

Aplicación de los métodos de ultrasonidos a la verificación de materiales de construcción

RICARDO HUETE FUERTES, DR. ARQUITECTO
PALOMA RUBIO DE HITA, DR. ARQUITECTO
CARMEN RODRIGUEZ LIÑAN, DR. ARQUITECTO

RESUMEN. El artículo analiza la aplicación de los métodos ultrasónicos en la verificación de materiales como el hormigón, piedras, rocas, productos cerámicos, plásticos y madera.

De especial interés son las características de propagación de las ondas ultrasónicas: direccionalidad, dispersión, reflexión, transmisión y difracción.

Los métodos utilizados para dicha verificación son el de transmisión o intensidad, y el de impulso de eco.

La aplicación de los métodos existentes para dicha verificación dependerá de la microestructura del material.

La estimación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos en el hormigón resulta de gran importancia para analizar su uniformidad, calidad, alteraciones en el tiempo, grietas, fisuras, etc.

SUMMARY. The article analyzes the application of ultrasonic testing methods to check material like concrete, stones, rocks, ceramic products, plastics and wood.

Of special interest are the characteristics of the ultrasonic waves: directness, dispersion, reflection, transmission and diffraction.

The methods used for verification are those of transmission or intensity and impulse of the echo.

The application of the existing methods for such kinds of verification will depend on the microstructure of the material.

Calculation of the velocity of the transmission of ultrasonic impulses in concrete becomes very important in order to analyze its uniformity, quality, alterations due to time, cracks, fissures, etc.

INDICE GENERAL

1. ¿Qué se entiende por ultrasonidos? 2. El efecto piezoeléctrico. Generación de ondas ultrasónicas 3. Propagación de las ondas ultrasónicas 4. Métodos para la verificación de materiales por ultrasonidos 5. Aplicación de los métodos de ultrasonidos a distintos materiales 6. Aplicación de los ultrasonidos mediante el método de transmisión

1. ¿QUE SE ENTIENDE POR ULTRASONIDOS?

El término **ultrasónico** se refiere, en general, a oscilaciones mecánicas, cuyas frecuencias están por encima del nivel audible. El límite entre el sonido audible y el sonido ultrasónico se da normalmente a la frecuencia de 20 kHz = 20000 Hz (20000 oscilaciones por segundo). Las frecuencias normalmente utilizadas en las técnicas de ensayo ultrasónico van de los 45-54 kHz para hormigones a 15 MHz para algunos metales. A estas frecuencias las ondas se transmiten razonablemente bien en líquidos y sólidos, sin embargo, no se transmiten en el aire. Por esta razón una

onda ultrasónica que se mueve en el interior de un material a verificar se moverá siempre dentro de este, ya que no puede abandonar la pieza al reflejarse en la interfase formada por la pieza y el aire que la rodea.

2. EL EFECTO PIEZOELECTRICO. GENERACION DE ONDAS ULTRASONICAS

Existen muchos métodos para producir ondas ultrasónicas: piezoeléctricos, mecánicos, hidráulicos, etc, pero para nuestros fines solamente tendrán interés aquellos basados en la excitación de los piezo-

crisales, es decir, los materiales que tienen la propiedad de deformarse al recibir una presión mecánica externa, produciendo un voltaje eléctrico en sus caras, y a la inversa, al aplicar un potencial eléctrico a sus caras el material cambia de tamaño produciendo una onda de presión.

Los materiales cristalinos más utilizados son el cuarzo, el titanato de bario, metabionato de plomo y el sulfato de litio.

Para poder aplicar las propiedades de estos cristales en el ensayo de materiales debemos introducir el sonido generado por este cristal en el interior del material a verificar. Para conseguirlo se utiliza un acoplante acústico, es decir un material que permita la transmisión de la oscilaciones producidas por el cristal. Este acoplamiento tiene la finalidad de eliminar el aire entre el cristal y la superficie del material a ensayar, y puede ser aceite fluido, vaselina, grasa consistente etc., dependiendo del grado de rugosidad de la superficie del material.

En un aparato de ultrasonidos, al elemento emisor de la onda ultrasónica se le llama normalmente palpador y existen de varios tipos con distintos diámetros, frecuencias, situación del cristal etc., con el fin de efectuar distintos tipos de controles, adaptándose el palpador al control específico que se vaya a efectuar (figura 1).

Las principales características de un palpador son sensibilidad y poder resolutivo. La sensibilidad podría compararse con el rendimiento del mismo, es decir, cuanto más energía eléctrica convierte en energía sonora mayor será la sensibilidad del palpador. A la hora de realizar un ensayo si el palpador tiene mayor sensibilidad tendremos mayor presión sonora en un punto determinado y, por tanto un mayor poder de detectar discontinuidades de pequeño tamaño.

El poder resolutivo se puede definir como la capacidad del palpador de separar las señales de dos discontinuidades muy próximas (figura 2).

3. PROPAGACION DE LAS ONDAS ULTRASONICAS

Al enviar un impulso ultrasónico a través de un material, la energía elástica se irradia a través del material creándose tres tipos de ondas que poseen su propia velocidad, longitudinales, transversales y de superficie.

a) Ondas longitudinales

En este tipo de onda las partículas oscilan en la misma dirección de propagación de la onda. Es decir, la onda elástica se propaga en la misma dirección de las partículas. Este tipo de onda es el que posee mayor velocidad.

b) Ondas transversales

En este tipo de onda el movimiento de las partículas es transversal a la dirección de propagación de la onda.

Como la transferencia de fuerza con la onda transversal es menor que con la onda longitudinal, debido a la oscilación transversal de los átomos, la proporción de propagación de la onda transversal es mucho menor que la onda longitudinal y su velocidad también es menor.

c) Ondas de superficie

Se producen en medios sólidos no infinitos, ya que este tipo de onda es el que describe el movimiento de las partículas de la superficie de un sólido cuando llega a ella una onda longitudinal o transversal procedente del interior. También son llamadas ondas de **Rayleigh** y son las más lentas de las tres.

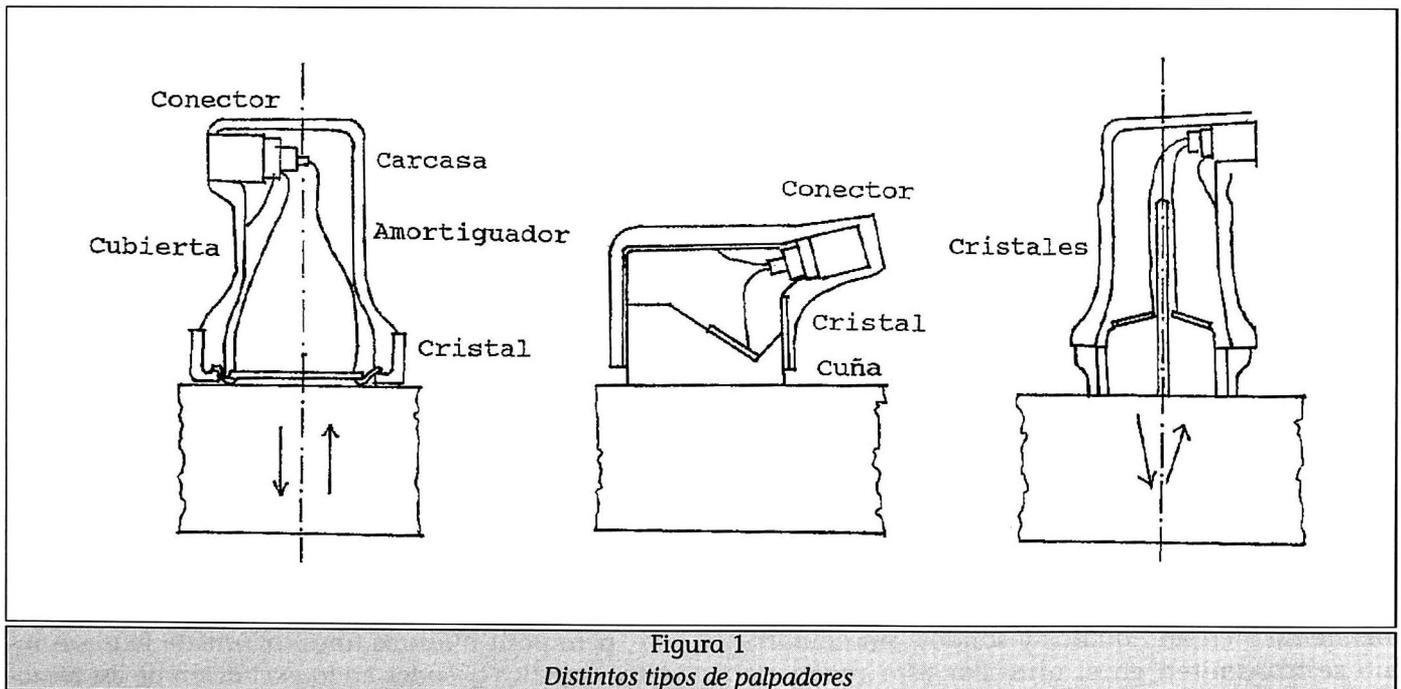


Figura 1
Distintos tipos de palpadores

3.1 Características de la propagación de las ondas ultrasónicas

3.1.1 Direccionalidad y dispersión

Una característica importante en la propagación de las ondas ultrasónicas es la direccionalidad. Debido a la, en general, corta longitud de onda de los impulsos ultrasónicos, estas ondas se propagan prácticamente en línea recta. Esto es lo que las hace muy útiles en la propagación de defectos. No obstante, se produce una mayor dispersión, y por tanto menor direccionalidad, cuanto mayor sea la longitud de onda.

El ángulo de dispersión o de divergencia (figura 3) viene dado por:

En la que:

$$\gamma = k \frac{\lambda}{Def}$$

Def = diámetro efectivo del cristal.

λ = longitud de onda

$k = 1,2$ para palpadores circulares

$k = 1,3$ para palpadores rectangulares

Luego para obtener la menor dispersión posible se deberá utilizar la frecuencia más alta posible, pero al aumentar la frecuencia se produce una mayor atenuación de la energía elástica.

El grano del material exige también que la longitud de onda sea mayor que el tamaño de las partículas de que está constituido. Si la longitud de onda es muy pequeña con respecto a las partículas del material, la onda no penetrará ya que será reflejada en las interfases de estas.

Así, trabajando con metales como acero o aluminio cuyo grano es fino, se pueden emplear frecuencias elevadas de varios megaciclos, con lo cual es fácil obtener haces de energía muy estrechos (de unos 10°C).

Las cosas son diferentes en materiales heterogéneos constituidos por partículas o granos mayores. En el caso del hormigón, por ejemplo, no es posible emplear frecuencias superiores a los 500 kc/s (500 KHz). Por ello los palpadores utilizados para estos materiales tienen unos haces casi esféricos.

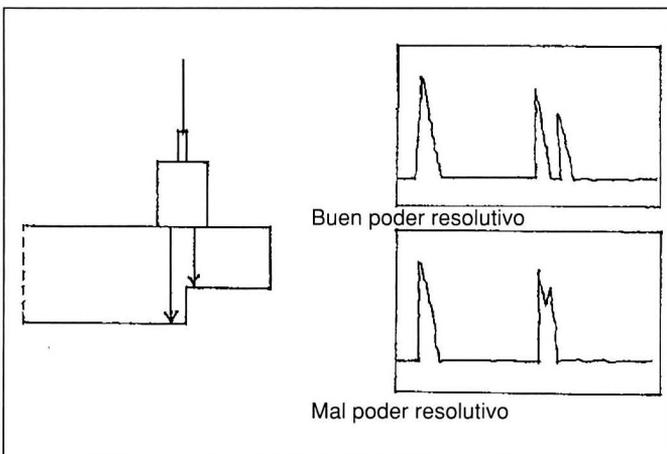


Figura 2
Poder resolutivo de un palpador

Por otro lado, al emplear mayores longitudes de onda (o lo que es lo mismo, menores frecuencias) no se podrán detectar defectos pequeños.

El menor defecto detectable será:

$$\text{Tamaño del min. defect. detec.} = 0,6 \times \lambda$$

3.1.2 Reflexión y transmisión. Impedancia acústica

Cuando una onda elástica incide en una interfase, es decir una discontinuidad en el medio en que se propaga, una parte de la energía se refleja y otra parte se transmite a través de la interfase (Ley de Snell o Ley de refracción) (figura 4).

Supongamos en el caso particular de la incidencia de una onda oblicua de un impulso elástico ultrasónico con una velocidad c que penetra desde un medio I a un medio II, a través de una interfase. Este impulso ultrasónico da lugar a dos ondas reflejadas y a dos refractadas.

Por un lado se forman una onda longitudinal reflejada con velocidad cl ; otra reflejada ct y dos refractadas longitudinal y transversal con velocidades cl' y ct' respectivamente (figura 5).

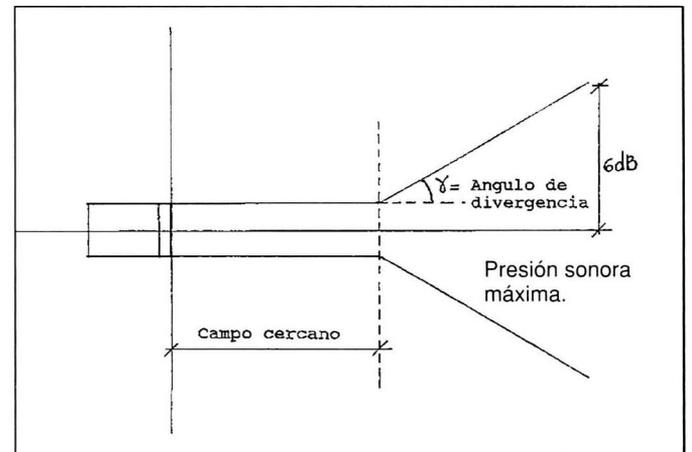


Figura 3
Geometría del haz

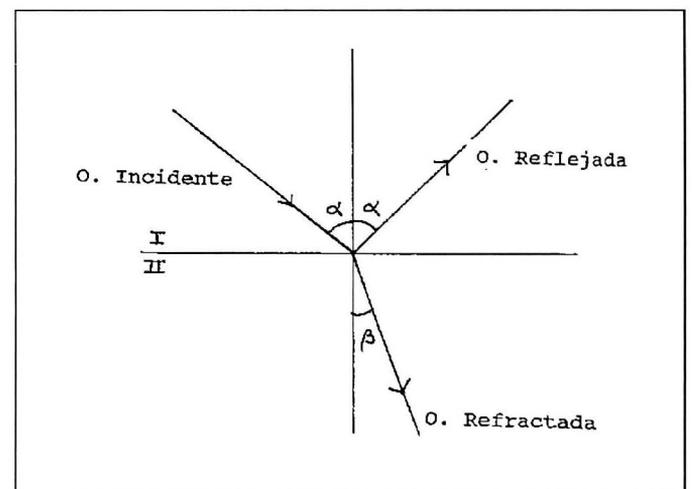


Figura 4
Ley de refracción

La relación entre estas velocidades es la siguiente:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{c_1} = \frac{\text{sen } \alpha}{c_t} = \frac{\text{sen } \beta}{c'_1} = \frac{\text{sen } \beta'}{c'_t}$$

La velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales varían de un medio a otro, esto es, cada material posee su propia velocidad de propagación del sonido. Si tenemos que E_1 y E_2 son las energías reflejadas e incidentes, c_1 y c_2 las velocidades de propagación en cada medio y ρ_1 y ρ_2 las densidades de los medios, la relación entre la energía reflejada y la incidente es la siguiente:

$$\frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2$$

Es decir, la energía reflejada será tanto mayor cuanto más diferentes sean los productos $\rho_1 c_1$ y $\rho_2 c_2$ que se llaman impedancia acústicas.

En la tabla 1 se muestran las impedancias acústicas de diferentes materiales.

Como se puede apreciar, la mayor reflexión de la onda se producirá en una interfase sólido/aire ya que la impedancia acústica del aire es muy pequeña comparada con la de la mayoría de los sólidos.

Por otro lado, en materiales heterogéneos como el hormigón se producirán reflexiones en las interfases o discontinuidades, esto contribuirá a la difracción de la energía elástica en el medio.

3.1.3 Difracción

En la propagación de una onda elástica, sónica o ultrasónica, a través de un material hay siempre una pérdida de energía debida a las discontinuidades como grietas, fisuras, poros de aire etc., el impulso elástico pasará a través del material difractándose muchas veces en su trayectoria.

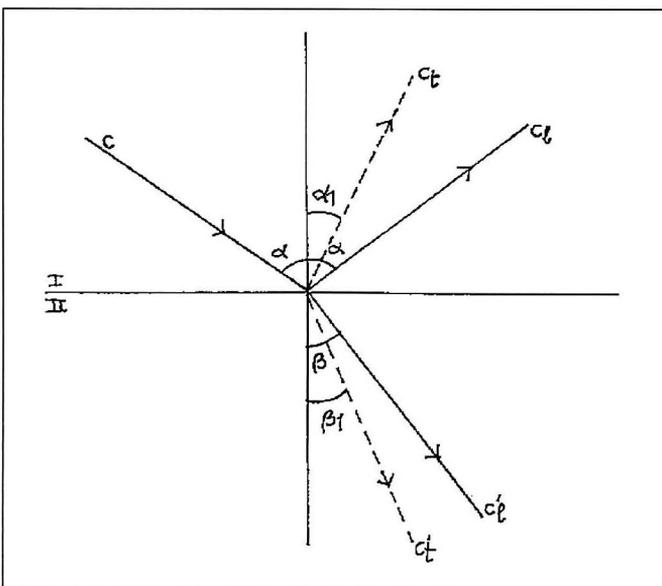


Figura 5

Reflexión y difracción a través de dos medios diferentes

Existirán difracciones en el borde de cada fisura o hueco, lo que dará lugar a un aumento en el tiempo de propagación del impulso a través del medio, de modo que la velocidad de propagación siempre será mayor que en un material homogéneo.

4. METODOS PARA LA VERIFICACION DE MATERIALES POR ULTRASONIDOS

4.1 Método de intensidad o de transmisión

El primer método que se empleó para la verificación de materiales por ultrasonidos fue el método de intensidad o de transmisión.

Fue en 1930 cuando se midió la intensidad del ultrasonido después de haber atravesado una pieza para su verificación. El procedimiento empleado fue el siguiente:

Un generador de alta frecuencia produce un alto voltaje que excita a un cristal piezoeléctrico, este comienza a oscilar y transmite la onda sonora a la pieza a verificar. Un segundo cristal o palpador colocado en el lado opuesto al primero, recibe parte de la onda de presión emitida y por el efecto piezoeléctrico del cristal, se produce un voltaje eléctrico que se amplifica posteriormente y se lee un instrumento de medida (figura 6).

Lógicamente en una pieza homogénea, la intensidad recibida será equivalente a la emitida y por tanto el instrumento de medida marcará el 100% de la intensidad emitida.

En el caso de una pieza no homogénea, la propagación del sonido se dificulta por la discontinuidad del material, resultando una reducción de la presión sonora y por tanto, una lectura menor en el aparato de medida.

Este método puede utilizarse con los palpadores emisor y receptor enfrentados o bien a través de una reflexión como se muestra en la figura 7.

4.2 Método de impulso de eco

En estos dos métodos se puede utilizar, en lugar de un aparato de medida de intensidad, un equipo universal de ultrasonidos, que nos mide a la vez la intensidad sonora y el tiempo transcurrido entre la emisión de la onda y la recepción de esta.

En el método anterior hemos visto que era imprescindible la utilización de dos cristales o dos palpadores, uno que continuamente emitía el sonido y otro cuya misión era únicamente recibir la energía transmitida a través de la pieza que estamos verificando.

Este método tiene el inconveniente de la necesidad de utilizar dos palpadores que deben estar perfectamente enfrentados para recibir la máxima señal transmitida con el fin de evaluar con respecto a esta señal.

Lógicamente el acoplamiento de los dos palpadores al material debe ser perfecto para que el resultado obtenido sea fiable.

Con el método de impulso eco sólo se necesita un palpador, o sea, el cristal es emisor y receptor a la vez en un mismo palpador.

En este método, como en el anterior, se mide la presión sonora sólo que en este caso se mide la presión sonora reflejada y no la transmitida.

Lógicamente, el palpador al tener las dos funcio-

nes, deberá emitir un impulso sonoro, pero también deberá dejar de transmitir durante un cierto intervalo de tiempo con el fin de recibir la onda reflejada en una superficie límite, que puede ser la pared de fondo o la reflexión en una discontinuidad del material.

Hay que señalar que en caso de existir un posible defecto interno de pequeño tamaño, parte del haz sonoro se reflejará en este pero otra parte del haz continuará su camino reflejándose en la pared de fondo.

MATERIAL	P.E. (g / cm ³)	Módulos Kg / cm ² x 10 ³		Velocidades (m / s)			Impedancia acústica (10 ⁶ u..c.g.s.)	Coeficiente de Poisson
		E	E _t	c _t , c _l	c _f	c _s		
Aire	0,0013	-	-	330	-	-	0,0000432	-
Agua	1,00	-	-	1500	-	-	0,15	-
Madera	-	-	-	3000 a 4000	-	-	-	-
Suelos	-	-	-	600 - 1500	-	-	-	-
Acero	7,91	1.990	768	5730	3100	2800	6,45	0,30
Aluminio	2,70	730	273	6250	3100	2800	1,68	0,35
Cobre	8,89	1.140	410	4620	2130	1050	4,09	0,37
Latón	8,44	1.050	385	4700	2130	1950	3,96	0,37
Plomo	11,34	168	58	1950	635	584	2,22	0,43
Mercurio	13,55	-	-	1450	-	-	1,95	-
Plexiglas	1,18	33,6	14,0	2670	1090	990	0,315	0,40
Nylon	1,11	36,4	12,4	2615	1065	965	0,29	0,40
Vidrio	2,32	-	-	5640	3380	2950	1,305	-
Cuarzo	2,64	812	-	5750	-	-	1,52	-
Hormigón								
Malo	2,00	180	68	3000	1600	1400	0,9	0,33
Dudoso	2,21	300	115	3500	1940	1780	1,0	0,28
Excelente	2,40	400	175	4000	2600	2370	1,2	0,15

Tabla 1

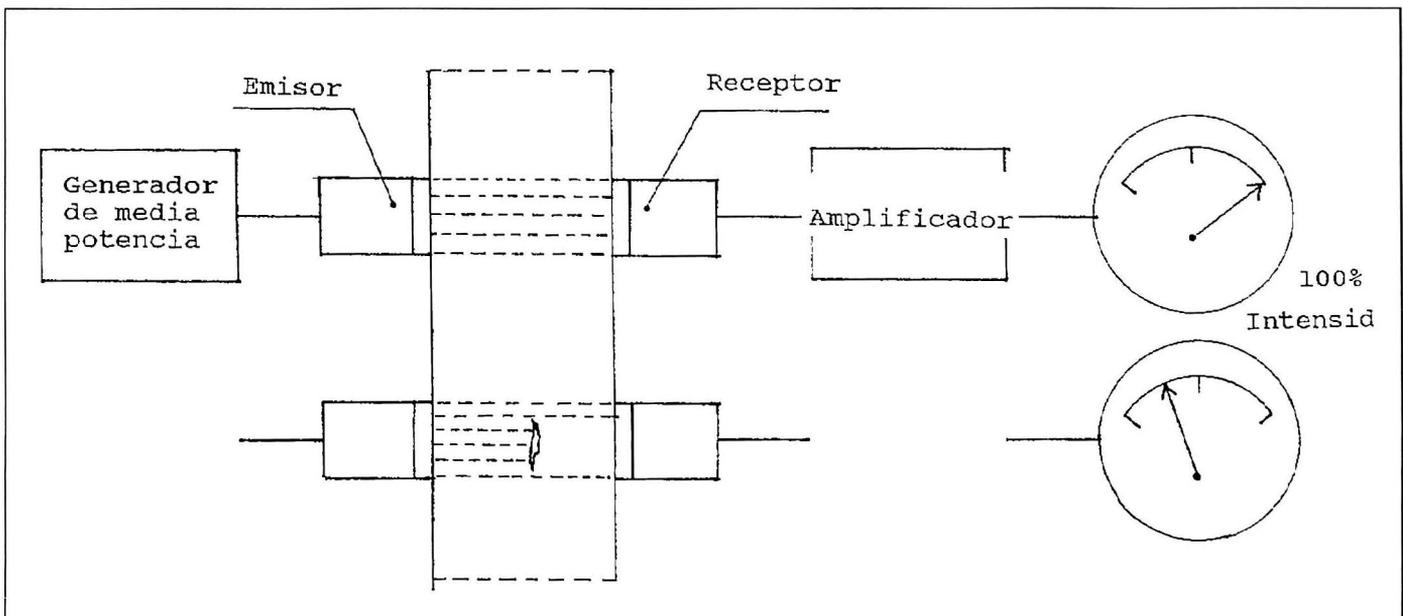


Figura 6

Método de intensidad con transmisión del sonido

Una vez reflejada la onda sonora esta regresa y es recibida por el palpador que la convierte en señal eléctrica, luego es amplificada y representada en la pantalla de tubo de rayos catódicos.

La representación que se produce en la pantalla es dimensional, esto es, en el eje horizontal la señal aparecerá en un punto u otro dependiendo del tiempo que tarde la onda en ir y venir del palpador hasta el reflector, y en el eje vertical, la altura de la señal representada dependerá de la intensidad del sonido reflejado. Este sonido depende a su vez del tamaño, posición y forma del reflector, así como de las características del palpador.

Esquemas de detección de defectos mediante el método de impulso-eco:

- a) Pequeño defecto o discontinuidad en el haz sonoro.
- b) Dos discontinuidades dentro del haz sonoro.
- c) Defecto de gran tamaño que refleja la totalidad del haz sonoro, el defecto pequeño posterior y la pared de fondo quedan ocultas por este defecto.
- d) Defecto de gran tamaño orientado oblicuamente con respecto al haz sonoro, no aparece el eco de la pared de fondo.
- e) Defecto pequeño, la pared de fondo por ser oblicua al haz queda enmascarada en la pantalla.

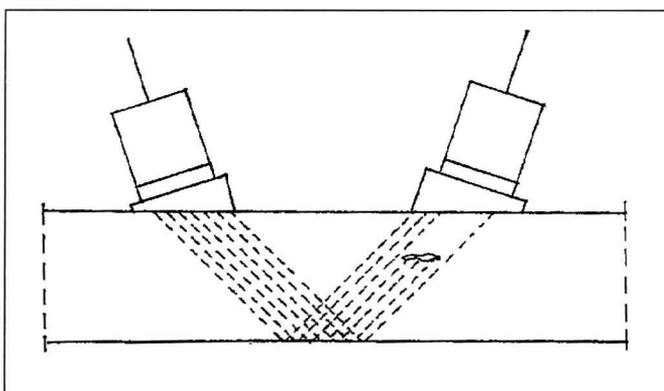


Figura 7
Método de intensidad con reflexión

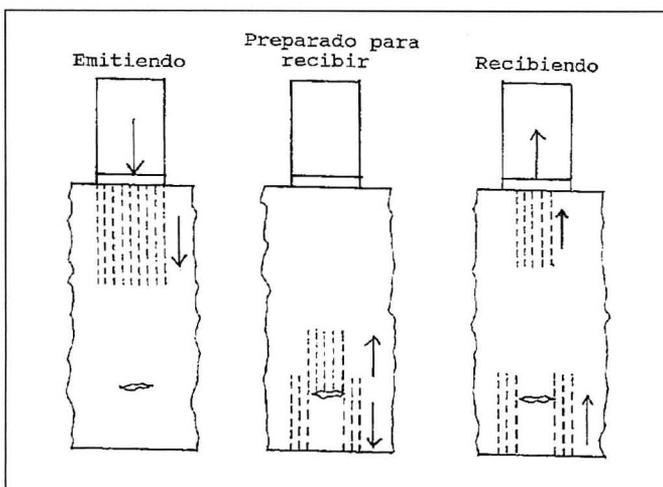


Figura 8
Método del impulso eco

f) Gran atenuación del sonido, no se observa el eco del defecto ni el eco de fondo, solamente **hierba**. En la figura 9 se muestra la aplicación del método de impulso eco.

Como se puede apreciar en la figura, este método además de detectar defectos o discontinuidades, nos permite la localización exacta de estos dentro de la pieza.

5. APLICACION DE LOS METODOS DE ULTRASONIDOS A DISTINTOS MATERIALES

Anteriormente se han expuesto los métodos existentes para la verificación mediante ultrasonidos, la aplicación de uno y otro método dependerá de la microestructura del material a verificar por las siguientes razones:

1) Mientras que en un material homogéneo, como son los metales, la propagación del sonido puede considerarse como constante, en el caso de materiales heterogéneos, como el hormigón, la velocidad varía en gran medida dependiendo de varios factores. Así en el caso del hormigón la velocidad se verá afectada por la dosificación, compacidad, edad, etc.

2) Los impulsos que atraviesan un material heterogéneo sufren muchas dispersiones ya que se reflejan en las superficies limítrofes en sus distintos componentes.

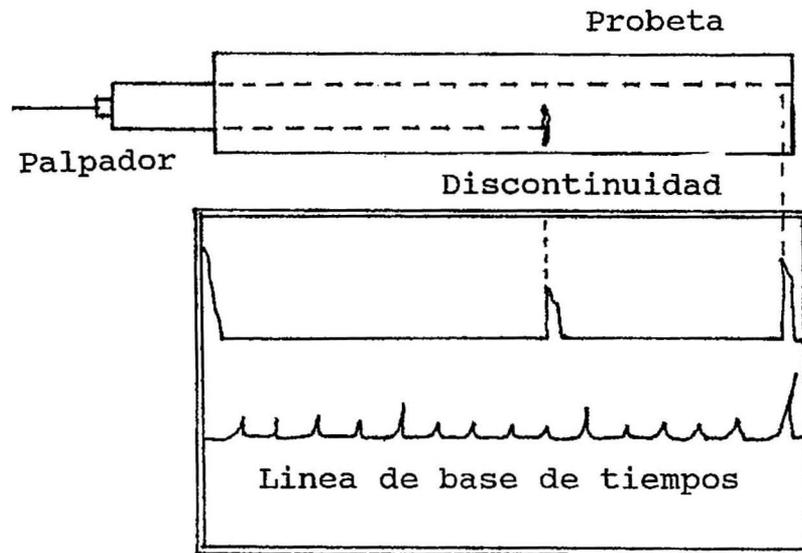
De estos dos puntos se pueden extraer las siguientes conclusiones a la hora de hacer la elección del método a aplicar:

a) El método de impulso eco es el más adecuado para la verificación no destructiva por ondas ultrasónicas de metales y otros materiales homogéneos. Este método como hemos visto anteriormente permite localizar la posición exacta de la discontinuidad, así como el tamaño de la misma.

b) El método del impulso eco, sin embargo, no da resultado en el caso de la verificación de materiales heterogéneos con estructuras basta, ya que la energía de los impulsos ultrasónicos queda reflejada en las superficies límites y poros en los materiales (al igual que en las grietas finas) sufriendo consecuentemente una dispersión en todos los sentidos.

En estos casos conviene utilizar el método de transmisión trabajando con dos palpadores, uno emisor y otro receptor.

La frecuencia utilizada para estos ensayos debe ser notablemente más baja que la utilizada en el método del impulso del eco, para conseguir que la atenuación sea lo más pequeña posible y de este modo conseguir el máximo alcance de los impulsos ultrasónicos en el material. Como es sabido, a mayor longitud de onda (por tanto a menor frecuencia) las ondas pueden atravesar partículas de mayor tamaño.



Pantalla de tubos de rayos catódicos.

Procedimiento de impulso-eco.

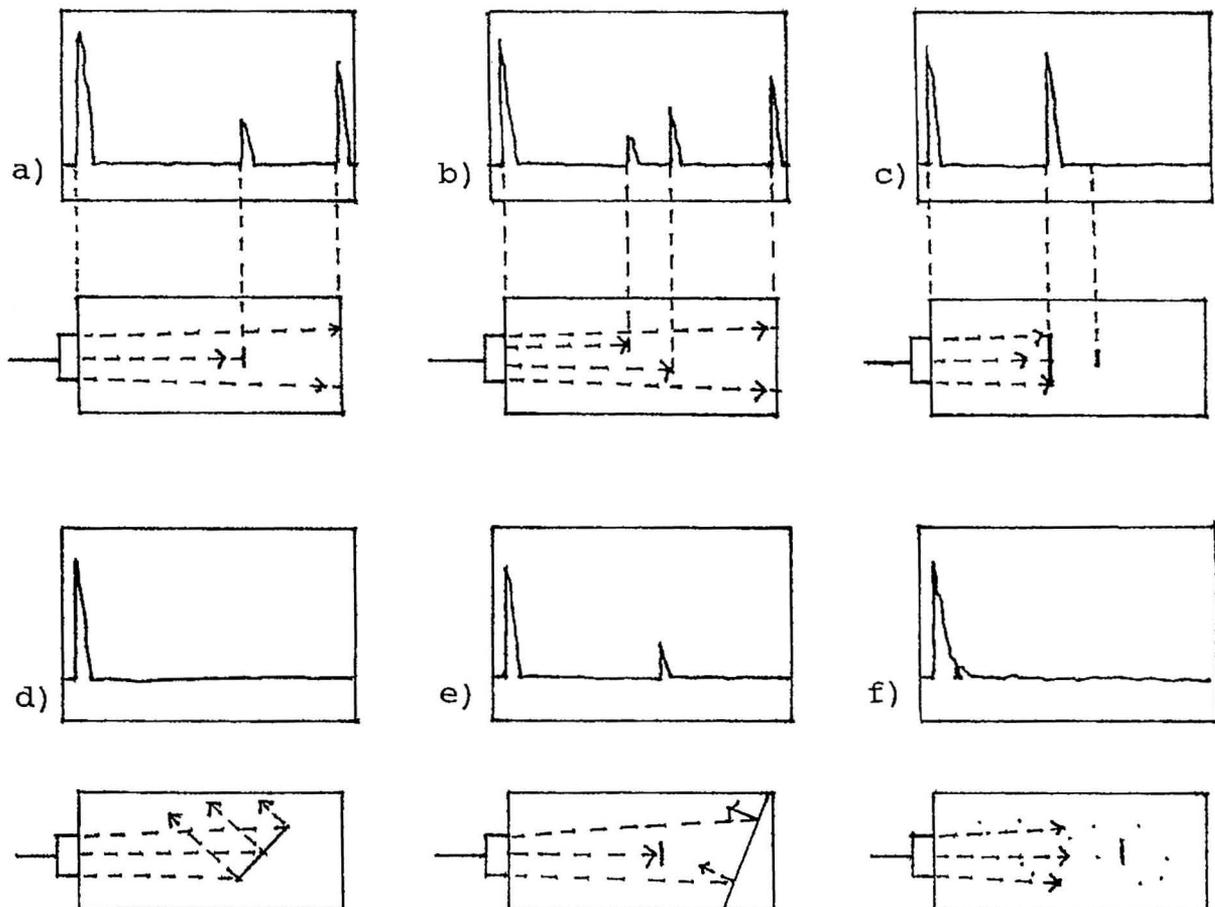


Figura 9

Aplicación del método de impulso-eco

También sucede que a menor frecuencia la concentración del haz disminuye, y prácticamente podemos considerar que estos palpadores tienen un haz esférico como se aprecia en la figura 10.

Con este método la magnitud de una discontinuidad (grieta, oquedad, etc.) puede evaluarse mediante el aumento del tiempo necesario para que el sonido rodee el obstáculo y compararlo con el tiempo de propagación del sonido en una zona sana o sin discontinuidades del mismo material.

6. APLICACION DE LOS ULTRASONIDOS MEDIANTE EL METODO DE TRANSMISION

6.1 Verificación de hormigones

Las primeras publicaciones sobre verificación no destructiva de hormigón datan de finales de los años cuarenta. Desde entonces, este tipo de ensayo se ha ido haciendo más común.

Según la norma UNE 83-308-86 (12) la determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos en el hormigón podrá ser aplicable a los siguientes campos:

- Estudio de la uniformidad del hormigón en los distintos elementos estructurales, delimitando las zonas de hormigones de baja calidad.
- Comparación de la calidad de los hormigones colocados en la misma estructura.
- Estimación de las alteraciones cualitativas del hormigón a lo largo del tiempo.
- Detección de defectos tales como: coqueas, grietas, fisuras, etc.

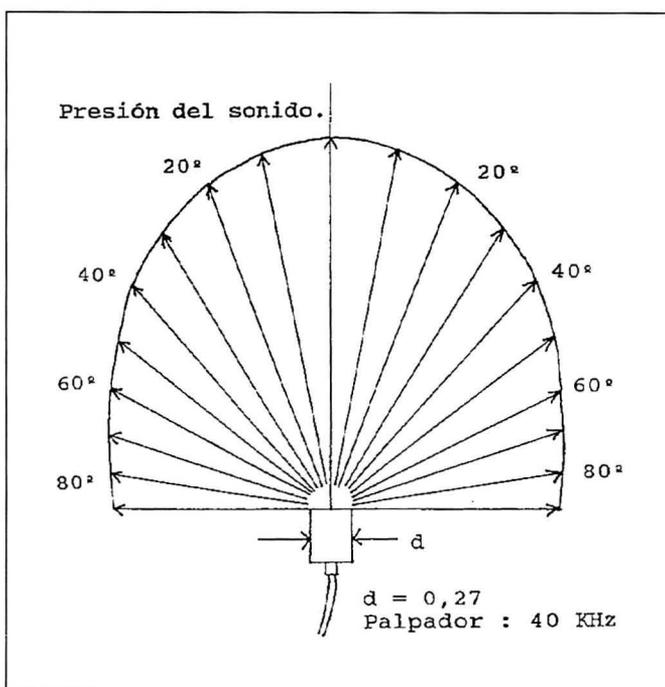


Figura 10

Orientación característica del haz de un palpador de hormigón

- Estimación orientativa de la resistencia de los hormigones.

En este último aspecto es importante destacar que la norma determina que este método nunca es sustituto de los métodos destructivos para la determinación de resistencia, sino más bien, un ensayo complementario y que en general no es recomendable la predicción de la resistencia a compresión partiendo únicamente de la velocidad de propagación de los ultrasonidos.

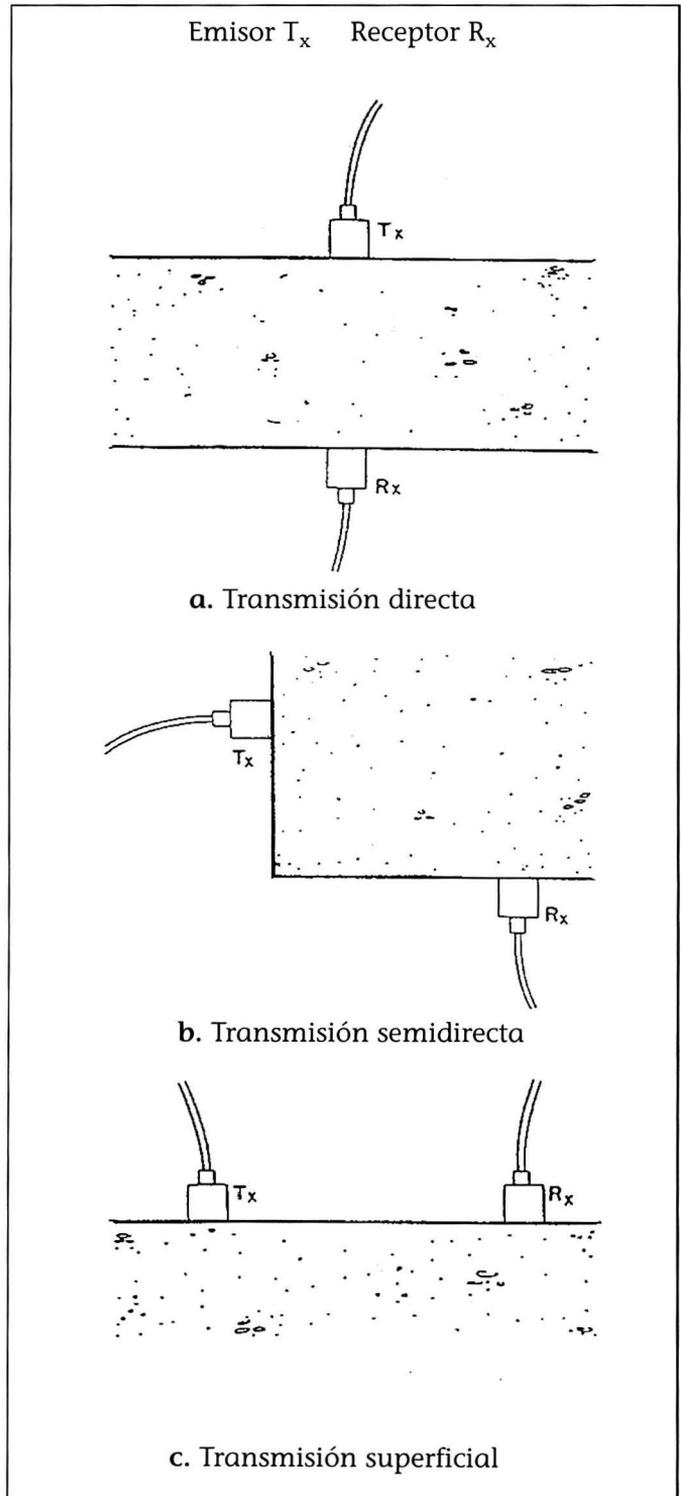


Figura 11

Formas de colocación de los palpadores

6.1.1 Métodos de medición

Dentro del método de transmisión que es el más adecuado para hormigones, existen tres posiciones de colocación de los palpadores:

a) en caras opuestas (**transmisión directa**). Es el método más recomendable y el de mayor sensibilidad.

b) En caras adyacentes (**transmisión semidirecta**).

c) En la misma cara (**transmisión superficial indirecta**). Es el método menos sensible y se utiliza cuando es accesible una cara del hormigón. Puede aplicarse para determinar la profundidad de una grieta, siempre que no sea posible hacerlo por transmisión directa (figura 11).

En los métodos **a** y **b** suelen utilizarse palpadores cilíndricos, sin embargo para el método **c** podemos encontrar dificultades en la determinación exacta de la longitud del recorrido del sonido, por ello suelen utilizar palpadores cónicos.

La velocidad de propagación será:

$$v = s / t$$

Donde **s** es la separación entre los palpadores.

Se realizará un gráfico que relacione el tiempo de recorrido y la distancia entre los palpadores.

En el caso de un hormigón homogéneo la unión de los puntos de medición a diferentes distancias nos dará una línea recta. Si en la zona se produce un salto con respecto a esta recta, esto nos indicará que en dicho punto existe una discontinuidad.

6.1.2 Factores que influyen en la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos en el hormigón

A la hora de evaluar las velocidades de propagación en el hormigón tendremos que tener en cuenta que esta puede estar influenciada por los siguientes factores:

a) **La superficie de ensayo**. Esto deberá ser lo más lisa posible para facilitar un buen contacto entre el palpador y el elemento a ensayar, también será imprescindible la utilización de un material acoplante.

b) **Contenido de humedad**. La humedad influye en la velocidad de propagación ya que al llenarse los poros de hormigón de agua esta posee una mayor velocidad de propagación que el aire (de 340 m/s para el aire a 1500 m/s para el agua). Esta variación de velocidad puede llegar a ser para hormigones de un alto contenido de humedad de un 5% mayor que para hormigones secos.

c) **Temperatura del hormigón**. Para un intervalo de temperatura del hormigón de 5 a 30°C no se producen alteraciones sobre las velocidades de propagación. Fuera de este intervalo se producen va-

riaciones en las velocidades obtenidas, sin que por ello se hayan producido necesariamente cambios en las propiedades del hormigón ensayado.

d) **Longitud del camino recorrido**. En el caso de que la longitud del camino recorrido por el impulso ultrasónico sea muy pequeña, debido a la naturaleza heterogénea del hormigón puede afectar de manera sustancial a la medida afectuada, por ello se recomienda que la longitud o distancia mínimas entre los palpadores sea cinco veces mayor que el tamaño máximo de árido.

e) **Forma y tamaño de los elementos a ensayar**. En principio la forma y el tamaño de los elementos no influye en la velocidad de propagación, a no ser que la dimensión transversal a la dirección de propagación sea inferior a la longitud de onda de los impulsos ultrasónicos. Por debajo de este valor pueden producirse reducciones en las velocidades medidas.

Para una frecuencia de emisión de los palpadores de 50 kHz el valor mínimo que debe tener la dimensión transversal es de 80 mm.

f) **Efecto de las armaduras**. En general la norma no aconseja realizar medidas próximas a las armaduras, sobre todo cuando estas sean paralelas a la dirección de propagación. Este efecto fue estudiado por Jones¹ y Phol², que vieron que para distancias inferiores a 8 cm el valor de la velo-

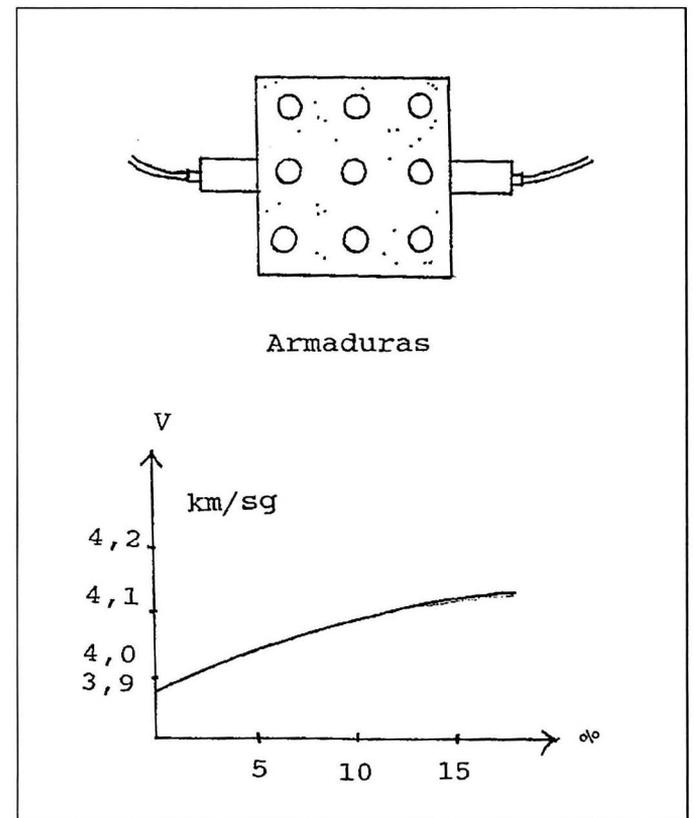


Figura 12
Velocidad de propagación del sonido según el porcentaje de acero

cidad de propagación aumentaba ya que el sonido se propagaba por el acero cuya velocidad de propagación de 5,1 Km/s está por encima de la del hormigón.

Gensel³ realizó mediciones perpendicularmente a la orientación de la armadura en secciones del hormigón muy armadas. La curva de la figura 12 muestra como la medida que aumenta el porcentaje de acero en una sección aumenta la velocidad de propagación.

Si la densidad de armadura es baja, el efecto es pequeño sobre la velocidad de propagación. (figura 12). En general cuando los redondos son de diámetro superior a 13 mm y la separación entre ellos es menor de 15 cm, hay que tener cuidado en la auscultación ultrasónica ya que los valores de velocidad de propagación hallados pueden ser dudosos.

g) Estado tensional. Cuando un hormigón está sometido a fuertes tensiones se produce una microfisuración y la velocidad de propagación se reduce debido a la presencia de estas fisuras. La influencia de estas será mayor si la dirección de propagación es perpendicular a las microfisuras.

6.1.3 Determinación de los medios de elasticidad y del módulo de Poisson en el hormigón

La Norma española no da fórmula alguna para la determinación de los módulos de elasticidad (estático y dinámico) del hormigón. Según la Norma inglesa BS 4408: Part 5:Feb.74. **Recommendations or Non-destructive methods of test for concrete.** Appendix C,

n L / V	μ	n L / V	μ	n L / V	μ
0,257	0,45	0,431	0,30	0,488	0,10
0,345	0,40	0,457	0,25	0,494	0,10
0,395	0,30	0,475	0,20	0,499	0,05

Tabla 2
Valores del módulo de Poisson

Velocidad Km/s	MODULO DE ELASTICIDAD	
	Dinámico MN/m ²	Estático MN/m ²
3,6	24 000	13 000
3,8	26 000	15 000
4,0	29 000	18 000
4,2	32 000	22 000
4,4	36 000	27 000
4,6	42 000	34 000
4,8	49 000	43 000
5,0	58 000	52 000

Tabla 3
Relación módulo de elasticidad-velocidad de propagación

La relación entre el módulo de elasticidad y la velocidad de propagación en un medio isótropo y elástico de dimensiones infinitas, viene dada por la fórmula:

$$E_d = \rho v^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}$$

Donde:

- E_d es el módulo dinámico de elasticidad (MN/m²)

- μ es el módulo de Poisson.

- ρ es la densidad (kg/m³)

- v es la velocidad de la onda longitudinal (km/s)

Si la densidad y el módulo de Poisson son conocidos podemos mediante esta ecuación determinar E_d .

En laboratorio podemos determinar empleando ensayos de resonancia la relación E_d /dens mediante la fórmula:

$$\frac{E_d}{\rho} = 4n^2 L^2 10^{-6}$$

Donde:

- n es la frecuencia de resonancia (Hz).

- L longitud de la muestra (m).

Relacionando las dos ecuaciones anteriores tenemos:

$$\frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} = \frac{4n^2 L^2}{v^2}$$

El valor de m puede ser determinado a partir de la tabla 2.

Pero los valores de los módulos de elasticidad (dinámico y estático), módulo de Poisson y densidad varían de un punto a otro de la estructura. Por ello no es siempre posible llevar a cabo ensayos de resonancia en todos los miembros estructurales para determinar estos valores. De todas formas, se pueden utilizar las relaciones empíricas entre E_d y E_s a partir de mediciones de la velocidad en distintos puntos de estructura.

La relación empírica entre los módulos de elasticidad y la velocidad de propagación se muestran en la tabla 3.

La estimación de los módulos de elasticidad obtenidos a partir de esta tabla tienen una precisión de $\pm 10\%$.

6.1.4 Relación entre la velocidad de propagación y la resistencia del hormigón.

La resistencia a compresión y flexión del hormigón dependen del módulo de elasticidad. Este módulo de elasticidad total depende a su vez de los módulos individuales de los áridos E_a , del cemento E_z , y de la proporción del volumen de áridos frente al volumen total ($a = V_a / V$).

Según Kern¹¹, el módulo de elasticidad total viene dado por las fórmulas:

$$E = \frac{a^2 E_a E_z}{a E_z + (1 - a) E_k} + (1 - a^2) E_z$$

La calidad de un hormigón queda influenciada en primer lugar por E_z , o sea de la calidad del conglomerante y como se puede ver, este es tan solo uno de los factores de los que depende E total. Cuando se calcula a través de una medición de la propagación del sonido, no estamos teniendo en cuenta la influencia de los otros factores de los que depende E total, por ello a través de E no es factible calcular la resistencia de un hormigón con una precisión muy grande.

Muchos autores han desarrollado fórmulas que relacionan la velocidad de propagación de los ultrasonidos y el módulo de la elasticidad con la resistencia a compresión. Sin embargo estas fórmulas sólo son aplicables a ciertas probetas y ciertos elementos de obra que cumplen con unos requisitos muy específicos.

En resumen podemos decir que sin un conocimiento de la composición del hormigón (tipo y dosificación de cemento, relación agua/cemento, presencia de aditivos, tipo y tamaño de áridos) de sus condiciones de curado y su edad, o al no disponer de probetas de hormigón, no es factible una determinación exacta de la resistencia del hormigón.

6.1.5 Estimación de la calidad de un hormigón in situ

De lo anteriormente expuesto, resulta obvio que no hay una relación única entre la velocidad de propagación del impulso ultrasónico y la resistencia del hormigón. Sin embargo existen correlaciones limitadas entre los cambios de velocidad y los cambios de resistencia cuando se producen alteraciones de ciertos factores específicos entre los que destacan la granulometría, dosificación, relación agua/cemento y presencia de armaduras. Es conveniente analizarlos y saber cuando pueden dar lugar a limitaciones en la aplicación del método de ultrasonidos.

El peor caso que se puede encontrar es cuando no se posee información suficiente sobre el hormigón que forma la estructura. En este caso el método de ultrasonidos nos servirá para detectar las faltas de homogeneidad en la composición del hormigón o los fallos de ejecución. Para ello supondremos que la composición del hormigón de los diferentes elementos de obra es la misma. En este caso, las diferencias de velocidad que pueden encontrarse serán debidas a una falta de uniformidad en la compactación, exceso o defecto de agua de amasado o deterioro local.

Lo que si puede afirmarse es que si hay variaciones de velocidad estas variaciones reflejan alteraciones cualitativas en la calidad del hormigón.

Uno de los casos en donde el ensayo ultrasónico es particularmente efectivo es la determinación de la calidad de piezas prefabricadas. En efecto, estas piezas han sido obtenidas con materiales y en condiciones casi idénticas por lo que es sumamente sencillo localizar cualquier pieza defectuosa en virtud de un tiempo de propagación anormal.

6.1.6 Detección de defectos en el hormigón

a) Detección de coqueas

La existencia de coqueas puede detectarse por medio de la transmisión directa debida a un incremento en el tiempo de propagación cuando el defecto queda dentro del camino que recorre el haz. El tamaño mínimo del defecto dependerá de la frecuencia del palpador (figura 13).

b) Estimación de la profundidad de una grieta superficial

Para poder determinar la profundidad de una grieta superficial, se deberá utilizar el método de transmisión superficial o indirecta. Según las Normas belgas par la verificación de hormigones por ultrasonidos¹³ se deberán anotar los tiempos t_1 y t_2 situando los palpadores a ambos lados de la grieta y equidistantes de ella como se muestra en la figura 14.

Si la grieta penetra perpendicularmente a la superficie del hormigón y este es uniforme alrededor

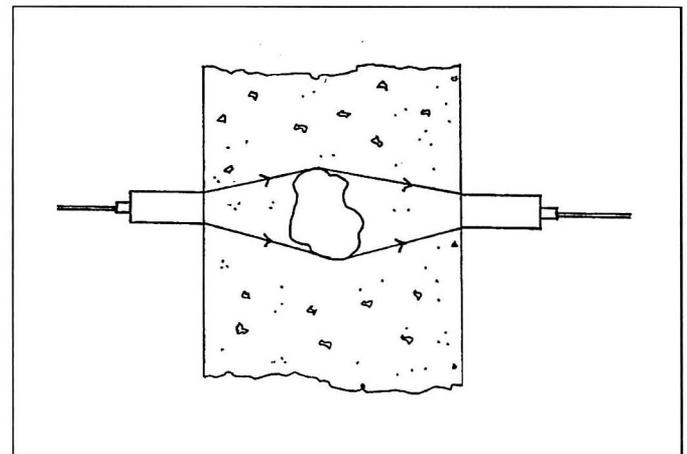


Figura 13
Detección de coqueas

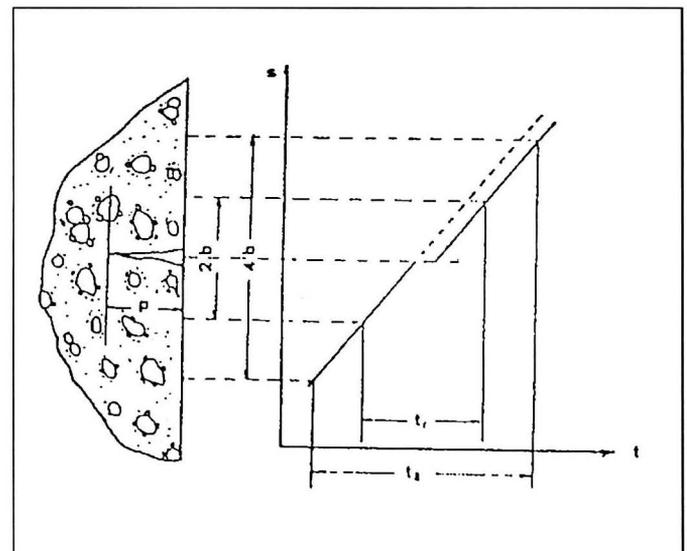


Figura 14
Medición de la profundidad de una grieta

de la grieta, la profundidad de la grieta puede calcularse utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho = b \sqrt{\frac{4 t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}}$$

Con b = distancia del palpador a la grieta.

El valor de b recomendado es de 150 mm.

Para comprobar que la grieta está situada en un plano perpendicular a la superficie colocaremos los dos palpadores muy próximos a la grieta y moveremos alternativamente cada uno de los ellos alejándolos de la grieta, y repitiendo los tiempos de recorrido para la posición. Si se produce una disminución del tiempo medido, indicará que la grieta se inclina en la dirección del palpador que se ha movido.

c) Estimación del espesor de una capa de hormigón de inferior calidad

El espesor de una capa de hormigón de mala calidad debido a la acción del fuego, al proceso de ejecución, a heladas, ataque de sulfatos, etc. puede estimarse midiendo el tiempo de propagación de los impulsos ultrasónicos por el método de transmisión superficial. Para ello construiremos un gráfico como el de la figura 15.

Primero trazaremos la recta correspondiente a los tiempos de propagación para un hormigón sano. En este, la distancia entre los palpadores y el tiempo de recorrido son proporcionales.

Luego iremos a la zona en las malas condiciones, en ella para distancias entre los palpadores muy pequeños, el impulso sólo atraviesa la capa superficial, como la velocidad de propagación de esta capa es menor, en la gráfica obtendremos una recta con otra pendiente. Pero a medida que separamos los palpadores llegará un punto en que el haz llegará al hormigón de mejor calidad con lo que aumentará la velocidad (menor tiempo de re-

corrido del impulso) y por tanto a partir de este punto cambiará la pendiente.

La distancia X_0 en la que cambia la pendiente, junto con las velocidades medidas en las dos capas de hormigón hacen posible la determinación de la capa superficial de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$t = \frac{x_0}{2} \sqrt{\frac{v_s - v_d}{v_s + v_d}}$$

Donde:

- V_d es la velocidad de propagación en el hormigón dañado.

- V_s es la velocidad de propagación en el hormigón sano de la capa subyacente.

- t es el espesor de la capa dañada.

Este método sólo es aplicable para áreas superficiales en las que las capas de hormigón dañado tengan un espesor uniforme y V_d sea bastante más pequeño que V_s .

6.2 Verificación de piedras y rocas

Mediante la aplicación de métodos de ultrasonidos se han realizado ensayos en la determinación de las propiedades elásticas de la roca. Los ensayos de este tipo han sido realizados por primera vez en Suiza por **Wenzel** ¹⁵. El campo de la construcción, se han aplicado en túneles para la determinación del módulo de elasticidad de la roca y en la determinación de zonas huecas.

6.3 Verificación de productos cerámicos

Durante la fabricación de ladrillos refractarios suele ocurrir debido a la falta de presión a que se someten que se forman grietas interiores. Estas grietas discurren en el sentido perpendicular al sentido de la presión.

En el caso de ladrillos dañados el tiempo de recorrido del impulso aumenta considerablemente hasta un 200% más que el tiempo de recorrido en ladrillos que se encuentran en perfecto estado.

Esta medición incluidos puede realizarse antes de cocer los ladrillos, así, los ladrillos que se hayan encontrado defectuosos podrán volverse a amasar evitando la pérdida de material y energía (figura 16).

Prácticamente ocurre lo mismo en la fabricación de losetas. También las losetas se pueden controlar antes de ser cocidas. Como la composición de la masa base es siempre la misma, por medio de la velocidad de propagación del sonido se obtiene una información clara de la calidad de cada loseta.

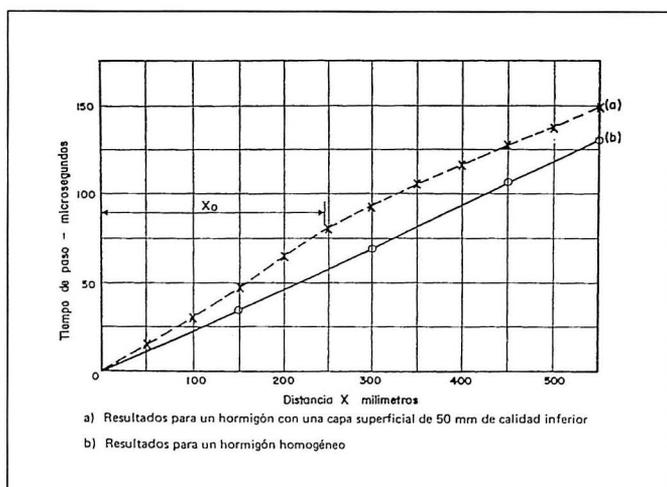


Figura 15

Determinación de la velocidad de los impulsos

6.4 Verificación de plásticos

6.4.1 Verificación de plásticos reforzados con fibra de vidrio

Los plásticos reforzados con fibra de vidrio poseen una estructura heterogénea, por ello su verificación se realiza por el sistema de transmisión y no por el de impulso eco. En ellos la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas varía notablemente si la transmisión se realiza en el sentido de la fibra o perpendicularmente a ella.

Niedersdat¹⁸ hizo ensayos en plásticos reforzados con fibra de vidrio. En ellos estudió la disminución del módulo dinámico de elasticidad en relación con la temperatura. Así mismo, se determinó el módulo de elasticidad en distintos sentidos con el fin de observar posibles desplazamientos de capas a través de las faltas de simetría.

6.4.2 Verificación de pegados

Meclenburg¹⁹ hizo ensayos de ultrasonidos en compuestos de plásticos pegados, haciendo entrar frontalmente los ultrasonidos en la placas sometidas a ensayo. La diferencias de calidad y los pegados incorrectos dieron, en este caso, diferencias de tiempo.

6.5 Medición de la velocidad de propagación en la madera

Al igual que sucede en los plásticos reforzados con fibra de vidrio, las velocidades de propagación en una misma pieza de madera variarán mu-

cho dependiendo de que la transmisión se realice paralela o perpendicular al sentido de la fibra.

También la velocidad de propagación variará según el tipo de madera y aún así dentro de un mismo tipo encontraremos variaciones.

La primeras verificaciones mediante ultrasonidos aplicadas al campo de la arquitectura fueron realizadas por Lee²⁰. Lee aplicó el método de la comprobación del estado de unas vigas de madera de una casa del siglo XVIII. Estas vigas habían sido atacadas por insectos xilófagos y por hongos. A través de un aumento en los tiempos de recorrido, se pudieron reparar con rapidez y eficacia y muchas de las vigas pudieron conservarse.

El mismo autor posteriormente señaló las posibilidades de verificación de los siguientes elementos constructivos:

- a) Vigas prefabricadas de madera con refuerzos.
- b) Calidad del encolado de uniones de madera.
- c) La calidad de la adherencia de planchas de madera contrachapada unidas mediante cola.

En estas comprobaciones quedó demostrado en los ensayos que el sonido quedaba reflejado casi un 100% al llegar a una interfase formada por aire-madera producido por un encolado deficiente o una falta de encolado.

En la actualidad se siguen las investigaciones en este campo por la necesidad de ensayos adecuados para el control de la madera.

7. BIBLIOGRAFIA

Bibliografía sobre la verificación de hormigones

- 1 JONES. R.: *Discussion on the Ultrasonic Testing of Concrete*. The Structura Engineer ,1957, 5.

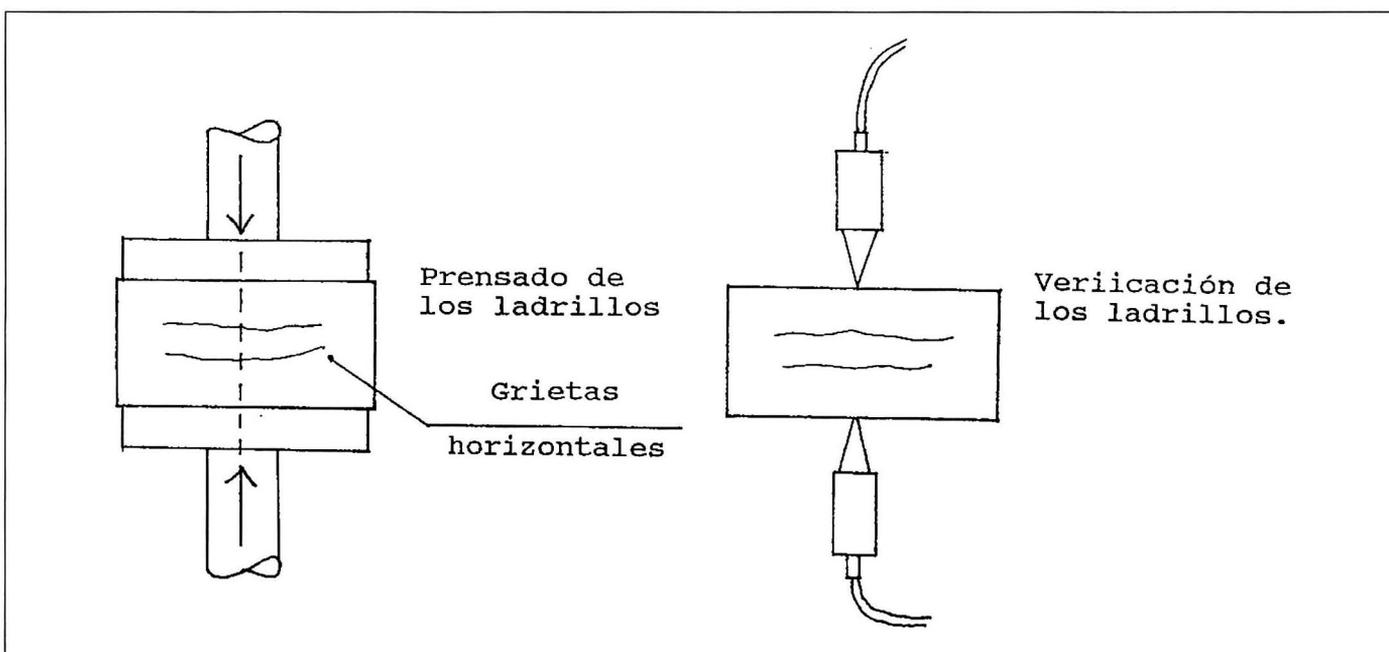


Figura 16

Formación de grietas en ladrillos refractarios

- 2 PHOL, E.: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen*, Leipzig, 1962, I, s.19-64.
- 3 GENSEL, J.: *Einfluss der Bewehrungsdichte und der Feuchtigkeit auf die Geschwindigkeit von Ultraschallimpulsen in Beton*.
- 4 LESLIE, J.R. y CHEESMAN, W.J.: *An ultrasonic Method of Studying Deterioration and Cracking in Concrete Structure*. Journal of the American Concrete Institute, 1949 Vol.46 pp. 17-36.
- 5 WESCHE, K.: *Möglichkeiten für die Anwendung von Ultraschall bei der Betonprüfung*. Die Bautechnik, Bd. 32, H.5, S.151.
- 6 L'HERMITE, CHEFDEVILLE Y DAWANCE: *L'auscultation dynamique du béton*, Annales de l'Institut Tech. du Bat. et des Trav. Publ., Paris Juli/Aug., 1950.
- 7 POPESCU, N.D.: *Zertrüfungsfreie Prüfung von Beton mit dem Ultraschallimpulsverfahren*. Materialprüfung Bd. 13; 1971; Nr. 3 S.; pp 85-88.
- 8 WATKEYS, D.G.: *Non destructive Testing of concrete subject to fire attack*. M.Sc. (Eng) Thesis, University of London, 1955.
- 9 EISENMAN, K. y ODEWALD G.: *Untersuchungen de elastischen Eigenschaften von Beton mittels Ultraschall*. Beton-und Stahlbeton, Bd. 54, H.6, S. 156-158.
- 10 WEIGLER y KERN: *Über die Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschall verfahrens zur Beurteilung der Betongute*. Beton-Zeitung H.5, 1965; S. 279-286.
- 11 STEINKAMP, G.J.R.: *Untersuchungen von Rissen in Beton mit Hilfe von Ultraschallwellen*. Doktrdissertation Braunschweig, 1953.

Normativa

- 12 UNE 83-308-86: *Ensayos de hormigón. Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos*.
- 13 NBN B 15-229: *Essais des Betons. Essais non destructifs mesure de la vitesse du son*.

- 14 BS 4408: Part 5: February 1974. *Recommendations for non-destructive methods of test for concrete. Measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete*.

Bibliografía sobre la verificación de rocas y piedras

- 15 WENZEL, K.: *Die Bestimmung der elastischen Eigenschaften von anstehendem Fels durch Ultraschall-Sondierung*. Schweizerische Bauzeitung, B. 77, 1969; Heft 30. s. 479 ff.
- 16 THILL, R.E. y BUR, T.R.: *An autmated ultrasonic pulse measurement system*, Geophysics, V. 34 nº I, 1969; S. 101-105
- 17 THILL, R.E., WILLARD, R.J. y BUR, T.R.: *Correlation of longitudinal Velocity Variation with Rock Fabric*. Journal of Geophysical Research Vol. 74, Nº 20, S. 4897-4909.

Bibliografía sobre la verificación de plásticos

- 18 NIEDERSTAD, G.: *Prufund der elastischen Eigenschaften von Glasfaser-Kunststoffen durch Ultraschall*. Kunststoffe Bd. 54, 1964; H.12, S. 781-783.
- 19 MECKLENBURG, H.E.: *Kleben als Fugererfahren für Glasfaserverstärkte Kunststoffe*. Kunststoffe Bd. 54, 1964; H. 12, S. 804-815.

Bibliografía sobre la verificación de madera

- 20 LEE, I.D.G.: *Testing fr Safety in Timber Structures Paper 12*, Symposium on Nondestructive Testing of Concrete and Timber, Inst. of Civil Engineers, London, June 1969; pp 115-118.

Manuales:

- *Ensayos de materiale por ultrasonidos*. Sistema de formación Krautkramer.
- STEINKAMP, G.: *Manual para la utilización del equipo de ultrasonidos Tipo BP V*.
- PHOL, E.: *Wissenschaftliche Zeitschrift der hochschule für Bauwesen*, Leipzig, 1957.