

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PROPAGACIÓN DE UNA ONDA ULTRASÓNICA A TRAVÉS DEL HORMIGÓN

Ing. Edgardo D. Urtubey

F.C.E.yT. - Universidad Nacional de Santiago del Estero
Avda. Belgrano (s) 1912 - 4200 - Santiago del Estero
e-mail: eurtubey@unse.edu.ar

Dr. Ing. Guillermo J. Etse

F.C.E.yT. - Universidad Nacional de Tucumán
Avda. Roca 1800 - 4300. S. M. de Tucumán
e-mail: getse@herrera.unt.edu.ar

Ing. M.S. Ricardo H. Loréfice

F.C.E.yT. - Universidad Nacional de Santiago del Estero
Avda. Belgrano (s) 1912 - 4200 - Santiago del Estero
e-mail: lorefice@unse.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta una simulación numérica, mediante elementos finitos, de la propagación de una onda ultrasónica a través del hormigón, con el propósito de medir valores de tensión relacionando los cambios de velocidad de la onda con las modificaciones del módulo de Young. La simulación se realiza para material elástico isótropo (espécimen aun no sometido a carga axial) asumiendo condiciones de tensión plana para reducir el problema de la propagación de ondas a dos dimensiones. El ingreso de la onda ultrasónica se representa prescribiendo historias de tasas de desplazamientos aplicadas a un cierto número de nodos, representativo del tamaño del transductor, en el borde izquierdo de la probeta.

ABSTRACT

This work shows a numerical simulation using a finite element code of the ultrasonic wave propagation through the concrete, to measure stress values relating speed changes of the wave with modifications of Young module. The simulation is performed for isotropic elastic material (the sample has not been charged) assuming plane stress conditions to reduce a two dimensions the problem of wave propagation. The entering of the ultrasonic wave will be represented prescribing displacement rate histories on some nodes that represent the transducer size on the left bound of the sample

INTRODUCCIÓN

Los ensayos no destructivos se realizan desde hace tiempo sobre estructuras metálicas pero son relativamente recientes en estructuras de hormigón. El lento desarrollo de estas técnicas para el hormigón se explica porque se trata de un material compuesto fuertemente heterogéneo. En general se distinguen dos tipos de ensayos no destructivos, en el primero se agrupan los métodos que estiman resistencias (esclerometría, CAPO test) y velocidad de pulso. El segundo tipo incluye métodos que miden elasticidad y otras propiedades tales como el módulo dinámico y la existencia

de fisuras (ondas de tensión, radar, técnicas termográficas infrarrojas, ensayo de frecuencia resonante y mediciones acústicas).

El esclerómetro consiste en una masa percutora que se desliza por una guía tubular y que es proyectada contra la superficie del hormigón a investigar con una energía de percusión del orden de los 50 kg/cm, por medio de resortes previamente comprimidos. La resistencia del hormigón se mide por la magnitud del rebote de la masa percutora, que se produce como consecuencia del impacto [1]. En el CAPO test (Cut And Pull Out test) se realiza un orificio en el hormigón endurecido, perpendicular a la superficie, con un ensanchamiento a 25 mm de profundidad que servirá de alojamiento a una arandela que se expande al ajustar el elemento portaperno que la contiene. Con un aparato extractor se extrae el perno, midiéndose la fuerza de extracción [2]. B. G. Long, H. J. Kurtz y J. R. Leslie propusieron medir la velocidad de onda ultrasónica para la evaluación no destructiva del hormigón e introdujeron el aparato y las técnicas conocidas como "método de velocidad de pulso". Este método que mide el tiempo de paso de la onda ultrasónica a través de un espesor conocido, se ha vuelto una de las técnicas no destructivas más populares usadas hoy en día. El primer estudio de emisión acústica de hormigón bajo tensión fue realizado por Rüsck quien notó que se producía cerca de la máxima carga (efecto Kaiser, 1960). L'Hermitte, por otro lado, observó un agudo incremento en la emisión acústica coincidente con el punto para el cual la razón de Poisson comienza a crecer. Green en 1970 mostró que las emisiones acústicas del hormigón están relacionadas con procesos de falla dentro del material. Entre las técnicas de onda de tensión se destacan el eco-pulso y el eco-impacto. En el primero un pulso de tensión es introducido en el material mediante un transmisor. El pulso se propaga y es reflejado por defectos e interfaces. La llegada de las ondas reflejadas es monitoreada por otro transductor que actúa como receptor. En la técnica de eco-impacto un impacto mecánico de corta duración, producido golpeando una pequeña bola de acero contra una superficie de hormigón, es usado para generar ondas de tensión de baja frecuencia que se propagan en la estructura y que son reflejadas por defectos y otros bordes. Desplazamientos superficiales causados por reflexión de estas ondas son registrados por un transductor ubicado adyacente al impacto. La señal resultante en el dominio del tiempo es transformada al dominio frecuencia. Reflexiones múltiples de ondas entre el impacto superficial, defectos y otros bordes ocasionan condiciones de resonancia transitoria las cuales pueden ser identificadas y usadas para determinar la sonidad de la estructura o la localización de defectos. Los patrones presentes en las formas de las ondas de desplazamiento y la correspondiente amplitud de espectro proporcionan información acerca de la existencia y ubicación de defectos [3]. La evaluación de estructuras existentes, para repararlas, reforzarlas y/o reciclarlas para nuevos usos, requiere conocer parámetros que permitan caracterizar el estado actual. Considerando que las estructuras de hormigón armado son las más frecuentes en nuestro medio, resulta de particular interés la estimación de su resistencia. Entre las formas más económicas y rápidas de evaluación se destacan los métodos esclerométrico, ultrasónico y de extracción de insertos, tan difundidos que su uso se encuentra normalizado en los códigos de construcción más avanzados [2].

APARATO DE ULTRASONIDO (CONTROLS E46)

El aparato que se utilizará para calibrar el modelo mide tiempos de propagación en microsegundos, de la onda ultrasónica a través de hormigón u otro material. Se usa para detectar fallas o daños generados por heladas o por fuego, estimar profundidad de fisuras, localizar inclusiones de materiales extraños, evaluar la resistencia a la compresión del hormigón y tiempos de desencofrado y de pretensado, determinar módulo de elasticidad, controlar la homogeneidad del hormigón proyectado. El modelo E46 ofrece salidas de 2,5, 1,5 y 0,5 KV. Para pequeñas distancias y hormigones de buena calidad se sugiere la salida de 0,5 KV a fin de minimizar ruidos de fondo. Presenta conexión para carga de batería de 220V/50Hz y visualización digital en microsegundos. Los transductores tienen 2,5 cm de diámetro. Las cabezas de medición pueden adoptar diferentes posiciones pero en general será necesario interponer una delgada capa de pasta de contacto [4].

Cálculo de la velocidad de la onda ultrasónica: la velocidad de la onda ultrasónica es función de la

calidad del hormigón y se obtiene con la fórmula:

$$V = \frac{S}{T} \times 10^6 \quad (1)$$

donde: V = Velocidad de la onda ultrasónica en m/seg

S = Distancia entre las cabezas en metros

T = Tiempo registrado por la unidad ultrasónica en μ seg

Usualmente la velocidad ultrasónica para hormigones varía entre 4.000 y 4.800 m/seg, la distancia entre las cabezas debe evaluarse con una aproximación de $\pm 1,0$ %. Puesto que la velocidad de la onda ultrasónica depende de la densidad del medio es deseable conocer tipo de cemento, relación agua-cemento, contenido de humedad, condiciones de maduración.

Medición de grietas y fisuras: con los transductores equidistantes un valor x de la fisura se mide un tiempo de propagación t_1 . Luego se ubican a 2x sobre hormigón sano y se mide un t_0 . La profundidad h de la fisura se calcula como [1]:

$$h = \frac{x}{t_0} \sqrt{t_1^2 - t_0^2} \quad (2)$$

donde h = profundidad de la fisura

x = distancia entre transductores

t_1 = tiempo de propagación con los transductores a ambos lados de la fisura

t_0 = tiempo de propagación en el hormigón sano

Localización de oquedades, fallas y daños: planteando tiempo de tránsito versus distancia entre transmisor y receptor se puede establecer la posición de probables defectos.

Hormigones de diferente calidad: es posible calcular la profundidad h de las capas de hormigón dañadas por fuego o por helada con la siguiente fórmula:

$$h = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{1 - \frac{v_s}{v_i}}{1 + \frac{v_s}{v_i}}} \quad (3)$$

donde h = espesor del hormigón dañado

x = distancia del eje vertical al punto de cruce de las rectas representativas de v_s y v_i

v_s = velocidad de propagación en el hormigón dañado

v_i = velocidad de propagación en el hormigón sano

Estimación de tiempos para desencofrado y precompresión: Dejando pequeñas puertas en los encofrados del hormigón, es posible controlar el proceso de endurecimiento en la estructura.

Estimación del módulo elástico dinámico: A partir de mediciones de la velocidad de las ondas ultrasónicas es posible calcular el módulo elástico dinámico como sigue:

$$E_D = V^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (4)$$

donde: V = Velocidad en km/seg
 ρ = Densidad del hormigón en kg/m^3
 ν = Relación de Poisson (0,15 para alta resistencia; 0,30 para baja resistencia)
 E_D = Módulo elástico dinámico en MN/m^2

INCONVENIENTES DEL MÉTODO

Precisión en las mediciones: dado que la velocidad de propagación de la onda se obtiene como $V = S/T$, midiendo la longitud de camino (S) con una precisión de $\pm 1,0\%$ y el tiempo (T) de tránsito con una precisión del $\pm 2,0\%$ resultará que la velocidad de pulso (V) se puede obtener con una precisión del $\pm 3,0\%$. Dado que el módulo elástico E varía con al cuadrado de la velocidad de pulso, la precisión en su medición será alrededor de $\pm 6,0\%$. Aunque no está claro que la velocidad de pulso resulte influida por la longitud del camino recorrido, se sugieren los siguientes valores mínimos en función del tamaño máximo del agregado grueso (TMAG) [5]:

100 mm para hormigones con TMAG < 30 mm
 150 mm para hormigones con TMAG < 45 mm

Influencia de las condiciones de ensayo: Debe establecerse un adecuado contacto entre la superficie del concreto y el transductor, usando si es necesario, una sustancia para mejorar el acoplamiento. Variaciones de la temperatura ambiente de 5°C a 30°C no ocasionan cambios significativos en la velocidad de pulso en el hormigón. Para temperaturas mayores y menores se han observado cambios en la velocidad de pulso en concretos secos y saturados por lo cual las mediciones efectuadas deberán corregirse.

Efectos varios: la velocidad del pulso es afectada por la composición del hormigón, por la frecuencia de la emisión ultrasónica (los pulsos de alta frecuencia atenúan más), por la edad y la heterogeneidad del hormigón [6].

ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

La resistencia a compresión del hormigón puede determinarse a partir de la velocidad de pulso mediante [5]:

a) Correlaciones gráficas entre V y R obtenidas ensayando probetas.
 Se requieren como mínimo 30 probetas ensayadas. El valor promedio de la velocidad de pulso se obtiene a partir de tres probetas sometidas a idénticas condiciones de ensayo. Las variaciones de resistencia y velocidad de pulso requeridas para la correlación se logran modificando cantidad de agua, grado de compactación, etc. Con los resultados se construye la curva de correlación gráfica entre V y R , usando cualquier procedimiento de ajuste de curva a una nube de puntos.

b) Correlaciones analíticas conocidas entre V y R
 Se han empleado las siguientes expresiones [5]:

$$\begin{aligned} R &= a V^b \\ R &= a e^{bV} \\ R &= a V + b V + c \end{aligned} \quad (5)$$

En las cuales V es la velocidad de propagación de onda medida
 a , b , y c son constantes que se determinan mediante ensayos

La precisión de la estimación varía según los datos que se dispongan (composición del hormigón y resultados de probetas ensayadas).

SIMULACIÓN NUMÉRICA

Deben realizarse una apreciable cantidad de ensayos para obtener fórmulas de correlación confiables que permitan estimar la resistencia del hormigón a partir de la medición de velocidades de onda ultrasónica. Para disminuir la incertidumbre de los resultados, hay que recurrir a correlaciones múltiples, por ejemplo, ultrasonido y esclerometría y aun agregar el pull-out test. Esto significa contar con un laboratorio muy completo y enfatiza la importancia de la simulación numérica. Por cierto, habrá que calibrar el modelo con resultados experimentales pero incluso esto puede hacerse en base a datos obtenidos por otros investigadores.

Material: en un material heterogéneo como es el hormigón, la simulación admite varias etapas en cuanto al comportamiento considerado. La primera de esas etapas es suponer comportamiento elástico isótropo y reducir el problema de la propagación de ondas a dos dimensiones.

Malla: las probetas son de forma prismática, de 10 cm x 20 cm, tamaño que se corresponde con las dimensiones de los especímenes que se ensayarán en laboratorio. Los transductores miden 2,5 cm de diámetro, dimensión que debe tenerse en cuenta para determinar el número de nodos sobre los que se aplicará la historia de carga que simula el ingreso de la onda ultrasónica.

La geometría del espécimen ha sido representada por 1.749 elementos con 3.672 grados de libertad. La malla estructurada está compuesta por 33 elementos en el ancho del espécimen y 53 elementos en su altura. En la parte media se ha densificado la malla para visualizar mejor el avance de la onda. Todas las simulaciones numéricas involucran elementos cuadriláteros de cuatro nodos.

Condiciones de borde: se fijan los nodos de la base en el sentido vertical. Los nodos medios de la base y de la cara superior, se fijan en la dirección horizontal. (Figura 1)

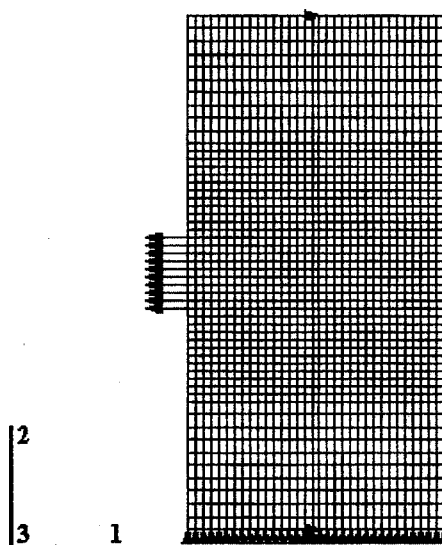


Figura 1- Malla indeformada y condiciones de vínculos

Cargas: La entrada del transductor ultrasónico se representa prescribiendo una historia de velocidades aplicada a diez nodos ubicados a media altura del borde izquierdo del espécimen. La duración del paso se ha determinado considerando una velocidad de onda de 4.800 m/seg que a través de los 10 cm de ancho de la probeta arroja un tiempo de tránsito de aproximadamente $2,0 \times 10^{-5}$. Los parámetros del hormigón considerados son: módulo de Young $E = 24.000$ MPa, relación de Poisson $\nu = 0,2$, densidad $\rho = 2.400$ kg/m³. La onda ultrasónica se simula prescribiendo velocidades de variación sinusoidal con la expresión de Fourier.

En la Figura 2 se pueden apreciar la malla deformada por el paso de la onda.

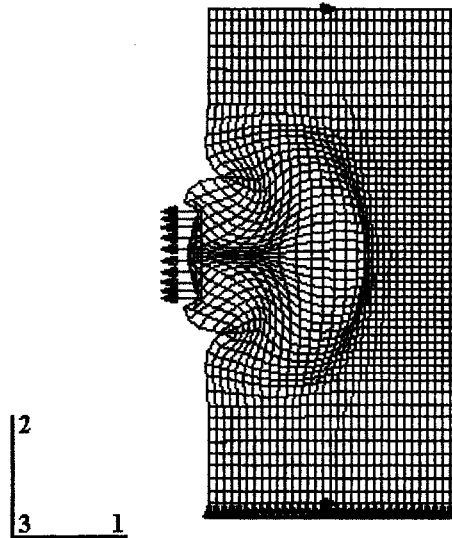


Figura 2 - Malla deformada

En la Figura 3 se muestra un gráfico de contorno de componentes horizontales de tensiones que ilustra la propagación del frente de onda para $t = 1.0 \times 10^{-5}$

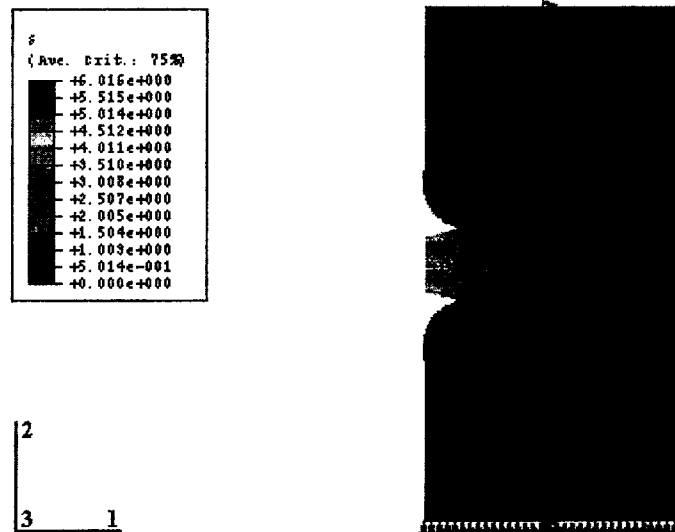


Figura 3 - Contorno de tensiones para $t = 1.0 \times 10^{-5}$

La Figura 4 presenta un gráfico de contorno de componentes horizontales de tensiones que ilustra la propagación del frente de onda para $t = 2.0 \times 10^{-5}$

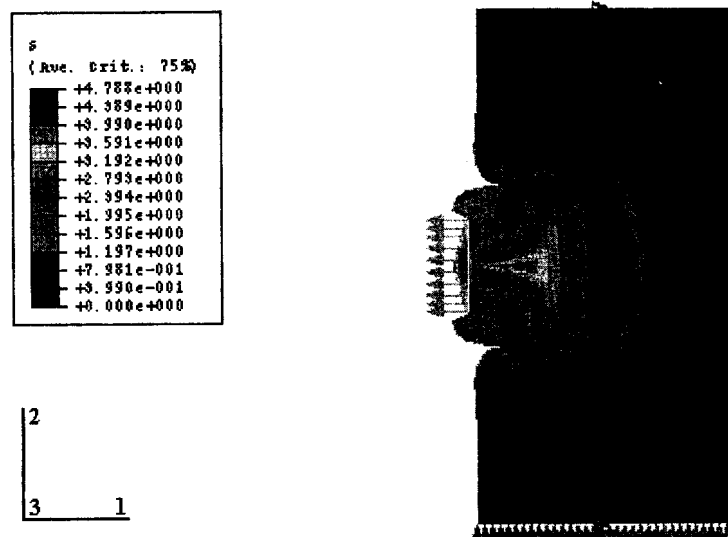


Figura 4 - Contorno de tensiones para $t = 2.0 \times 10^{-5}$

CONCLUSIONES

En el rango elástico los resultados muestran una buena correlación entre los datos obtenidos experimentalmente y las predicciones numéricas del paso de la onda ultrasónica proporcionadas por el Método de los Elementos Finitos.

A fin de reproducir en forma realista el paso del pulso ultrasónico en el régimen de post-pico, que es cuando se produce la mayor degradación de las propiedades mecánicas del hormigón, es necesario emplear formulaciones que incluyan la plasticidad o alguna otra teoría capaz de tener en cuenta la degradación en función de la historia de tasas de desplazamientos y la irreversibilidad del proceso de daño que sufre el hormigón.

REFERENCIAS

- [1] Rocha, C., *Ensayos Sobre Hormigones Endurecidos*, FCFyN, UNC
- [2] Amin, D. L., *Estimación de la Resistencia del Hormigón mediante Ensayos no Destructivos*, Tesis de Magister, UNT
- [3] Radakovic, Z., William, K., Bond, L. J. *Ultrasonic Assessment Of Concrete In Uniaxial Compression*
- [4] **Manual del Equipo de Ultrasonido CONTROLS**
- [5] Jones, R., Facaoaru, I., *Recomendations For Testing Concrete By The Ultrasonic Pulse Method*
- [6] Popovics, S., Rose, J. L., Popovics, J. S., *The Behavior Of Ultrasonic Pulses In Concrete*
- [7] Neville, A., *Tecnología del Concreto*, Limusa, Mejico, 1989
- [8] Reglamento CIRSOC 201

