas y mecánicas, fundamentalmente, que presente dicha estructura. Entre los factores que influyen en el comportamiento de las propiedades mecánicas podemos mencionar el tipo de cemento y árido empleado, el empleo de aditivos, las condiciones de moldeo y curado, el ambiente en el que se encuentra expuesto, la relación agua/cemento entre otras. Concretamente la variación de la relación agua/cemento provoca un aumento o disminución de la porosidad presente en las muestras que puede afectar a la resistencia del hormigón.

El elemento principal del hormigón es el cemento, al reaccionar éste con el agua se forma la pasta de cemento, un material sólido, poroso y duro que forma la matriz del hormigón y que influye decisivamente en sus propiedades mecánicas. La adición de arena (agregados

finos) de diámetro inferior a algunos milímetros hace el mortero, material de interés en este trabajo, y la adición de piedras (agregados toscos) de hasta unos centímetros en diámetro hace el hormigón. La porosidad presente en la pasta de cemento es la responsable del comportamiento de las propiedades mecánicas y depende esencialmente de la clase, tamaño, forma y disposición de sus componentes (productos resultantes de la reacción del agua y el cemento, cemento sin hidratar y la porosidad).

Tradicionalmente en los ensayos no destructivos por ultrasonidos aplicados al hormigón para estimar su calidad, la medida de la velocidad de propagación está estrechamente relacionada con sus propiedades mecánicas, más directamente con el módulo de Young. Hasta el momento no existe una fórmula teórica que establezca una relación entre la velocidad de propagación y la resistencia a la compresión del material. Lo que sí puede determinarse es el módulo elástico o módulo de Young y tratar de relacionar este módulo con la resistencia a compresión o flexión por cualquiera de las fórmulas expuestas en [1]. Por lo cual en la medida en que mejor estimemos el módulo de elasticidad, más fiables serán las estimaciones de la resistencia a la compresión.

Como dijimos anteriormente la porosidad presente en la pasta de cemento es el principal determinante de las características mecánicas, por lo que en este trabajo se estudiará el comportamiento de las propiedades mecánicas con la porosidad.

En este trabajo describimos un método no destructivo para la estimación cuantitativa de las variaciones de las propiedades mecánicas debido a la porosidad, el cual ha sido aplicado en cerámicas avanzadas, [2]. El método relaciona las medidas de la velocidad ultrasónica con la porosidad del material mediante un modelo micromecánico, el cual relaciona la densidad y constantes elásticas del material con la medición de la velocidad ultrasónica.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO MICROMECAÍNICO.

Al propagarse una onda ultrasónica en un material, la magnitud de la velocidad ultrasónica de dicha onda está relacionada con la densidad y las constantes elásticas del material [3]. En materiales porosos estas propiedades dependen de la porosidad por lo que se pueden establecer relaciones entre la velocidad de propagación en el medio y la densidad o la fracción de volumen del poro del mismo. Cuando usamos la velocidad de propagación para la caracterización de la microestructura cuantitativamente, es necesario un conocimiento detallado de las relaciones matemáticas entre las propiedades de las fases constituyentes y las propiedades globales del material. Esto puede ser logrado con la ayuda de un modelo micromecánico, donde el módulo de elasticidad del compuesto es calculado a partir de las propiedades de los materiales constituyentes: tamaño, forma y orientación; así como sus propiedades elásticas individuales.

El modelo micromecánico está basado en la teoría de Mori-Tanaka, [4], la cual manipula poros elipsoidales con una cierta distribución de orientación dentro del material. Esta teoría está basada en el método de los eigenstrain [5] (autodeformación), el cual es una continuación de la teoría de la elasticidad aunque sus aplicaciones cubren una amplia área relacionada con las características mecánicas de los materiales: plasticidad, fractura y fatiga, ecuaciones constitutivas, materiales compuestos, policristales, etc. [2].

La manipulación de los poros elipsoidales, ha sido desarrollada por Eshelby, [6], tanto para inclusiones como para inhomogeneidades. La determinación del campo elástico de una inclusión elipsoidal se puede expresar en términos de integrales elípticas tabuladas.

La presencia de inclusiones inhomogéneas tales como poros afectan las propiedades globales mecánicas y físicas del material. El grado de cambio de las propiedades depende de las características de las inclusiones tales como fracción del volumen del poro, forma y orientación. Para calcular la densidad efectiva y las constantes elásticas de un material poroso, el mismo puede ser tratado como un medio compuesto formado por una matriz homogénea y un gran número de inclusiones elipsoidales. La figura 1 muestra un elemento de volumen representativo sujeto a desplazamientos uniformes que dan origen a deformaciones constantes ε en su frontera. Se asume que las inclusiones son del mismo tamaño, isotrópicas y

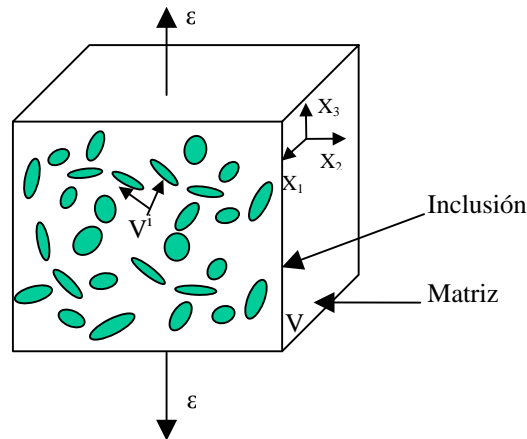


Figura. 1 Un elemento de volumen representativo de un medio compuesto formado por inclusiones inhomogéneas elipsoidales de volumen V^i y matriz isotrópica de volumen V^m .

orientadas aleatoriamente. Por lo tanto las propiedades globales del compuesto serán isotrópicas. Ya que las velocidades de la onda ultrasónica propagándose en este material dependen de la densidad y rigidez, es conveniente para calcular estas propiedades usar un modelo micromecánico.

Al referirnos a la rigidez efectiva del material, estamos hablando de las constantes elásticas del mismo; por lo que a lo largo del trabajo se podrán usar ambos términos indistintamente. Para la descripción del modelo usaremos la siguiente notación: la 'i' y la 'm' están referidos a la inclusión y la matriz, respectivamente, la fracción del volumen, es denotado por v ; la densidad, por ρ ; y el tensor de rigidez isotrópica (tensor de constantes elásticas), y el tensor de complacencia por C y C^{-1} , respectivamente.

La fracción del volumen es igual a:

$$v^i + v^m = 1 \quad (1)$$

Relación entre la Rigidez Efectiva y la Velocidad.

El tensor de constantes elásticas, C , relaciona el esfuerzo (stress) promedio σ y la deformación del sistema promedio ε , (strain); en el elemento de volumen representativo V . Cuando la deformación, ε , esta definido en la frontera, la rigidez efectiva puede ser encontrada si uno encuentra la deformación promedio de la inclusión (algunas veces dependientes de la orientación) en términos de ε . Para este propósito, introducimos el tensor factor de concentración de deformaciones. Este factor puede ser evaluado por la teoría de campo de Mori Tanaka [4], este método aproxima la deformación promedio en las inclusiones que actúan reciprocamente, con el de una inclusión simple en una matriz infinita sometida a una deformación promedio, la cual es diferente a partir de ε . Usando esta aproximación Jeong, [2], estudio las propiedades elásticas de materiales compuestos que tenían inclusiones elipsoidales orientadas arbitrariamente. Este estudio deriva en una expresión de un tensor para la rigidez efectiva en términos de la rigidez de las fases y las cantidades de las inclusiones dependientes de la geometría, expresado como:

$$C = C^m + v^i (C^i - C^m) \langle T \rangle [v^m I + v^i \langle T \rangle]^{-1} \quad (2)$$

Donde T es el tensor de Wu en coordenadas globales e I es el tensor de identidad simétrica.

Los paréntesis angulares denotan el promedio de las orientaciones de las inclusiones sobre todas las orientaciones posibles [2].

APLICACIÓN DEL MODELO MICROMECAÍNICO PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FUNCIÓN DE LA POROSIDAD.

Para la estimación de la variación de la densidad volumétrica debido a la porosidad, suponemos la fracción de volumen del poro es desconocida ($x=v^i$), entonces $v^m = 1-x$, teniendo en cuenta la expresión (1). Si consideramos que tanto la matriz como las inclusiones son isotrópicas y que la densidad y las constantes elásticas de las inclusiones tienden a 0, la densidad efectiva y las componentes del tensor de rigidez vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$\rho = (1-x)\rho^m \quad (3)$$

$$C_{11} = C_{11}^m + \frac{x \left[C_{11}^m - \frac{4}{3} (C_{44}^m) \right] \langle T_{1111} \rangle + 2 \langle T_{1122} \rangle}{1-x + x \langle T_{1111} \rangle + 2 \langle T_{1122} \rangle} - \frac{\frac{8}{3} x (C_{44}^m) \langle T_{1212} \rangle}{1-x + 2x \langle T_{1212} \rangle} \quad (4)$$

$$C_{44} = C_{44}^m - \frac{2x (C_{44}^m \langle T_{1212} \rangle)}{1-x + 2x \langle T_{1212} \rangle} \quad (5)$$

La velocidad de la onda longitudinal (L) y transversal (T) pueden ser calculadas como:

$$\sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} = \text{Velocidad Longitudinal medida, } V_L \quad (6)$$

$$\sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} = \text{Velocidad Transversal medida, } V_T \quad (7)$$

La estimación del módulo de Young a partir del modelo se obtiene a partir de la relación:

$$E = \frac{C_{44} (3 \cdot C_{11} - 4 \cdot C_{44})}{C_{11} - C_{44}} \quad (8)$$

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para los ensayos en general contamos con dos juegos de probetas de mortero con diferentes porosidad, las cuales se obtuvieron por la variación de la relación agua cemento en el proceso constructivo. Dos juegos iguales de 30 probetas de 40x40x160 mm³ fueron fabricados, el primero de estos juegos fue analizado usando técnicas destructivas y el otro mediante ensayos no destructivos por ultrasonidos. Cada juego está dividido en 5 grupos (6 muestras de mortero por grupo), que fueron construidas con relaciones agua/cemento de 45%, 50%, 55%, 60% y 65 % respectivamente, para obtener distintos grados de porosidad. En la tabla 1 se muestran los parámetros medidos mediante ensayos destructivos en el laboratorio de AIDICO; el contenido de porosidad fue determinado con el método ASTM C 642-90.

Para los ensayos no destructivos se ha utilizado un transductor de 500 kHz de frecuencia y $\phi 20$ mm. Las mediciones fueron hechas en seco con acoplamiento de caucho a presión constante. Las señales ultrasónicas han sido adquiridas con una frecuencia de muestreo a 66 MHz usando el sistema SENDAS [7].

Grupos de probetas	Relación A/C	Porosidad (%)	Densidad Real (g/cm^3)	Resistencia a la compresión (N/mm^2)
1	0.45	15.95	2.91	46.5
2	0.50	18.04	2.98	39.9
3	0.55	19.94	3.11	34.1
4	0.60	20.81	3.18	30.7
5	0.65	21.27	3.22	25.2

Tabla 1. Características de las probetas, medidas por AIDICO.

Para poder aplicar el modelo debemos determinar el valor de las constantes elásticas (C_{11}^m , C_{44}^m) y la densidad (ρ^m) de la matriz y el tensor T de las inclusiones. Para calcular los parámetros de la matriz utilizamos las medidas destructivas de porosidad expuestas en la Tabla 1 junto con la medida de velocidad ultrasónica [8]. Para calcular el tensor de Wu, T, se considera que los poros son capilares distribuidos aleatoriamente, semejantes a cilindros de longitud infinita y sección de $1 \mu\text{m}$.

A partir de la aplicación del modelo obtenemos las curvas del módulo de Young en función de la porosidad para cada una de las relaciones A/C (figura 2). Podemos observar como al aumentar la porosidad en el material disminuye el módulo de elasticidad como era de

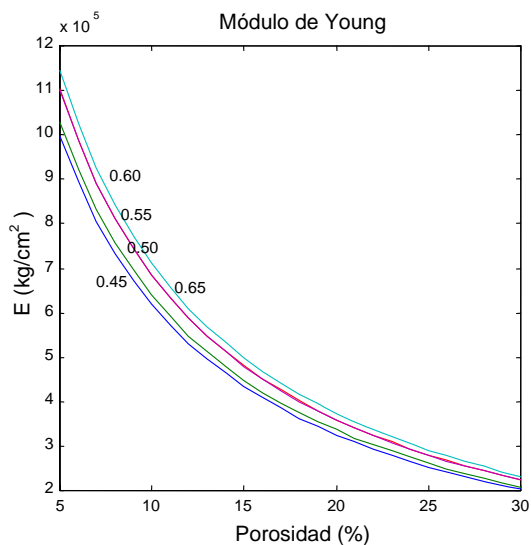


Fig. 2. Módulo de Young en función de la porosidad para las diferentes relaciones A/C obtenida con el modelo micromecánico.

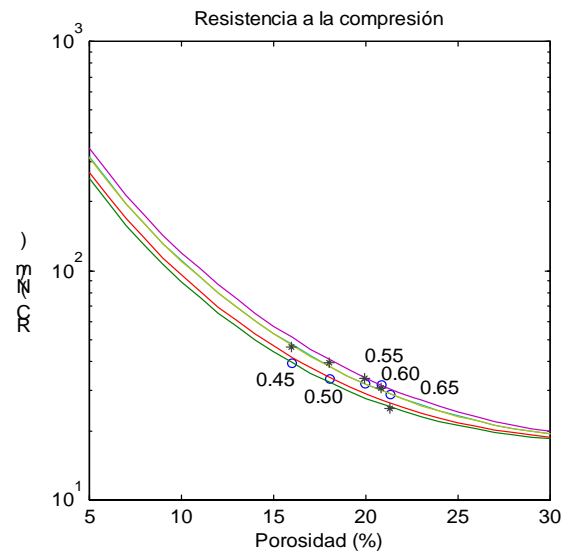


Fig. 3. Resistencia a la compresión en función de la porosidad para las diferentes relaciones A/C. Valor medio para cada uno de los grupos de probetas: 'o' medidas no destructivas, '*' medidas destructivas.

esperar. También conviene señalar que las curvas correspondientes a las relaciones A/C de 0.55 y 0.65 se encuentran superpuestas, lo que puede ser debido a que a medida que aumenta la relación A/C existe un exceso de hidratación en el mortero que cambia considerablemente las características estructurales de la porosidad que son las que se han aplicado a todos los tipos de probetas [9].

Para poder comparar las propiedades mecánicas obtenidas con el modelo y con los datos de los ensayos destructivos (Tabla 1), se puede utilizar una relación empírica entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión cuya expresión para el hormigón se puede encontrar en [1]. En la figura 3 se pueden ver las curvas así obtenidas para las

diferentes relaciones A/C. También se muestra la media de la resistencia a la compresión para cada uno de los grupos de probetas obtenida mediante ensayos destructivos y no destructivos.

En la Tabla 2 se muestra numéricamente esta comparación. Aunque el ajuste de los datos numéricos no se puede considerar óptimo, la curva teórica obtenida mediante el modelo micromecánico muestra comportamientos muy acordes con resultados empíricos. Así, por ejemplo, aunque no tan acusado como en las medidas destructivas, se puede ver la anómala disminución de la resistencia a la compresión para el caso de las probetas de relación A/C de 0,65. Asimismo la representación semilogarítmica de la resistencia a la compresión se aleja de la linealidad a medida que disminuye la porosidad efecto ya mostrado por diversos estudios empíricos como el de Feldman [10].

Grupos de probetas	Relación A/C	Resistencia a la compresión (N/mm ²) Ensayos destructivos	Resistencia a la compresión (N/mm ²) END	Error en Resistencia a la compresión (%)
1	0.45	46.5	39.8	14.29
2	0.50	39.9	35.8	14.64
3	0.55	34.1	33.9	5.38
4	0.60	30.7	33.4	3.59
5	0.65	25.2	30.4	15.42

Tabla 2. Comparación numérica de la resistencia a la compresión.

CONCLUSIÓN

Las propiedades mecánicas de materiales porosos pueden ser estimadas mediante la utilización de modelos micromecánicos y la medida de la velocidad ultrasónica. La aplicación de éste método a compuestos de cemento, concretamente mortero, ha permitido obtener las curvas de la variación del módulo de Young en función de la porosidad mediante ensayos no destructivos con ultrasonidos. A partir de estas medidas se estiman la resistencia a la compresión en probetas de mortero con distintas concentraciones A/C, la comparación de los datos obtenidos con el modelo y los ensayos destructivos muestran resultados alentadores. La estimación de las propiedades mecánicas en el mortero, a partir de la micromecánica, será más exacta mientras mejor se conozca el material.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por CICYT dentro del proyecto TAP97-1128.

BIBLIOGRAFIA

1. J. M. Tobío, "Ensayos no destructivos, métodos aplicables a la construcción". Patronato de Investigación Científica y Técnica "Juan de la Cierva" del CSIC, Febrero 1967.
2. H. Jeong and D. K. Hsu, "Quantitative estimation of material properties of porous ceramics by means of composite micromechanics and ultrasonic velocity". NDT & E. International, Vol 29, No 2, pág. 95-101, 1996.
3. J. Krautkrämer, H. Krautkrämer. "Ultrasonic Testing of Materials". Springer-Verlag. 1990. pág 522-524.
4. Mori, T. And Tanaka, K. "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions" Acta Metall 21 5 (1973) pp 571-574.
5. Mura Toshio. "Micromechanics of defects in solids", 2nd edition, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1987.
6. J. D. Eshelby. "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems". Proc. Royal Society London, A241, pág. 376-396.
7. C. Fritsch, T. Sánchez, J. J. Anaya, M. A. G. Izquierdo, J. Giménez, "SENDAS: an approach to modular digital processing for automated NDE", Second Conference on NDE Applied to Process Control on Composite Fabrication, ST Louis, oct 1996.

8. M. G. Hernández, M.A.G. Izquierdo, A. Ibáñez, J.J. Anaya, L.G. Ullate, "Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE", Ultrasonics, num. 38 (2000), 531-533.
9. P.K. Metha in Concrete: Structure properties and Materials, California, 1986.
10. R. F. Feldman and J.J. Beaudoin, "Microstructure and Strength of Hydrated Cement", Symp. Chem. Cement. Moscú (1974).