

**TÉCNICAS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA APLICABLES
PARA LA EVALUACIÓN DE DAÑO EN ELEMENTOS
ESTRUCTURALES DE LA AL-HAMBRA.**



ASIGNATURA | EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA Y CALIDAD EN ESTRUCTURAS

PROF | GUILLERMO RUS CALRBORG

ALUMNO | DAVID ESCOLANO MARGARIT

MAYO, 2008

TÉCNICAS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA APLICABLES PARA LA EVALUACIÓN DE DAÑO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA AL-HAMBRA.

Asignatura | Evaluación no Destructiva y Calidad en las Estructuras
Prof. | Guillermo Rus
Alumno | David Escolano Margarit

INDICE

1

1. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN LA AL-HAMBRA	3
1.1. TAPIAL	3
1.2. LA MADERA	5

2

2. TECNICAS NO DESTRUCTIVAS APLICABLES A LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.	6
2.1. TAPIAL.	6
2.1.1. MÉTODOS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA PARA CARACTERIZAR LA POROSIDAD DEL MORTERO	6
2.1.2. EFECTOS SOBRE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS DE FLUIDOS EN EL INTERIOR DE MORTEROS DE CEMENTO	9
2.2. MADERA.	13
2.2.1. METODOLOGÍA DE ENSAYO PARA DIAGNOSTICAR EL ESTADO DE LA MADERA	13

3

3. BIBLIORAFÍA CONSULTADA	21
----------------------------------	-----------

1. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN LA AL-HAMBRA

1.1. TAPIAL

El tapial se realizaba mediante unos tableros de madera (hormas) a modo de moldes separados entre sí la anchura del muro y sostenidos por travesaños (agujas o cárceles) entre los que se iban echando los materiales constitutivos: piedra, grava, arena, cal, etc., que se iban conformando en el molde al ser humedecidos, batidos o apisonados.

Los materiales que constituyen las fábricas de los muros, son principalmente, tierra y morteros – hormigones de cal.

La cal es un producto fundamental en la construcción, se emplea como aglutinante de los diferentes materiales de la obra.

Características físico-mecánicas

Entre las características físicas del cajón de tapial cabe destacar una baja dilatación térmica, $0,012 \text{ mm/m a } ^\circ\text{C}$, así como su buen comportamiento como aislante acústico, debido a sus grandes espesores, con una reducción de 56 dB en un muro de 40 cm., para una frecuencia de 500 Hz.

Mecánicamente, el tapial tiene una resistencia aproximada de 1,5 Mpa (15 kg/cm²), pudiendo variar entre 10 y 22 kg/cm², en tanto la resistencia a la tracción es muy baja, entre 2 y 4 kg/cm².

Cuando el material está endurecido, presenta buen comportamiento frente al desgaste y al punzonamiento. Sin embargo, tiene muy baja resistencia frente a esfuerzos cortantes y, por ello, mal comportamiento ante situaciones de posible cizallamiento, lo que propicia la aparición de fisuras y grietas verticales, especialmente en la proximidad de las esquinas o contrafuertes.

La densidad media del tapial está en el entorno de 2 T/m³, en función de la mezcla adoptada, variando generalmente entre 1,8 y 2,1 T/m³.

PRINCIPALES PATOLOGÍAS

Los principales agentes que causan las lesiones son el agua, la temperatura y el viento.

Humedad:

El agua afecta fundamentalmente a la parte inferior de la fábrica, a su coronación, que no suele estar protegida y a las zonas de las juntas. La ascensión del agua por capilaridad es muy baja en la tapia endurecida, no sobrepasando nunca valores aproximados de 40 cm., siendo menor cuanto mayor sea la porosidad de la fábrica. Sin embargo, es más sensible al salpiqueo del agua y a los ciclos hielo-deshielo en zonas de climas fríos y húmedos.

Resistencia

La resistencia de las construcciones de tierra disminuye progresivamente a medida que aumenta la humedad relativa en el interior de sus fábricas. Además se produce simultáneamente la pudrición de los elementos leñosos que apoyan o están embebidos en las fábricas de adobe y tapial, lesionando los forjados y produciendo oquedades y el cedimiento interno en los cajones, que pueden acabar arruinando la construcción.

El arrastre de sales higroscópicas de los morteros del zócalo de apoyo, o existentes en la propia tierra, en la zona inferior de las tapias, puede provocar la aparición de eflorescencias en la superficie, produciendo pérdida del material en el plano exterior o el abolsamiento y posterior caída del revestimiento exterior de protección.

Temperatura:

Las fábricas de tierra resisten muy bien las temperaturas altas o bajas, pero son sensibles a las variaciones bruscas o a gradientes elevados, cuando se produce una elevada temperatura a mediodía y desciende de forma importante por la noche, superando el coeficiente de dilatación del material, entre la superficie exterior expuesta y la temperatura interna del material, casi constante por su gran espesor, pudiendo producir fisuración en el exterior, que no se aprecia en la otra cara de la fábrica si está protegida.

Debido a la escasa resistencia al cizallamiento, que se comentaba anteriormente, en el caso de que se produzcan esfuerzos diferenciales por cedimiento, asentamiento o deslizamiento, las fábricas de adobe se abren, de forma similar a las de ladrillo, pero con efectos más contundentes, y los cajones de tapial pueden fisurarse fácilmente, especialmente en las zonas de cambio de material, de espesor, o en la proximidad de esquinas y refuerzos.

1.2. MADERA

Las estructurales horizontales de los palacios de la Al-Hambra están resueltas en la mayoría de los casos mediante una estructura de escuadrías de madera apoyadas directamente sobre la cabeza de los muros o apoyadas sobre durmientes de madera.

El tipo de madera más común en las obras de Andalucía, es el pino silvestre.

PRINCIPALES PATOLOGÍAS

Los principales patologías de la madera viene provocadas por dos agentes destructores:

- **Agentes Bióticos:** La madera puede ser atacada por distintos organismos vivos (insectos y hongos) que se alimentan de las distintas partes que conforman la madera y si las condiciones son adecuadas pueden llegar incluso a destruirla completamente.
- **Agentes abióticos:** Aquellos agentes de origen no vivo que producen alteraciones o envejecimiento de la madera. Son agentes atmosféricos, acciones mecánicas, químicas y el fuego.

2. TECNICAS NO DESTRUCTIVAS APLICABLES A LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

2.1. TAPIAL.

Como hemos visto el tapial puede considerarse como un cierto tipo de hormigón realizado con morteros de cal y arena. Por tanto aplicar métodos actuales para determinar las características y evaluación de daño en materiales con una matriz de cemento y áridos puede ser un criterio interesante para determinar las características y evaluación de daño de los tapias, adaptando los métodos a este material concreto.

Se analizan por tanto varios métodos de evaluación no destructiva mediante ultrasonidos, aplicados actualmente al materiales con base de cemento.

2.1.1. MÉTODOS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA PARA CARACTERIZAR LA POROSIDAD DEL MORTERO.

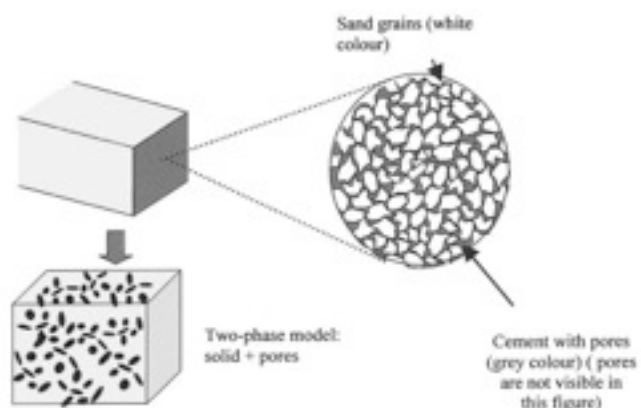
Tal y como describen L. Vergara et al en su artículo: NDE ULTRASONIC METHOD TO CHARACTERISE THE POROSITY OF MORTAR. [6]

Los procesos que afectan a la durabilidad del hormigón están muy relacionados a su estructura porosa, que determina su comportamiento frente al entorno. Los poros y capilaridades en el hormigón propician los procesos destructivos que comienzan por lo general en la superficie. Los agentes agresivos del hormigón se transmiten a través de la estructura de poros. La distribución y la dimensión de los poros influyen en el tipo de líquidos y gases, así como la facilidad de transporte de los mismos a través de la estructura de poros del material.

De todos los poros los más íntimamente relacionados con la durabilidad del hormigón son los macroporos y las capilaridades.

Dada la complejidad del hormigón el equipo de investigadores decide analizar el mortero, compuesto básicamente por arena y cemento.

Por otro lado considerando que puedan aparecer poros en el cemento, se puede modelar el mortero como un material basado en tres fases: arena + cemento + poros. De todas formas para una primera aproximación consideran un



modelo de material con dos fases: una sólida formada por arena + cemento y otra formada por un conjunto de poros.

Set up experimental:

Se utilizan 120 probetas de mortero de cemento de dimensiones 160x4x4 cm. Divididas en cinco grupos con distinta relación agua cemento. 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 y 0.65.

De estas 12 se utilizan para el ensayo mediante técnicas destructivas y 12 para ensayarlas con técnicas no destructivas. Dentro de las dedicadas a técnicas no destructivas 6 se emplean para el análisis del ruido y 6 para determinar la velocidad de propagación.

La investigación se lleva a cabo desde dos puntos de vista. Análisis del ruido y el estudio de la relación entre la velocidad de propagación ultrasónica y la porosidad.

De ambas líneas de investigación nos centramos en el estudio de la segunda puesto que es la que ofrece los resultados más satisfactorios a la hora de determinar la porosidad de los especímenes ensayados:

CARACTERIZACIÓN BASADA EN LA VELOCIDAD DEL SONIDO:

La velocidad del sonido ha sido frecuentemente usada como un indicador de las características mecánicas de los materiales. Para este efecto existen algunas expresiones analíticas que relacionan la velocidad con las constantes de Lamé [8]. Por otro lado existen trabajos que establecen la relación analítica entre la velocidad acústica y la porosidad en los materiales compuestos [9]. Estos casos se usan en el caso del mortero.

Para aplicar un modelo micro-mecánico al mortero se, consideran el material formado por una fase sólida que ocupa un volumen V^m más los poros que ocupa un volumen V^i ($V^m + V^i = 1$). También consideran que los poros de capilaridad (de una dimensión inferior al micrón) tienen una forma cilíndrica y extendida y que su distribución es aleatoria en la fase sólida.

Con estas hipótesis se puede considerar la siguiente expresión que relacionan la velocidad de propagación del sonido en un medio con porosidad:

$$V = f(C_{ij}, T_{klmn}, r, X)$$

Donde:

V = la velocidad de propagación de las ondas acústicas.

C_{ij} = Constantes elásticas del sólido

T_{klmn} = indica el tensor que contiene el tamaño, distribución y orientación de los poros en un material.

r = Densidad.

X = Porcentaje de porosidad

El promedio de las velocidades se mide para 6 probetas de cada grupo mediante dos transductores, en seco usando como contacto goma. Se miden tres puntos por probeta con un transductor de 1 MHz.

La figura 4 muestra las curvas que relacionan la porosidad y la velocidad. Cada curva se obtiene de encontrar los parámetros de un modelo para cada grupo de probetas con distinto porcentaje de agua-cemento.

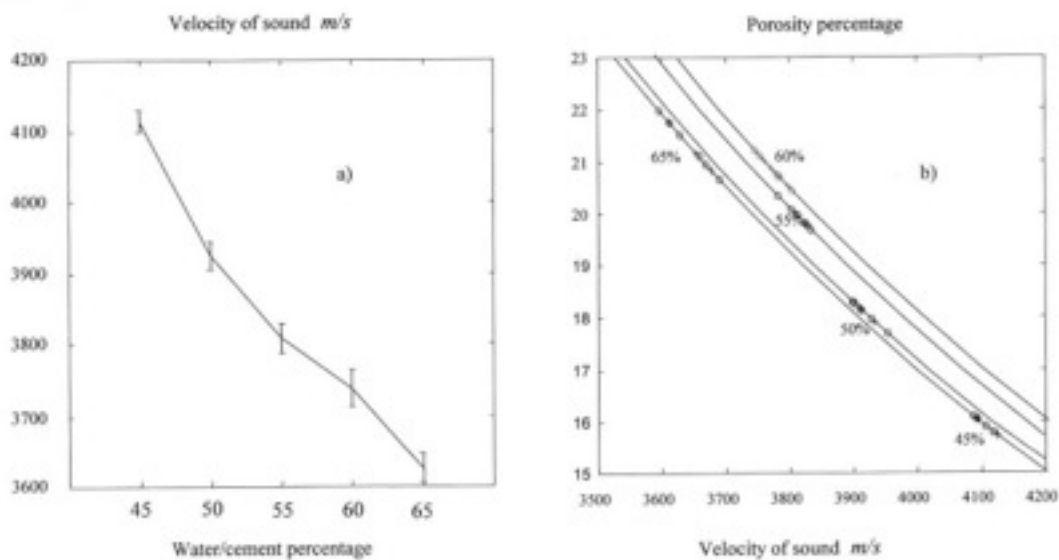


Fig. 4. (a) Velocity measures of the five groups of probes. (b) Theoretical curves of porosity — applying the micro-mechanic model. The circles correspond to the porosity-velocity points of the curves where the porosity is the one obtained by destructive methods; the 'X' correspond to the porosity-velocity points where the velocity is the one obtained by ultrasonic nondestructive methods.

Para encontrar los parámetros del modelo, necesitamos el promedio de la medida de porosidad, obtenida por END mediante métodos de ultrasonidos en el mismo grupo.

Nótese en la figura 4b que cada grupo de probetas produce un modelo diferente, aunque las curvas son lo suficientemente cercanas para dar un método prometedor para una medida precisa en la porosidad.

2.1.2. EFECTOS SOBRE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS DE FLUIDOS EN EL INTERIOR DE MORTEROS DE CEMENTO

Las estructuras manufacturadas con materiales a base de cemento son muy heterogéneas en función del entorno en el que se encuentren situadas. A pesar de que existen problemas para relacionar la micro-estructura del material con sus propiedades, introduciendo importantes abstracciones, es posible describir estos materiales en términos micro-estructurales.

A una escala macroscópica los materiales con base de cemento están formados por áridos embebidos en una pasta de cemento. A una escala microscópica la pasta de cemento es un compuesto de partículas deshidratadas de cemento y una red de capilaridades porosas que pueden contener fases acuosas. A una escala sub-microscópica el gel C-S-H es una mezcla de partículas cristalizadas laminares, con diferente morfología y composición química, rodeadas por un sistema continuo de poros que pueden más o menos ser rellenadas por agua.

Entre esta estructura heterogénea, la fase acuosa contenida en los poros, la que tiene un efecto negativo sobre la durabilidad y las propiedades mecánicas de los materiales con base de cemento.

En este trabajo los investigadores, aplican técnicas no destructivas mediante ultrasonidos a pastas de cemento, basadas en la relación existente entre la velocidad de ultrasonidos y las constantes elásticas obtenidas del modelo micro-mecánico. El objetivo es evaluar el efecto de los fluidos dentro de los poros de materiales de cemento sobre la velocidad de ultrasonidos. El modelo micro-mecánico considera el material formado por dos fases: una matriz sólida y poros que pueden estar llenos o vacíos de agua. En primer lugar se realiza un análisis teórico basado en este modelo, considerando la información micro-estructural de la matriz y del fluido llenando los poros. Para los trabajos experimentales, usan especímenes de cemento de diferente porosidad, cuyos poros se mantienen secos o saturados de agua. En ambos casos, la velocidad de ultrasonidos se mide y compara con el modelo micro-mecánico.

Modelo bifásico:

Los investigadores utilizan un modelo basado en la expresión de Jeong y Hsu [9]. Suponiendo que la matriz y las inclusiones son isotrópicas el tensor se reduce a dos constantes elásticas independientes.

Predicción de la velocidad de ultrasonidos en materiales de cemento saturados:

Los investigadores aplicaron un modelo micro-mecánico considerando las propiedades elásticas del fluido contenido en los poros. Para la geometría de

los poros se consideran dos casos distintos: oblate esferoide muy achatado en los polos and prolate esferoide con los polos casi de forma esférica.

La fig. 1 muestra la relación de la velocidad longitudinal con respecto a un incremento de la porosidad cuando los poros están vacíos o llenos de agua. Se observa que para poros prolate causan mayor velocidad que los poros oblate. Para porosidades $>20\%$ elevadas, las velocidades mayores corresponden a materiales de cemento secas con poros prolate. Para porosidades bajas $<20\%$ los investigadores no pueden apreciar diferencias entre especímenes saturados de agua y secos para poros prolate.

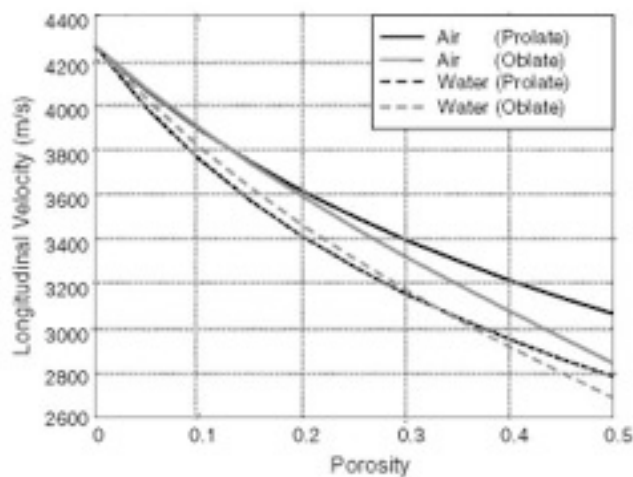


Fig. 1. Theoretical longitudinal velocity for saturated and dry cement paste as a function of porosity, for oblate ($\alpha = 0.6$) and prolate ($\alpha = 6$) spheroidal pores.

Del estudio se puede concluir que la velocidad de ultrasonidos es sensible a los cambios en el fluido existente en la estructura porosa.

Ensayo experimental:

Para verificar las predicciones del modelo, se realizan ensayos experimentales. Se fabrican 12 especímenes de mortero de cemento. Se dividen en 4 grupos, 3 especímenes por grupo. Para obtener especímenes con distinta porosidad se varía la relación agua cemento y se usan cemento con 2 resistencias a compresión: 32.5 y 42.5 MPa. Uno de los especímenes se ensaya con técnicas destructivas y los otros de grupo se ensayan mediante técnicas de ultrasonidos.

El objetivo de las técnicas destructivas es la determinación de la porosidad y la densidad, para determinar las propiedades elásticas de la matriz no porosa.

Table 2
Destructive measurements by ASTM C 642-90

Group of samples	Apparent density (g/cm ³)	Real density (g/cm ³)	Total porosity (%)
CI-0.4	1.5930	2.3	30.74
CI-0.5	1.4158	2.27	37.63
CII-0.4	1.6415	2.26	27.37
CII-0.5	1.4662	2.21	33.66

Descripción de las técnicas no destructivas:

Medida de la velocidad de ultrasonidos en especímenes de materiales de cemento saturados de agua:

La velocidad de ultrasonidos se mide mediante un transductor de 2 MHz de frecuencia central. Los especímenes se ensayan inmersos en agua y se mide la velocidad longitudinal de propagación a través del material.

Para calcular la velocidad de ultrasonidos de los especímenes saturados de agua, los investigadores usan la siguiente fórmula:

$$v_L = \frac{X_c}{t_c - t_{\text{agua}} + X_c / v_{\text{agua}}}$$

La figura 3 muestra la velocidad longitudinal en la zona central de cada espécimen de material de cemento. Se observa que la velocidad es distinta para cada grupo de especímenes.

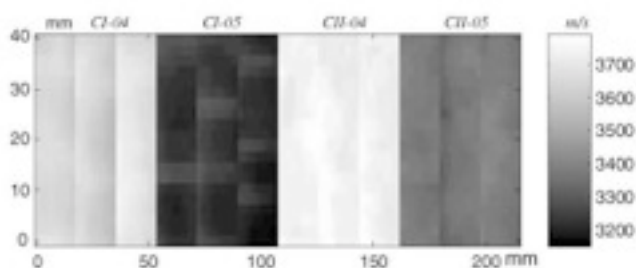


Fig. 3. Map of velocities of the central zone of every sample of cement paste.

La tabla 3 muestra la velocidad y la desviación estándar para los cuatro grupos de especímenes saturados de agua. La velocidad de ultrasonidos incrementa con la resistencia mecánica y disminuye con la relación agua cemento.

Table 3
Measured longitudinal velocity on cement paste (dry and full of water)

Group of samples	Velocity (m/s) (dry)	Velocity (m/s) (water)
CI-04	3614 (16)	3576 (21)
CI-05	3264 (30)	3196 (22)
CII-04	3703 (21)	3590 (30)
CII-05	3403 (21)	3331 (38)

Medida de la velocidad de ultrasonidos en especímenes de material de cemento seco:

Las medidas se realizan mediante dos transductores de 2 MHz. La velocidad de ultrasonidos se determina usando los métodos convencionales basados en el tiempo de propagación a través de los especímenes.

La tabla 3 muestra también la velocidad y la desviación estándar de la velocidad de ultrasonidos de los especímenes secos. De estas medida podemos determinar que la relación agua cemento tiene más influencia en la velocidad de ultrasonidos que el tipo de cemento.

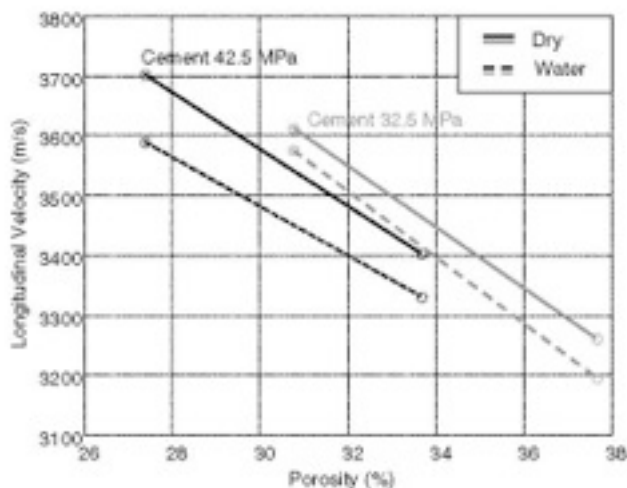


Fig. 4. Longitudinal velocity vs porosity of the cement paste samples.

La figura 4 muestra las medidas de velocidad de la tabla 3 frente a las medidas de porosidad mostradas en la tabla 2. Se puede observar que la velocidad en los especímenes secos es mayor que en los saturados. Por otro lado se puede observar que un incremento de porosidad induce una reducción de la velocidad, y velocidades altas corresponden con especímenes con mayor resistencia mecánica y menor relación agua cemento.

Predicción de la velocidad en materiales de cemento saturados

Para predecir la velocidad de ultrasonidos para materiales de cemento saturados de agua de un modelo micro-mecánico, es necesario conocer a priori las constantes elásticas de la matriz no porosa. Estas constantes se calculan mediante técnicas no destructivas y destructivas y se aplican al modelo definido por las ecuaciones.

Una vez se conocen las constantes elásticas de la matriz, se aplica el modelo micro-mecánico para la predicción de velocidad longitudinal en materiales de cemento saturados.

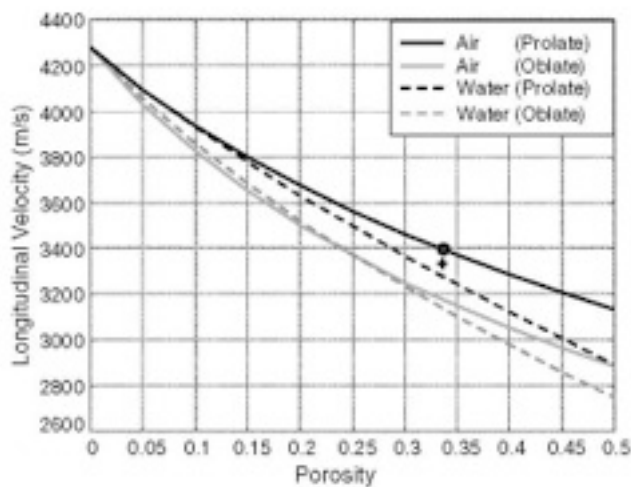


Fig. 7. Longitudinal velocity, prediction and measurement, for the group of samples CII-0.5.

La figura 7 muestra la predicción de la velocidad longitudinal y la medida de esta velocidad para un grupo de especímenes. Podemos observar que la velocidades medidas y calculadas coinciden en el caso de especímenes secos. En el caso de especímenes saturados hay una pequeña diferencia, que puede ser justificada en parte porque los especímenes no estuvieran totalmente saturados de agua.

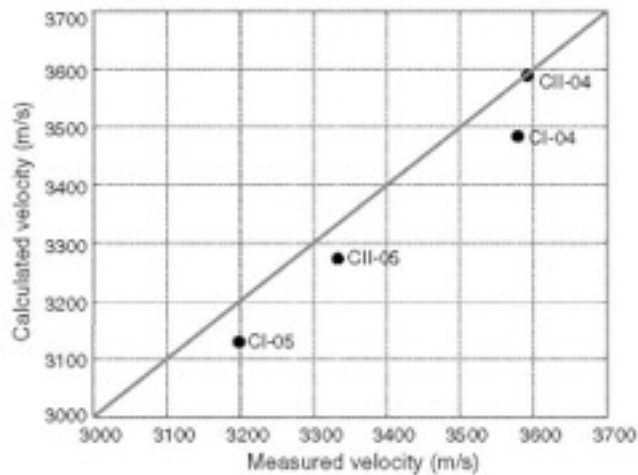


Fig. 8. Predicted and measured velocity for the four groups of saturated cement pastes.

La figura 8 muestra la velocidad de ultrasonidos medida y calculada para el modelo micro-mecánico para materiales de cemento saturados de agua. La velocidad se predice con errores por debajo del 2%.

El modelo micromecánico se aplica para el estudio de los efectos de fluidos en los poros de materiales de cemento, sobre la velocidad de ultrasonidos. En particular se considera la velocidad para materiales de cemento con dos tipos distintos de poros. El modelo muestra que la velocidad de ultrasonidos es superior para materiales de cemento y poros achatados.

La velocidad longitudinal de ultrasonidos ha sido medida en especímenes de materiales de cemento en condiciones secas y saturados de agua. Los trabajos experimentales muestran coincidencia entre las predicciones teóricas y las velocidades medidas. El método permite estimar la velocidad en materiales de cemento saturados de las medidas sobre materiales de cemento secos con un error del 2%.

2.2. MADERA.

2.2.1. MÉTODOLÓGÍA DE ENSAYO PARA DIAGNOSTICAR EL ESTADO DE LA MADERA.

En el libro EVALUACIÓN DE ESTADO DE LA MADERA, EN OBRAS DE REHABILITACIÓN, MEDIANTE TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS [1]. Se desarrolla una metodología de ensayo, basada en técnicas de ultrasonidos, que permite diagnosticar el estado de la madera, así como evaluar la capacidad portante de forjados de madera en obras de rehabilitación.

La metodología se centra en los siguientes aspectos:

1. Material: Pino silvestre, comúnmente conocido como pino de Flandes.
2. Elementos constructivos: Vigas y viguetas en forjados de madera, básicamente elementos estructurales trabajando a flexión.
3. Estado de la madera. El estudio se realiza en probetas de madera nueva y vieja, sana y deteriorada.

Los objetivos de la investigación son los siguientes:

1. Desarrollo de una metodología de ensayos, para inspección in situ de forjados de madera
2. Obtener una estimación del grado de deterioro de madera correlacionando la velocidad de propagación de la madera y la densidad de la misma.
3. Obtener una estimación de los valores de resistencia a flexión y del módulo de deformación elástico de la madera.

ENSAYOS REALIZADOS Y MATERIAL NECESARIO:

1. Ensayos no destructivos:

- Métodos de ultrasonidos: De los diversos métodos de ultrasonidos existentes se ha utilizado el método de transmisión. Se utilizan palpadores piezoeléctricos de punta cónica por no presentar problemas de acoplamiento con la superficie del material a ensayar. La frecuencia que se utiliza es de 50 KHz.
- Ensayos de determinación del contenido de humedad: Se realizan por dos procedimientos mediante desecación hasta estado anhidro y mediante higrómetro de resistencia.

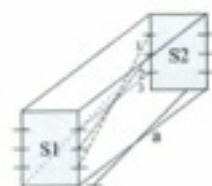
2. Ensayos destructivos. Rotura a flexión simple.

FACTORES QUE AFECTAN A LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LOS ULTRASONIDOS:

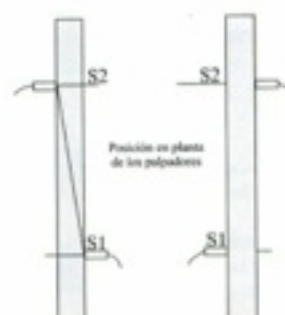
1. Tipo de madera: Debido a la diferente estructura interna de los distintos tipos de madera cada una de ellas posee un distinto rango de velocidades siendo estas más parecidas en maderas pertenecientes a la misma especie. Este factor no influye en la investigación, puesto que esta se basa en un mismo tipo de madera: pino de Flandes.

2. Influencia de la posición de la fibra: La madera está caracterizada por tener tres ejes de simetría correspondientes a las direcciones longitudinal, radial y tangencial. Las propiedades de la madera son diferentes en estas tres direcciones, así como las velocidades de propagación. Se estudian las velocidades de propagación en cada una de las direcciones así como la relación que existe entre cada una de ellas. Para que los valores de las velocidades transversales obtenidos en los distintos puntos de la viga sean comparables entre sí sin que afecten la posición de los anillos se determinan unos coeficientes de conversión a la velocidad normal, de manera que multiplicando cualquier velocidad por ellos se obtiene la velocidad normal.

Estos coeficientes los determinan experimentalmente y dependen que la posición de la fibra este centrada o en un extremo, dando 3 valores de los mismo para cada caso.



Modelos longitudinales cruzados



Caso 1

$$V_a > V_b$$

$$V_a > V_c$$



Caso 2

$$V_b > V_d$$

$$V_b > V_a$$



Caso 3

$$V_a > V_c$$

$$V_b > V_d$$

$$V_a > V_b$$

$$V_d > V_c$$



Caso 4

$$V_c > V_a$$

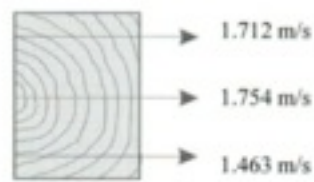
$$V_d > V_c$$

$$V_a > V_b$$

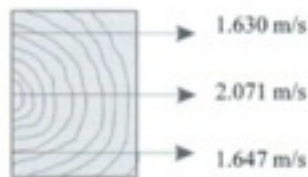
$$V_d > V_c$$



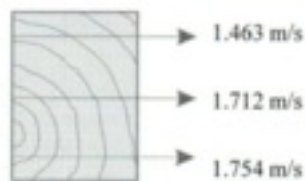
• Velocidad mayor en S2



Caso A.1.



Caso A.2.



Caso B.1. Extrema-Central



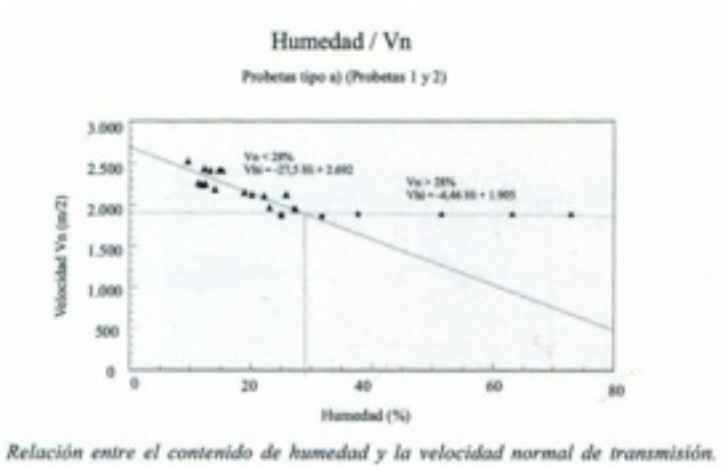
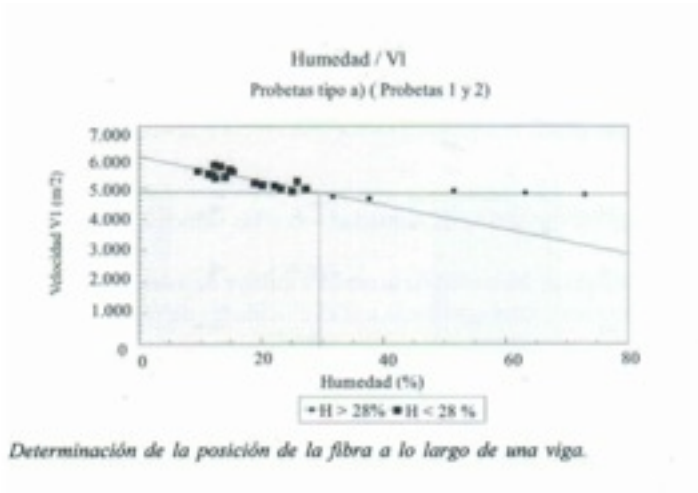
Caso B.2. Extrema

3. Influencia de la humedad sobre la velocidad de transmisión: Al igual que el contenido de humedad afecta a las propiedades mecánicas de la madera, también afecta sobre las velocidades de propagación.

Para la determinación de la influencia de la humedad realizan un ensayo consistente en medir la velocidad longitudinal y transversal para probetas con diferentes contenidos de humedad. De estos ensayos se obtienen unas gráficas que nos permiten referenciar la velocidad de propagación a un contenido de humedad cualquiera. En ambos casos para la velocidad longitudinal y transversal se observa que a partir de un 28% de humedad que es la de saturación de las fibras de madera no hay variaciones en la velocidad de propagación.

Mediante las gráficas de correlación los investigadores establecen la relación existente entre velocidad de propagación y humedad. Para evitar este factor establecen como valor de referencia de humedad el 12 % de manera que

todas las velocidades las refieren a este valor consiguiendo eliminar este factor que afectan a la velocidad.



4. Influencia de los defectos: Se consideran defectos nudos, fendas, acebolladuras, gemas, ... que por lo general, provocan un descenso de los valores de transmisión ya que suponen una discontinuidad del material.

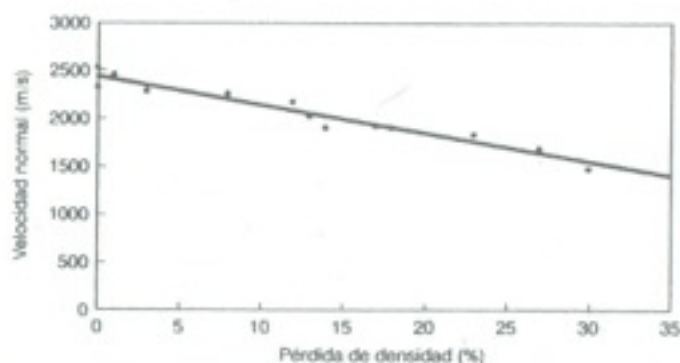
Por norma general se considera que los defectos provocan una disminución en los valores de la velocidad de transmisión, puesto que suponen una discontinuidad en el material.

No se puede valorar de manera cuantitativa las pérdidas de velocidad que provocan los defectos, pero si se pueden cualificar puesto las pérdidas que provocan se producen de una manera brusca y puntual sin zonas de transición, a diferencia de los deterioros, cuyas pérdidas de velocidad se producen de forma gradual existiendo velocidades intermedias en las zonas de transición.

5. Influencia del deterioro sobre las velocidades de transmisión: La manera de cuantificar el deterioro se realiza mediante la pérdida de densidad, que es un indicador de la intensidad del ataque sufrido por la madera.

Experimentalmente se ha demostrado que la V_L velocidad longitudinal resulta ineficaz para la detección del deterioro. En cambio la velocidad normal V_N es más sensible a las pérdidas de densidad, descendiendo los valores de la misma.

Mediante la aplicación de métodos estadísticos sobre el banco de datos obtenidos de los ensayos de ultrasonidos y medidas de densidad, realizados sobre múltiples probetas de madera provenientes de obras de rehabilitación. Los investigadores obtienen la recta de regresión que permite determinar la pérdida de densidad de la madera conociendo el valor de la velocidad normal V_N .



Madera vieja. Relación entre velocidad normal y pérdida de densidad para la totalidad de las probetas.

Ecuación de regresión	R	R ²	F-Ratio	P
$\Delta\delta = 86 - 0.035 V_N$	0.97	0.94	206	0,000

R=coeficiente de correlación

F= Fiabilidad del modelo

P= Probabilidad de que un valor se produzca al azar.

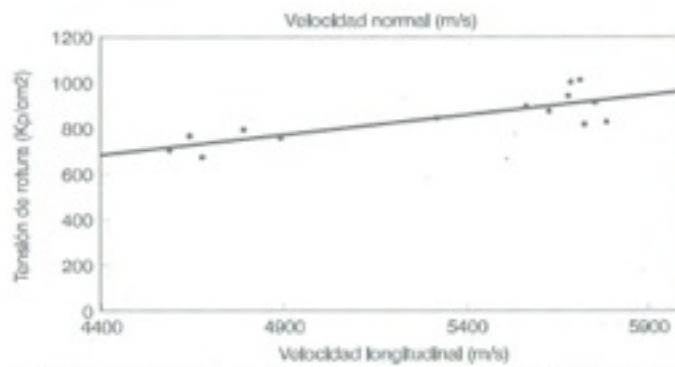
Como vemos los investigadores llegan a un modelo determinado que tiene capacidad explicativa y predictiva.

CORRELACIÓN DE MEDIDAS DE ULTRASONIDOS CON PARÁMETROS RESISTENTES:

Para la ejecución de esta correlación se ensayan 141 probetas mediante técnicas de ultrasonidos y ensayos de rotura a flexión. De estos ensayos se obtiene: Las velocidades longitudinal V_L y normal V_N , y la tensión de rotura y el módulo de elasticidad estático.

Aplicando métodos estadísticos sobre los datos obtenidos de los ensayo los investigadores obtienen los siguientes resultados:

Para madera nueva:



Madera nueva. Relación entre la tensión de rotura a flexión y la velocidad longitudinal de transmisión de ultrasonidos.

Es posible determinar la tensión de rotura conociendo la velocidad longitudinal V_L , mediante la ecuación de regresión:

Ecuación de regresión	R	R ²	F-Ratio	P
$\sigma_r = 0.173V_L - 74,52$	0.813	0.661	23,2	0,000

Se observa al igual que antes la fiabilidad del modelo obtenido por los investigadores.

Para madera deteriorada:

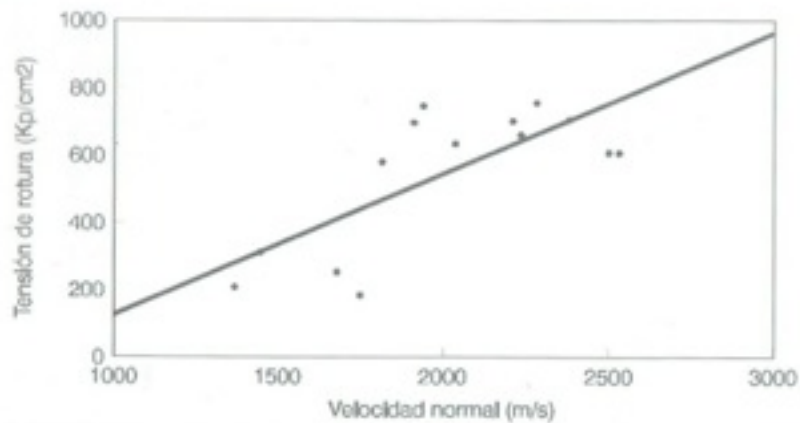


Fig. 3.22. Relación entre tensión de rotura y velocidad normal para madera vieja.

No es posible determinar la tensión de rotura mediante la velocidad longitudinal sino a través de la velocidad normal V_N , mediante la siguiente ecuación de regresión:

Ecuación de regresión	R	R ²	F-Ratio	P
$\sigma_F = 0.75V_N - 956$	0.76	0.58	17	0,001

Por tanto según el método propuesto por los investigadores en madera sana se estima la tensión de rotura a partir de la velocidad longitudinal y en madera deteriorada mediante la velocidad normal. Es un resultado lógico puesto que en vigas sanas el material es homogéneo, con una resistencia característica para toda la viga, al contrario que en vigas de maderas deterioradas que el material no es homogéneo y tendría un valor de resistencia variable para cada sección de la viga.

A partir de los datos de las correlaciones obtenidas los investigadores proponen tres intervalos para poder diagnosticar el estado de la madera:

$V_N > 1.900 \text{ m/s}$ Madera sana
 $1.900 \text{ m/s} < V_N < 1.500 \text{ m/s}$ Inicio de deterioro
 $V_N < 1.500 \text{ m/s}$ Madera deteriorada

METODOLOGÍA DE APLICACIÓN A OBRAS DE REHABILITACIÓN:

Los investigadores proponen una batería de ensayos a realizar in situ en obras de rehabilitación y restauración para determinar el daño y la resistencia de las vigas de madera.

Ensayos a realizar en obra:

Ensayo 1: Homogeneidad de la sección:

Se basa en medidas transversales de ultrasonidos. Permite determinar el grado de deterioro de la pieza de madera por secciones así como la resistencia de la viga de madera deteriorada.

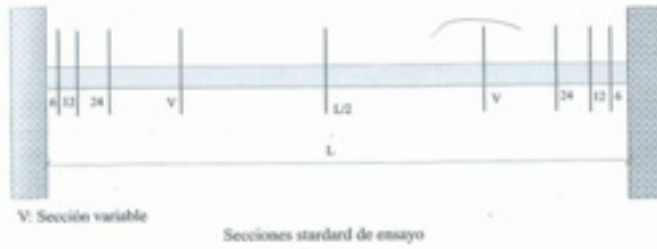
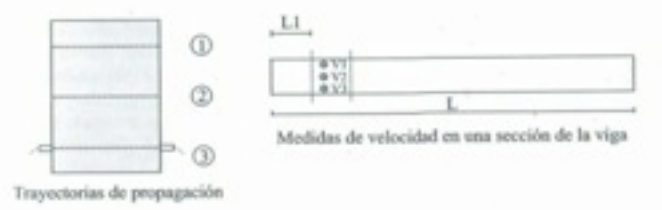
Comprende ensayos de ultrasonidos y de contenido de humedad. Se realizan tres medidas transversales por sección de las que obtenemos 3 velocidades. A su vez se mide la humedad en los mismos tres puntos y se referencia a la humedad del 12%. El número de secciones a ensayar irá en función de la importancia de la obra pero recomiendan realizar mayor número de ensayos en los empotramientos, puesto que estos suelen ser los puntos donde comienzan la mayor parte de las patologías debido a la humedad de los muros.

Ensayo 2: Determinación de la posición de la fibra:

Se basa en la realización de tres medidas transversales y sirve para apoyar al anterior ensayo, en el caso de que se produzcan dudas acerca de la posición de la fibra. Este ensayo es fundamental para determinar los coeficientes correctores a velocidad normal.

Ensayo 3: Medidas longitudinales:

Está basado en la realización de las medidas longitudinales cruzadas. Permite determinar la resistencia de una viga de madera no deteriorada.



3. BIBLIORAFÍA CONSULTADA

LIBROS:

1. **Rodríguez Liñan, Carmen; Rubio de Hita, Paloma;** “EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA MADERA EN OBRAS DE REHABILITACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS”. Ed. Universidad de Sevilla. Secretariado de Publicaciones, 2000. ISBN: 84-472-0675-2

ARTÍCULOS:

2. **Rodríguez Liñan, Carmen; Rubio de Hita, Paloma; Gómez de Cózar, Carlos.** EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA MADERA EN OBRAS DE REHABILITACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE ULTRASONIDOS Y OBTENCIÓN DE PARÁMETROS RESISTENTES. ETSA de Sevilla. Departamento de construcciones Arquitectónicas 1. Comunicación del III Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. En 3th International Congress of Restoration of Buildings and Architectural Heritage. Pp.449-454. 1996 Copyright © 1996 by CEHOPU-CEDEX (MOPTMA) and the University of Granada.
3. **Martha Tavares; Ana Cristian Magalhaes; María do Rosario Veiga; José Aguilar.** “MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO PARA REVESTIMIENTOS DE EDIFICIOS ANTIGUOS. IMPORTANCIA Y APLICABILIDAD DE LOS ENSAYOS IN-SITU”. PH Boletín del instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, nº53, abril 2005, pp. 11-17
4. **Ontiveros Ortega, Esther; Valverde Espinosa, Ignacio; Sebastián Pardo, Eduardo.** TÉCNICAS DE ANÁLISIS APLICADAS AL ESTUDIO DE LOS TAPIALES DE LAS MURALLAS DE GRANADA. Comunicación del III Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. En 3th International Congress of Restoration of Buildings and Architectural Heritage. Pp.270-273., 1996 Copyright © 1996 by CEHOPU-CEDEX (MOPTMA) and the University of Granada.
5. **Dennis A. Sack and Larry D. Olson.** “ADVANCED NDT METHODS FOR EVALUATING CONCRETE BRIDGES AND OTHER STRUCTURES”. Olson Engineering Inc, 14818 W. 6th Avenue, Unit SA, Golden, Colorado, 8041, USA. NDT&E International, Vol. 28, No. 6, pp. 349-357, 1995 Copyright © 1995 Elsevier Science Ltd.
6. **L. Vergara; R. Miralles; J. Gosálvez; F.J. Juanes; L.G.Ullate; JJ. Anaya; M.G. Hernández; M.A.G. Izquierdo.** NDE ULTRASONIC METHOD TO CHARACTERISE THE POROSITY OF MORTAR. NDT&E International, 34 (2000) 557-562.

7. **M.G. Hernández; J.J. Anaya; L.G. Ullate; A. Ibañez.** EFFECT OF THE FLUID IN THE INCLUSIONS OF CEMENT PASTE ON THE ULTRASONIC VELOCITY. *Ultrasonics* (1994) 865–869.
8. **Krautkrämer J.; Krautkrämer H.;** Ultrasonic testing of materials. Berlin. Springer,1990.
9. **Jeong H.; Hsu DK.;** Quantitative estimation of material properties of porous ceramics by means of composite micro–mechanics and ultrasonic velocity. *NDT&E International*, 1996, 29 (2); 95–101.
10. **Wonsiri Punurai, Jacek Jarcynski, Jianmi Qu, Jin.Yeon Kim, Lurence J. Jacobs, Kimberly E. Kurtis.** CHARACTERIZATION OF MULTI–SCALE POROSITY IN CEMENT PASTE BY ADVANCED ULTRASONIC TECHNIQUES. *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 38–46.
11. **M.G. Hernández, J.J. Anaya, L.G. Ullate, A. Ibañez.** FORMULATION OF A NEW MICRO MECHANICAL MODEL OF THREE PHASES FOR ULTRASONIC CHARACTERIZATION OF CEMENT BASED MATERIALS. *Cement and Concrete Research*, 36 (2006) 609–616.
12. **M.G. Hernández, J.J. Anaya, L.G. Ullate, M. Cegarra, T. Sanchez.** APLICATION OF A MICROMECHANICAL MODEL OF THREE PHASES TO ESTIMATING THE POROSITY OF MORTAR BY ULTRASOUND. *Cement and Concrete Research*, 36 (2006) 617–624.