

Actas del Cuarto Congreso Nacional de
Historia de la construcción

Cádiz, 27-29 de enero de 2005

Volumen II

Instituto
Juan de Herrera
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE ARQUITECTURA DE MADRID

Sociedad Española de
**Historia de la
Construcción**

arquitectos de **cadiz**

COAATC
Colegio Oficial de Aparejadores
y Arquitectos Técnicos de Cádiz

Avance de propuesta metodológica para el diagnóstico y análisis de estructuras de madera históricas

Alfonso Basterra
Gema Ramón
Isabel Barranco
Gamaliel López
Luis Acuña
Milagros Casado

Podemos distinguir dos enfoques a la hora de aproximarse a la inspección y análisis de una estructura de madera histórica, la mayor parte de las veces parcialmente degradada por los diversos agentes agresivos para el material leñoso. Los ingenieros suelen realizar un enfoque material o directo, con prevalencia del método científico. Sus conocimientos especializados y la familiaridad con técnicas instrumentales desarrolladas para el diagnóstico de la madera viva resultan de gran valor, pero su aplicación extensiva resulta muy laboriosa y requiere pericia, instrumentos y técnicas no disponibles de forma generalizada entre los agentes intervinientes habituales. Los arquitectos efectúan una aproximación más intuitiva y global, en la que aspectos no relacionados directamente con la estructura de madera intervienen de manera capital. Este enfoque indirecto ha de tener en cuenta, entre otras cosas, criterios teóricos pertenecientes a la teoría de la restauración y del proyecto arquitectónico, a la historia del monumento y su contexto, a las razones de todo tipo que motivan la intervención, etc. todo ello destilado a través de su propio criterio, sus intenciones arquitectónicas, su juicio sobre las posibilidades existentes y su propia valía y experiencia individual. La necesaria integración entre las diversas disciplinas, característica de la labor del arquitecto, exige tener en cuenta multitud de aspectos, lo que, en no pocas ocasiones, resta profundidad al estudio de aquellos que requieren análisis de cierta laboriosidad y detalle, como es el caso que nos ocupa. Este distinto enfoque dificulta la intercomuni-

cación y transmisión de los requisitos y los datos resultantes entre ambos mundos, disminuyendo su eficacia y rentabilidad.

El trabajo que se presenta forma parte de una investigación más amplia que pretende poner a punto una metodología de inspección, representación y análisis orientada al proyecto, que sirva de base para la toma de decisiones de intervención sobre el amplio patrimonio construido con estructuras de madera. Se incardina en la línea de la aplicación de nuevos procesos y tecnologías relacionadas por una parte con el diagnóstico del estado de conservación de sistemas y elementos estructurales de madera pertenecientes a bienes inmuebles y, secundariamente, de partes estructurales de bienes muebles; por otra, con sistemas de representación hipermediática de resultados del análisis. Su desarrollo y posterior divulgación permitirá que puedan ser analizadas con criterios técnicos solventes sobre base científica, contribuyendo a su conservación y a una mayor eficiencia —eficacia a coste mínimo— en las operaciones de intervención y restauración.

Su realización es llevada a cabo por un grupo de investigación multidisciplinar de la Universidad de Valladolid (<http://www.uva.es/maderas/>), integrado por profesionales e investigadores con experiencia en los campos de la construcción y restauración arquitectónica y la tecnología de la madera; arquitectos e ingenieros de montes, respectivamente.

Objetivos

En España se vienen llevando a cabo en los últimos años, tanto a nivel nacional como regional, importantes actuaciones en materia de patrimonio histórico y cultural, destacando el amplio despliegue legislativo, la puesta en marcha de numerosos programas de recuperación, restauración y rentabilización de dicho patrimonio así como un gran esfuerzo formativo por parte de las universidades para preparar a especialistas en el sector. Por otra parte, los agentes involucrados en su gestión y conservación necesitan de la constante aplicación de tecnologías que consigan perfeccionar su actuación en los procesos de diagnóstico, protección, conservación, restauración y explotación sostenible de edificios históricos. Partimos de la base de que la conservación y revalorización del patrimonio histórico, entendido en sentido amplio, representa un valioso elemento vertebrador del espacio socio-cultural y de dinamización económica dentro de una política de explotación adecuada y sostenible de los recursos regionales o locales y de una estrategia de desarrollo económico, representando potenciales fuentes de empleo.

La madera, un material abundante y fundamental —en un doble sentido— en el patrimonio inmobiliario y monumental de España, no ha recibido hasta la fecha la atención que su protagonismo *de facto* requeriría. Ello es especialmente llamativo si se compara con el desarrollo que han conocido las técnicas de diagnóstico de materiales tales como el hormigón, el ladrillo, la piedra, los revestimientos o incluso el suelo. Esta situación, unida al papel francamente marginal de la madera como material estructural en los planes de estudio de la mayor parte de las titulaciones universitarias relacionadas (arquitectura, ingeniería de montes, ingeniería civil, etc.), lleva, con una enorme frecuencia, a la poco reflexiva, por no decir desorientada, eliminación del material estructural leñoso original, y su sustitución por alternativas como el acero o el hormigón. Tal modo de enfocar la intervención es:

- Desde un punto de vista técnico, inapropiado, salvo excepciones, dado el complejo comportamiento mecánico global de los edificios históricos. En ellos la sustitución de piezas estructurales ha de ser contemplada en relación con otras aparentemente no afectadas pero que

interaccionan entre sí en un equilibrio complejo logrado a lo largo de los años.

- Desde un punto de vista teórico, contraria a los principios generalmente aceptados en nuestro entorno cultural.
- Desde un punto de vista económico, carente de lógica siempre que sus condiciones, débilmente analizadas, admitan su conservación.

Puede afirmarse que en el fondo de tal situación subyace una información científica y técnica insuficiente sobre la fiabilidad estructural de la madera a lo largo del tiempo, aún en estado de degradación parcial; o una deficiente transferencia de la misma desde los centros de investigación o los lugares desde donde se está produciendo. Uno de nuestros objetivos prioritarios debe apuntar a invertir tales actitudes implícitas en las prácticas actuales de intervención.

Por otra parte, el inminente Código Técnico de la Edificación, por primera vez en la historia de la normalización en España, preverá un conjunto de criterios para la evaluación de estructuras existentes, en consonancia con las metodologías probabilistas asumidas internacionalmente desde hace tiempo para el cálculo de estructuras con otros materiales, como el hormigón armado y el acero. Pero para que tal sistemática pueda ser realmente operativa será fundamental disponer de extensas bases de datos con información que relacione, en términos estadísticos, los resultados de diferentes análisis destructivos y no destructivos con el valor de la probabilidad de que cada pieza alcance determinados valores de rigidez o resistencia. En España está trabajando intensamente en esa línea el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria —INIA— y, con la modestia debida, este proyecto aspira también contribuir a enriquecer los datos disponibles y, sobre todo, su interpretación aplicada.

Además, el conocimiento preciso de la capacidad mecánica del material existente tendrá efectos medioambientales positivos, por dos vías fundamentales. En primer lugar reducirá la actual tendencia a la utilización acrítica y generalizada de biocidas en intervención sobre el patrimonio (que, por lo demás, las reglamentaciones europeas están tendiendo a restringir al máximo). En segundo, favorecerá la utilización en las intervenciones de materiales leñosos originales, en la mayoría de los casos de origen nacional. A escala europea es generalizada la convic-

ción de que el incremento del uso de madera en la construcción a todos sus niveles es una de las claves para generar impactos ambientales positivos en el sector forestal.¹

El objetivo principal de este del proyecto del que este trabajo forma parte es desarrollar y poner a punto una sistemática normalizada de inspección, representación y análisis de resultados que sirva de base para la toma de decisiones sobre las estructuras de madera históricas, sean de carácter monumental o no. Apunta a la obtención de la capacidad residual de piezas estructurales de madera parcialmente degradadas mediante el empleo de métodos no destructivos y quasi-no destructivos susceptibles de ser aplicados mayoritariamente in situ, apoyándose en el perfeccionamiento y adaptación contextual de métodos de ensayo ya experimentados internacionalmente a las peculiaridades de las piezas estructurales de madera más frecuentes en el patrimonio histórico-cultural de España. Tales peculiaridades han de entenderse en términos de especies, geometría (resultado de su silvicultura y su proceso), y las patologías más habitualmente encontradas. El proyecto contempla la validación de los resultados de dichas técnicas y los obtenidos mediante ensayos destructivos, hasta la rotura.

Su condición de metodología orientada al proyecto, facilitaría un procedimiento contrastado y de calidad para el establecimiento de criterios y propuestas de intervención homogéneas y comparables para una extensa población de casos que se caracterizan precisamente por su diversidad en términos tipológicos, materiales, patológicos, etc. Ante situaciones homologables se podrán adoptar decisiones técnicamente solventes en un proceso que facilite el acierto de las mismas y registre los procesos que llevaron a ellas para revisiones posteriores, en su caso.

El ámbito de aplicación abarcaría desde los proyectos de intervención de rehabilitación o restauración de más ambicioso y profundo alcance hasta las meramente rutinarias labores de mantenimiento y conservación. Por lo tanto, sus destinatarios serán los técnicos encargados de intervenir en el patrimonio construido, así como los propietarios, usuarios y gestores de las administraciones públicas con competencias en la materia. La extensión del proyecto, tanto en términos de aplicación de resultados, como de población del sistema de datos, abarca todas las áreas geográficas del estado. Los resultados podrían así

servir de base normativa pues la información obtenida permitirá la práctica de la evaluación de construcciones en madera existentes dentro del marco normativo de la legislación española, tal y como estará configurada a corto plazo. Por otra parte, al utilizar un sistema de almacenamiento de datos de concepción coordinada con las tendencias actuales en Europa, podrá beneficiarse de la inclusión de información de bancos de datos de otros países de nuestro entorno. En sentido contrario, el aporte de la información y resultados a diferentes países europeos, permitirá contribuir a investigaciones en curso en el campo de que se trata.

ESTADO DE LA CUESTIÓN

El problema de la determinación de la fiabilidad estructural de construcciones de madera existentes ha sido afrontado a lo largo de la historia basándose, fundamentalmente, en la realización de inspecciones visuales y rudimentarios ensayos de impacto de tipo artesanal, cuyo resultado se evaluaba sobre la base de un expertizaje de carácter empírico. Estos métodos, si bien pueden considerarse incompatibles con la metodología científica actual, han demostrado ser de una aceptable eficacia técnico-económica, hasta el punto de que aún en algunos puntos de Europa (especialmente, Hungría) se conserva el *derecho gremial* de determinados especialistas a ser los únicos autorizados para la inspección de estructuras de madera existentes. A lo largo del primer tercio del siglo XX aparecen en Norteamérica y Europa las primeras normas de clasificación visual de madera para su uso estructural. Dichas normas han evolucionado a lo largo de sus aproximadamente 70 años de vida mediante ajustes metodológicos y biogeográficos.

El futuro Código Técnico de la Edificación español, actualmente en avanzado proceso de elaboración, establece una serie de clases resistentes para la madera de uso estructural. Además, proporciona criterios de correspondencia entre dichas clases resistentes y las calidades contempladas en diferentes normas internacionales de clasificación visual; entre ellas las españolas, europeas y norteamericanas. Pero todas ellas han sido desarrolladas para la clasificación del producto de primera transformación más extendido —el tablón procedente del aserrado— y de especies comunes de cada mercado. Por consiguiente

te, existen dificultades evidentes a la hora de aplicar dicha información en la evaluación de estructuras existentes, que se extienden y agravan cuando se trata de estudiar barras estructurales de grandes escuadrías, de especies y/o variedades y/o prácticas silviculturales y/o procesos industriales no habituales (o inexistentes) actualmente, o barras estructurales de sección circular, características todas ellas frecuentes en el patrimonio histórico.

Además, la aplicación subsidiaria de una norma «estándar» de clasificación visual tiende, con carácter más o menos general, a subestimar la calidad estructural de una pieza de los tipos aludidos. Por ello, el resultado de su utilización, aun en el mejor de los casos, puede inducir a desestimar la conservación de estructuras perfectamente viables.²

Durante los años inmediatamente anteriores y posteriores a la Segunda Guerra Mundial se asistió a un acelerado desarrollo del conocimiento tecnológico de la madera como material estructural. En la década de los 60 (s. XX), como consecuencia del saber acumulado sobre la relación entre las propiedades físico-mecánicas del material y determinados fenómenos, se promovería, por el US Forest Products Laboratory, una serie de simposios sobre ensayos no destructivos de la madera. El primer simposio europeo tuvo lugar en Sopron, en la Universidad de Hungría Occidental, en 1994. Dichos encuentros constituyen el principal fondo documental para el análisis y seguimiento de la aplicación de tecnologías de evaluación no destructiva de estructuras de madera. Los métodos actualmente disponibles han sido compendiados por (Arriaga et al. 2002) y pueden agruparse en cuatro tipos fundamentales:

- Métodos pseudo no destructivos (escucha del impacto, medición de la resistencia a la penetración del taladro, medición de la resistencia superficial al impacto puntual, etc.)
- Métodos sónicos y ultrasónicos (basados en diversos modos de análisis de la velocidad de propagación y el espectro de ondas de diferentes frecuencias).
- Otros (medida directa de la deformación, propiedades eléctricas, radiaciones, etc.).

Sin embargo, la aplicación de tales métodos a estructuras existentes puede no resultar viable y, además, aparecen problemas específicos, extremada-

mente dependientes de factores de carácter local, que hacen problemática la interpretación de los resultados. Cabe destacar a este respecto aspectos tales como:

- La necesidad de completar total o parcialmente los ensayos “in situ”, pues en muchas ocasiones resulta imposible el traslado de piezas al laboratorio.
- La imposibilidad, salvo excepciones, de utilizar ensayos destructivos.
- Los ya citados en lo referente a la clasificación visual estructural.
- La dependencia, en la interpretación de los resultados de la mayor parte de los fenómenos, de la especie de que se trate.
- Los variados comportamientos y patrones de agresión bióticos y abióticos en las diferentes áreas geográficas.

En Europa se han venido realizando algunas experiencias puntuales (ver bibliografía), cuya orientación y relativamente pobre difusión hace difícil su utilización generalizada o sistemática. Aún más difícil resulta su aplicación a las condiciones específicas del patrimonio inmobiliario y monumental en el entorno español. Por ello, en este proyecto pretendemos poner a punto procesos específicos de aplicación inmediata basados en:

- Métodos que precisen equipos portátiles disponibles en el mercado a costes asumibles en el amplio contexto de la construcción y la restauración arquitectónicas a escala estatal.
- Métodos para los que existen equipos portátiles de probada operatividad y eficacia en obra, incluyendo la emisión acústica.
- Métodos que ofrezcan la información más directamente aplicable a la evaluación estructural (lo cual excluye la resistencia a la penetración de aguja).
- Métodos que consideren las condiciones específicas del patrimonio inmobiliario y monumental, las técnicas vernáculas, las especies forestales más abundantes, etc. del entorno regional de España.

AVANCE DE METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

Diseño del sistema de datos

Se ha desarrollado una aplicación informática para la clasificación visual de la madera (Llorente et al. 2004) con la finalidad de sistematizar la entrada de datos procedentes de la clasificación visual de vigas (norma UNE 56.544), del ensayo de flexión (norma UNE EN 408) y del ensayo por ultrasonido Sylvastest,³ aplicable a madera de uso estructural para las principales especies de coníferas españolas. Se trata de una herramienta de trabajo que permite establecer un sistema objetivo de clasificación atendiendo a criterios de clasificación visual, físicos y mecánicos. Admite la incorporación de datos referidos a:

- Características y singularidades de cada viga:
 - Características generales.
 - Singularidades ligadas a la estructura de la madera y al aserrado de las piezas.
 - Caracterización de los nudos.
 - Caracterización de las fendas.
 - Caracterización de las gemas.
 - Caracterización de las bolsas de resina.
 - Otras singularidades ligadas a la estructura de la madera.
- Alteraciones de tipo biológico.
- Propiedades físico-mecánicas de la viga.
- Ultrasonidos.

Se basa en recoger y clasificar sistemáticamente la presencia de los defectos habituales en la madera, dada su probada influencia en la capacidad resistente. El criterio adoptado en la aplicación para medir las características y singularidades de las distintas vigas es el de la norma española UNE 56.544: 2003. Aunque la evaluación de los defectos más frecuentes en la madera difiere más o menos de una norma a otra, el programa trata de dar una aproximación a la clasificación visual en base a otras normas de clasificación europeas como la NF B-52-001 francesa, la DIN 4.074 alemana, o la INSTA 142 de los Países Nórdicos. De este modo se puede conocer la asignación de propiedades mecánicas que se obtendrían en el caso de utilizar otras normas internacionales de clasificación. La incorporación permanente de información a la base de datos representa una estructura de auto feed-back que aumenta el rigor en la estima-

ción de las propiedades resistentes de las vigas según crece el número de registros incorporados.

En definitiva, la aplicación establece una propuesta resistente para cada viga aprovechando la información disponible tanto de la clasificación visual como del ensayo por ultrasonidos. En base a los datos obtenidos, proporciona el modelo de predicción del valor del Módulo de Rotura (MOR), teniendo en cuenta tres factores que explican dicho modelo: el Módulo de Elasticidad Global de Canto (MOEGTO), la velocidad de transmisión de la onda en el ensayo por ultrasonido y una función de defectos. Para cada sección de defecto (secciones donde se insertan los nudos que suelen aparecer agrupados), tendremos dos valores (tracción y compresión) que vendrán expresados por la suma de todos los diámetros de los nudos que en ella se encuentren, para las zonas de tracción y compresión, multiplicadas por un coeficiente dependiente de la ubicación de esta sección dentro de la pieza y obtenido a través del diagrama de momentos. Ese coeficiente «c» (momentos), dependiente del valor del momento en cada sección, puede establecerse para cada pieza como un valor entre 0 y 1, valores extremos correspondientes al máximo y al mínimo del diagrama de momentos. Para el total de la viga, se podrán establecer dos únicos valores (Funciones de defectos), uno para la zona de tracción y otro para la de compresión, que represente globalmente el número de nudos, su tamaño (diámetro) y su situación en la pieza, que vendrá expresado como el sumatorio de las funciones anteriores para todas las superficies de defecto que aparezcan en la viga. La estimación del módulo de rotura proporcionada por el software, podrá realizarse partiendo, bien de la muestra de vigas existente en cada uno de los lotes, o bien de la población total de vigas existentes en la base de datos de la misma especie.

El sistema está siendo actualmente experimentado por miembros del grupo de investigación (Acuña. et al. 2004) constatándose la eficacia de la utilización de la función de defectos en la predicción del valor de la resistencia a la rotura de las vigas de madera.

Integración de la información previa

La metodología cuyos avances se presentan en esta comunicación ha sido ejemplificada experimentalmente en quince edificios declarados Bien de Interés

Cultural, en un trabajo ya publicado (Basterra et al. 2004) que fue financiado por la Dirección General de Patrimonio y Bienes Culturales de la Junta Castilla y León. Para tal trabajo se contaba con un banco de información previa constituido por dos tablas de datos heredadas: la del inventario de Bienes de Interés Cultural (BIC) de la Dirección General de Patrimonio de la Junta de Castilla y León y los datos básicos relativos a Castilla y León de las bases iniciales del proyecto de inventario de estructuras de madera del Instituto de Patrimonio Histórico Español (IPHE).⁴

El banco de datos desarrollado, de carácter relacional, es capaz de almacenar y acceder a información y documentación en formatos digitales diversos sobre los casi 2000 monumentos declarados BIC de Castilla y León y, concretamente, al estado y diagnóstico de sus estructuras de madera. Además, admite la integración de documentación bibliográfica convencional y documentos y datos obtenidos de arquitectos y agentes que hayan intervenido anteriormente en el monumento (fig. 1).

Inspección

Como núcleo central del trabajo se ha estructurado una metodología orientada desde la inspección al proyecto (fig. 2). En ese momento, en el que la toma de decisiones resulta crítica, debe disponerse de un análisis completo, en el que converjan los datos previos recopilados con los resultados de la inspección específica. Todo ello en un sistema relacional que permita navegar a través de todos ellos, en los distintos momentos del proyecto.

Para la inspección se han establecido tres niveles de análisis (fig. 3). El Nivel Básico se corresponde

con la inspección ocular superficial, la ayuda de herramientas sencillas como el punzón o el martillo de goma, y el apoyo de sistemas gráficos de representación convencional: dibujo y fotografía. Puede obtenerse una razonable aproximación a la especie de que se trata e identificar y localizar familias de patologías por sus signos exteriores, incorporándolos después a un sistema de información integrada con los planos que permita establecer criterios y recomendaciones esenciales sobre la estructura. El Nivel Instrumental conlleva la utilización de técnicas específicas del diagnóstico en madera: xilohigrometría, lecturas de propagación de ultrasonidos y extracción de perfiles resistográficos. Además, se toman muestras para la identificación microscópica de la especie y se intensifica la adquisición de imágenes mediante video digital y fotografía exhaustiva. Se identifican patologías concretas, con representación gráfica de las zonas o barras afectadas. El nivel más avanzado se alcanza con el Análisis Estructural que, por no significar estrictamente labores de inspección, se describe en apartados siguientes.

El proyecto contempla la realización, en el Laboratorio de Maderas de la Universidad de Valladolid (Campus «La Yutera», Palencia), de ensayos destructivos según la norma UNE EN 408, de determinación de las propiedades físico-mecánicas, obteniendo los valores característicos según las indicaciones de la norma UNE EN 384.

Representación y codificación

La diversidad tipológica y superficies de tan distinto tamaño y forma en los edificios históricos objeto de estudio ha requerido el desarrollo de una codificación

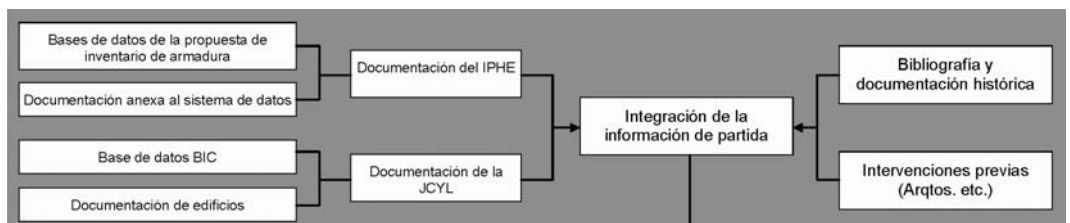


Figura 1
Información previa integrada

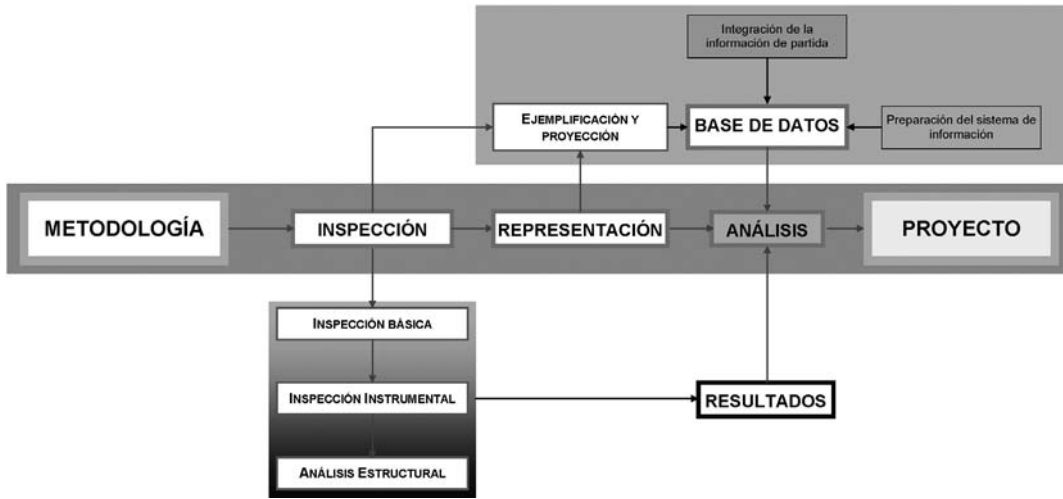


Figura 2
Metodología general (resumen)

de zonas que, para cada edificio, permita identificarlas en los documentos asociados. El sistema elegido está basado en una cuadrícula virtual, superpuesta a la planta que, a modo de hoja de cálculo, designa unívocamente cada área. Para posibilitar la entrada de un número universal de casos, a veces las celdas deben dividirse en órdenes jerárquicamente menores, de forma que la designación no tiene sólo dos caracteres, sino varios.

El manejo de un volumen de información de tal tamaño,⁵ y la previsión de ampliación de la población de casos, ha exigido una codificación rigurosa en el nombre y formato de los mismos y su estructura de almacenamiento (Basterra et al. 2004).

Para facilitar el intercambio de los ficheros se ha seleccionado el formato Acrobat® PDF de Adobe, por su aptitud para integrar datos heterogéneos, su fácil difusión y el carácter gratuito de su lector estándar. Permite abrir y manejar documentos generados con aplicaciones de diseño gráfico, dibujo asistido, retoque fotográfico, video digital, etc. sin necesidad de disponer de las aplicaciones capaces de manejar y generar la información en origen. Además incorpora posibilidades de navegación que, si bien no tan conocidas y familiares como las de tipo web, permiten funcionalidades parecidas.

Análisis estructural y evaluación de datos

El Análisis Estructural comporta el cálculo de una serie de elementos representativos de la estructura aplicando los criterios de los códigos experimentales europeos —Eurocódigo 5—, directamente relacionados con el Código Técnico de la Edificación de próxima vigencia en España. Para ello se han desarrollado una serie de hojas de cálculo paramétricas que, con la variación de los datos de partida, efectúan una rápida peritación del elemento deseado. Dichas tablas están disponibles para investigadores e interesados en el Departamento universitario de los autores de este trabajo.

Se realizan estudios de correlaciones entre el perfil mecánico real de la pieza y datos obtenibles en inspección visual directa (singularidades de crecimiento y síntomas de degradación) o inspecciones métricas básicas posibles *in situ*. Igualmente se estudian correlaciones entre informaciones no destructivas de carácter numérico (geometría precisa de la pieza, datos de extracción de tornillo, propagación de sonido, perfiles resistográficos, ensayo a flexión controlada) y el perfil mecánico real de la pieza obtenido en rotura. Finalmente se establecerán predictores asociados a cada metodología de evaluación.

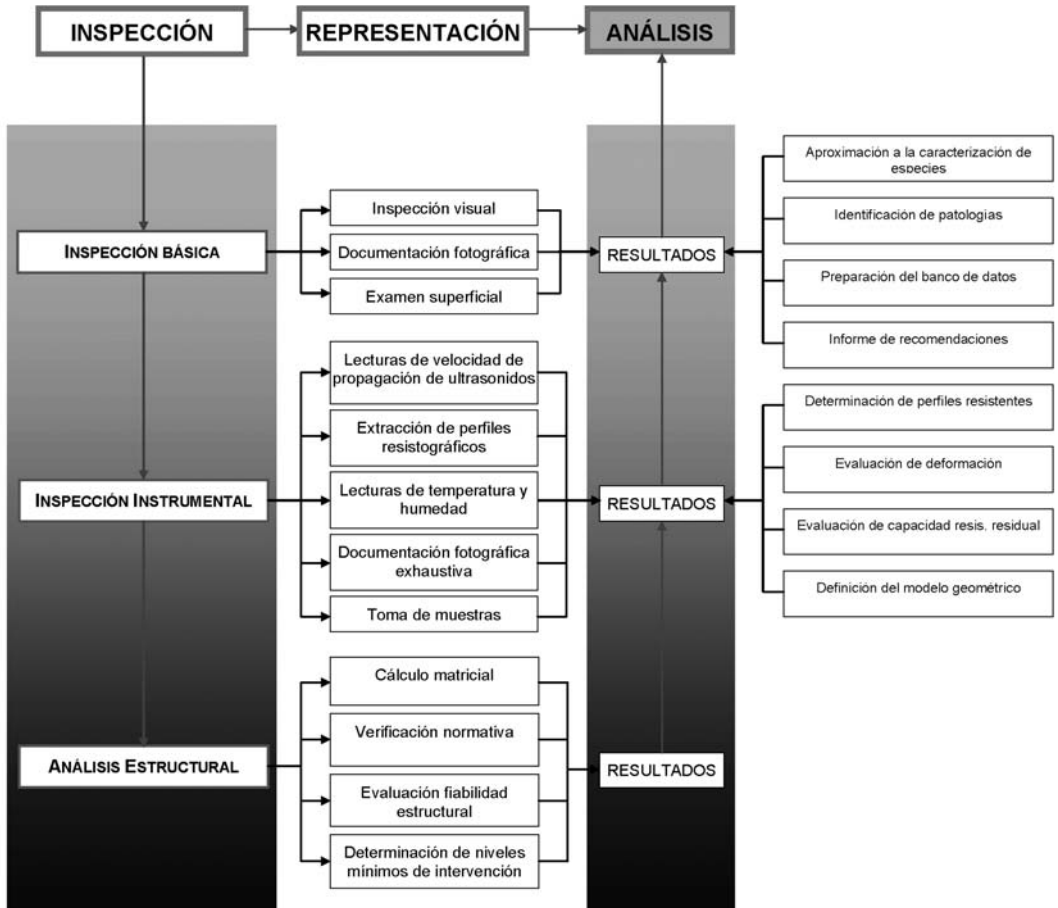


Figura 3
Niveles de inspección

CONCLUSIONES PROVISIONALES Y LINEAS DE TRABAJO

Las técnicas convencionales (reconocimiento visual, punzón, martillo de goma) han demostrado su competencia en un número relevante de los casos, pudiendo completarse con nuevas técnicas en desarrollo. Sistemas portátiles de iluminación halógena recargables han servido de apoyo insustituible en la mayoría de los casos. El xilohigrómetro se ha mostrado fundamental para la aproximación a las zonas lesionadas o potencialmente degradables. La velocidad de propagación de ultrasonidos precisa aún investigación y

puesta a punto para poder obtener datos fiables en maderas de gran escuadría, parcialmente degradada y puesta en obra. El resistógrafo, por el contrario, ha aportado utilidad para la inspección de zonas de madera no visibles pero cuyo estado reviste importancia, como los extremos empotrados en condiciones desfavorables, muy sensibles a la pérdida de capacidad resistente e, incluso, a una progresiva desintegración material. En esta línea trabajan actualmente investigadores del grupo, con resultados prometedores que esperamos aportar en un futuro próximo.

Se ha constatado que las normativas nacionales de referencia⁶ no son de aplicación directa a la compro-

bación de la seguridad estructural de estructuras existentes, por lo que precisarán necesariamente metodologías específicas de verificación de las prestaciones exigidas.

En los ensayos efectuados se ha comprobado la eficacia de la utilización de la «Función de defectos», incluida en la aplicación informática que se ha descrito más arriba, es útil para la predicción del valor de la resistencia a la rotura de las vigas de madera.

En cuanto a la ejemplificación experimental de la metodología descrita, ensayada en una serie pequeña pero representativa de quince edificios monumentales, ha arrojado las conclusiones que detalladamente ya han sido publicadas (Basterra et al. 2004) y de las que podríamos destacar las siguientes.

En general los accesos a las estructuras —cuando existen— resultan impracticables, deficientes o inseguros. Sin embargo la funcionalidad de un sistema de este tipo facilitaría la inspección y mantenimiento rutinario, con posibilidad de corrección de defectos en fases iniciales y costos asequibles para las ventajas potenciales esperables. En no pocos casos es imposible acceder a las zonas objeto de estudio, en ocasiones como consecuencia de desafortunadas intervenciones recientes.

Se han encontrado multitud de refuerzos inadecuados, incorporados de forma desorientada para corregir o evitar fallos locales. Estos elementos han modificado el esquema resistente, generando esfuerzos adicionales sobre elementos no previstos para ello. En algunos casos se han reducido sus valores absolutos, y las generosas escuadrías han podido tomarlos sin mayores dificultades. Sin embargo otros han producido o producirán a corto plazo daños, deformaciones y roturas.

En la muestra de monumentos analizados se ha encontrado una presencia mayoritaria de madera de coníferas, fundamentalmente pino de la especie *Pinus sylvestris* y, en menor medida, *Pinus pinaster*. Sus características morfológicas y biológicas apuntan a elementos de rechazo a la vista de la normativa de clasificación visual española, pensada para unas escuadrías y tamaños anómalos en edificios históricos. Otras normas internacionales (DIN 4.074–1989) pueden adaptarse mejor a la clasificación visual de las barras comunes en los sistemas estructurales de monumentos. Por lo tanto, como en este trabajo se ha expuesto, puede considerarse pendiente un método estándar para asignar unívocamente una clase resis-

te a piezas de madera de las características habituales en el patrimonio monumental, mediante técnicas no destructivas. Ello dificulta extraordinariamente fases posteriores de comprobación estructural, a pesar de estar codificadas de forma mucho más completa. La futura extensión del trabajo iniciado permitirá avanzar en la aplicación de los métodos probabilistas adoptados en la normativa más reciente y en la de aparición inminente, en los términos en que se han publicado los proyectos correspondientes. Por otra parte, el incremento del banco de datos anatómico podría manifestar interesantes relaciones entre el patrimonio monumental y la historia forestal de la región.

Las degradaciones más frecuentes son de origen biótico, principalmente por combinación en diferentes proporciones de hongos de pudrición e insectos xilófagos de ciclo larvario, fundamentalmente de la familia de los anóbidos (carcoma) y, de forma puntual, de cerambícidos. No se ha detectado la presencia de insectos de tipo social (termitas). Salvo casos excepcionales los ataques detectados son de intensidad media sobre la albura, no pasando de profundidades del orden de los 2 cm. Esto implica, por lo general y con notables excepciones, una pérdida de sección resistente poco importante para los tamaños de escuadría comunes en dichos edificios. No obstante, las cabezas de los elementos estructurales empotradas en los muros son puntos donde la consecuencia de estos daños puede suponer una pérdida parcial o completa de su capacidad de carga. No obstante, y a este respecto la modestia cuantitativa del muestreo manejado hasta ahora no permite sacar conclusiones taxativas, por lo que otra importante utilidad del desarrollo futuro del trabajo será el posible establecimiento de un mapa de riesgos biológicos para la madera presente en las estructuras históricas, que orientaría más adecuadamente la utilización de biocidas químicos, la prescripción de detalles constructivos estándar específicos o el aprovechamiento de las propiedades de durabilidad natural de las especies. La medida generalizada de actuación convencional suele consistir en un tratamiento químico con carácter curativo y preventivo, mediante la aplicación por pincelado o pulverizado de un producto con propiedades fungicidas e insecticidas. No obstante, la limitada eficacia de estos tratamientos superficiales y sus costes medioambientales asociados irán progresivamente limitando su aplicación. Con carácter gene-

ral debería, al menos, complementarse con inspecciones preventivas, sistemáticas y rutinarias, basadas en las informaciones que se vayan acumulando en la base de datos, que podría incluir sistemas de alerta y alarma programadas de forma automática o casi-automática.

En definitiva, este trabajo, en su versión final (fig. 2), intentará contribuir a establecer criterios y procesos de aplicación general para la inspección y diagnóstico de estructuras de madera, sistematizando la recogida y gestión de los resultados de su análisis en un proceso orientado al proyecto.

En un futuro, y como continuación natural de la investigación en curso, los objetivos podrían hacerse extensibles a la estructura en su conjunto, lo que conlleva el análisis del complejo comportamiento de los nudos y la interacción de las piezas a través de ellos y con otros sistemas y elementos estructurales y constructivos. La aplicación de métodos numéricos como el de los elementos finitos, por ejemplo, puede representar en un futuro próximo la posibilidad de sustituir determinado tipo de ensayos por su simulación virtual infográfica, con la consiguiente reducción de costes. Para ello la investigación ha de ir conociendo y poniendo a punto las variables fundamentales que permitan su implementación en este tipo de estructuras, como ya está siendo en estos momentos investigado por otros grupos a escala internacional.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto está financiado por el Ministerio de Fomento en el marco de las Acciones Estratégicas sobre «Mantenimiento y evaluación de estado de obras y edificios» del Área Sectorial «Construcción Civil y Conservación del Patrimonio Histórico Cultural» del «Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000–2003», con la colaboración de la Junta de Castilla y León y la empresa privada Técnicas para la Restauración y Construcciones, TRYCSA.

NOTAS

1. Evidentemente, esto es cierto supuesta la adecuada gestión de los bosques de origen del material, algo que,

con matices, puede considerarse aceptable al menos en el seno de la CE.

2. La norma UNE 56.544: 2003, actualmente vigente, clasifica como madera no estructural, o de rechazo, cualquier presencia de galerías de insectos xilófagos, condición excluyente, de principio, para casi cualquier elemento estructural de madera de cierta antigüedad.
3. Este aparato comercial consta de dos sondas que actúan una como emisor y otra como receptor, acopladas a una estación que recoge el tiempo (en μ s) de propagación de la onda emitida a 30 kHz, al atravesar la madera. Con el fin de conseguir un contacto íntimo con la madera, las sondas tienen una forma cónica y se practica un orificio de 5 mm de diámetro y 1 cm de profundidad en las zonas donde se introducen los extremos de los palpadores.
4. Este amplio estudio, realizado en los años 80 y dirigido por el Dr. Enrique Nuere, estuvo orientado a la recopilación de información para un futuro inventario de estructuras de madera de interés en el Patrimonio. Con su autorización, en este trabajo se ha importado la información correspondiente a Castilla y León estructurada en una base de datos y soportes digitales obsoletos, preparando la metodología para la futura extensión al resto de los datos almacenados, en su caso. El archivo original pertenece y está depositado en el IPHE y el contenido importado se reproduce en 12+3 sin modificación alguna.
5. La metodología ejemplificada en 12+3 conllevó la creación de más 1.800 archivos (planos, memorias, fotografías y secuencias de video digital, documentos previos escaneados, etc.), distribuidos en 82 carpetas.
6. Códigos experimentales europeos —Eurocódigo 5— y Código Técnico de la Edificación, de próxima vigencia en España.

LISTA DE REFERENCIAS

- Acuña L.; Casado, M.; Basterra, A. et al. 2004. Evaluación resistente no destructiva de madera de *Pinus pinaster* Ait. de las regiones de procedencia «Gredos» y «Bureba-sierra de Oña». En *Iº Congreso ibérico a madeira na construção*. Guimarães-Braga: Paulo Cruz (ed.). ISBN 972-8692-10-2.
- Acuña L.; Llorente A.; M. Casado y C. Herrera. 2001. *Clasificación de la madera de Pinus sylvestris L. Mediante ensayos no destructivos*. III Congreso Forestal Español. Granada.
- Argüelles, R.; Arriaga, F. [1996] 2000. *Estructuras de madera. Diseño y cálculo*. AITIM, Madrid.
- Arriaga, F.; Peraza, F.; Esteban, M.; et al. 2002. *Intervención en estructuras de madera*. AITIM, Madrid.

- Arriaga, F.; García, L.; Gebremedhin, K. G.; Peraza, F. 1992. Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera. *Revista AITIM* n° 161: 51–62.
- Basterra, A.; Acuña L.; Casado, M.; et al. 2004. Evaluación preliminar de la estructura de madera de quince (12+3) monumentos declarados B.I.C. en Castilla-León. En *Iº Congresso ibérico a madeira na construção*. Guimarães-Braga: Paulo Cruz (ed.). ISBN 972–8692–10–2.
- Bertolini, C.; Brunetti, M.; Cavallero, P.; Macchioni, N. 1998. A non destructive diagnostic method on ancient timber structures: some practical application examples. In *5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland*, vol. 1, 13–37.
- Bonamini, G. 1996. Restoring timber structures: inspection and evaluation. In *Timber engineering Step 2*. Centrum Hout, Holanda.
- Bonamini, G.; Ceccotti, A.; Montini, E. 1992. Indagini non distruttive per la verifica strutturale di legno antico. Dipartimento di Ingegneria Civile. Università di Firenze. *Legno materiale per l'ingegneria civile. Raccolta Monografica. Sezione strutture n° 16/90*, 118 p.
- Ceccotti, A.; Togni, M. 1996. NDT on ancient timber beams: assesment of strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods. In *10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne*.
- Kuklík, P.; Dolejš, J. 1998. Nondestructive evaluation of structural timber. In *5th World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland*, vol. 1, 692–699.
- Laffarga, J. 1992. Aplicación de la programación de ondas ultrasónicas para el estudio de las maderas. *Revista de Edificación RE*. Universidad de Navarra, 11: 21–28.
- Llorente, A.; Acuña L.; Casado, M.; et al. 2004. Aplicación informática para la clasificación visual de la madera. En *Iº Congresso ibérico a madeira na construção*. Guimarães-Braga: Paulo Cruz (ed.). ISBN 972–8692–10–2.
- Rinn, F., 1994. Resistographic inspection of building timber. In *Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast, Australia*, vol. 2, 469–478.
- Rodríguez, C.; Rubio, P. 2000. *Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos*. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla.

