

**TÉCNICAS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA APLICABLES
PARA LA EVALUACIÓN DE DAÑO EN ELEMENTOS
ESTRUCTURALES DEL PALACIO DE DARALHORRA.**



ASIGNATURA | EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA Y CALIDAD EN ESTRUCTURAS

PROF | GUILLERMO RUS CALRBORG

ALUMNOS | ESTELA CUESTA VALERO

DAVID ORTIZ MAUROLAGOITIA

ABRIL, 2010

INDICE

1-Descripción del edificio

- 1.1- Emplazamiento
- 1.2- Referencias historiográficas
- 1.3- Tipología

2-Sistemas Constructivos

- 2.1- Fábricas mixtas de tapial y ladrillo
- 2.2- Carpintería
 - 2.2.1- Aleros
 - 2.2.2- Armaduras
 - 2.2.3- Alfarjes

3-Patologías de los sistemas constructivos

- 3.1- Muros de fábrica de ladrillo
- 3.2- Madera

4-Técnicas de Evaluación no destructiva aplicadas a los sistemas constructivos de muros de fábrica y pétreos.

- 4.1- Justificación de técnicas por estudio comparativo
- 4.2.- Priorización
- 4.3.- Protocolos de utilización:
 - 4.3.1.- Métodos ultrasónicos aplicados a piedras. Utilizaremos este método para verificar el estado de las columnas de mármol del patio.
 - 4.3.2.- Métodos sónicos aplicados a fábricas de tapial.
 - 4.3.3.- Métodos impacto-eco aplicados a fábricas de ladrillo. Aplicaremos el método de impacto-eco a las fábricas de ladrillo existente para analizarlas.

5-Técnicas de Evaluación no destructiva aplicadas a los sistemas constructivos de madera

5.1-Justificación de técnicas por estudio comparativo:

5.2.- Priorización

5.3.-Protocolos de utilización aplicados a obras de rehabilitación de madera:

5.3.1.- Ensayos no destructivos.

5.3.2.- Factores que afectan a la velocidad de propagación de los ultrasonidos.

5.3.3.- Correlación de medidas de ultrasonidos con parámetros resistentes:

5.3.4.- Metodología de aplicación a obras de rehabilitación:

5.4.- Análisis de datos.

6-Bibliografía

1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO.

Emplazamiento

La mansión de la familia real nazarí denominada Daralhorra (Dār al-Hurra) debe su nombre al tratamiento honorífico que recibían las princesas musulmanas, por lo que se ha traducido como Casa de la Sultana, de la Reina o de la Señora.

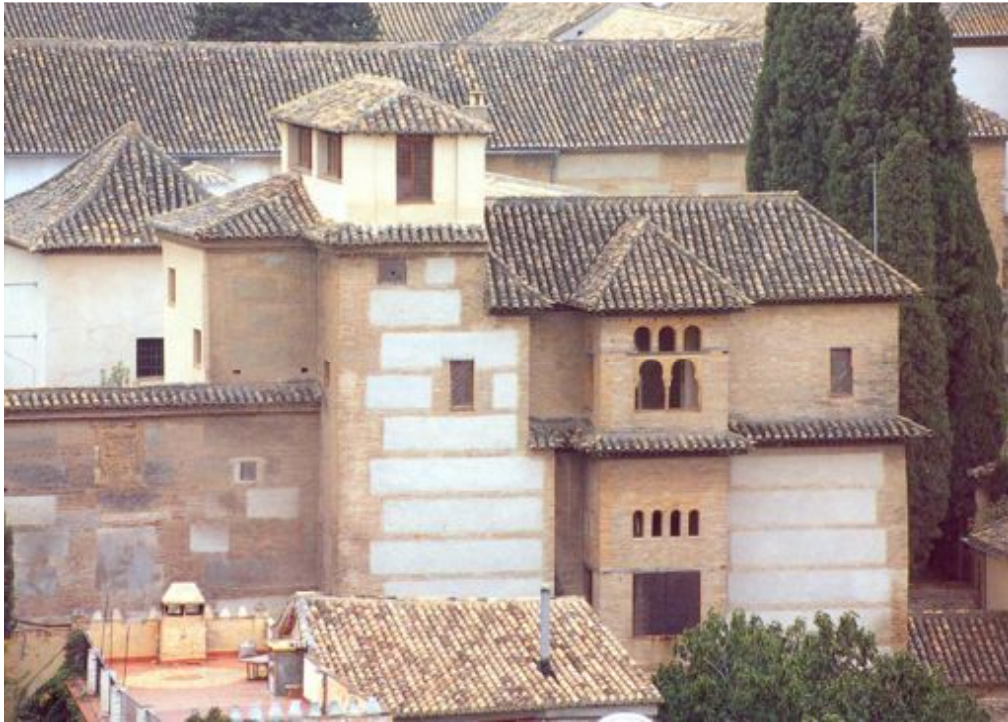


Foto 1.

Está situado dentro del recinto de la Alcazaba Antigua, posiblemente sobre el solar ocupado por el Alcázar del rey Babis (s. XI), al cual, quizás podrían pertenecer los cimientos de duro tapial de argamasa sobre los que se asienta su muro más septentrional, que constituye la fachada hacia el Callejón de las Monjas.

1.1 Referencias historiográficas.

Debido a la destrucción total del alcázar zirí la parcela llegó al siglo XV convertida en la llamada "huerta alta de la Alcazaba Antigua". En la segunda parte de este siglo fue adquirida por Fátima, futura esposa de Muley Hacén y madre de Boabdil, siendo esta época la comúnmente aceptada por los historiadores como la de la construcción del edificio.

Tras la capitulación de Granada se empezó a construir en la parcela un convento de religiosas franciscanas por orden de Isabel la Católica en cuyo honor lleva el nombre de

Santa Isabel la Real, afortunadamente, la casa nazarí se mantuvo, con pocas modificaciones, en el extremo septentrional del conjunto conventual.

En el año 1922 el convento fue declarado monumento histórico artístico, lo cual incluía también la mansión nazarí. Poco después gracias a la labor ejercida desde Granada por Torres Balbás el estado adquirió Daralhorra con fondos procedentes de los billetes de las entradas de la Alhambra y Generalife. En 1928 Gómez-Moreno Martínez, autor del informe para la adquisición del inmueble, la definió como “un modelo precioso de arquitectura doméstica andaluza, correspondiente a los últimos tiempos de la dominación musulmana en nuestro suelo, tal como no puede señalarse otro equiparable”.

1.2 Tipología.

Se trata de una casa de tamaño medio por lo que no resulta apropiada la usual consideración de palacio. Ocupa una parcela de 357 m² además de huertas y jardines. La vivienda se desarrolla en torno a un patio rectangular orientado en la dirección norte-sur, con crujías en los cuatro lados y pórticos de tres columnas solo en los dos menores. En estos últimos se situaban las salas principales de doble altura, mientras que en los otros dos había dos pisos de habitaciones secundarias.

Las dos características más notables son la existencia de una planta alta sobre la sala de la crujía norte, con su galería de acceso, y los miradores emplazados en el centro de ambas salas de este mismo lado.

2. TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS.

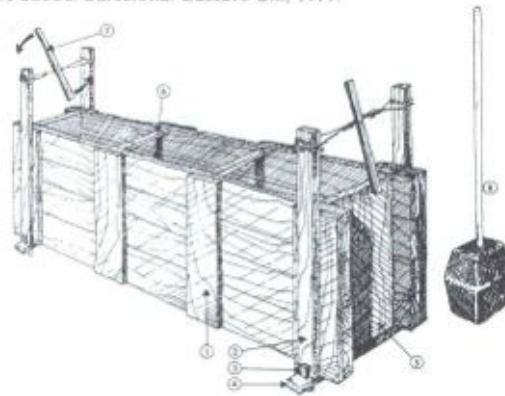
2.1 Fábricas mixtas de tapial y ladrillo.

El tapial es una técnica sencilla y a la vez compleja. Sencilla porque un elemental y reducido juego de piezas basta para erigir la totalidad de las fábricas de un edificio. Compleja porque su aparente sencillez es resultado de un procedimiento muy depurado conceptualmente, cuya práctica precisa del conocimiento de detalles muy específicos que facilitan el desenvolvimiento del sistema, pero que no resultan fáciles de captar a quien no disponga de un bagaje de experiencia práctica.

Siendo un sistema ideado para evitar el despliegue de medios auxiliares, de andamios en particular, es capital la sujeción del molde, dentro del cual trabajan los apisonadores, con el fin de obtener un asiento estable y seguro sobre la parte de la fábrica construida con anterioridad.

Arriba tres cuerdas atadas a cada familia de costeros se tensan para comprimir los tableros que se acodalan internamente con otras tantas piezas horizontales, susceptibles de eliminar a medida que se va levantando la hilada. El mecanismo se repite en la parte inferior. Unas cuñas comprimen los tableros contra el tope formado por la última tongada de la parte inferior.

Fig. 1.-BARDOU, P. Y ARZOUMANIAN, V.: Arquitecturas de adobe. Barcelona: Gustavo Gili, 1979.



Como se ve, el único esfuerzo que no corresponde al encofrado, sino a la fábrica, es la compresión lateral que se ejerce sobre su coronación provisional. Por tanto, es imprescindible que el tablero cuelgue, al menos unos centímetros, por debajo de esta cota.

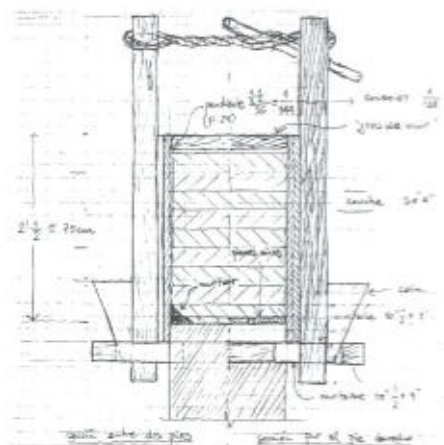


Fig. 2.-Sección esquemática de un tapial, según interpretación de Mariano Vázquez, deducida de la descripción literaria. COINTERAUX, F. École d'Architecture Rurale. París, 1790

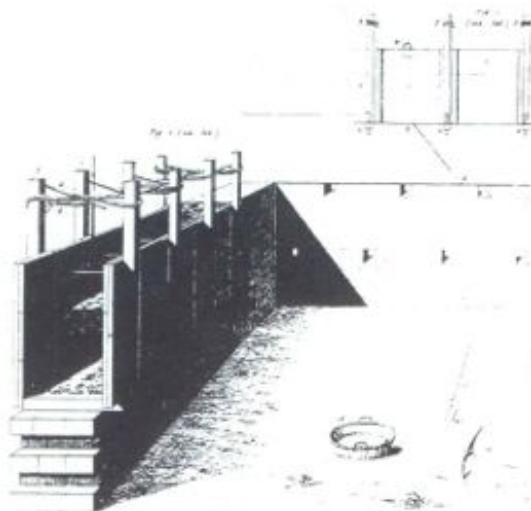


Fig. 3.-Fragmento de una lámina del tratado de J. Rondelet. En la ilustración más próxima, en perspectiva, el tapial está simplemente posado sobre la fábrica, sin sujeción en la parte inferior. Por el contrario, en el trazado esquemático del fondo se representan las rozas-mechinales y los tableros del molde descienden para tener de tope la última hilada. FONT, F. Y HIDALGO, P.: El tapial, una técnica constructiva milenaria. Castellón, 1990.

Para resolver esta cuestión, es decir, que la parte inferior del encofrado este por debajo del plano horizontal de la tongada inferior, hay varias alternativas.

Reutilizar los surcos que dejan los codales, si no se escamotean durante el apisonado, como base de asiento para las agujas del molde de la hilada superior.

Completar el apisonado íntegro, sin mayores precauciones, para posteriormente labrar las oportunas rozas transversales en la cara superior de la tongada.

Hacer unas incisiones en la tabla inferior de los moldes, coincidentes con los armajes, para que el encofrado descienda la altura necesaria.

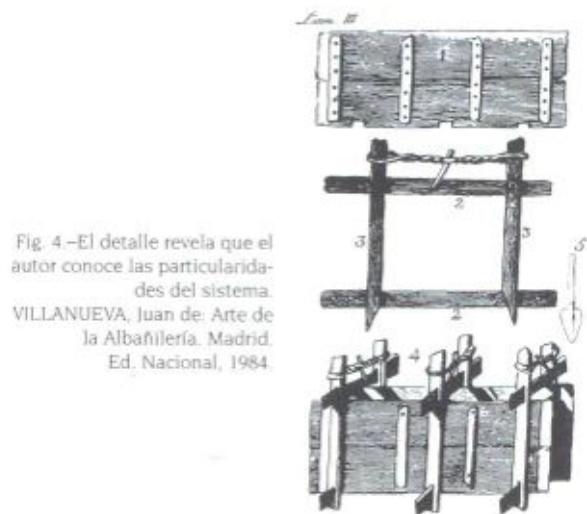


Fig. 4.—El detalle revela que el autor conoce las particularidades del sistema.
VILLANUEVA, Juan de: Arte de la Albañilería. Madrid. Ed. Nacional, 1984.

La primera opción es más bien teórica, pues obliga a prever con una precisión inalcanzable la colocación exacta del encofrado en la hilada siguiente. Lo habitual es recurrir a las dos últimas soluciones, combinadas o independientes, según preferencias.

Del mismo modo, la construcción de unidades de esquina es muy engorrosa. Por una parte para poder colocar el tablero correspondiente a la cara del rincón, hay que labrar una roza suplementaria.

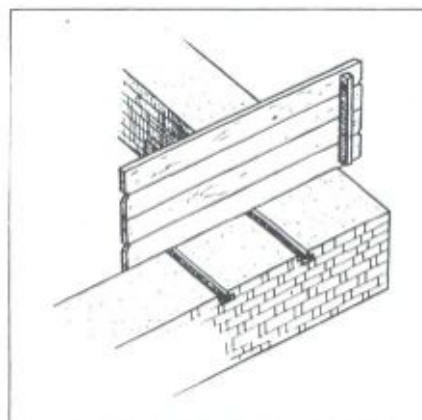
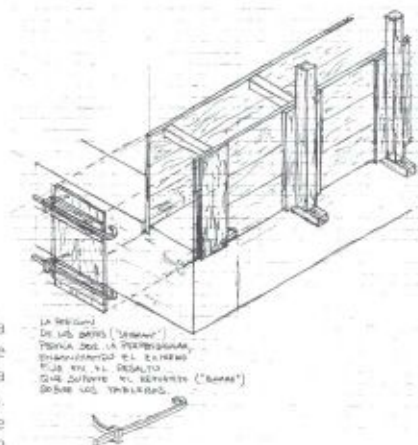


Fig. 5.—El descenso del tablero implica necesariamente la labra de una roza transversal en la esquina, en continuación con la cara interior de la pared.
FONT, E y HIDALGO, P.: El tapial, una técnica constructiva milenaria. Castellón, 1990.

Además, el último armaje no puede disponer de plano de asiento de modo que, para la sujeción de los tableros en este extremo, debe recurrirse a soluciones particulares que exceden el limitado juego de piezas del sistema.

Fig. 6.-Solución al encofrado de la esquina, según interpretación de Mariano Vázquez, deducida de la descripción literaria.
COINTERAUX, F. École d'Architecture Rurale. París, 1790



En suma, el tapial es un procedimiento bastante eficiente con dos puntos oscuros: el asentamiento del molde y la construcción de la esquina.

La fábrica mixta, a base de machones y verdugadas de albañilería que enmarcan paños de tapia, es una inteligente alternativa que obvia ambos problemas. Los machones hacen de encofrado perdido en la dirección transversal y se ubican en los quiebros y puntos conflictivos donde es engorroso el despliegue de encofrados. Las verdugadas evitan la labra de rozas y forman el lecho para el asiento de las agujas.

Con frecuencia la fórmula se matiza con el fin de afianzar la traba entre las dos partes del muro, tapia y albañilería, mediante la variación alternada en el espesor de los machones, formando grandes adarajas. Esta modalidad recibe el nombre de “tapia de mayor a menor”.

En otras ocasiones también se aspira a obtener una trabazón en la dirección transversal. Con este objetivo se dejan en las caras internas de los machones unas cajas verticales en las que ha de penetrar la masa de la tapia.

Finalmente, por su mayor ductilidad, las fábricas de ladrillo son un complemento imprescindible de la tapia en todos aquellos puntos (hastiales, dinteles sobre huecos, etc) donde hay dificultades para sujetar el molde o no es posible ejecutar unidades enteras de encofrado.

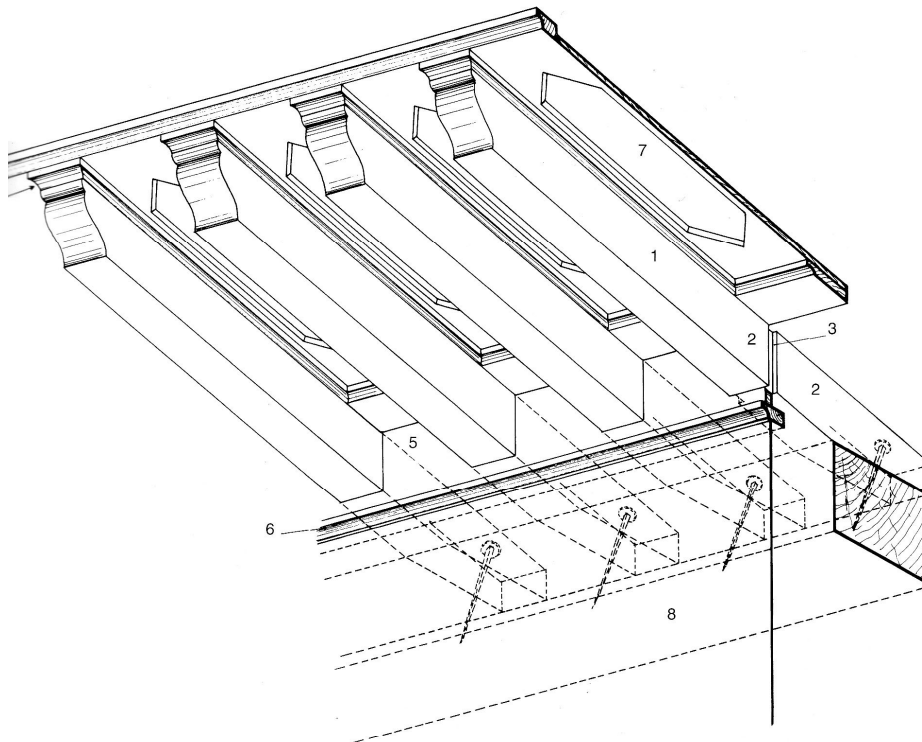
2.2 Carpintería

En el Palacio de Daralhorra nos encontramos con tres elementos de carpintería característicos de la arquitectura nazarí:

2.2.1 Los aleros.

Estos elementos aportan un matiz muy particular a la arquitectura de este periodo, tanto por la suntuosidad que presentan, como por una característica prácticamente generalizada en todos ellos: su posición inclinada.

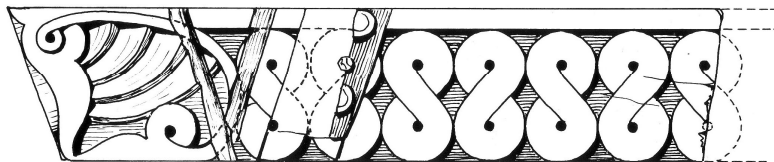
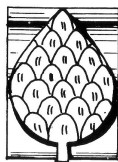
Son estructuras acopladas al muro, con funcionamiento independiente tanto del techo o cubierta interior, como de la cubierta exterior, y que no suponen necesariamente el remate superior, previo a las tejas, de la fachada.



- 1.- CANECILLO
- 2.- Cola de canecillo
- 3.- Acanaladura para tabica
- 4.- Tocadura de canecillo
- 5.- TABICA (corrida)
- 6.- TOCADURA alero
- 7.- COBIJA (de menado)
- 8.- RASTRA (estribo)

0 5 cm.
M.L.R./C.L.P.

En este edificio destaca por su estado de conservación y su singularidad el alero que rodea por debajo de la segunda planta los cuatro lados del patio (*Foto 2*). Tiene 48 cm. de vuelo sustentados con canecillos de extremo aquillado y el típico ornato en forma de ochos en sus costados y una tabica corrida con restos de inscripciones coránicas que aún conservan su policromía.



0 5 cm.
M.L.R./C.L.P.

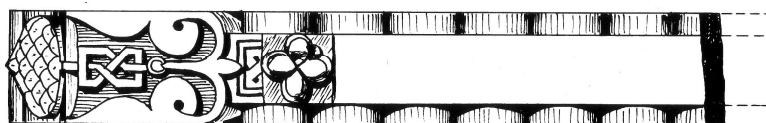
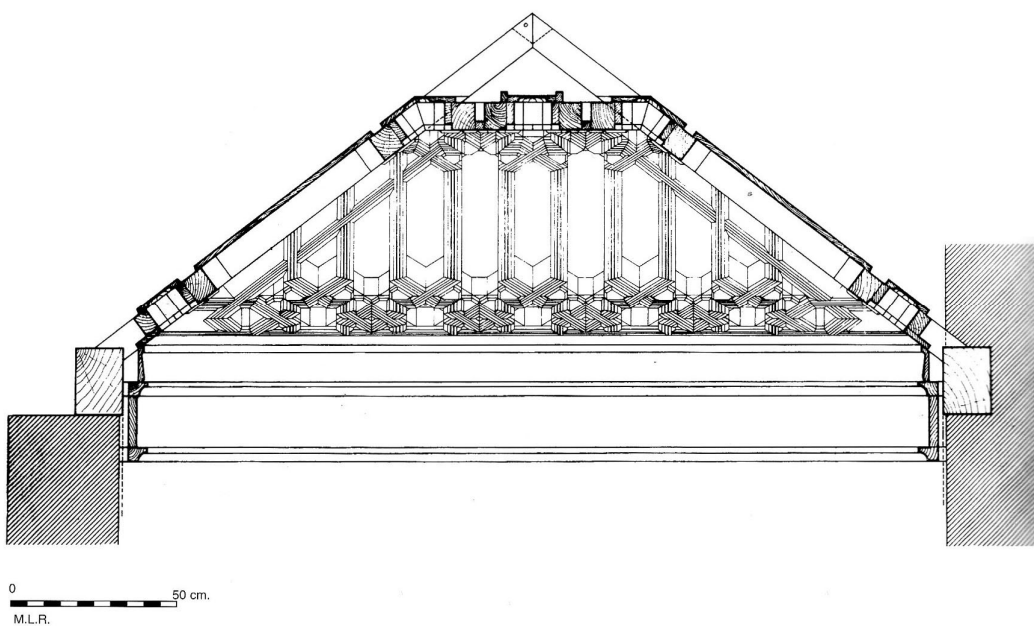


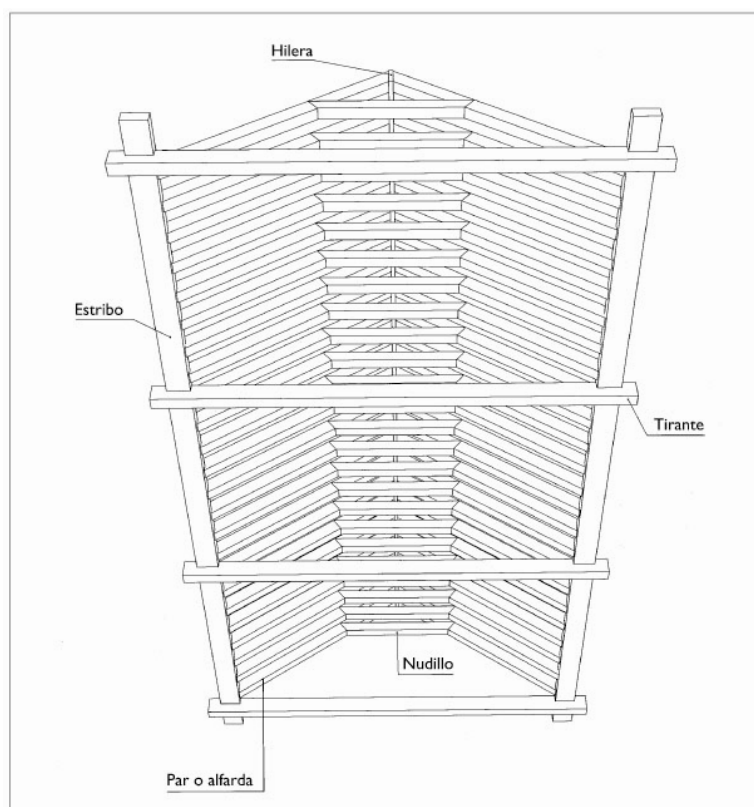


Foto 2.

2.2.2 Armaduras

La característica general aplicable a todas las armaduras nazaríes es su funcionamiento independiente respecto a una segunda armadura que exteriormente se encarga de sujetar la teja. Son por tanto dos estructuras diferentes, una interna que va generalmente decorada, y otra externa más tosca que protege la interior de la intemperie.





En Daralhorra destacan tres cubiertas de armadura, la primera sería la que cubre en la segunda planta en el ala norte la sala que precede al mirador (*Foto 3 y 4*) y que es una armadura de par y nudillo, de lima bordón, dotada de tres parejas de tirantes, en los cuales unas pequeñas incisiones en los extremos tratan de imitar zapatas, pues carecen de ellas. No tiene lazo, pero está decorada con motivos vegetales en varias tintas, sobre fondo rojizo, por lo que ha sido considerado el ejemplo más notable de su género en Granada.



Foto 3.



Foto 4.

La segunda sería la que cubre la crujía meridional (*Foto 5.*). Está sala fue reconstruida en el siglo XVI transformándose en la capilla del convento. Es una techumbre mixta que consta de una armadura de par y nudillo con limas mohamares y tres parejas de tirantes, que se decora con chillas y alfardones, así como capulín de mocárabes en el centro del almizate. Pero el ancho de la armadura es menor que el de la sala, por lo que sus estribos aparentes no apoyan sobre los muros, sino que están en el aire. El espacio entre ambos es completado por sendos alfarjes, que terminan en un alicer con decoración de hojas formando círculos, de tipo renacentista. La sustentación se realiza por medio de vigas metálicas de perfil en I, colocadas sobre los tirantes, de las que cuelgan los estribos. En el extremo de levante tiene un volumen aproximadamente cuadrado y de mayor altura que el resto, cubierto con una armadura apeinazada octogonal, con lazo de ocho en los faldones y el almizate (*Foto 6*).



Foto 5.



Foto 6.

También en la planta baja en el ala septentrional cubriendo el mirador encontramos una armadura ataurejada que imita a una apeinazada de limas mohamares, con decoración de lazo de ocho en el almizate y los extremos de los faldones (*Foto 7*).



Foto 7.

2.2.3 Alfarjes.

Su construcción no requiere más que la posición equidistante de unas vigas (jaldetas) con la suficiente longitud como para hacer descansar cada uno de sus extremos en la cumbrera de los muros paralelos de una habitación.

Aún se conservan los alfarjes originales en sala norte de la planta baja (*Foto 8 y 9*), en el pórtico que la precede y en la galería de la segunda planta, todos ellos son de tipo menado decorados con chillas, pinturas, alfardones y alicer con inscripciones coránicas pintadas sobre la madera.

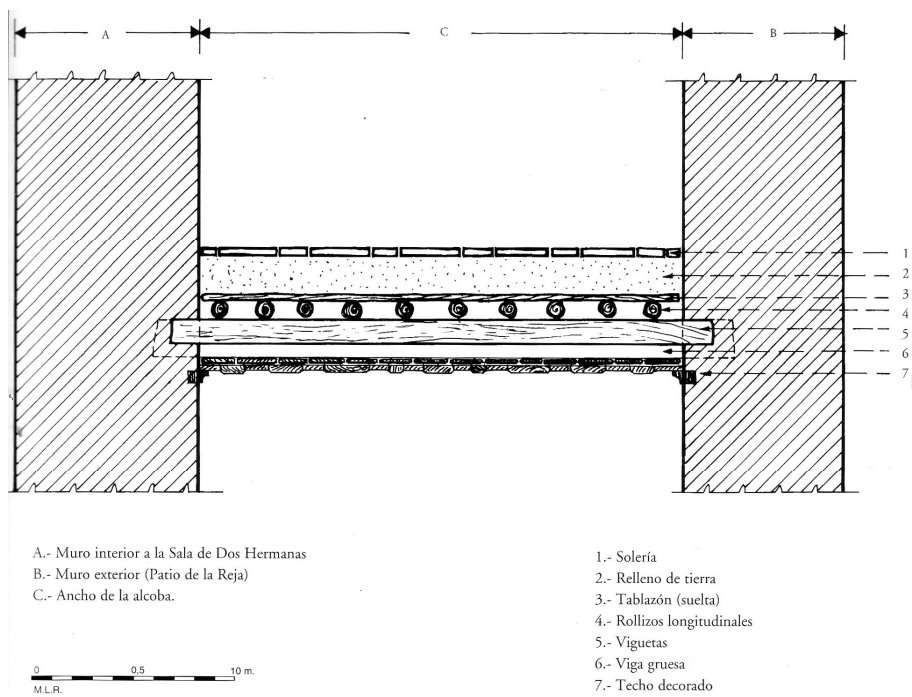


Foto 8.

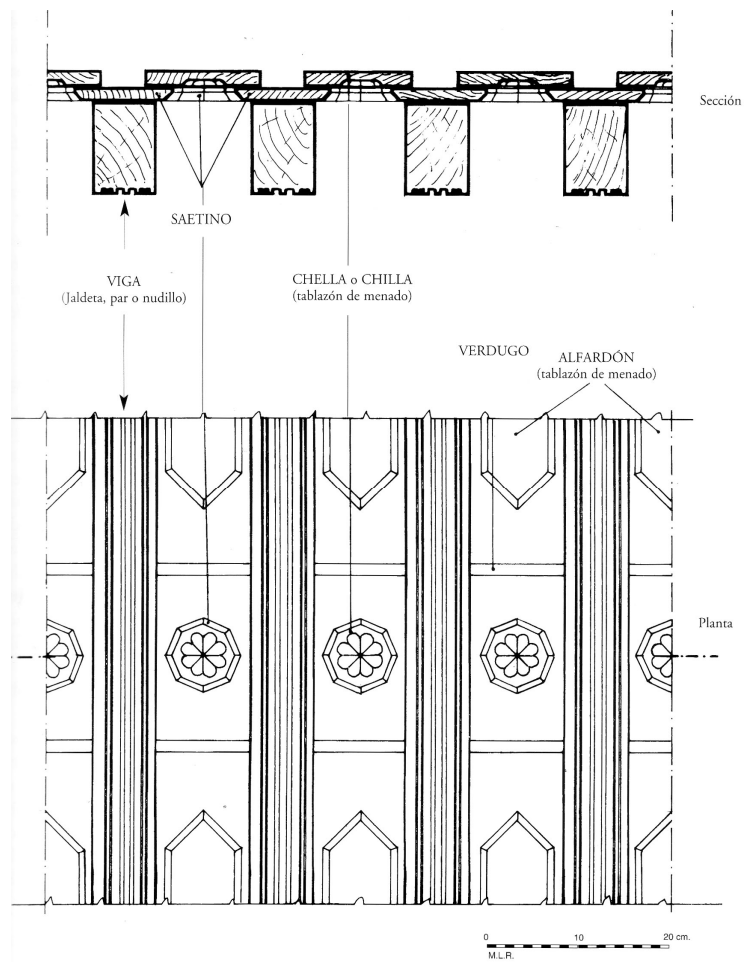


Foto 9.

3. PATOLOGÍAS DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

3.1 Muros y cimientos.

Las casas andalusíes en Granada han sido construidas mediante muros de

carga de tapias de tierra con poca cal, dotados de pilares de ladrillo como refuerzo de esquinas y vanos de acceso. En los dos o tres cajones inferiores la tierra era sustituida por mampuestos, con objeto de evitar las humedades de capilaridad. La tapiería se realizaba con áridos procedentes de los conglomerados que constituyen el suelo sobre el que se asienta la ciudad.

Las características mecánicas de este material, debida a su fabricación son muy oscilantes, si bien se puede decir de él que tiene un coeficiente por dilatación térmica muy bajo $0,012 \text{ mm/m a } ^\circ\text{C}$ a la vez que ofrece un buen aislamiento acústico con una reducción de 56 dB en un muro de 40 cm., para una frecuencia de 500 Hz.

A compresión tiene una resistencia alta de 15 kg/cm^2 aunque puede variar entre 10 y 22 kg/cm^2 , mientras que la resistencia a la tracción es baja, de entre 2 y 4 kg/cm^2 . Cuando está bien ejecutado es un material que aguanta bien al desgaste y al punzonamiento, pero que resiste poco frente a esfuerzos de cortante por lo que no soporta bien las situaciones de cizallamiento apareciendo fisuras y grietas verticales junto a contrafuertes y esquinas. Esto se pone de manifiesto especialmente cuando se producen esfuerzos diferenciales debidos a asentamientos, cedimientos o deslizamientos, abriéndose las fabricas o provocando la fisuración de los cajones de adobe.

La densidad media de una tapia es de entre 1,8 y $2,1 \text{ T/m}^3$.

Los principales agentes causantes de patologías son el agua, el viento y la temperatura.

Humedad.

El agua ataca fundamentalmente a la parte inferior de las tapias ascendiendo por capilaridad desde los cimientos y a las partes altas cuando no están protegidas. En realidad la capilaridad es más bien baja, no sobrepasándolos 40 cm de altura si la fábrica no es demasiado porosa pero es sensible a las salpicaduras y a los ciclos hielo-deshielo.

La humedad disminuye la resistencia del tapial a medida que penetra y acarrea podredumbre a los elementos orgánicos (paja, maderos) que aseguran la trabazón del adobe lo que puede acarrear el colapso de la construcción.

Temperatura.

El adobe resiste bien las bajas y altas temperaturas pero sufre con los cambios de temperatura bruscos entre el calor del día y las heladas nocturnas. Esto provoca la aparición de fisuras en la cara exterior, la expuesta, de la tapia y que no se manifiestan en el interior debido a su inercia térmica y gran espesor.

3.2 La madera.

Las estructuras horizontales son de madera de pino, alfarjes en los techos de la planta baja y armaduras en la planta alta. La madera utilizada es el pino silvestre producido en las sierras cercanas, comúnmente conocido como pino de Flandes.

Los agentes causantes de patologías en madera se dividen en dos grupos: los bióticos y los abióticos. Los primeros lo constituyen los seres vivos que se alimentan de la madera, insectos y hongos básicamente, que pueden provocar una destrucción total. Los agentes abióticos serían el resto que producen alteraciones y envejecimiento de la madera: agentes atmosféricos, acciones mecánicas, químicas y el fuego.

4. TÉCNICAS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA APLICADAS A LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE FÁBRICA Y PÉTREOS.

El análisis de edificaciones históricas presenta grandes retos, porque presentan una complejidad en su geometría, una variabilidad de las propiedades de los materiales tradicionales, una ausencia de conocimiento sobre daños existentes, el efecto que ciertas acciones provocan en las construcciones a lo largo de su vida. Todo este unido a la falta de ejemplos, así como los altos costes movilizados en la diagnosis y en la inspección provocan una reducción de la información de los sistemas constructivos así como de los materiales empleados en ellos. Los métodos no destructivos son, necesarios para obtener características mecánicas necesarias para el análisis y el comportamiento mecánico de estas.

4.1 Justificación de técnicas por estudio comparativo.

Los métodos de END pueden ser empleados para varios propósitos:

- detección de elementos estructurales ocultos
- detección de huecos y defectos en fábricas
- realización de mapas de heterogeneidad de materiales
- evaluación de la extensión de daños mecánicos
- evaluación del contenido de humedad y ascensión capilar,
- evaluación de las propiedades mecánicas y físicas de los morteros, piedras o ladrillos.

4.1.1 Estructuras de fábrica.

Dentro de la amplia gama de técnicas no destructivas aplicables a la evaluación de obras de fábrica, nos centraremos en analizar las técnicas acústicas.

Los sistemas acústicos se basan en la generación de impulsos acústicos (sónicos o ultrasónicos) en un punto de la estructura bien mediante percusión o por un dispositivo

transmisor, siendo posteriormente recibidos por un receptor que puede estar situado en varias posiciones diferentes.

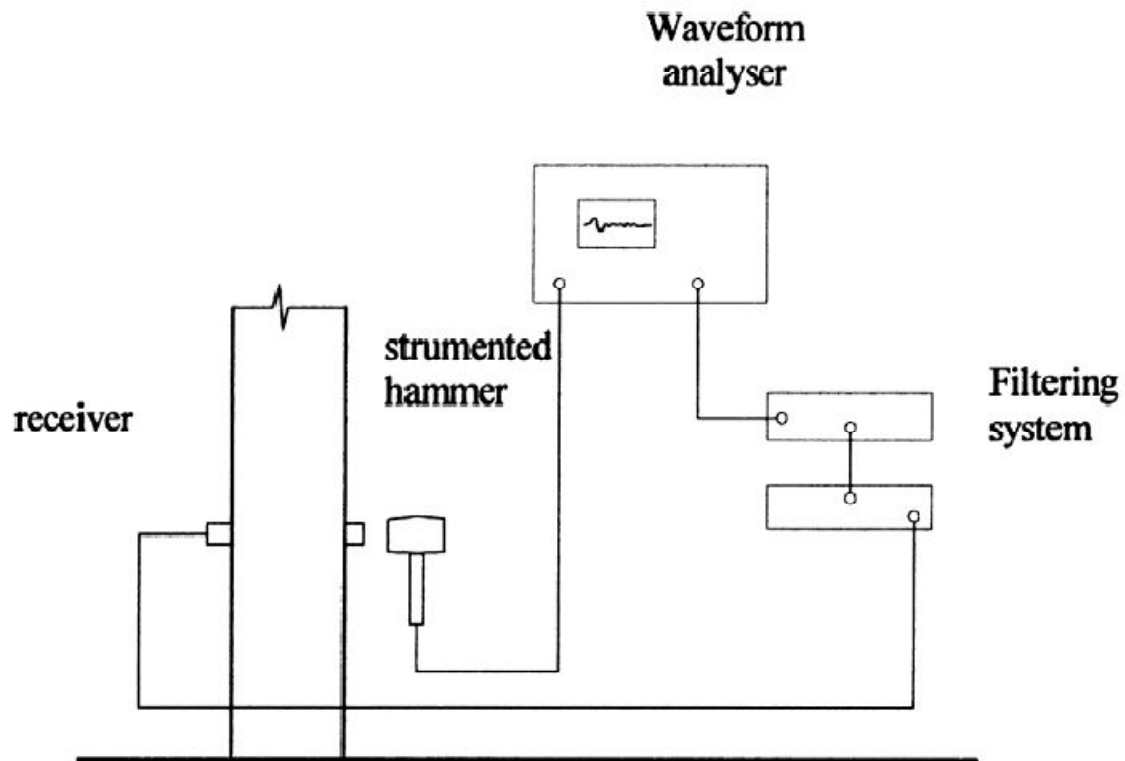


Figura 1.- Equipamiento del ensayo sónico

Si las oscilaciones mecánicas generadas son de alta frecuencia ($> 20\text{kHz}$) el sistema se denomina ultrasónico, denominándose sónico si las frecuencias están entre 20 Hz Y 20 kHz, (en general entre 0,5 y 10 KHz).

Cuando se realiza por ejemplo un impacto sobre una superficie de un sólido, se produce una alteración (de tensión o desplazamiento), dicha alteración se propaga a través del sólido mediante tres tipos de ondas: una onda P, una onda S y una onda R

- Las onda P, llamadas longitudinales, en las cuales la vibración de las partículas se realiza en dirección paralela al avance de la onda (también llamadas ondas primarias), las ondas P son las presentan mayor velocidad de propagación.

- Las ondas S, llamadas transversales, en las cuales la vibración de las partículas se realiza en dirección perpendicular a la propagación de la onda (también llamadas ondas secundarias), las ondas S tardan más tiempo en ser recibidas que las ondas P.

- Las ondas R, llamadas de Rayleigh, estas ondas no penetran en el material más allá de su longitud de onda, por lo que también se las conoce con el nombre de ondas de superficie.

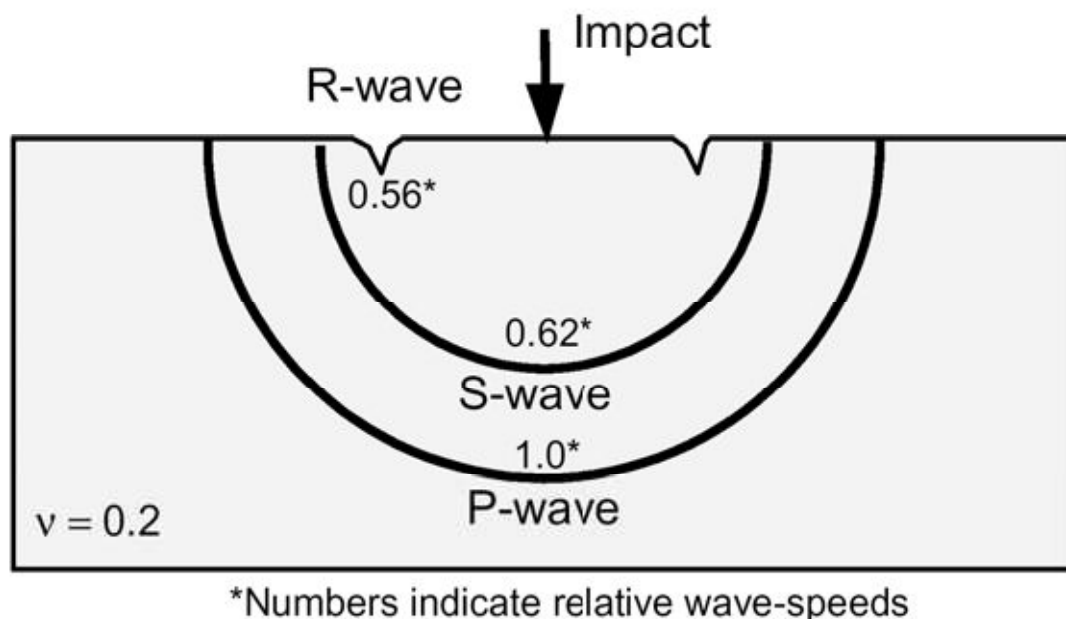


Figura 2.- Ondas de tensión causadas por el impacto en un punto de la superficie de un elemento estructural.

La onda P y la onda S, se propaga dentro del sólido a través de frentes de onda esféricos. La onda P se asocia con la propagación de tensiones normales mientras que la onda S se asocia con tensiones de corte. Además hay una onda R que se aleja de la alteración provocada a lo largo de la superficie.

La teoría de propagación de ondas a través de sólidos, permiten reconocer las limitaciones de los sistemas acústicos. En un sólido elástico isótropo, la velocidad de una onda P, C_p , se relaciona con el módulo de Young de elasticidad, E , el coeficiente de Poisson, ν , y la densidad, ρ , con la fórmula que a continuación se muestra:

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Con la longitud de onda incidente dominante, se relacionan los defectos más pequeños reconocibles y el tamaño del material ensayado, pero un defecto sólo será detectable si la longitud de la onda incidente es menor que su tamaño efectivo.

La longitud de onda λ , es directamente proporcional a la velocidad de onda e inversamente proporcional a la frecuencia del pulso. Para una velocidad dada a medida que la frecuencia aumenta la longitud de onda decrece. A medida que la frecuencia se incrementa la proporción de energía atenuada también incrementa limitando el tamaño de sección de pared que puede ser investigada. La frecuencia óptima se elige considerando los requerimientos de atenuación y de resolución para obtener una combinación razonable de los dos parámetros limitantes, un rango habitual para fábricas es un pulso sónico con una frecuencia alrededor de los 3,5 kHz.

Los ensayos se realizan con un transductor emisor siendo recibido el pulso transmitido por un transductor receptor, en general un acelerómetro, posicionado sobre la superficie de la fábrica. Las señales son registradas por un analizador de onda acoplado, con un computador para realizar procesados posteriores.

Se pueden realizar tres tipos de ensayos:

-Ensayo directo o a través del muro, en el cual el martillo y los acelerómetros están situados en línea sobre caras opuestas del elemento de fábrica.

-Ensayo semidirecto, en el cual el martillo y los acelerómetros se emplazan formando un cierto ángulo entre uno y otro.

-Ensayo indirecto, en el cual el martillo y los acelerómetros se localizan ambos en la misma cara de la pared, en una vertical o en una horizontal.

Métodos ultrasónicos

Un sistema se denomina ultrasónico si las oscilaciones mecánicas son de alta frecuencia (mayores que 20kHz).

La generación de las ondas ultrasónicas se basa en que una unidad de pulso envía una señal eléctrica al transductor, el cuál mediante un cristal piezoeléctrico interno genera una onda de tensión de baja energía alta frecuencia. A su vez los transductores o palpadores han de ser acoplados a la superficie de la fábrica mediante medios acoplantes para transmitir el máximo de energía posible. La onda viaja a través de la sección, siendo captada por el transductor receptor, que puede situarse en varias posiciones en función del método empleado, el cual a su vez convierte la energía de la onda en energía eléctrica. El tiempo de la transmisión puede visualizarse mediante un display de lectura, generalmente son microsegundos. Debido a su corta longitud de onda los pulsos ultrasónicos se propagan en línea recta, por lo que éstos son muy direccionables. Cuanto mayor es la longitud de onda mayor es la dispersión angular que se produce. Los ensayos de ultrasonidos tienen una limitación para evaluar materiales muy heterogéneos. Los métodos ultrasónicos son empleados satisfactoriamente en el caso de morteros aplicados para macizar las cavidades presentes en la pared, así como en la evaluación de elementos pétreos aislados (muros de mampostería o sillares).

Métodos sónicos

Estos métodos se basan en la generación de ondas mecánicas de baja frecuencia, frecuencias sónicas, mediante un martillo instrumentado. Los martillos suministran una masa cayendo de una determinada distancia, por lo que masa y dureza definen energía y frecuencia de la onda inicial. Un receptor recoge la onda mecánica, normalmente un acelerómetro que activa un registrador digital que comienza a almacenar los datos que son percibidos por el receptor.

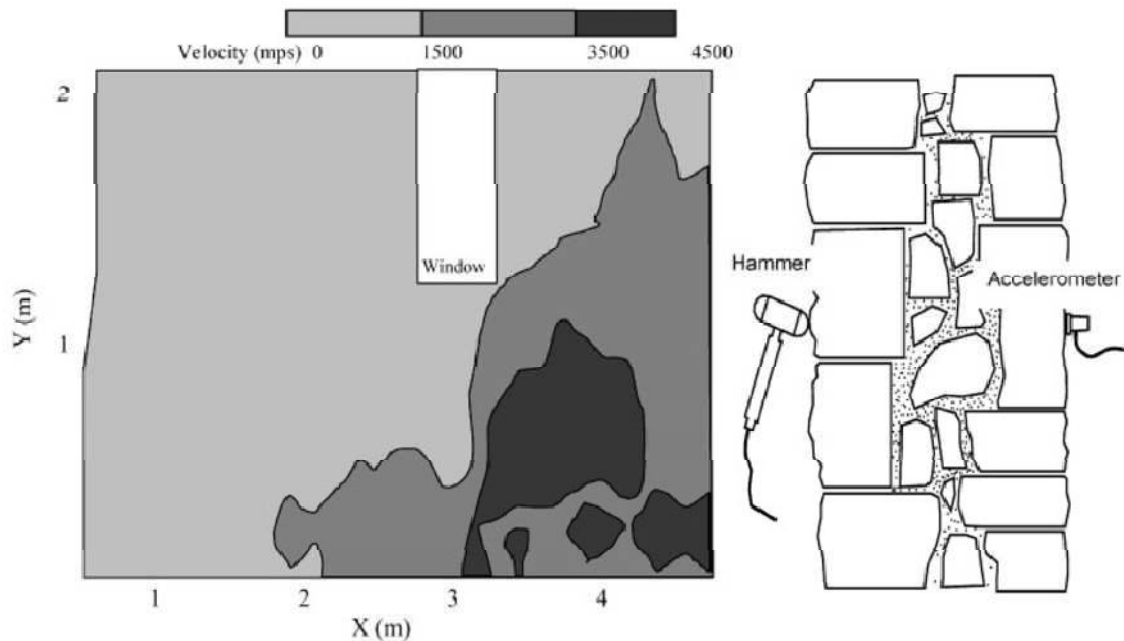


Figura 10.- El contorno representa la velocidad de pulso sónico a través de una pared que fue generada para evaluar la solidez de la hoja interna de un campanario mediante el método de velocidad de pulso sónico como se muestra a la derecha. La zona de velocidad más alta representa una construcción relativamente sólida; la región de baja velocidad de la parte superior izquierda de la imagen representa una separación interna o la existencia de vacíos entre las hojas. Las áreas en las que se identificaron bajas velocidades fueron subsecuentemente reparadas mediante inyecciones.(Fuente: Michael P. Schuller).

Los resultados se obtienen midiendo el tiempo que tarda el impulso entre el transmisor y el receptor (tiempo de viaje), mediante dicha magnitud puede calcularse la velocidad de la onda que se propaga por el medio:

$$V_{\text{onda}} = \frac{\text{Espacio recorrido por la onda}}{\text{Tiempo de viaje}}$$

Mediante un ensayo sónico en un muro de fábrica se pueden analizar los siguientes parámetros:

- Calificar la fábrica a través de la morfología de la sección de pared
- Detectar la presencia de vacíos y defectos
- Encontrar patrones de agrietamiento y modelos de daño
- Controlar la eficacia de la reparación por técnicas de inyección
- Detectar cuando las características físicas de los materiales han cambiado.

Los ensayos de pulso sónico resultan más apropiados que los ultrasónicos para el caso de materiales muy heterogéneos como las fábricas debido a la alta atenuación causada por las uniones, vacíos y heterogeneidades. Aún así los sistemas sónicos presentan una serie de limitaciones:

- Coste relativo de las operaciones, debido al alto número de mediciones que hay que llevar a cabo.
- Difícil elaboración de los resultados debido a las dificultades creadas por la falta de homogeneidad del material.
- La velocidad del pulso sónico es característica de cada tipología de fábrica, siendo imposible generalizar los valores. Los ensayos han de ser calibrados directamente in situ.
- Dificultad para correlacionar los parámetros sónicos con las características mecánicas de los materiales.

Impacto Eco

El método de impacto-eco solo requiere el acceso a la estructura por una cara. Las aplicaciones típicas en fábricas, se realizan para localizar tizones, identificar células macizadas en fabricas armadas, determinar el espesor de secciones transversales y localizar vacios en construcciones de varias hojas.

Cuando una onda de tensión viaja a través de un material 1 incide con la interfase de un material 2 distinto, una parte de la onda incidente es reflejada. En estos métodos es de especial importancia el principio de la impedancia acústica. El principio de la impedancia acústica es el producto de la velocidad de la onda y la densidad del material.

| Material | Impedancia acústica, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ |
|----------|--|
| Aire | 0.4 |
| Agua | $0.5 \cdot 10^6$ |
| Acero | $0.5 - 4 \cdot 10^6$ |
| Hormigón | $7 \cdot 10^6$ |
| Aluminio | $47 \cdot 10^6$ |

Según dicho principio la energía reflejada en una interfase será tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia entre las impedancias de los dos medios que forman la interfase. A su vez la amplitud de la reflexión es función del ángulo de incidencia y es máxima cuando dicha incidencia es perpendicular a la interfase. Para una incidencia normal el coeficiente de reflexión R, viene dado por la siguiente expresión:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

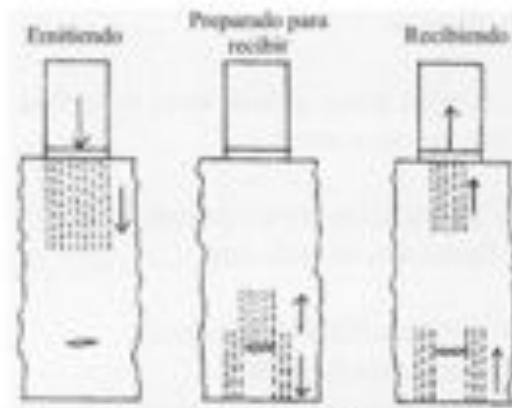
Z2= Impedancia acústica específica del material 2

Z1= Impedancia acústica específica del material 1

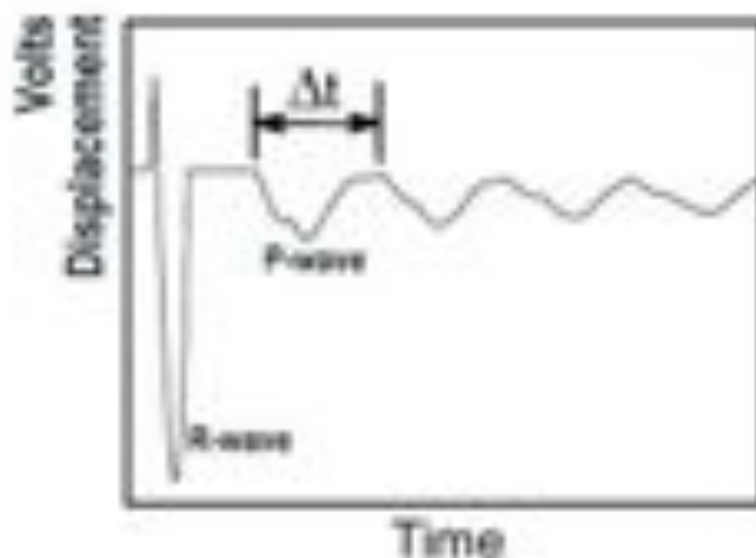
Según esto, en un material heterogéneo, como la fábrica, se producirá una difracción de la onda de llegada siempre que haya una discontinuidad del material, produciéndose una pérdida de velocidad respecto a la que se obtendría en un material homogéneo. Cuando la onda encuentra una interfase con el aire, la reflexión en la interfase es total, en tanto que el coeficiente de reflexión puede considerarse que alcanza la unidad. Esta es la causa de que estos métodos no destructivos sean satisfactorios para localizar defectos dentro de sólidos.

El coeficiente de reflexión puede ser positivo o negativo, dependiendo de los valores relativos de las impedancias acústicas de los dos materiales.

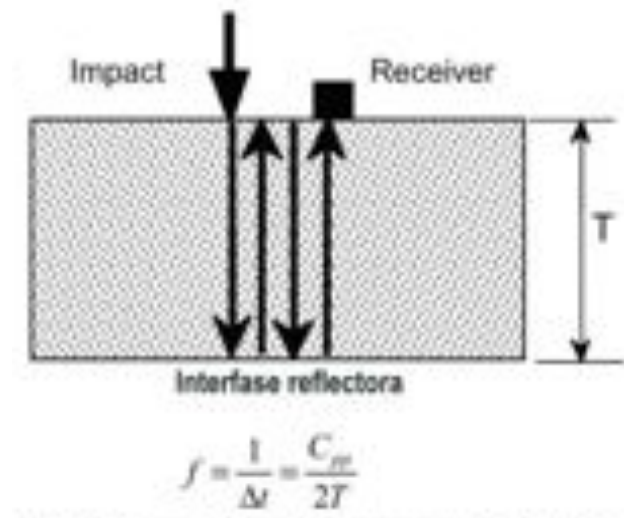
Si $Z_2 < Z_1$, como podría ocurrir en un interfase hormigón-aire el coeficiente de reflexión es negativo. Esto significa que el signo de la tensión en la onda reflejada es opuesto al signo de la tensión de la onda incidente. De esta forma una onda P incidente con tensión de compresión se reflejaría originando una onda P con tensión de tracción. Si $Z_2 > Z_1$, el coeficiente de reflexión es positivo no habiendo un cambio en el signo de la tensión de la onda. En este caso, una onda P incidente con tensión de compresión se reflejaría originando una onda con tensión también de compresión.



Un transductor electromecánico es empleado para generar un pequeño pulso de ondas de tensión acústicas que se propagan dentro del objeto que se está inspeccionando. La excitación superficial produce unas ondas P y S, que viajan a través de la placa y unas ondas R superficiales que se alejan del punto de impacto. Las ondas P y S son reflejadas por los defectos internos (impedancia acústica). Cuando las ondas reflejadas o ecos retornan a la superficie producen desplazamientos que son medidos por un transmisor receptor. Si el transductor está situado próximo al punto de impacto la respuesta está dominada por los ecos de la ondas P. Un gran descenso del desplazamiento al comienzo está causado por ondas R, y las series de descensos de desplazamientos de menor amplitud son debidas a la llegada de ondas P originadas por múltiples reflexiones entre la superficie y el vacío interno.



Hoy en día se usa un análisis frecuencial en vez del análisis en el dominio del tiempo para registrar las ondas P.



La onda P producida por el impacto experimenta múltiples reflexiones entre la superficie de ensayo y la interfase reflectora. Cada vez que la onda P llega a la superficie causa un desplazamiento característico. La onda se caracteriza por una periodicidad que depende de la distancia de viaje, de ida y vuelta, de la onda P. Si el receptor está cerca del punto de impacto, la distancia de ida y vuelta será $2T$, T es la distancia entre la superficie de ensayo y la interfase reflectora. El intervalo de tiempo entre llegadas sucesivas de las múltiples reflexiones de la onda P es la distancia recorrida dividida por la velocidad de la onda. La frecuencia, f , de llegada de la onda P, es el inverso de dicho intervalo de tiempo y viene dada por la siguiente relación:

$$f = \frac{C_p}{2T}$$

C_{pp} = velocidad de la onda P a través del espesor de la placa
 T = profundidad de la interfase reflectora.

Esta ecuación es la relación básica para interpretar los resultados de los ensayos de impacto-eco. La velocidad de una onda no es la misma que la velocidad de la onda P en un sólido de gran longitud, la velocidad es aproximadamente un 96% de la velocidad de la onda P, esto es, $C_{pp} = \beta C_p = 0,96 C_p$.

El objetivo de este análisis es determinar las frecuencias dominantes de la onda registrada. Esto se consigue mediante el empleo de técnicas como Transformada de Fourier. La transformación arroja un espectro de amplitudes que muestran las amplitudes asociadas a las frecuencias contenidas en la onda. El valor del pico puede emplearse para determinar la profundidad de la interfase reflectora.

$$T = \frac{C_{pp}}{2f} = \frac{\beta C_p}{2f}$$

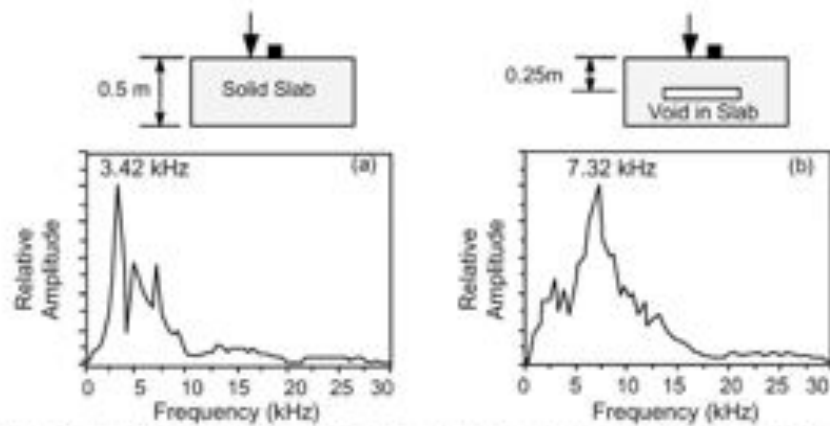


Figura 17.- Ejemplos del espectro de amplitudes en ensayos de impacto-eco: a) Ensayo de una porción sólida de una losa de 0.5 m de grosor y b) ensayo sobre una cavidad artificial a 0.25 m de profundidad. (Fuente: Nicholas J. Carino).

En las gráficas anteriores se ilustra el uso del análisis frecuencial en los ensayos de impacto-eco. La primera muestra el espectro de amplitudes de un ensayo de una pieza de hormigón de 0.5m de grosor. Hay un pico de frecuencia de 3.42KHz, el cual corresponde a las múltiples reflexiones de la onda P entre las superficies inferior y superior de la losa.

La segunda gráfica muestra el espectro de amplitudes para un ensayo de una pieza con un vacío. El pico a 7.32 KHz es el resultado de las múltiples reflexiones entre la parte superior de la losa y el vacío. Utilizando la ecuación anteriormente mencionada calculamos que el vacío se encuentra a una distancia de 0,23m.

4.2 Priorización

Partes de edificio que vamos a analizar y técnicas a utilizar

- Piedra, métodos ultrasónicos
- Tapial, impacto-eco

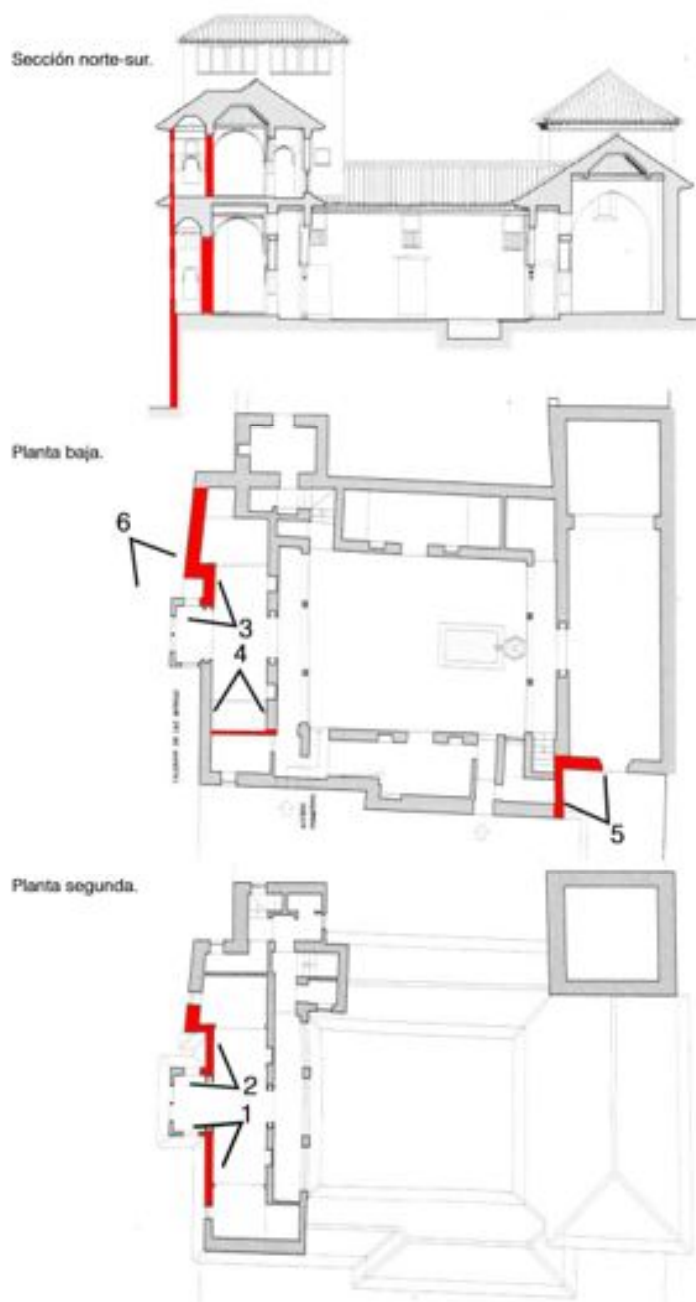


Foto 1.



Foto 2.



Foto 3.



Foto 4.



Foto 5.



Foto 6.

4.3 Protocolos de utilización.

4.3.1 Métodos ultrasónicos aplicados a piedras.

Utilizaremos este método para verificar el estado de las columnas de mármol del patio. El ejemplo se va a realizar con piedras areniscas rojas y calizas, de las cuales tenemos valores ensayados, suponiendo que el protocolo de utilización sería el mismo para el mármol de nuestro edificio.

Previamente a la realización de las pruebas ultrasónicas se llevan a cabo ensayos de compresión sobre probetas cilíndricas de los tipos de piedra que vamos a analizar, así como ensayos físicos sobre las piedras (densidades, porosidades)

Las pruebas realizadas dieron un promedio de 36MPa para areniscas rojas, 32 MPa para areniscas blancas y 100MPa para piedra caliza. La forma de fractura de las probetas fue de 45°.

Sobre una probeta de piedra se realiza un ensayo ultrasónico (método directo) para conocer la respuesta de las dos piedras frente a la propagación de las ondas elásticas.

Ambas piedras muestran un comportamiento diferenciado a este ensayo. La caliza presenta un promedio de 4.244,5 m/s, mientras la arenisca roja presenta un promedio de 1.810,6, y la arenisca blanca 1.221,5 m/s.

Relacionando las propiedades mecánicas estudiadas previamente y los resultados obtenidos de los ensayos ultrasónicos se obtienen las siguientes tablas, en las cuales se aprecia que a mayor densidad, menor porosidad, mayor resistencia mecánica y mayor velocidad de propagación ultrasónica.

Tabla 2.- Velocidad ultrasónica estimada en diferentes materiales.

| Tipo de piedra | Testigo | L(mm) | t [microseg] | v [m/s] | | |
|-----------------|---------|--------|--------------|----------|----------|----------|
| CALIZA | 1,00 | 80,50 | 17,00 | 4.735,29 | 4.321,53 | 4.244,50 |
| | | 80,50 | 20,80 | 3.907,77 | | |
| | 2,00 | 120,00 | 28,40 | 4.225,35 | 4.167,47 | |
| | | 120,00 | 29,20 | 4.109,59 | | |
| ARENISCA ROJA | 1,00 | 180,00 | 72,40 | 2.209,94 | 1.859,76 | 1.810,57 |
| | | 180,00 | 144,20 | 1.109,57 | | |
| | 2,00 | 60,00 | 29,30 | 2.047,78 | 1.961,39 | |
| | | 60,00 | 32,00 | 1.875,00 | | |
| ARENISCA BLANCA | 1,00 | 100,00 | 120,20 | 1.331,11 | 1.185,38 | 1.221,45 |
| | | 100,00 | 153,90 | 1.039,64 | | |
| | 2,00 | 60,00 | 57,30 | 1.396,16 | 1.257,52 | |
| | | 60,00 | 71,50 | 1.118,88 | | |

Tabla 3.- Relacion entre la velocidad ultrasónica registrada, la resistencia a compresión y determinadas propiedades físicas (densidad aparente y porosidad).

| | Caliza | Arenisca roja | Arenisca blanca |
|--|----------|---------------|-----------------|
| Rm [MPa] | 100,40 | 36,45 | 31,70 |
| Densidad aparente (g/cm ³) | 2,65 | 2,25 | 2,09 |
| Porosidad (% en volumen) | 1,48 | 7,83 | 16,38 |
| Velocidad ultrasónica (m/s) | 4.244,50 | 1.810,57 | 1.221,45 |
| ρv [kg/MPa] | 39,2 | 43,7 | 38,5 |

4.3.2 Métodos sónicos aplicados a fábricas de tapial.

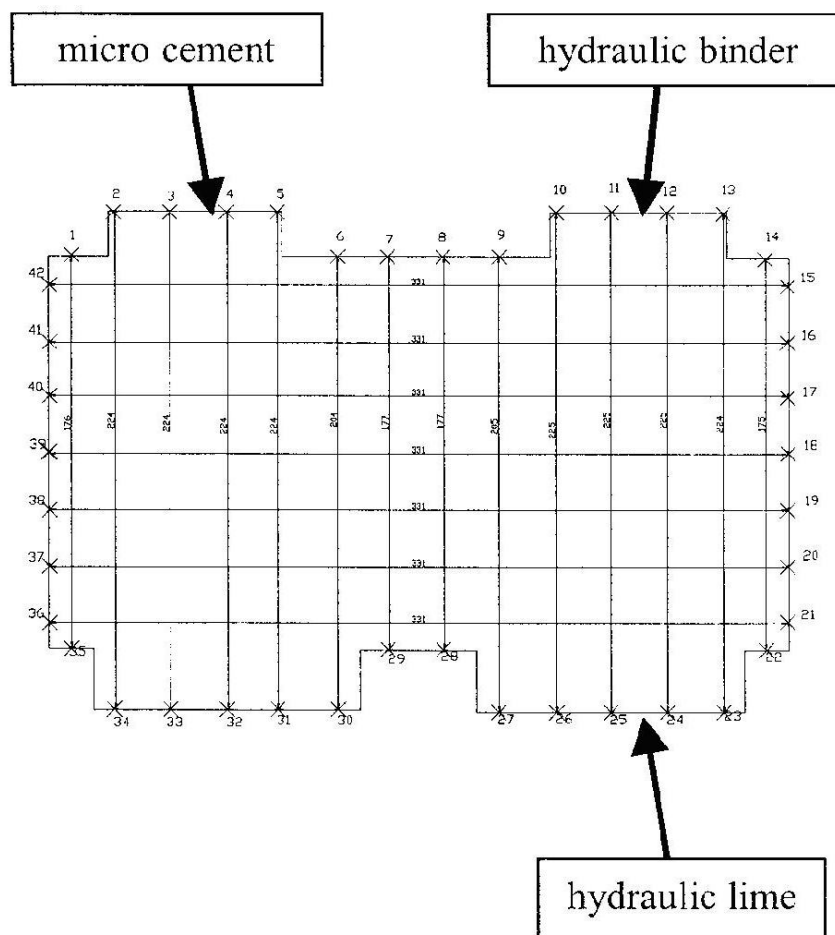
En el palacio objeto del análisis existen algunos muros de fachadas que alternan la fábrica de ladrillo con tapial, este último sistema constructivo ha sido reforzado con un mortero. Un método apropiado para este sistema constructivo es el método sónico. A continuación se muestra el protocolo de utilización poniendo como ejemplo la aplicación de estas técnicas a la rehabilitación de la Catedral de Noto.

Se coloca un martillo y los acelerómetros en línea sobre los lados opuestos de los elemento de fábrica a ensayar (ensayo directo).

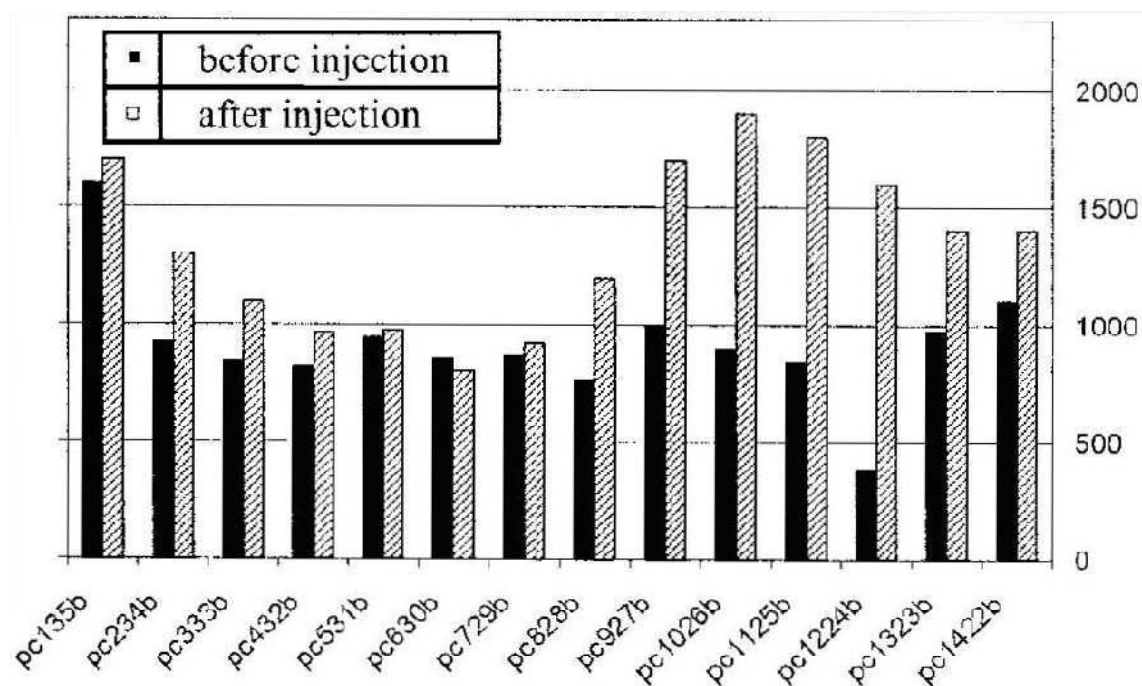
Un analizador de forma de onda acoplado con un ordenador almacenó las señales para el tratamiento remoto. Las pruebas se realizaron en alturas diferentes para verificar el estado de daño, la morfología general y la variación en los materiales de las pilas y paredes.

A su vez se realizaron pruebas experimentales sobre la eficacia de la inyección de cuatro preparados de diferente naturaleza. Se volvieron a realizar las pruebas acústicas 28 días después de la inyección observándose un aumento general de la velocidad sónica como consecuencia de dicha operación.

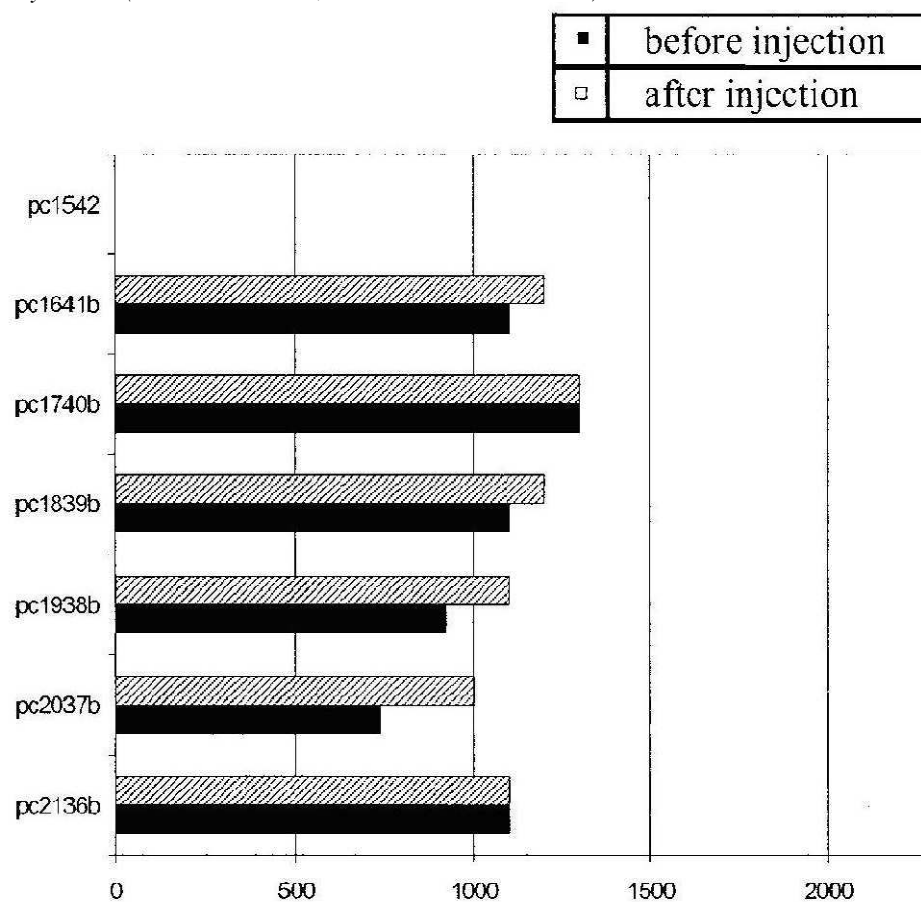
Se adjunta un gráfico en la que se define, para una pila ensayada a 25 cm del suelo las trayectorias investigadas antes y después de su utilización.



Trayectorias investigadas mediante sistemas sónicos. (Fuente: L. Binda, A. Saisi & C. Tiraboschi).



Resultados de los ensayos sónicos llevados a cabo sobre una de las pilas de la catedral de Noto antes y después de la inyección. (Fuente: L. Binda, A. Saisi & C. Tiraboschi).



Resultados de los ensayos sónicos llevados a cabo sobre una de las pilas de la catedral de Noto antes y después de la inyección. (Fuente: L. Binda, A. Saisi & C. Tiraboschi).

4.3.3 Métodos impacto-eco aplicados a fábricas de ladrillo.

Aplicaremos el método de impacto-eco a las fábricas de ladrillo existente para analizarlas.

El ensayo de impacto-eco se basa en tres componentes básicos:

- Un impactador mecánico capaz de producir impactos de corta duración. La duración de estos puede ser variada.
- Un receptor de alta fidelidad para medir la respuesta superficial.
- Un sistema de adquisición y análisis de la señal para capturar la salida transitoria del receptor, almacenar las ondas asociadas con el movimiento de la superficie y realizar el análisis y procesamiento de la señal.

La distancia entre el punto de impacto y el transductor es importante. Si la distancia es demasiado grande la respuesta no está dominada por ondas P reflejadas, y las ecuaciones antes descritas no son aplicables. Si la distancia es demasiado corta, la respuesta está dominada por el efecto de las ondas de superficie. En base a una serie de estudios analíticos, se encontró que con espaciados de 0.2 a 0.5 de la profundidad del defecto se obtienen resultados aceptables, Sansalone y Streett recomiendan un espaciamiento menor que el 40% de la profundidad del defecto.

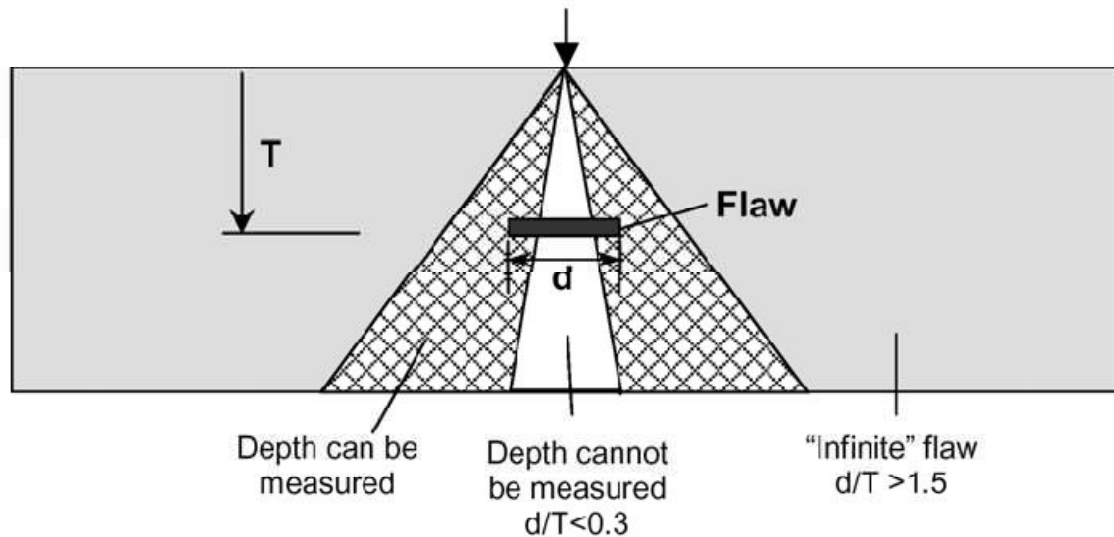
La duración del impacto es crítica para éxito del ensayo. La idea básica del ensayo es crear una vibración resonante correspondiente al modo asociado con el espesor. Para excitar el modo asociado con el espesor, el pulso aportado debe contener la frecuencia correcta, a su vez el receptor debe de ser de banda ancha para que pueda responder sobre una amplia gama de frecuencias.

Como aproximación la frecuencia más alta de amplitud significativa puede ser tomada como el inverso del tiempo de contacto.

Por ejemplo, para una velocidad de onda-P de 4000 m/s y una profundidad de defecto de 0.2m, la frecuencia (thickness frequency) es de 10 kHz ($f = 4000 / 2 \cdot 0.2 = 10000 \text{ Hz}$). Por tanto el tiempo de contacto del pulso ha de ser menor que 100 μs ($t_c = 1/f = 1/10.0000 = 0.0001 \text{ s}$) para ver el defecto en el espectro de amplitud.

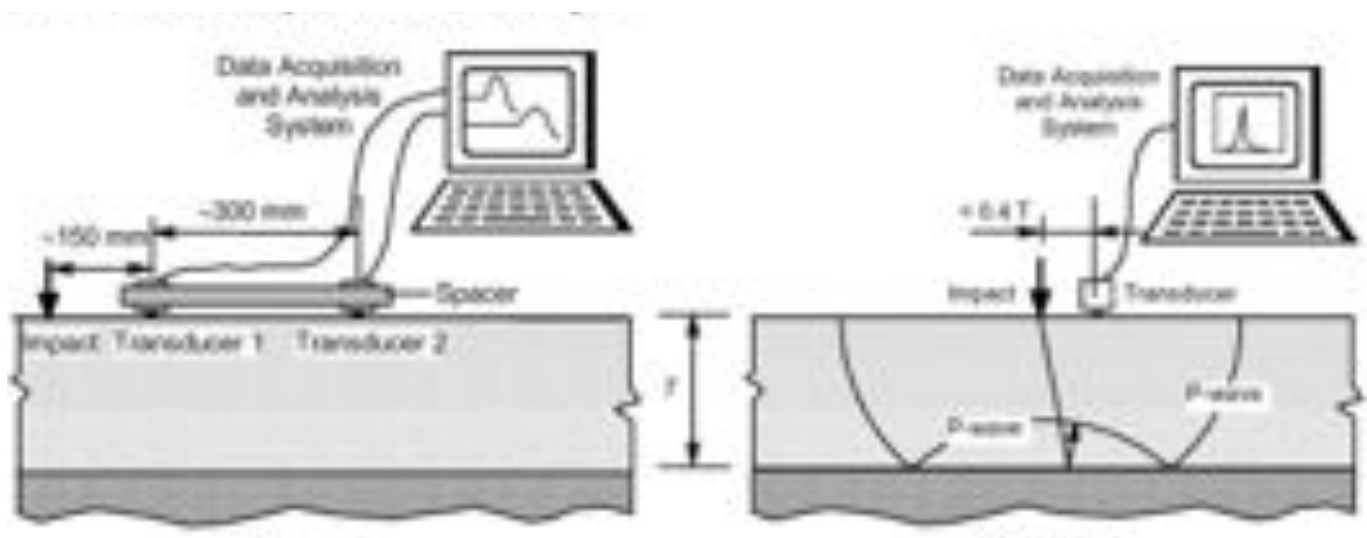
En principio la longitud de onda (velocidad de onda dividida por la frecuencia máxima) más corta tiene que ser aproximadamente igual o menor que la dimensión de defecto para que este pueda ser detectado. A su vez a medida que la profundidad de un defecto aumenta, también aumenta el tamaño más pequeño de defecto que puede ser detectado. En base a estudios analíticos y de laboratorio, Sansalone y Streett sugieren que si las dimensiones laterales de una grieta plana o un vacío sobrepasan 1/3 de su profundidad, la profundidad del defecto puede ser medida. Si las dimensiones laterales exceden 1.5 veces la profundidad, el defecto se comporta como un límite infinito y la respuesta es que el elemento tiene un espesor igual a la profundidad del defecto.

Cuando un defecto cae dentro de la región, el espectro de amplitud tendrá típicamente dos picos: un pico de alta frecuencia correspondiente a la profundidad del defecto y un pico de baja frecuencia correspondiente al espesor de la placa.



La grieta o vacío horizontal detectable más pequeño depende de su profundidad, si el defecto cae dentro de la región blanca su profundidad no puede ser medida (en base a Sansalone y Streett).

El desarrollo de un método de ensayo estándar para la detección de defectos empleando la técnica de impacto-eco es difícil en tanto que han de ser tenidas en cuenta una gran cantidad de variables en sus aplicaciones de campo.



Procedimiento en dos fases para la medición del espesor de un elemento tipo placa de acuerdo con ASTM C 1383: El procedimiento 1 es empleado para determinar la velocidad de la onda-P y el procedimiento 2 es utilizado para determinar la frecuencia asociada con el espesor (thickness frequency)

El procedimiento 1, es empleado para medir la velocidad de la onda-P en el hormigón. Esta medida se basa en la medición del tiempo de viaje de la onda-P entre dos transductores separados una distancia conocida. El fondo de la investigación de esta técnica fue suministrado por Sansalone I.

El procedimiento de la figura 2 versa de la determinación de la frecuencia asociada con el espesor (thickness frequency) empleando el método de impacto-eco en el cuál el grosor de la placa se calcula usando la medida de la velocidad de la onda-P (calculada mediante el procedimiento A) y la ecuación (6).

Conviene hacer notar que la velocidad de la onda-P obtenida por el procedimiento A ha de ser multiplicada por 0.96 cuando se emplea en la ecuación (6).

5. Técnicas de Evaluación no destructiva aplicadas a los sistemas constructivos de madera

Para la evaluación del estado de la madera mediante métodos END nos basamos en la metodología desarrollada en "Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonido".

Detección de daños: la detección de daños existente en un elemento de madera es el primer paso del proceso para evaluar su gravedad y decidir las medidas de actuación.

Evaluación de daños: la evaluación se llevará a cabo después de la inspección y la utilización de técnicas de reconocimiento adecuadas. Los daños se evalúan en función de dos aspectos: extensión del ataque e intensidad del mismo. Estos aspectos están relacionados con el agente causante del deterioro y con la duración del ataque.

5.1 Justificación de técnicas por estudio comparativo

Las técnicas de auscultación tradicionales utilizadas en la madera son:

- La inspección visual de la superficie.
- Golpeo con martillo metálico o de pasta
- Perforaciones con punzones y realización de taladros

Estas técnicas requieren un instrumental poco sofisticado. Actualmente se están desarrollando técnicas más sofisticadas de END para el estudio y diagnóstico de piezas de madera. La mayoría se basan en la transmisión de ondas elásticas a través del material, de las cuales se pueden destacar:

- Los medidores de velocidad de ondas de esfuerzo: son aparatos para medir la propagación de ondas de esfuerzo a través de un material. Conociendo la velocidad y el módulo de elasticidad se puede saber la densidad.
- Métodos que procesan los sonidos producidos por el ataque de insectos xilófagos.
- Técnicas de ultrasonidos: Esta técnica es en la cual nos vamos a centrar. Es un método no destructivo, por lo tanto no daña el elemento a ensayar. Es de aplicación in situ. El instrumental necesario es de pequeño tamaño y manejable. Proporciona unos resultados objetivos, como es la velocidad de transmisión frente a otros que se basan en la estimación subjetiva de un operario con experiencia y capacitación suficiente.

5.2 Priorización

Nos basamos en una metodología de ensayo basada en las técnicas de ultrasonido que permiten diagnosticar el estado de la madera así como evaluar la capacidad portante de forjados de madera en obras de rehabilitación.

El desarrollo se ha centrado en los siguientes aspectos:

- Material: Pino Silvestre, ya que es el más común en las obras de rehabilitación en Andalucía.
- Elemento constructivo: Vigas y viguetas de forjado de madera, elementos trabajando a flexión. Nos centramos en el estudio de forjados ya que en obras de rehabilitación suele ser de gran importancia conocer la capacidad portante de un forjado por los cambios de uso que suele sufrir.
- Estado de la madera: Estudio sobre probetas de laboratorio realizadas en madera nueva y vieja, sana y deteriorada.

Los objetivos que se persiguen son:

- Desarrollo de una metodología de ensayo basadas en las características de propagación de ondas ultrasónicas para la inspección in situ de forjados de madera.
- Estimación del nivel de deterioro de la madera mediante la medida de la velocidad de transmisión y la consecuente pérdida de densidad del material.
- Estimación de la resistencia a flexión del material.

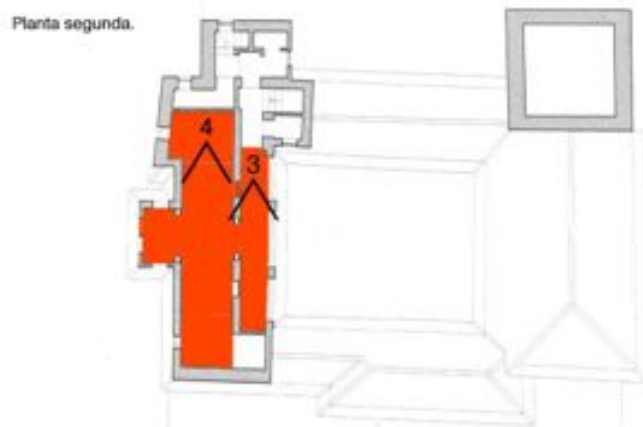
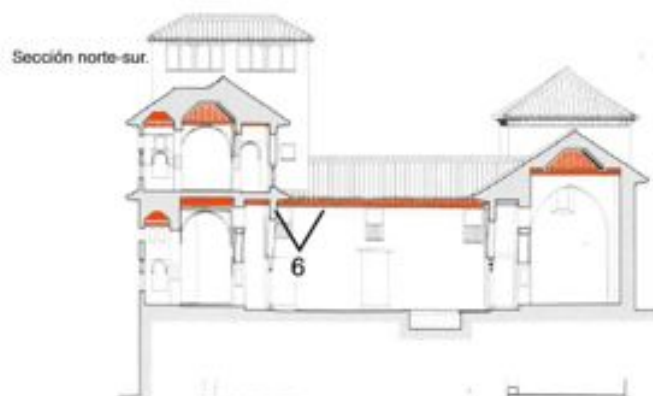


Foto 1.



Foto 2.



Foto 3.



Foto 4.



Foto 5.



Foto 6.

5.3 Protocolos de utilización aplicados a obras de rehabilitación de madera.

5.3.1 Ensayos no destructivos.

Ensayos de ultrasonidos, de los diversos métodos de ensayo que existen se ha utilizado el método de transmisión en el que se utilizan un emisor y un receptor del impulso ultrasónico. Conocida la distancia entre ambos la medida del tiempo permite conocer la velocidad de transmisión en el material.

Ensayos de determinación del contenido de humedad. Se hacen por dos procedimientos:

- mediante desecación hasta el estado anhidro
- mediante higrómetro de resistencia.

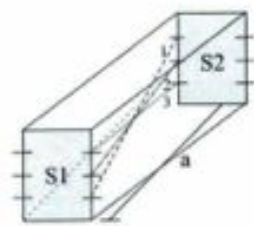
5.3.2 Factores que afectan a la velocidad de propagación de los ultrasonidos.

El principal objetivo es la estimación del grado de deterioro a través de las alteraciones que se producen sobre la velocidad de transmisión de los ultrasonidos. No sólo el deterioro afecta a la velocidad sino que hay que conocer otros factores.

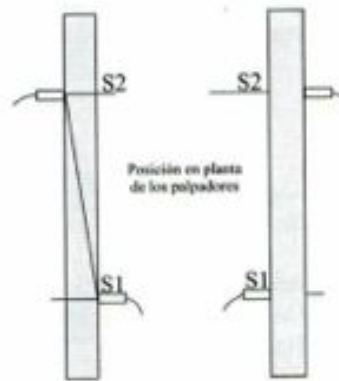
-Tipos de madera: debido a la diferente estructura interna de cada tipo de madera, cada una posee un rango de velocidad de propagación ultrasónica propia. En nuestro caso nos centramos en el pino silvestre, al ser siempre el mismo tipo este factor no influye.

-Posición de la fibra: La madera tiene tres ejes de simetría perpendiculares entre sí cuyas direcciones son longitudinal, radial y tangencial a su estructura de crecimiento. Las velocidades en el sentido longitudinal contiene un mayor rango de velocidades, 5.000 m/s, las velocidades normales 2.000 m/s y las tangenciales 1.500 m/s. Se han estudiado estas tres velocidades en estas tres direcciones V_L , V_N y V_T y las relaciones que existen entre ellas.

Para que las velocidades transversales obtenidas en los distintos puntos de la viga sean comparables entre sí sin que afecte la posición de los anillos, se han determinado unos coeficientes, con los cuales se puede obtener la velocidad normal V_N , multiplicando estos por V_L o velocidad



Medidas longitudinales cruzadas



Posición en planta de los palpadores



Caso 1



Caso 2



Caso 3



Caso 4

$$V_a > V_b \\ V_a > V_c$$

$$V_b > V_d \\ V_b > V_a$$

$$V_a = V_c \\ V_b = V_d \\ V_a = V_b \\ V_d = V_c$$

$$V_c > V_a \\ V_d > V_e \\ V_a = V_b \\ V_d = V_e$$



• Velocidad mayor en S1

- **Contenido de humedad:** Así como el contenido de humedad afecta a las propiedades mecánicas de la madera también afecta a las velocidades de propagación.

Para conocer la influencia del contenido de humedad se han realizado ensayos en laboratorio que consisten en la realización de medidas de velocidad longitudinal y transversal en probetas con diferentes contenidos de humedad con la aplicación de métodos estadísticos sobre un banco de datos con los resultados obtenidos de los ensayos se han determinado unas rectas de regresión que permiten referir la velocidad de transmisión a un contenido de humedad cualquiera.

Para medidas de velocidad longitudinal:

$$H < 28\% \quad V_{LHi} = -39,09 H_i + V_{LH0}$$

$$H > 28\% \quad V_{LHi} = -0,73 (H_i - 28) + V_{LH28}$$

Para medidas de velocidad normal:

$$H < 28\% \quad V_{NHi} = -27,05 H_i + V_{NH0}$$

$H > 28\%$

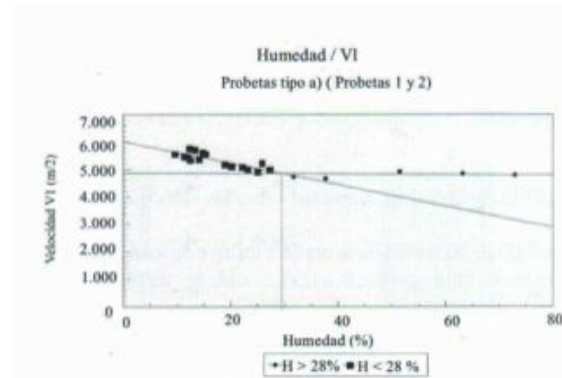
$$V_{NH_i} = -0,46 (H_i - 28) + V_{NH28}$$

H Humedad en %

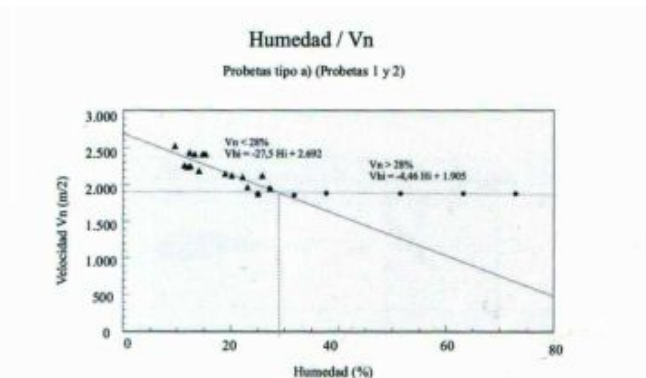
V_{LH_i}, V_{NH_i} Velocidad longitudinal, normal para una humedad H

V_{LH0}, V_{NH0} Velocidad longitudinal, normal para una humedad del 0%

V_{LH28}, V_{NH28} Velocidad longitudinal, normal para una humedad del 28%



Determinación de la posición de la fibra a lo largo de una viga.



Relación entre el contenido de humedad y la velocidad normal de transmisión.

La explicación al distinto comportamiento de la madera en los dos intervalos está en que por encima del grado de saturación el exceso de agua que hay en la madera se encuentra libre ocupando los espacios internos de las células mientras que para contenidos de humedad inferiores al de saturación el agua está contenida en las paredes celulares y un cambio de ésta implica cambios en las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

En nuestro caso todas las velocidades han sido referidas a una humedad del 12%, con lo cual todas las velocidades están referidas a esta misma humedad y conseguiremos eliminar otro factor que afecta a la velocidad de propagación.

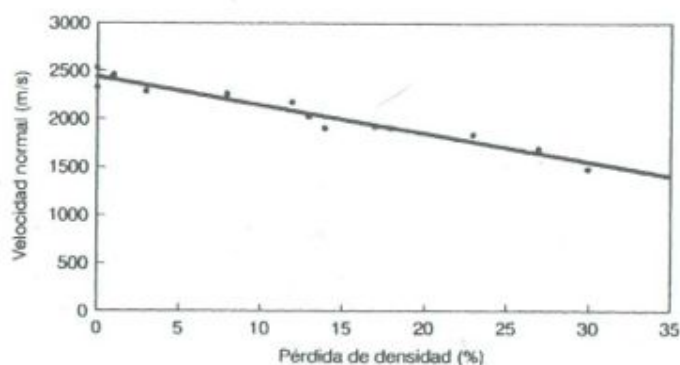
-Defectos en la madera: un defecto provoca un descenso de los valores de velocidad de transmisión ya que supone una discontinuidad del material. Es difícil confundir defecto con deterioro al realizar ensayos de ultrasonidos ya que éstos suelen ser vistos desde el exterior y se manifiestan de manera diferentes a los ensayos.

Los defectos se pueden valorar de manera cualitativa ya que las pérdidas de velocidad se producen de forma brusca y puntual sin zonas de transición mientras que en el deterioro las bajadas de velocidad no están localizadas puntualmente sino por zonas y los descensos se producen de forma gradual existiendo valores de velocidad intermedios.

-Deterioros de la madera: la manera de cuantificar el deterioro ha sido a través de la pérdida de densidad el cual nos da la intensidad del ataque sufrido por la madera por agentes destructores.

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 | R2 | F-Ratio | P |
|-----------------------|------|------|---------|-------|
| $= 86 - 0.035 V_N$ | 0.97 | 0.94 | 206 | 0,000 |

R=coeficiente de correlación

F= Fiabilidad del modelo

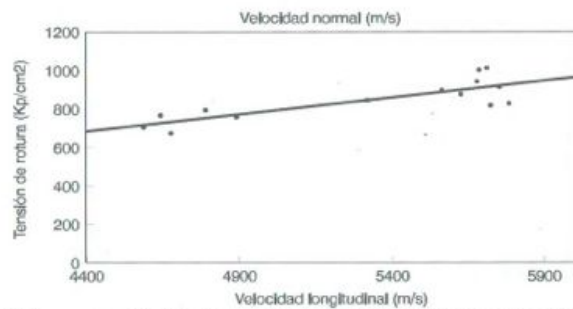
P= Probabilidad de que un valor se produzca al azar.

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

5.3.3 Correlación de medidas de ultrasonidos con parámetros resistentes.

Para la obtención de estas correlaciones se realiza un banco de datos con 141 probetas ensayadas mediante técnicas de ultrasonidos y ensayos de rotura a flexión. De estos ensayos se han obtenido los valores de velocidad longitudinal V_L o normal V_N , la tensión de rotura y el módulo de elasticidad estático.

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 en Kp/cm2 conociendo la velocidad longitudinal V_L , mediante la ecuación de regresión:

| Ecuación de regresión | R | R2 | F-Ratio | P |
|-------------------------------|-------|-------|---------|-------|
| $\sigma_r = 0.173V_L - 74,52$ | 0.813 | 0.661 | 23,2 | 0,000 |

Se observa que hay un buen ajuste de la recta sobre la nube de puntos.

Para madera deteriorada: 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 |
|----------------------------|------|----------------|---------|-------|
| $\sigma_r = 0.75V_N - 956$ | 0.76 | 0.58 | 17 | 0,001 |

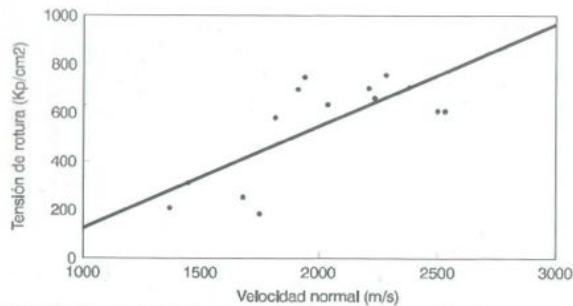


Fig. 3.22. Relación entre tensión de rotura y velocidad normal para madera vieja.

Para madera sana se estima la tensión de rotura a partir de la velocidad longitudinal y en madera deteriorada mediante la velocidad normal. Estos resultados son lógicos ya que en una viga de madera sana el material es homogéneo, con un valor de resistencia

característico para toda la viga, mientras que en vigas con deterioro el material no es homogéneo y por tanto resultaría un valor de resistencia variable para cada sección de la viga.

Los tres intervalos de velocidad que serán de utilidad en el diagnóstico de las vigas son

| | |
|---|---------------------|
| $V_N > 1.900 \text{ m/s}$ | 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 |

Para la obtención de tensiones admisibles y valores de carga máximas en vigas, se obtiene en primer lugar y de forma experimental la tensión de rotura mediante ensayo. Dividiendo ésta por un coeficiente de seguridad obtenemos la tensión básica, que es aquella que puede resistir permanentemente y con seguridad la madera sana para una humedad del 12%.

$$T_{\text{BÁSICA}} = T_{\text{CARACTERÍSTICA}} / \text{Coef. Seg.}$$

La tensión admisible se obtiene multiplicado la tensión básica por un coeficiente de clase que va en función del número de defectos que contiene el material.

En el caso de madera sana la obtención de la tensión se realiza a partir de la velocidad longitudinal.

Si se utiliza $V_{L \text{ CRUZ MAX}}$ que no tiene en cuenta defectos y se divide por el coeficiente de seguridad obtenemos la tensión básica. Si se utiliza $V_{L \text{ CRUZ MED}}$ que tiene en cuenta defectos de la viga y al dividir por el coeficiente de seguridad se obtiene la tensión admisible.

En el caso de madera deteriorada la estimación de la tensión de rotura se realiza a partir de la velocidad normal media de la sección. Este valor no tiene en cuenta los defectos de la pieza, por lo que esta tensión será una tensión básica.

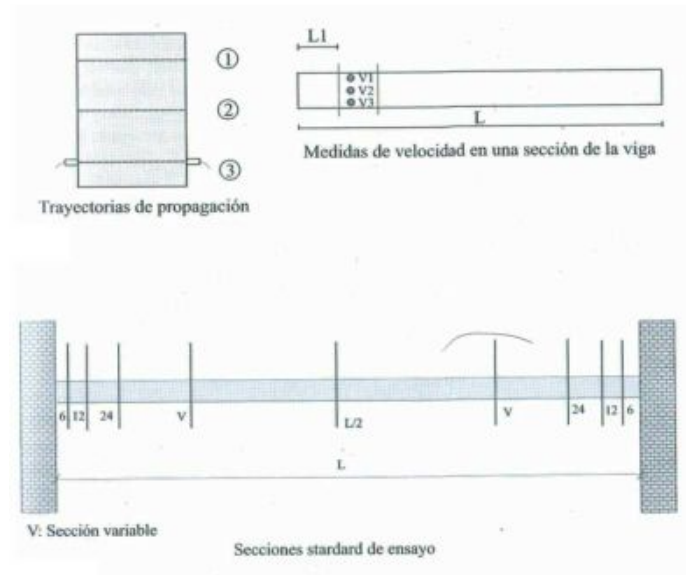
5.3.4 Metodología de aplicación a obras de rehabilitación

Los ensayos no destructivos a realizar in situ, en las vigas de un forjado de una obra de rehabilitación son tres:

-Homogeneidad de la sección: basados en medidas transversales de ultrasonido, determina el deterioro por secciones y la resistencia de las vigas en madera deteriorada. Este ensayo comprende ensayos de ultrasonido y de contenido de humedad. Se realizan tres medidas transversales en la viga obteniendo tres tiempos, T_1 , T_2 , T_3 que originan las velocidades V_1 , V_2 y V_3 . A su vez en estos seis puntos se toman medidas de humedad para referir estas velocidades al mismo contenido de humedad. Se realizarán un mayor número de ensayos en secciones próximas a empotramientos, ya que es el punto donde se inicia el ataque de la madera por el elevado contenido en humedad.

-Determinación de la posición de la fibra: está también basado en medidas transversales y sirve de apoyo al anterior. Este ensayo es esencial para determinar los coeficientes correctores a la velocidad normal.

-Medidas longitudinales: basados en medidas longitudinales cruzadas para determinar la resistencia de una viga de madera no deteriorada.



5.4 Análisis de datos

Nos basamos en un ejemplo descrito en el libro "Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación, mediante técnicas de ultrasonidos" en el que se han realizado los siguientes ensayos a un forjado de la Casa de los Marqueses de la Algaba:

- Ensayo de ultrasonido (homogeneidad de la sección).
- Medidas longitudinales.
- Ensayo de determinación del contenido de humedad.

Resultados de los ensayos: en el ejemplo descrito se usó el programa informático UltraMad 02 para el análisis de los datos obtenidos y se obtuvieron unas gráficas mediante códigos de colores que representan:

- mapa de humedades
- mapa de deterioro
- mapa de tensiones admisibles
- mapa de cargas

Mapa de humedades: Los ensayos se realizaron en la época más lluviosa del año. La zona de las vigas con mayor índice de humedad son aquellas que están empotradas en el muro exterior ya que son las más expuestas. Las zonas más humedad tienen

contenidos de humedad superiores al punto de saturación ($H > 50\%$). En otras partes de las vigas, el contenido de humedad es menor, entre el 12% y el 28%.

Mapa de deterioro: Cada color representa uno de los tres estados establecidos en el diagnóstico 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 |

Del estudio de esta planta se deduce que en general el estado de las vigas no es bueno, alcanzando valores de velocidades medias en algunas zonas de 300 m/s.

Mapa de tensiones básicas: Alguna viga presenta en las secciones centrales valores de tensiones básicas superiores al resto de la viga.

En este mapa se puede entender como la viga se convierte en un material de resistencia variable cuando es atacado por algún agente destructor.

Mapa de cargas máximas: De este mapa se deduce que aunque haya vigas que admitan valores de 600 y 800 kp/m² se deberá utilizar el criterio más restrictivo de todo el forjado, que es 200 kp/m². Estos valores indujeron a la construcción de un nuevo forjado de chapa plegada de acero y hormigón en capa de compresión anclada a los muros para obtener una mayor resistencia requerida.

Mapa de deterioro por vigas: Los mapas de deterioro particularizados para cada viga dan en mayor detalle el estado de cada sección. Estos mapas son útiles a la hora de aplicar un tratamiento curativo o rehabilitar vigas ya que delimitan perfectamente las zonas deterioradas. Este daño se puede valorar de manera cuantitativa según el número de secciones afectadas, o cualitativa mediante el valor de velocidad que proporciona la pérdida de densidad.

6. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- **Eloy Algorri García.** “La albañilería en la arquitectura popular.” Congreso internacional sobre restauración del ladrillo. Sahagún, León. 1999.
- **Antonio Orihuela Uzal.** “Casas y Palacios Nazaríes siglos XIII-XV” de la edición Sierra Nevada 95 – El Legado Andalusi – Lunwerg Editores S.A.
- **M. Carmen López Pertíñez.** “La carpintería en la arquitectura nazarí.” Instituto Gómez Moreno. Fundación Rodríguez Acosta.
- **Antonio Orihuela Uzal.** La casa andalusí en Granada. Siglos XIII-XVI. Seminario. La casa meridional: Correspondencias.
- **Antonio Orihuela Uzal.** Restauración de casas andalusíes en Granada.

ARTÍCULOS

- **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.
- **Ignacio Lombillo, Luis Villegas.** “Metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación estructural del Patrimonio”