COMPORTAMIENTO DE SÓLIDOS HETEROGÉNEOS (HORMIGÓN) FRENTE A SOLICITACIONES ULTRASONICAS

Anselmo Garay Guerrero,

Lcdo. en Física

Jefe del Equipo de Investigación
IETcc

689-14

El presente artículo ha sido elaborado con la colaboración de diversos miembros de este Equipo de Investigación (E. I.) y trata de dar a conocer a los lectores la importancia de un mejor conocimiento de los fenómenos que tienen lugar en la transmisión de impulsos ultrasónicos a través de sólidos heterogéneos y la generación de aquéllos en el seno de éstos, por microdesplazamientos de partículas, que pueden originar el subsiguiente nacimiento de roturas o fisuras.

La interpretación correcta de estos fenómenos puede proporcionar una valiosa información sobre el estado del material, así como sobre ciertas características del mismo (elasticidad, resistencia, inclusión de defectos, etc.), que pueden aplicarse con gran aprovechamiento a las Técnicas de Ensayos No Destructivos en la Construcción.

1. INTRODUCCION

La aplicación de Ensayos No Destructivos (END), basados en las propiedades de los ultrasonidos, en la Metalurgia e industrias de construcciones mecánicas data ya de más de 50 años y existe toda una gama de métodos de ensayos de aplicaciones comunes en estas técnicas.

La industria de la Construcción, artesanal en gran parte de sus medios y equipos, incorpora mucho más tarde las técnicas más depuradas de ensayos y control que ya eran de uso común en otros campos.

Este desfase no siempre es debido a la mayor o menor resistencia de amplios grupos del sector a la asimilación de técnicas de ensayo cada vez más refinadas, sino a la dificultad natural que ofrecen los materiales de construcción, especialmente el hormigón, por su marcada heterogeneidad e incluso fácil anisotropía, si la puesta en obra no fue lo suficientemente cuidada.

Así por ejemplo, las técnicas de auscultación ultrasónica que se emplean con gran profusión y excelentes resultados en las industrias del metal (fabricación de piezas, laminados, soldaduras, etcétera) presenta severas limitaciones como veremos más adelante cuando se trata de explorar piezas de hormigón.

El empleo de ultrasonidos en la investigación de las características de los materiales se basa en la estrecha relación existente entre ciertas características de éstos (densidad, elasticidad, etc.) y los parámetros que definen un impulso de ondas elásticas que se propaga a través del material.

En principio, y según sea el papel que juega el propio material frente al fenómeno ultrasónico, su estudio puede dividirse en dos partes:

Parte I.: Comportamiento pasivo de los materiales, frente a ultrasonido: Se refiere a todas aquellas propiedades de los materiales que pueden estar relacionadas y, por lo tanto, ser estudiadas, con el tránsito de una onda ultrasónica a través de aquéllos y que se genera artificialmente, en el exterior, por dispositivos adecuados de excitación.

Parte II: Comportamiento activo de los materiales frente a ultrasonido: Se refiere a aquellos fenómenos que tienen lugar cuando el impulso ultrasónico se origina en el seno del propio material por una liberación brusca y discontinua de energía. Este fenómeno conocido con el nombre de EMISION ACUSTICA (E. A.) aparece cada vez que por una causa u otra se producen reagrupaciones de partículas a escala microscópica en el seno de un sólido, deformaciones plásticas del mismo (dislocaciones, maclajes, etc.) o iniciación de roturas o microfisuras en puntos concretos de aquél.

Este último fenómeno, descubierto en la década de los 50 y estudiado por primera vez por Kaiser,

se comienza a utilizar en la década siguiente para la detección de fallos en el mismo momento de su ocurrencia, en los depósitos de carburantes y cámaras de combustión de los grandes cohetes espaciales, donde el conocimiento previo de la iniciación de una fisura es vital en la prevención de la explosión del ingenio.

En 1964 aparece ya esta novísima técnica de detección de defectos en tiempo real, incorporada al amplio arsenal de los métodos no destructivos.

Según nuestras noticias fue por esta época cuando se aplicó por primera vez en la industria de la construcción, durante la realización de la presa de un embalse en Canadá.

Allí se utilizaron sensores embebidos en la masa de hormigón del muro, unidos permanentemente a una estación fija próxima donde se registraban las señales procedentes de aquéllos. De esta manera no sólo se daría la alarma en el momento de aparición de una fisura, sino que el sistema, asistido por un ordenador, proporcionaría las coordenadas del punto de iniciación.

Resumiendo, diremos que por la aplicación de las técnicas derivadas del comportamiento pasivo (parte I) de los materiales se puede obtener información sobre:

- Características elásticas (módulo elástico, variación del mismo, degradación del material, etc.).
- Resistencia (correlaciones velocidad de propagación resistencia y frecuencia de resonancia-resistencia).
- Detección de huecos en los materiales (en ciertas condiciones favorables, según el tipo de material).
- Cambios de fase (caso del fraguado de un cemento).

De la aplicación de las técnicas derivadas de la Parte II, se puede obtener información sobre:

- Naturaleza del fenómeno que ha producido la E. A. (deslizamiento de capas, deformaciones plásticas, inicio de rotura o microfisuras, etc.).
- Localización del punto de origen con un alto grado de precisión.

2. OBJETO DE LA INVESTIGACION

El objetivo sobre el que se creó este grupo de investigación fue el de profundizar en los campos anteriormente descritos, por las líneas de penetración sobre las que ya tenía experiencia el autor y demás personal de este equipo, que se creó precisamente alrededor de los temas cultivados por el

antiguo Departamento de Metrología del IETcc, del cual formaban parte.

La idea final es llegar a obtener métodos no destructivos de ensayos, aplicables a la Construcción, que afinen o adapten los ya existentes a las condiciones actuales (como las originadas por los cementos de adición) o den lugar a técnicas de nueva aplicación.

En una segunda fase se estudiarán los fenómenos de E. A. en los materiales de construcción (hormigón, armaduras de acero, etc.) con vista a puesta a punto de métodos utilizables en cierto tipo de obras.

3. LINEAS DE AVANCE DE LA INVESTIGACION

En lo referente a los fenómenos del primer grupo (comportamiento pasivo) se han trazado las siguientes líneas de investigación:

- Comportamiento de las pastas de cemento durante el fraguado respecto al paso de ondas ultrasónicas a su través.
- Velocidad de transmisión de impulsos ultrasónicos en hormigón.
 - Anomalías de la velocidad de propagación.
 - Relación entre la velocidad y las características físicas del hormigón.
 - Diagnósticos de calidad basados en la velocidad de propagación.
- Perturbaciones en la propagación del haz ultrasónico por la interposición de huecos.

El avance en cada una de las tres líneas expuestas requiere a veces el desarrollo de instrumentación propia y adecuada al problema a resolver, lo que supone la ejecución de prototipos de aparatos de los que se irá dando cuenta oportunamente.

3.1. Comportamiento durante el fraguado, de pastas de cemento frente a ultrasonido: estado actual

Esta línea de avance está bajo la responsabilidad del ingeniero Barraclough de nuestro E. I. El trabajo que se realiza está relacionado a la vez con la tecnología del cemento y con las propiedades físicas de la materia en sentido algo más general. Se trata de hacer interaccionar paquetes de ondas ultrasónicas con pastas de cemento durante el proceso de fraguado de éstas para intentar conseguir información sobre los fenómenos físicos y químicos que se desarrollan en la pasta, a medida que transcurre el fraguado.

Un primer problema que pretende clarificar este trabajo es determinar la relación general entre la cantidad de energía que transmite la pasta, cuando esta energía está en forma de ondas ultrasónicas, y el tiempo transcurrido a partir del momento final de amasar la pasta. La evolución en el tiempo de esta relación está sujeta a muchos factores variables (relación agua/cemento, forma y tiempo del amasado, temperatura del ambiente, tipo de cemento, estado del mismo, manera de compactar la probeta...), muy difíciles de normalizar totalmente. Aún así, dentro de una cierta dispersión estadística, es posible reconocer ciertas características constantes en la relación general, especialmente algunas inflexiones en el diagrama (fig. 1), que parecen responder a fenómenos de resonancia de ciertas partículas de la pasta ante los impulsos cíclicos impuestos por las ondas ultrasónicas, a la frecuencia del emisor.

Fig. 1. Tres diagramas típicos de relación Energía-Tiempo para distintas pastas.

Como resultados más inmediatos parece verificarse que hay una relación de la forma $E = K + \log t^a$ entre la cantidad de energía transmitida por la pasta y el tiempo t transcurrido desde el instante final del amasado, siendo «a» una constante; y que, durante el transcurso de las primeras seis horas de fraguado, aparecen, sucesivamente en el tiempo, dos o tres zonas de absorción de energía por la pasta que son claramente identificables y características (fig. 1).

Actualmente están en marcha nuevos ensayos tendentes a determinar la causa precisa de estas inflexiones agudas en la relación general entre tiempo y energía.

En el momento de entregar a prensa este artículo el esfuerzo del E. I. se centra en conseguir un generador de ultrasonido de potencia adecuada y de características especiales, para estudiar con más detalle las zonas de posibles resonancias a que se ha aludido anteriormente.

Cuando esta línea de avance de la investigación llegue a su meta, a la par que proporcionará un mejor conocimiento del fenómeno del fraguado, suministrará técnicas de laboratorio, basadas en equipos de ultrasonido, para la determinación de la evolución y desarrollo de dicho fenómeno.

3.2. Velocidad de impulsos ultrasónicos en hormigón

La velocidad de propagación de un paquete de ondas elásticas o impulso de frecuencia sónica o ultrasónica a través de un material es un parámetro que está estrechamente ligado con las características físicas del material.

Sin embargo, esta velocidad en los medios sólidos reales no es una magnitud bien definida y es necesario hacer ciertas precisiones al hablar de la misma.

En efecto; si se tratase de una onda continua, longitudinal y monocromática, su velocidad se identificaría con la velocidad de fase de la misma que es la distancia a que se propaga una fase cualquiera del movimiento vibratorio de las partículas del medio en la unidad de tiempo, en dirección normal a la de oscilación de aquéllas en el caso de ondas transversales, y en la misma dirección en el de ondas longitudinales.

La ecuación de propagación en la dirección x , sería:

$$(\lambda + 2G) \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial \mu}{\partial t^2}$$

donde: λ , G

son constantes elásticas del medio (constante de Lamé y módulo de rigidez, respectivamente) y ρ representa la densidad del mismo.

Del examen de esta ecuación se desprende que la única velocidad posible de las partículas oscilantes está en la dirección, pero ello sólo es cierto en condiciones ideales, en un medio desprovisto en absoluto de rigidez. Por el contrario, siempre que se generen ondas longitudinales, se pierde algo de energía en la excitación de ondas transversales o de cizalladura, y, si el medio no es

Fig. 2. Forma típica de un impulso ultrasónico obtenida en nuestros laboratorios por fotografía de la pantalla de un osciloscopio de rayos catódicos.

infinitamente extenso, terminan por formarse ondas de superficie o de Rayleigh que absorben igualmente algo de la energía de excitación longitudinal.

Ahora bien, cuando la excitación del medio no se produce en forma de onda continua, como la descrita hasta ahora, sino de forma discontinua o intermitente, no es ya una onda sinusoidal lo que progresa por el medio transmisor, sino un impulso o paquete de ondas como el que aparece en la fotografía de la fig. 2.

Este paquete, más que como un elemento limitado de una onda pura sinusoidal, de amplitud variable, se debe considerar como una suma de Fourier de elementos sinusoidales simples, de frecuencias próximas entre sí.

En este caso, la velocidad de propagación del sonido no coincide con la «velocidad de grupo», sensiblemente inferior a aquélla, siendo esta última la que se determina y se emplea en todas las aplicaciones de los ultrasonidos. En general, es más fácil medir la velocidad, aplicar y captar los impulsos ultrasónicos en los materiales, si bien se paga a costa de ciertas imprecisiones que pueden limitar severamente su uso en ciertos casos.

En efecto, cuando un paquete o grupo de ondas progresa por un medio dispersivo —y los sólidos y líquidos parecen serlo para el ultrasonido en mayor o menor grado— se «deshace» y termina degenerando en un grupo en forma de huso más o menos alargado, cuya semejanza con el paquete original depende del grado de dispersividad del medio.

En este caso, por razones que sería prolijas exponer aquí, es mejor hablar de «velocidad de señal», un concepto más complejo, relacionado con la velocidad de grupo y el método de detección.

En la fig. 3 se aprecia que el frente del grupo se «ha estirado» un poco, apareciendo unas

Fig. 3. Impulso ultrasónico parcialmente deformado a causa de su paso por un espesor de hormigón de 30 cm de longitud.

Fig. 4. Diversas partes de un impulso tras su paso por un medio dispersivo.

oscilaciones irregulares, de amplitud tan pronto creciente como decreciente, que preceden a las oscilaciones netamente sinusoidales del frente de grupo. Análogamente, la cola nítida del paquete de la figura 2 se alarga y se afina sensiblemente, introduciéndose así una disimetría mayor en la forma original del impulso.

La zona delantera de un impulso así deformado se llama de «precursores», ya que propiamente no forma parte del grupo; y, la parte final, que ocupa casi la semipantalla derecha de la fig. 3, se sigue llamando cola del impulso; lo que ocurre es que ahora, prácticamente, se ha reducido apenas a una línea gruesa.

La observación del paso de impulsos, en medios dispersivos de longitudes crecientes, indica que tanto la longitud de los precursores como la de la cola aumenta con el grado de dispersión del medio.

Si a lo dicho añadimos que, en la determinación de la velocidad del grupo, los dispositivos de medida del tiempo de tránsito exigen el establecimiento de ciertos niveles de disparo para las amplitudes integrantes del paquete, se entenderá la dificultad que entraña hablar de un concepto físico que traduzca la «verdadera velocidad» del grupo.

A esta dificultad en la identificación de la cresta que debe disparar el paquete hay que añadir otra característica perturbadora, propia de la propagación de impulsos en medios dispersivos, que fue puesta de manifiesto, por primera vez, por el autor y sus colaboradores en 1974 cuando intentaban una medición cuidadosa y exacta de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos generados por su aparato (*) en una losa de hormigón de grandes dimensiones.

Se trataba de resolver los problemas que suscitaba la falta de concordancia de diversas medidas realizadas con motivo de ciertos trabajos de obra

(*) Un PUNDIT de C.N.S. Instrument de 40-50 kHz de frecuencia fundamental.

para un informe técnico del Instituto. Se observó que, lejos de ser un error de medida, el efecto de disminución aparente de velocidad con la longitud explorada se reproducía con toda fidelidad en otras piezas de dimensiones parecidas.

Fue entonces cuando abrimos esta línea de investigación, reproduciendo las experiencias iniciales en bloques de hormigón de mayores dimensiones para tratar de encontrar alguna explicación a este fenómeno que desde entonces conocemos dentro de nuestro grupo con el nombre de **anomalía de velocidad**.

Posteriormente, cuando se creó el E. I. tal como es hoy, se incorporó a su temario como trabajo de partida junto con los pequeños progresos logrados hasta la fecha.

Una primera aproximación de explicación, que se comprende bien observando las diversas zonas del impulso representado en la fig. 4, la intentamos suponiendo que el descenso de velocidad observada se debiera a la parte de impulso perdida en forma de «precursores». De ser eso absolutamente cierto la longitud, medida en tiempo, de los precursores, debería representar una fracción importante del tiempo total del tránsito, cosa que no resultó ser cierta.

En efecto; una vez adoptado este supuesto como hipótesis de trabajo, se realizaron nuevas pruebas en una losa de 4×4 m y 25 cm de espesor, cuyos resultados se recogen en el cuadro de la fig. 5.

En él aparece claramente reflejada la **anomalía de velocidad**. Dada la importancia del decrecimiento observado, se llega fácilmente a la conclusión de que la hipótesis de los precursores resulta insuficiente para explicar el fenómeno en toda su magnitud.

A continuación supusimos que tal vez pudiera estar relacionado con la intensidad del haz que avanza por el medio, ya que, también, a medida que las amplitudes del paquete se van debilitando por su progresión en el medio, se va perdiendo velocidad de propagación.

Transcurrido algún tiempo hemos leído, con satisfacción, que otros autores, como Benson Carlin —del que no habíamos tenido noticias anteriormente— ha constatado, él mismo, junto con otros investigadores citados por él (*), un fenómeno análogo.

En el estado actual de la investigación, el ingeniero técnico de nuestro E. I., Enrique Morales está procediendo al diseño y ejecución de estructuras escalonadas de hormigones de ciertos tipos, a la par

(*) Ver nota ad hoc en bibliografía. La cita dice textualmente: «Hay una posibilidad de que esta velocidad varíe de algún modo con la intensidad. Los experimentos indican que la velocidad puede ser más alta cerca de las fuentes de ondas, donde la intensidad de los ultrasonidos es muy grande. En tales condiciones se han registrado velocidades tres veces superiores a la normal.

TRAYECTORIA (denominac.)	LONGITUD (mm)	TIEMPO (μs)	VELOCIDAD (m/s)	VEL. MEDIA (m/s)
11	552	132	4.180	4.180
14	564	132	4.270	
13	747	182	4.100	
21	1.054	252	4.180	4.180
24	1.061	251	4.220	
23	1.168	282	4.140	
31	1.537	371	4.140	4.190
34	1.541	365	4.220	
33	1.617	383	4.220	
41	2.028	574	3.530	3.580
44	2.031	574	3.540	
43	2.089	567	3.680	
51	2.522	-	-	3.810
54	2.525	642	3.930	
53	2.572	698	3.690	
61	3.018	1.196	2.520	2.870
64	3.020	996	3.030	
63	3.060	1.005	3.090	
71	3.516	1.623	2.170	2.460
74	3.518	1.312	2.680	
73	3.552	1.399	2.540	

Fig. 5. Descenso aparente de la velocidad de impulsos ultrasónicos en hormigón según la distancia recorrida.

que nosotros con el resto del equipo nos dedicamos, como se ha dejado dicho en otro lugar de este trabajo, a la ejecución y puesta a punto de equipos de generadores de ultrasonido de más potencia que el empleado hasta ahora, y frecuencia variable en ciertos límites.

Cuando el progreso en esta línea nos permita una visión más clara del fenómeno que venimos llamando **anomalía de velocidad** lo pondremos igualmente en conocimiento de nuestros lectores en esta revista.

3.3. Aplicación de los conocimientos anteriores a Ensayos No Destructivos sobre hormigón

Una de las aplicaciones inmediatas de las propiedades de propagación de impulsos ultrasónicos a Ensayos No Destructivos (E.N.D.) encaminados a dictaminar sobre la calidad de hormigón endurecido, se deriva de la propia relación entre la velocidad de propagación de los impulsos y las características elásticas del material. Como es sabido esta velocidad viene expresada por:

$$[1]: c = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

donde:

c = velocidad de propagación
 E = módulo de Young
 ρ = densidad del material
 μ = coeficiente de Poisson

Dado que existe una correlación entre el módulo de Young de un material y su resistencia a compresión, también la habrá entre ésta y la velocidad de propagación, c según se desprende de la fórmula [1], si se suponen invariables el resto de las magnitudes que intervienen en la misma.

Un método de predicción de resistencias mediante ultrasonido puede consistir en medir las velocidades de propagación por hormigones de diferentes resistencias y tratar de establecer la correlación oportuna.

Para ello lo mejor es construir diferentes bloques de hormigón de distintas resistencias, medir en ellos la velocidad de propagación (tal como se indica en la fotografía de la fig. 6) y sacar posteriormente testigos de las zonas ensayadas, que se romperán a compresión finalmente.

A continuación se representan los puntos en un diagrama y en la nube de puntos resultante se interpola una curva de máxima aproximación por el método de los mínimos cuadrados.

Resultan así, curvas como la representada en la fig. 7.

Una primera precaución que hay que tener presente según las experiencias realizadas con motivo del estudio de la anomalía de velocidad, es no utilizar trayectorias de ensayos demasiado largas (deben ser inferiores a 2 m en el caso del equipo «PUNDIT»), ni de longitudes muy desiguales para los ensayos de calibración.

En segundo lugar hay que saber que la correlación obtenida es sólo válida, naturalmente, para el intervalo ensayado (de 180 kp/cm² a 300 kp/cm² en el caso representado en la fig. 7). Las extrapolaciones hechas tanto hacia arriba como hacia abajo de este intervalo carecen de rigor.

Si se obtiene la variación de resistencia de forma controlada en laboratorio por variación de una sola variable de las múltiples que influyen en la resistencia final del hormigón (tal como pueda ser la relación agua/cemento) se suelen lograr, como es el caso que nos ocupa, desviaciones medias inferiores al $\pm 15\%$ y aún mejores.

No obstante, esto no debe engañarnos de tal forma que tratemos de aplicar directamente estas correlaciones a hormigones de obra, máxime si tienen una historia desconocida, que nos impida, incluso, tener seguridad sobre un origen común.

No es difícil encontrar en una misma estructura

Fig. 6. Medición de las velocidades de propagación ultrasónica en bloques patrones, con puntos señalados para la extracción posterior de probetas.

hormigones de distinta procedencia, donde no sólo puede variar la relación agua/cemento, sino otras variables, tal como la naturaleza de la grava y del árido fino, que también influyen decisivamente sobre las resistencias finales.

La correlación representada en la fig. 8 procede de un caso real en que se desconocía la historia del hormigón auscultado.

En ella se observa una dispersión que, sin ser excesiva, es manifiestamente mayor que la obtenida en las experiencias controladas.

En el caso de hormigones de obra puede aparecer aún otra causa de perturbación de la citada correlación: la presencia de finos u otro agente que altere la adherencia mortero/grava. Ello sería suficiente para producir desviaciones importantes y aleatorias de la curva interpolada. Para evitarlo, en el caso de un número reducido de muestras que presenten esta anomalía, es conveniente excluir esas probetas al confeccionar la correlación.

En cualquiera de las gráficas anteriores se puede observar la gran pendiente de las curvas, es decir, el fuerte incremento de resistencia que corresponde a pequeñas variaciones de la velocidad, c , del impulso ultrasónico. Esto explica que las curvas generalmente aceptadas para representar la citada correlación sean exponenciales del tipo (*):

$$\sigma = A \cdot e^{B \cdot c}$$

o bien:

$$\ln \sigma = \ln A + B \cdot c$$

Utilizando la ecuación en esta última forma y representándola en papel semilogarítmico se obtienen rectas como la de la fig. 9.

(*) Ver notas bibliográficas núms. 1, 7, 8.

Para un mismo hormigón, las constantes A, B se pueden deducir de dos experiencias y si de los resultados de un cierto número de probetas se derivan sendos conjuntos de valores $\{\ln A_i\}$, $\{B_i\}$ no muy dispersos, se pueden tomar los valores medios

respectivos $\overline{k}_0$, $\overline{B}$ para usar la expresión:

$$\ln \sigma = \overline{k}_0 + \overline{B} \cdot c$$

en la predicción de resistencias del hormigón en estudio.

De la forma de esta ecuación se desprende, como ya habíamos dicho anteriormente, la necesidad de medir c con el mayor grado de precisión posible, lo que comporta medir con dicha precisión tanto el tiempo de tránsito, τ , del impulso por el material, como la longitud, l_i , de la trayectoria recorrida por dicho impulso.

Así por ejemplo, en el caso ordinario de los aparatos usuales en el mercado que proporcionan medidas del tiempo con error, $\varepsilon \leq \pm 1\%$, y soportes de una edificación del orden de 25×30 cm, estamos obligados a medir las longitudes de ensayos con el mismo límite de error, por lo menos; es decir, con tolerancias máximas de 2,5 ó 3 mm, según midamos en una u otra de las dimensiones del pilar.

Estas exigencias nos llevaron a construir dispositivos especiales, alguno de los cuales se describen en el siguiente apartado, cuando quisimos aplicar masivamente este método no destructivo a auscultaciones de obras reales de hormigón.

4. PRACTICA DE AUSCULTACIONES ULTRASONICAS EN OBRA

Cuando se desea poner en práctica un método de auscultación ultrasónica, tal como el que hemos señalado anteriormente, es preciso poner en práctica una serie de técnicas experimentales que hemos pasado por alto en la exposición teórica.

La primera de ellas consiste en evitar armaduras próximas y paralelas a la dirección de ensayos (Fig. 10).

Es fácil verificar mediante el cálculo que siendo la velocidad de propagación en acero del orden de un 40% a un 50% superior a la del hormigón, existirá un camino acústico mínimo, AMNB, para ir el haz de A a B, que se desvía hacia la armadura y recorre parte de él por ella. El error dependerá de la proximidad, d , entre la trayectoria de ensayo y la armadura.

Fig. 7. Correlación típica velocidad/resistencia a compresión.

Fig. 8. Correlación obtenida con testigos obtenidos de una obra real.

Fig. 9. Correlación resistencia/velocidad en escala semilogarítmica referidas a probetas cúbicas y cilíndricas de relación $h/D = 2$.

Este error, como nos induciría a pensar en velocidades de propagación más altas que las reales, podría ser peligroso del lado de la seguridad.

Por esto, una superficie o elemento a auscultar con ultrasonido debe ser cuidadosa y previamente explorado (Fig. 11) con un detector de armaduras, como es por ejemplo el «Pachómetro».

Una vez conocida las situaciones de éstas se procederá a trazar sobre el pilar la red de puntos que va a definir el conjunto de trayectorias de ensayo. A continuación se determinan —con la precisión requerida—, las longitudes de dichas trayectorias, midiendo las distancias entre los puntos homólogos de apoyos de los captadores, y solamente cuando esté hecho esto, se procederá a extender una pequeña cantidad de grasa de acoplamiento sobre los puntos elegidos, como se indica en la fotografía adjunta (Fig. 12).

La misión de esta pasta es evitar una interfase de aire entre superficie de hormigón y superficie del transductor, lo que produciría la reflexión y subsiguiente no penetración de la mayor parte del impulso en la pieza en ensayo.

Una vez realizada esta operación bastará aplicar firmemente los transductores del equipo de ultrasonido y proceder a la lectura de tiempos de tránsito que proporciona el aparato (Fig. 13).

5. PROBLEMA QUE PRESENTA LA MEDICION PRACTICA DE LAS LONGITUDES DE LAS TRAYECTORIAS

Una vez que se ha decidido hacer una exploración sistemática de una estructura de hormigón armado conviene decidir cómo se van a distribuir los puntos de ensayo por las superficies. Esto vendrá aconsejado, en general, por el tipo de superficie, indicios sobre la forma de variación de resistencia en el elemento y por la sistemática de obtención de resultados que nos convenga aplicar.

La forma más simple, quizás, consiste en distribuir los puntos en dos verticales enfrentadas, tal como se indica en la fig. 14.

Otra disposición, útil cuando se sospeche falta de uniformidad, consiste en colocar los puntos alternadamente en dos verticales, tal como se indica en la fig. 15. Resultan así explorados los planos cruzados, α , β , ν .

En aquellos casos en que el soporte a explorar sea muy alto, muy heterogéneo, o ambas cosas a la vez, se pueden definir una serie de niveles A, B, C, D, a lo largo de la arista del pilar y marcar en cada uno,

Fig. 10. Influencia de armaduras de acero paralelas a la dirección de exploración.

mediante el nivel y la cinta métrica, las secciones correspondientes para después fijar en las mismas los pares de puntos homólogos que definirán las trayectorias de ensayo en el nivel en cuestión. (Fig. 16).

En todos estos sistemas se ha supuesto que los puntos se sitúan sin más ayuda que el nivel de burbuja y una cinta métrica graduada en milímetros y que no se cometen en absoluto errores.

Fig. 11. Exploración magnética previa de la superficie a ensayar.

Fig. 12. Untado de la pasta de acoplamiento a los puntos de ensayo.

Sin embargo, un examen más detenido de estas operaciones nos descubrirá varias fuentes de error, que, dadas las estrechas tolerancias impuestas por el método ultrasónico ($\pm 1\%$) habrá que tener en cuenta.

A continuación estudiaremos la influencia del error de situación de los puntos en la longitud real, de la trayectoria de ensayo. El que esta variación de longitud esté o no dentro de las tolerancias preestablecidas decidirá si el método empleado para el trazado de los puntos es o no aceptable.

Cuando se emplean los utensilios citados para colocar los puntos de ensayo sobre una superficie de un soporte, puede ocurrir que los puntos homólogos no se coloquen exactamente en el mismo plano horizontal, con lo cual se comete un cierto *error en altura*, al tomar el grueso del soporte como longitud, L , efectiva, de la trayectoria de ensayo (Fig. 17).

Fig. 13. Lectura de los tiempos de propagación con un equipo «PUNDIT».

Puede ocurrir también que las dos verticales de puntos homólogos no se coloquen exactamente enfrentadas, o sea, que no estén en el mismo plano normal a las caras del soporte (Fig. 18), con lo cual se cometerá un *error de deriva*; o bien, en el peor de los casos, se pueden cometer ambos errores.

Además puede ocurrir, especialmente con encofrados viejos, que una u otra de las superficies donde vamos a situar los puntos, esté ondulada, con lo cual se podrá cometer otro *error por variación del grosor*, de la pieza que se supuso uniforme.

Fig. 14. Exploración de pilares mediante puntos alineados.

Fig. 15. Exploración de pilares por puntos alternados.

A continuación veremos cuáles deben ser los límites de cada uno de estos errores, para no salirnos de la tolerancia del $\pm 1\%$ en la longitud de la trayectoria de ensayo.

5.1. Influencia del error por altura

Cuando se han dispuesto los puntos de ensayos en sendas verticales enfrentadas dentro de un mismo plano vertical y normal a dos caras opuestas del soporte (Fig. 17), y éstas son suficientemente lisas, el único error notable es el Δh , que se comete al fijar los puntos a diferentes alturas respecto a un plano horizontal.

Fig. 16. Exploración de pilares por niveles.

Entonces si llamamos:

L , al grosor del pilar que tomamos erróneamente por trayectoria efectiva.

Δh , a la altura respecto la horizontal de referencia del punto erróneo, A_1 , donde se coloca el transductor.

$L + \Delta L$, la longitud real de la trayectoria de ensayo tendremos:

$$(L + \Delta L)^2 = L^2 + \Delta L^2; \Delta L^2 = 2L \cdot \Delta L + \Delta L^2 =$$

$$= L^2 \left[2 \cdot \frac{\Delta L}{L} + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 \right]$$

pero como las tolerancias permitidas imponen:

$$\frac{\Delta L}{L} \leq \frac{1}{100} \Rightarrow \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 \leq 10^{-4}$$

que resulta despreciable, con lo que queda:

$$\Delta h = L \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta L}{L}}$$

o sea, que habrá de ser:

$$\Delta h \leq L \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-2}}$$

es decir:

$$\Delta h \leq 0,141 L$$

Así, si por ejemplo es $L = 400$ mm (medida usual en obra), bastará no cometer desviaciones en altura

superiores a 56 mm para estar dentro de tolerancias, cosa que es fácil de conseguir con un manejo cuidadoso del nivel y la cinta métrica.

Por esta misma razón resultaría redundante colocar dos puntos inmediatos A, C (Fig. 17) a una distancia vertical inferior a $0,141 L$, ya que darían lugar a la misma longitud de trayectoria efectiva habida cuenta de los límites de error.

Como criterio medio, este E. I. en estos casos observaba una distancia mínima

$$\overline{AC} \geq 100 \text{ mm}$$

para piezas corrientes de menos de 80 cm de grosor.

5.2. Influencia del error por altura y deriva

Cuando además de error *en altura* se considere que existe también un cierto error *en deriva* al enfrenar

Fig. 17. Influencia del error de enfrentamiento por altura.

Fig. 18. Influencia del error por altura y deriva.

Fig. 19. Influencia del error por variación del grosor.

verticales homólogas, el error total en la trayectoria de ensayo será ahora (Fig. 18).

$$\Delta L = \overline{PP_2} - \overline{PP_1}$$

que con $\overline{PP_1} = L$, y el resultado del apartado anterior nos permite poner:

$$\Delta h \leq 0,141 L$$

si seguimos suponiendo para el error relativo de L

$$\frac{\Delta L}{L} \leq 1\%$$

pero como:

$$\Delta h^2 = \Delta y^2 + \Delta z^2$$

y

$$\Delta z \approx \Delta y$$

por realizarse estas medidas con los mismos utensilios pondremos:

$$\begin{aligned} \Delta y = \Delta z = \delta; \Delta h^2 &= 2 \cdot \delta^2 \Rightarrow \Delta h = \\ &= \sqrt{2} \cdot \delta \leq 0,1 \cdot \sqrt{2} \cdot L \end{aligned}$$

o sea:

$$\delta \leq 0,1 L$$

Lo que supone, para un soporte de $L \approx 400$ mm, un límite de error para las coordenadas y, z, de

$$\delta \leq 40 \text{ mm}$$

condición que también se puede alcanzar con los medios usuales.

5.3. Influencia del error por variación del grosor de la pieza

En el caso más general (Fig. 19), se cometerá también un error, Δx en la dirección x (anchura del pilar), debido a las posibles ondulaciones de las caras del mismo, con lo cual habrá que tener en cuenta ya los errores de las 3 coordenadas (x, y, z). Esto equivale a que el punto homólogo del P, en la fig. 20, no lo situemos en P', que por geometría le correspondería (queda bajo la masa de hormigón debido a la ondulación), ni siquiera en su proyección P₁, ni tampoco en P₂, que sería el obtenido si, además de ondulación, hubiese sólo deriva, sino en P₃, que es el que finalmente fijamos porque se comete también un error en altura, Δz .

Por las razones antes apuntadas consideramos los 3 errores del mismo orden:

$$\Delta x \approx \Delta y \approx \Delta z \approx \delta$$

$$P(x, y, z) \text{ y } P_3(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$$

El error total, ΔL , en la trayectoria será:

$$\Delta L = \overline{PP_3} - \overline{PP'} = \overline{P_3N} < \overline{P_3M} < \overline{P'P_3}$$

pero:

$$\overline{P'P_3} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \approx \sqrt{3}\delta = \sqrt{3} \cdot \delta$$

con lo cual, para que se verifique la condición de tolerancia:

$$\Delta L \leq 0,01 L$$

bastará hacer:

$$\sqrt{3} \cdot \delta \leq 0,01 L, \delta \leq 0,006 L$$

que aplicado al ejemplo que venimos usando de $L = 400$ mm nos conduce a:

$$\delta \leq 2,3 \text{ mm}$$

tolerancia que si bien no es excesivamente amplia, si es alcanzable con los utensilios empleados.

Fig. 20. Influencia del error en las 3 coordenadas.

5.4. Conclusiones prácticas sobre el marcado de puntos

Tomando como base lo expuesto anteriormente y muy especialmente las conclusiones respecto a tolerancias, este equipo realizó una gran cantidad de trabajos en laboratorio y en obras reales. Para ello se sistematizaba la auscultación del siguiente modo:

1. Elección de los elementos a explorar.
2. Detección magnética de las posibles piezas de hierro en la zona de ensayo.
3. Marcado de los puntos de ensayo.
4. Lectura de las longitudes de trayectorias.
5. Preparación con grasa.
6. Lectura del tiempo de tránsito con el equipo ultrasónico.

De todas estas operaciones la de marcado y lectura de longitudes de trayectoria resultaba con mucho la más laboriosa.

Por este motivo se llegó pronto a la conclusión, dentro del equipo, de la necesidad de diseñar y desarrollar un útil mecánico o no, apropiado; de uso más simple y rápido, que pudiera suministrar las longitudes de trayectorias con la precisión requerida.

El resultado de estos esfuerzos ha sido el útil, que conocemos con el nombre de «Espesómetro» y cuyo aspecto puede verse en la fotografía de la fig. 21.

En esencia consiste en una especie de calibrador de gran tamaño que mide los desplazamientos de su varilla en mm, con lo cual se cubren las condiciones de tolerancia.

Fig. 21. Espesómetro para la medición de longitudes de trayectorias.

Fig. 22. Aplicación del útil anterior en obra.

En la foto de la fig. 22 puede verse cómo se aplica el mismo a una medición concreta.

La diversidad de problemas que representa la práctica de los ensayos ultrasónicos nos ha conducido a desarrollar diversos equipos y métodos de trabajo que iremos presentando sucesivamente.

La 2.^a parte de este trabajo se publicará más adelante.

Bibliografía

1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS. J. M. Tobío (1967).
2. EMISION ACUSTIQUE, J. C. Lenain.
3. ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE AS MEANS OF PREVENTING.
4. SERVICE FAILURE, Adrian A. Pollok.
5. ULTRASONICA, Benson Carlini, 1972.
6. LA CALIDAD EN EL HORMIGON Y SUS VARIACIONES EN LAS ESTRUCTURAS, S. G. Davis y S. J. Martin, 1967.
7. MEDICION DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGON EN ESTRUCTURAS, R. H. Elvery, 1973.
8. LES PRINCIPALES METHODES DE TRAITEMENT DU SIGNAL ET LEURS APPLICATIONS AUX MESURES PHYSIQUES, J. Max, 1970.