

ENCONTRO SOBRE A MADEIRA E SUAS APLICAÇÕES NOBRES

BEM UTILIZAR A MADEIRA

PROGRAMA

08h30 | 08h55 .REGISTO, ENTREGA DE DOCUMENTAÇÃO

08h55 .ABERTURA DOS TRABALHOS

SESSÃO DA MANHÃ - MODERADOR AIMMP

09h00 .A SECAGEM E AS RELAÇÕES DA ÁGUA COM A MADEIRA - José António dos Santos - INETI

09h30 .PRODUTOS DERIVADOS DA MADEIRA – POTENCIALIDADES E PRINCIPAIS APLICAÇÕES – Pedro Figueira - SONAE

10h00 .DEBATE DO 1º PAINEL

10h30 .PAUSA PARA CAFÉ

11h00 .MADEIRA EM ESTRUTURAS. PROGRAMAS DE CÁLCULO E NORMALIZAÇÃO - Marques Pinho – U.M.

11h30 .EURO CÓDIGO 5. MARCAÇÃO CE DE PRODUTOS DE MADEIRA – Pontífice Sousa - LNEC

12h00 .PROTECÇÃO DA MADEIRA CONTRA O FOGO - Lourenço Ferreira - CONSULFOGO

12h30 .DEBATE DO 2º PAINEL

13h00 .ALMOÇO E CAFÉ

SESSÃO DA TARDE - MODERADOR Jaime F. Silva - U.M.

14h30 .A MADEIRA E A ARQUITECTURA – Carlos Fonseca

15h00 .RECUPERAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM MADEIRA - João Appleton – A2P

15h30 .POSSIBILIDADES E APLICAÇÕES DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS – Paulo Lourenço – U.M.

16h00 .DEBATE DO 3º PAINEL

16h30 .PAUSA PARA CAFÉ

17h00 .APRESENTAÇÃO DAS EMPRESAS PATROCINADORAS - Armindo Mirante

17h30 .SESSÃO DE ENCERRAMENTO - Carlos Bianchi de Aguiar - CEO Sonae Indústria.

Organização



Universidade do Minho



Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

Patrocínio



damadeira

Timbermade



TECNIWOOD



Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos

Artur Feio¹, Paulo B. Lourenço²

¹Doutorando, ²Professor Associado

Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, P-4800-058 Guimarães
Tel: 253 510 200, Fax: 253 510 217; E-mail: ¹af@civil.uminho.pt, ²pbl@civil.uminho.pt

A decisão de proceder à reabilitação de construções existentes, em alternativa à substituição por estruturas totalmente novas, é frequentemente ditada por razões económicas. Em certas circunstâncias, porém, é a necessidade de preservar o património histórico ou cultural que impõe a recuperação da construção degradada, situação que geralmente determina o tipo de intervenção a realizar.

No caso de estruturas ou elementos de madeira, que poderão apresentar patologias, a identificação dos problemas, a avaliação da sua gravidade e a definição da metodologia a seguir para a reabilitação e/ou reforço dos elementos afectados pode revelar alguma especificidade, face à natureza deste material, localização dos elementos nas estruturas, função estrutural, etc. Deste modo, assume um papel relevante a identificação e o conhecimento das características da espécie de madeira usada, a avaliação da qualidade dos diversos elementos presentes, em termos de nós e de outros defeitos que exibam, assim como a avaliação da secção residual resistente, etc. Impõe-se ainda um especial cuidado no dimensionamento estrutural, em que se deve prestar particular atenção às diferentes propriedades físicas e mecânicas da madeira nas três direcções principais (longitudinal, tangencial, radial).

A interpretação correcta dos sinais apresentados por uma estrutura de madeira só pode ser feita à luz da compreensão de todos os fenómenos que afectam este material, de forma a distinguir os efeitos reversíveis dos irreversíveis, e aqueles de exclusiva importância estética dos que podem indicar degradação efectiva da segurança da construção.

INTRODUÇÃO

Os elementos estruturais de madeira estão integrados em estruturas geralmente complexas e submetidas a acções em serviço. Apresentam-se a seguir os critérios e os métodos que permitem avaliar a secção resistente e as principais características tecnológicas e mecânicas destes elementos estruturais. O objectivo principal é fornecer a todos os técnicos envolvidos no projecto de reabilitação estrutural, dados técnicos de suporte e orientação para:

- a verificação da segurança estrutural;
- o projecto de eventuais soluções de conservação ou reforço.

Os campos desta avaliação podem ser aplicados a edifícios comuns bem como a edifícios de interesse histórico ou artístico. Estes últimos podem apresentar problemas particulares e dificuldades acrescidas, seja pela realização da própria avaliação (necessidade de não

danificar o aspecto dos elementos ou de eventuais decorações), seja pelas sucessivas intervenções do passado.

A inspecção e avaliação das características estruturais dos elementos *in-situ* formam apenas uma pequena, ainda que importante, parte do processo de reabilitação e conservação da estrutura. Para a eficácia e sucesso do processo de diagnóstico e inspecção das estruturas, será necessário que resulte bem coordenada e conduzida a actividade pluridisciplinar ao cargo de vários técnicos especializados.

Em geral, o diagnóstico de um elemento de madeira pertencente a uma estrutura inclui os seguintes aspectos:

- a avaliação da qualidade da madeira (espécie lenhosa e principais características do elemento, defeitos e anomalias presentes no tronco originário);
- a avaliação de eventuais alterações e danos (de agentes biológicos ou de outras causas) no elemento, depois de colocado em obra;
- a determinação da secção resistente actual;
- a determinação de características físico-mecânicas relevantes, tais como a humidade, massa volúmica e módulo de elasticidade;
- a localização das zonas atacadas e os problemas resultantes das acções a que a estrutura está (ou esteve) sujeita;
- a realização de ensaios, sobretudo com recurso a técnicas não-destrutivas.

REQUISITOS GERAIS

Acesso à estrutura

O conjunto de ensaios, a observação e o contacto físico com os elementos de madeira são absolutamente necessários, o que implica meios de acesso à estrutura. Deste modo nas mais diversas inspecções realizadas em estruturas de madeira são necessárias estações elevatórias, cestos, andaimes ou outros, que devem ser sempre colocadas e utilizadas em conformidade com as normas de segurança e prevenção de acidentes.

Em geral, a inacessibilidade resulta não só da distância física dos elementos em estudo, mas também da presença de elementos construtivos que impossibilitam a visão e o contacto com os elementos a examinar: por exemplo, as faces superiores das vigas de um pavimento ou os topos das vigas inseridas nas paredes.

Limpeza das superfícies de madeira

Nenhuma inspecção pode ser realizada com os elementos em estudo cobertos por camadas de sujidade, pó, detritos animais e outros, que devem ser removidos. Obviamente que, no caso dos elementos que possuam decorações importantes, esta fase deve ser programada atempadamente. A limpeza (ou limpeza preliminar), além de permitir a remoção do material mais áspero e grosseiro, deve sobretudo permitir

examinar a superfície externa dos elementos, com todas as características macroscópicas, como a cor, os nós, as fissuras, etc.

A limpeza manual deve ser manual, realizada com uma escova de fibra vegetal ou sintética. O recurso a um aspirador industrial para acompanhar a escovagem é recomendado.

Iluminação

Devem ser utilizadas fontes adequadas de iluminação artificial sempre que as fontes de luz natural se revelem insuficientes, o que acontece com frequência. Idealmente deverá prever-se um sistema de iluminação geral e difusa, com poucas sombras, acompanhada de focos de iluminação em zonas circunscritas (por exemplo, lanternas eléctricas portáteis). Podem ainda ser utilizadas lanternas convencionais de espeleólogo, acompanhadas do respectivo capacete de protecção, que permitem uma boa iluminação enquadrada com a zona do campo de visão do operador, deixando livre ambas as mãos.

Elementos gráficos, topográficos e outros elementos de desenho

A situação ideal de trabalho seria a existência de um levantamento geométrico da estrutura, de tal modo que seja possível a concentração de todo o trabalho na observação das características qualitativas e geométricas dos elementos de madeira em estudo, permitindo propor hipóteses sobre a definição de eventuais causas da degradação.

INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO

A inspecção visual é o principal método de inspecção e diagnóstico para estruturas de madeira, consistindo em examinar directamente, e a uma distância relativamente pequena, o elemento em causa, ao longo do seu comprimento, observando e registando todos os sinais indicadores de anomalias, defeitos, ataques, coadjuvada com instrumentos simples de análise (faca do mato, formão, etc.) em zonas não directamente visíveis. Para uma inspecção visual eficaz deve-se melhorar ao máximo as condições preliminares de acesso, limpeza, iluminação e disponibilização de elementos gráficos.

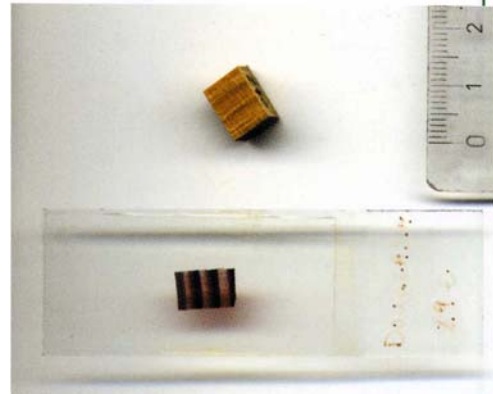
Identificação da espécie lenhosa

Qualquer característica de um elemento de madeira depende da espécie lenhosa a que pertence. Deste modo é indispensável identificar a espécie a que pertence determinado elemento, recordando-se que não são raros os casos em que numa estrutura coexistem diferentes espécies. Em determinadas tipologias construtivas é comum utilizar-se espécies lenhosas tendo em linha de conta o tipo de esforços que solicitam os elementos: um caso que se encontra frequentemente nas construções antigas monumentais é a utilização de Folhosas de elevada massa volúmica (Castanho, Carvalho, Olmo) nas linhas das asnas de cobertura (fortemente solicitadas à compressão transversal) enquanto que as cordas e pendurais (solicitados sobretudo na direcção longitudinal) são realizados em madeira de Abeto, com menor resistência e massa volúmica do que as espécies anteriormente mencionadas.

A identificação da espécie lenhosa pode ser uma tarefa complexa, exigindo conhecimento anatómico da madeira e das técnicas de reconhecimento macroscópico e microscópico (estas últimas só possíveis através da formação específica e/ou da prática laboratorial).



(a)



(b)

Figura 1 – (a) diversas espécies lenhosas encontradas num nó de uma asna: a corda e o pilar foram executados em madeira de Folhosas (Carvalho) enquanto que a linha foi realizada em madeira de Resinosas. Salienta-se a inclinação helicoidal do fio do pilar, e (b) amostra retirada de um cubo de madeira (em cima, 1 cm de largura) pronta para ser analisada microscopicamente.

Avaliação dos defeitos e características naturais da madeira

Normalmente a presença de defeitos pode ser revelada através da observação cuidada da superfície externa dos elementos, e se necessário com o eventual auxílio de uma lâmina afiada. A superfície dos elementos deve permanecer limpa e sempre que possível lisa, para que se possa realizar a identificação de características tais como: a inclinação do fio, a variação de cor entre cerne e borne, a alteração cromática das superfícies devido ao ataque de fungos, as galerias de insectos, etc.

Presença de humidade

Os ciclos de diminuição e aumento de humidade, com consequentes retracções e expansões, são responsáveis por tensões internas no material associadas a gradientes de humidade entre a superfície e o interior dos elementos, resultando na abertura progressiva de fendas de secagem e eventualmente no desenvolvimento de distorções diversas.

O efeito das fendas de secagem na resistência de estruturas de madeira varia, obviamente, com a sua extensão, profundidade e com a zona da peça e da secção onde ocorrem. Considera-se que estas fendas reduzem principalmente a resistência ao corte dos elementos, podendo igualmente diminuir a capacidade resistente das ligações. Independentemente do eventual desenvolvimento de fendas, os ciclos de retracção e

expansão associados a variações de humidade conduzem em geral a uma perda de rigidez das ligações mecânicas, que se traduz no aumento de flexibilidade e de deformações de todo o conjunto estrutural.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2 – (a,b) cárie localizada em elementos de madeira devido a uma infiltração localizada de água, (c) linha com fenda de secagem extensa e que indica direcção inclinada do fio, e (d) exemplo de apoio bem executado e com boa ventilação de todas as faces dos elementos.

Presença de fungos

Podem distinguir-se dois grupos distintos de fungos:

- Fungos cromogéneos – desenvolvem-se em madeira com teor em água superior a 25-30%, provocando colorações em tons de azul e outras. Não originam degradação significativa de resistência da madeira, visto alimentarem-se apenas de substâncias contidas no interior das células lenhosas;

- Fungos de podridão (ou lenhívoros) – alimentam-se directamente da parede celular, destruindo-a. As podridões são facilmente identificáveis pela perda de peso e de resistência da madeira, acompanhada por mudanças de coloração e aspecto. Também aqui o factor humidade é fundamental, pois o ataque destes fungos só ocorre para valores desta acima de 20%. É de referir que para madeira total e permanentemente imersa em água, o risco de ataque por estes fungos não existe, exactamente porque a madeira se encontra saturada de água.

Os elevados valores de humidade na madeira são, em geral, o resultado da infiltração de águas das chuvas, formação de condensações, presença de água por capilaridade, perdas nas tubagens, insuficiente ventilação das áreas de construção, etc.

O controlo da humidade efectiva actual da estrutura, pode ser realizado de um modo rápido e preciso mediante o uso de um medidor de humidade da madeira (higrómetro de madeira), indicado para a espécie em causa. A identificação de zonas potencialmente alvos de ataque, ou que no passado já tenham sido atacadas por fungos, pode ser efectuada com base no seguinte duplo critério:

- Zonas críticas – em muitos casos as zonas críticas correspondem às situações de detalhes construtivos que favorecem a acumulação de humidade. Um exemplo típico é o dos apoios de uma viga de pavimento numa parede resistente exterior, que favorece fenómenos como o da infiltração de água das chuvas e/ou formação e acumulação de condensações por ventilação insuficiente;
- Alteração cromática – manchas, “sujidades” ou outras alterações cromáticas da madeira, se persistirem, mesmo depois de uma limpeza superficial dos elementos, são provavelmente indícios de um ataque no passado.

Ataque de insectos xilófagos

No que respeita a insectos xilófagos, é necessário distinguir à partida os seguintes:

- Insectos de ciclo larvar (carunchos) – atacam preferencialmente a madeira seca e são as larvas que provocam a sua destruição, abrindo galerias na madeira conforme se alimentam. Após a metamorfose, o insecto no estado adulto abandona a madeira através do orifício de saída, tem existência curta, actuando apenas no sentido da reprodução e dispersão da espécie, dando-se a infestação de outras madeiras pela deposição de ovos no seu interior;
- Insectos sociais (térmitas) – são insectos sociais que vivem em geral no solo, em colónias. Atacam madeira preferencialmente húmida e em contacto com o solo, utilizando-a como alimento e como abrigo.

A dimensão e a forma dos orifícios, a presença e o tipo de serrim e a presença de espécies simbióticas, são características importantes que permitem identificar o tipo de ataque, a sua evolução e perigosidade. Se com os fungos é fácil associar a actividade do ataque à humidade da madeira (madeira húmida ↔ ataque activo; madeira seca ↔ ataque inactivo), com os insectos torna-se tarefa complicada verificar se o ataque está activo ou extinto. Um indicador útil pode ser baseado em factores indicativos da presença de insectos nas várias fases do ciclo larvar.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3 – Ataque biológico: (a) viga principal de apoio e ripa fortemente degradadas, (b) deficiente estado de conservação da madeira de uma viga com o apoio húmido e não ventilado, (c) uma excepção à regra: a alteração cromática devido à presença na madeira de objecto metálico (troncos metralhados), e (d) presença de fungos numa viga de madeira.



Figura 4 – Furos provocados por insectos xilófagos.

INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO: RECURSO A TÉCNICAS DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVAS (NDT)

Feito o diagnóstico, importa avaliar a extensão da zona afectada e estimar o nível de dano, no sentido de definir a estratégia de reabilitação a adoptar. É oportuno ter em linha de conta que as técnicas e ensaios que utilizam equipamentos mais ou menos sofisticados podem ser utilizadas em função de dois objectivos distintos:

- defeitos ocultos – detecção de defeitos, alterações ou danos na madeira, em partes não visíveis ou inacessíveis da estrutura, utilizando-se os equipamentos como extensão “tecnológica” dos cinco sentidos do operador;
- determinação das características físico-mecânicas – determinação não destrutiva de grandezas físico-mecânicas correlacionadas com a resistência e/ou deformabilidade do elemento em estudo, com o objectivo de atribuir um nível de prestação tão próxima da realidade quanto possível, nos casos já citados, em que a inspecção visual se revela insuficiente.

Deste modo existe um conjunto de técnicas, umas expeditas outras mais complexas, que permite em muitos casos avaliar a extensão do ataque: avaliação da resistência à penetração de a metálica, apreciação do som obtido por percussão de martelo sobre os elementos, resistógrafo, esclerómetro para madeiras (Pilodyn), raios-X, análise termográfica da superfície, análise da velocidade de propagação e a amplitude da onda sonora ou ultra-sónica, etc. No entanto, é de realçar que a eficiência e eficácia deste tipo de ensaios podem ser aumentadas se forem usados conjuntamente ensaios laboratoriais destrutivos para estudar a variabilidade das características mecânicas dos elementos de madeira (Uzielli, 1992; Cruz *et al.*, 1994).

Os ensaios não destrutivos (NDT) podem ser divididos em 2 grandes grupos: métodos globais de ensaio (GTM) e métodos locais de ensaio (LTM). Os primeiros incluem os ultra-sons e outros métodos de propagação de ondas. Os últimos são os que mais directamente auxiliam a inspecção visual, nomeadamente o Pilodyn (Görlacher, 1987) e o resistógrafo (Rinn, 1994).

Usualmente os LTM estão relacionados com a avaliação da secção residual resistente através da análise de variações da densidade, geralmente associadas a perdas de massa que podem estar relacionadas com degradação biológica. Outros NDT podem ser aplicados a estruturas de madeira: termografia (Tanaka, 2000; Berglind & Dillenz, 2003), ondas sónicas (Ross *et al.*, 1999; Divós, 2000), raios-X (Bucur *et al.*, 1997, Bergsten *et al.*, 2001), método dos isótopos (Madsen, 1994; Feinberg, 2005) e uso de endoscópios. O desenvolvimento destes e outros métodos está em pleno progresso, no entanto e tendo em conta questões de segurança, custos envolvidos, questões técnicas, etc., a sua utilização na avaliação de estruturas de madeira tem sido limitada.

A carotagem ou extracção de carotes tem também sido utilizada na análise dendrocronológica de estruturas e elementos de madeira, sobretudo na determinação da densidade (Bernabei, 2005; Romagnoli *et al.*, 2005). Esta técnica é também usada na determinação da resistência característica dos carotes, que será *à posteriori* comparada com a de provetes standard. Teoricamente, a relação entre ambas as resistências deve ser próxima da unidade, sendo que na prática verifica-se que esta relação é bem menor que 1

(\approx 70-75%), devido a questões relativas com o condicionamento e confinamento dos carotes.

MÉTODOS GLOBAIS DE ENSAIO (GTM)

Densidade – a densidade é um critério de classificação da madeira, e as correlações entre as propriedades mecânicas e a densidade foram relatadas por diversos autores (Bodig & Jayne, 1993; Giordano, 1999) para diferentes espécies, ainda que as correlações encontradas sejam apenas moderadas.

A determinação da densidade pode ser realizada laboratorialmente, em pequenos provetes extraídos dos elementos, ou pode ser realizada *in situ* usando métodos não destrutivos, que são condicionados por vários factores: em primeiro lugar, o custo em termos de mão-de-obra e de equipamento porque envolvem a extracção de carotes, e em segundo lugar porque, em muitas situações, a determinação da densidade tem que ser restringida a poucas amostras devido aos testes “semi-destrutivos” usados para obter as amostras, afectando a representatividade da amostra.

Raios-X – um dos primeiros métodos a ser estudado e aplicado, é baseado no facto de que a penetração deste tipo de radiação depende, entre outros factores, da densidade e espessura do material. O ataque por agentes biológicos, ao provocar perda de massa, origina zonas de menor densidade, o que é revelado pelos raios-X. No caso do ataque permanecer activo, este método poderá permitir a identificação do agente em causa.

Ultra-sons – acompanhada de um exame visual prévio, esta técnica pode ser uma mais valia no processo de diagnóstico, pois pode fornecer informações sobre as condições internas dos elementos de madeira e sobre a sua capacidade resistente residual (Sandoz, 1989; Ross *et al.*, 1997; Ross *et al.*, 1998; Zombori, 2000). Estes estudos não mostram uma relação efectiva entre o método ultra-sónico e a resistência residual dos elementos de madeira, devido ao comprimento de onda que é geralmente superior às dimensões dos defeitos locais (nós, inclinação do fio, etc.). No entanto, este método pode ser usado, com uma precisão extraordinária, para determinar defeitos locais e podem permitir uma boa interpretação das propriedades locais dos elementos *in situ*.

É sabido que a velocidade dos ultra-sons pode ser directamente relacionada com as propriedades elásticas da madeira. A velocidade de propagação das ondas longitudinais nos meios elásticos depende essencialmente da sua rigidez e densidade, sendo possível medir o tempo de propagação de um conjunto de ondas elásticas no sentido axial dos elementos de madeira ou nos sentidos perpendiculares.

A avaliação do processo de transmissão e propagação das ondas ultra-sónicas é uma tarefa difícil. Uma das vantagens mais importantes deste método é a afectação da onda exclusivamente pelo material entre os dois receptores (que permitem uma avaliação relativamente directa) e um dos problemas mais complexos é a interpretação dos componentes mais lentos da onda. Para elementos prismáticos, homogéneos e isotrópicos é válida a relação:

$$E_{din} = V^2 \cdot \rho \quad (1)$$

onde E_{din} representa o módulo de elasticidade elasto(dinâmico) (MPa); V é a velocidade de propagação da onda longitudinal (m/s) e ρ é a densidade dos provetes (kg/m³). Na prática, a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático é particularmente relevante ($E_{din} \geq 0.90 \cdot E_{sta}$). Esta relação pode ser explicada pelo comportamento visco-elástico dos materiais. Geralmente adapta-se uma relação linear:

$$E_{sta} = a \times E_{din} + b \quad (2)$$

onde a, b são constantes do material.

A propagação das ondas elásticas é afectada pelas propriedades elásticas locais dos materiais. Assim, utilizando-se a velocidade de propagação das ondas elásticas, juntamente com a densidade do material, calculam-se os diferentes módulos de elasticidade do material. Avanços associados à avaliação de ligações e de sistemas estruturais, sugerem que este método pode ser utilizado na avaliação de estruturas de madeira (ver Figura 5).

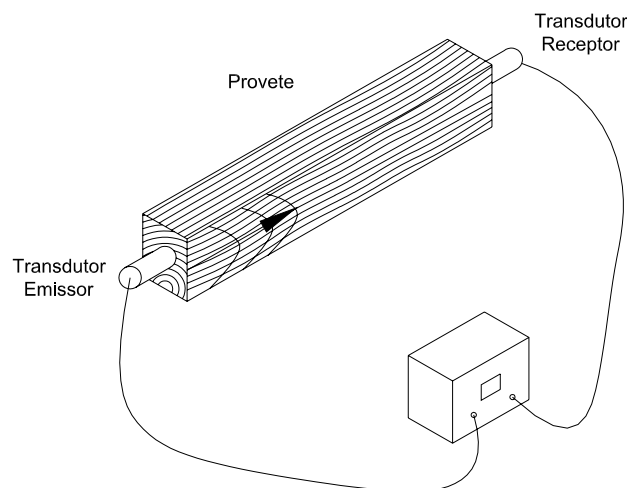


Figura 5 – Emissão paralela ao fio.

As baixas frequências (20kHz-500kHz) são usadas frequentemente na madeira por causa da atenuação elevada da onda, i.e., a velocidade de propagação da onda ultra sónica que viaja através de um sólido é dependente de suas propriedades elásticas. Em materiais muito dispersivos como a madeira, a onda ao viajar dentro do material sofre uma série de reflexões que originam ondas novas com polarizações diferentes e cada uma com uma

velocidade característica. A maioria dos equipamentos ultra sônicos disponíveis considera somente a onda mais rápida a chegar. Esta onda viaja pelas zonas de qualidade mais elevada contornando as zonas mais fracas (zonas com nós, deterioração, etc.) não permitindo a caracterização local desse elemento de madeira, ver Figura 6.

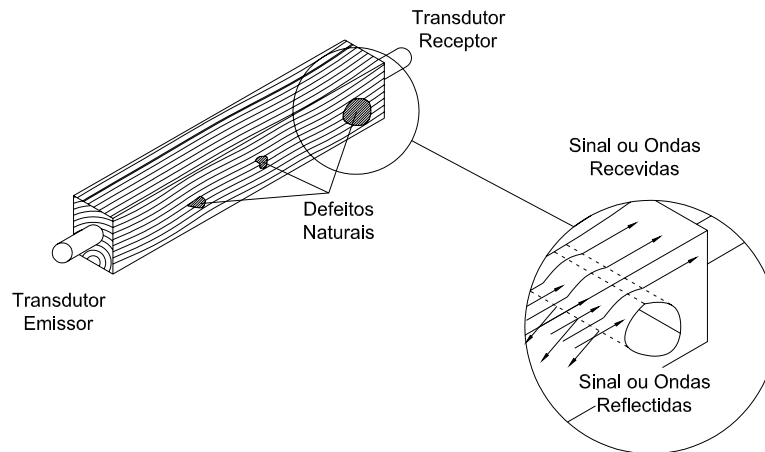


Figura 6 – Influência dos defeitos na emissão ultra sônica.

Se o sinal é desviado, o tempo de propagação aumenta. Tendo em conta a sua heterogeneidade, anisotropia e padrões naturais de variabilidade (inter e intra espécie), é possível correlacionar a velocidade de propagação com as propriedades físicas e mecânicas da madeira: as velocidades elevadas estão associadas com resistências mais elevadas e com a ausência de defeitos materiais.

O acoplamento dos transdutores à superfície dos provetes deve ser cuidado: a presença do ar é um inibidor da velocidade da transmissão, pelo que é necessário que os transdutores estejam acoplados adequadamente às superfícies dos provetes durante os ensaios. O acoplamento entre as superfícies pode ser garantido por lubrificantes e pressão apropriados.

Este método é também influenciado por factores ambientais e características anatómicas da madeira. Por exemplo, a velocidade de propagação aumenta com o teor de humidade. Devido à elevada higroscopicidade da madeira, o teor de humidade representa um papel importante na análise das propriedades mecânicas e físicas da madeira. A velocidade de propagação é três vezes mais rápida no sentido longitudinal do que no sentido transversal, permitindo detectar defeitos que envolvem mudanças na inclinação do fio, como por exemplo os nós. A velocidade de propagação na madeira deteriorada é mais lenta por causa das alterações anatómicas, que podem incluir furos e perda de massa provocados por agentes biológicos.

De entre todos os NDT, a técnica ultra sônica é das que possuem maiores possibilidades devido à sua rápida execução, eficiência, precisão, simplicidade de utilização e transporte. No entanto, a técnica requer um operador experiente e um acoplamento eficaz.

MÉTODOS LOCAIS DE ENSAIO (LTM)

Resistógrafo – o resistógrafo é um aparelho com acção semelhante a um berbequim, com uma agulha de cerca de $\phi_{máx.} = 3\text{mm}$, determinando a resistência oferecida pela madeira à rotação e à progressiva penetração da agulha, ver Figura 7. O perfil da peça assim obtido, permite detectar zonas da madeira com variações anormais de densidade devidas a descontinuidades físicas, tais como fendas, ou como resultado de degradação biológica, por exemplo pela acção de fungos. Saliente-se que a utilização deste aparelho é considerada não destrutiva, na medida em que somente provoca furos de pequeno diâmetro, facilmente tapados com uma cola do epoxídica e não reduzindo a resistência dos elementos de madeira inspeccionados. A geometria da broca elimina o efeito de atrito: o diâmetro do eixo é de 1-1.5mm e o comprimento máximo é de 1500mm. A resistência da broca concentra-se na ponta porque a sua largura é o dobro da largura do eixo (2 a 3mm). O dispositivo contém dois motores: um para a alimentação constante e um para a rotação da agulha.

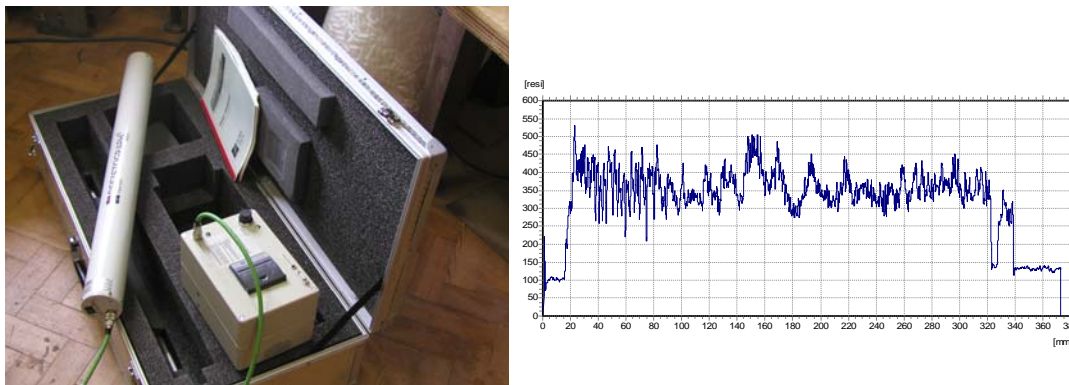


Figura 7 – Resistógrafo e gráfico obtida num elemento madeira.

Rinn *et al.* (1996) relataram que os perfis resistográficos se correlacionam com a densidade da madeira definida através do perfil densidade do ensaio com raios-X. Por outro lado, este método fornece informação sobre a conservação dos elementos estruturais e (indirectamente) sobre a sua capacidade estrutural, tal como a secção transversal (quando não é possível medir directamente as dimensões), a secção transversal residual (a madeira deteriorada está associada a baixa resistência à penetração), o padrão de distribuição dos anéis de crescimento, a presença de defeitos naturais e a madeira deteriorada não visível externamente (importante em detalhes construtivos tais como os topos das vigas). Algumas vantagens do método são a fácil interpretação gráfica, a simplicidade de armazenar dados, de transportar o equipamento e de executar os testes.

Alguns estudos revelam limitações deste método, nomeadamente relacionados com as dificuldades em realizar ensaios devido à posição do elemento (dificuldade em posicionar o dispositivo perpendicular ao elemento), o próprio procedimento de teste (requer o uso de ambas as mãos), as medidas somente de características locais dos elementos e a natureza invasiva da técnica. Desta forma, o método resistográfico pode melhor ser usado

conjuntamente com métodos e ensaios NDT que fornecem uma avaliação qualitativa. Salienta-se que o teor de humidade da madeira tem uma grande influência nos valores de densidade, tendo Machado & Cruz (1997) observado que a resistência à penetração diminui com o aumento do teor de humidade.

Alguns autores (Isik & Li, 2004) relatam uma correlação fraca entre a resistência à micro-perfuração e a densidade da madeira ($r^2 \approx 0.21-0.69$), mostrando que este método ainda não está suficientemente desenvolvido para o uso na avaliação quantitativa *in situ*.

Pilodyn – este método foi proposto originalmente para determinar a densidade e a resistência de elementos de madeira degradados e sãos. Diversos tipos de defeitos podem ser detectados rápida e objectivamente através de um simples ensaio não destrutivo, utilizando este equipamento, associando a redução de resistência à penetração da ponteira. Em casos concretos como a análise da resistência residual de postes de electricidade em madeira, este pode ser um ensaio vital. Outras situações em que este aparelho pode ser utilizado é na determinação prévia do aparecimento de doenças através de uma medição periódica, estabelecimento de parâmetros de produtividade no que diz respeito à densidade da madeira entre diversas espécies ou para estabelecer classes e categorias de resistência entre diversos tipos de madeira. O efeito do teste é tão ligeiro que os elementos ou provetes ensaiados continuam sem danos relevantes, sendo o teste considerado não destrutivo. No entanto, somente a dureza ou a resistência superficial são medidas, o que representa uma desvantagem.

Existem diversas versões deste dispositivo que podem ser usadas em inspecções: o Pilodyn 6J é o mais comum, ver Figura 8, enquanto que o Pilodyn 12J e o Pilodyn 18J, que possuem uma mola com uma rigidez mais elevada, e o Pilodyn 4JR permite um tiro repetido. Estes dispositivos possuem um pino metálico com 2.5mm de diâmetro, que penetra na madeira através da libertação de uma mola que transforme a energia potencial elástica na energia de impacto. Este impacto dinâmico é responsável pela penetração do pino na superfície dos provetes, permitindo registar a profundidade penetrada.

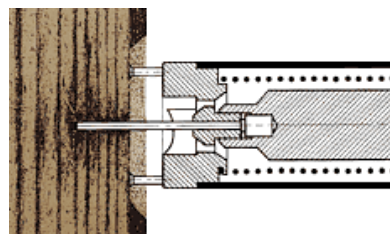


Figura 8 – Pilodyn 6J.

Um campo de aplicação possível para o Pilodyn é a classificação de toros em classes de densidade, fazendo com que os preços dos toros sejam baseados não somente no tamanho dos toros e na classificação visual mas também em características da densidade. Outras aplicações passam pelo controle genético das espécies, existindo porém a necessidade de monitorizar e acompanhar experiências por períodos longos, de forma a confirmar os resultados.

Görlacher (1987) obteve bons coeficientes de correlação ($r^2 = 0.74-0.92$) entre a densidade e a profundidade de penetração do Pilodyn 6J, tendo em conta que o número de medições para cada provete deve ser elevada (mínimo de 5 medições). Foram também realizados estudos para definir correlações com as propriedades mecânicas. Existem relações entre a resistência à penetração superficial e a resistência à flexão, mas mais estudos são necessários para corroborar estes resultados (Togni, 1995). Mais uma vez, é de notar que a profundidade de penetração é significativamente afectada pela humidade.

CASOS DE ESTUDO DE INSPECÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

Apresentam-se de seguida alguns casos de estudo, ilustrando situações de diagnóstico de algumas estruturas de madeira no património arquitectónico nacional.

Paço dos Duques – Guimarães

O Paço dos Duques foi mandado construir no primeiro quartel do século XV, provavelmente entre 1420 e 1422, por D. Afonso, Conde de Barcelos - filho bastardo de D. João I e futuro Duque de Bragança. O século XVI marcou o início do abandono progressivo e consequente ruína, processo que se agravou durante o século XIX, quando o Paço serviu de pedreira para as populações vizinhas. A partir de 1937 procedeu-se à reedificação arquitectónica, possível a partir da análise da estrutura e da reformulação de numerosos elementos, que lhe conferiram o carácter de Paço europeu que hoje detém.

Para avaliar o estado de conservação das madeiras das coberturas, realizou-se uma inspecção. Foram efectuadas análises qualitativas do estado de conservação, procedendo-se a uma vistoria geral das estruturas de madeira e ao levantamento do estado sanitário das madeiras e registo dos danos aparentes. Foi possível detectar as seguintes anomalias:

- como consequência do actual estado de conservação em que se encontra o edifício, nomeadamente com telas asfálticas a necessitarem substituição, as madeiras encontram-se expostas à acção das águas pluviais, o que originou deterioração da madeira por fungos;
- existem peças de madeira que apresentam fendas com dimensões consideráveis e que propiciam um ataque mais severo e danoso por parte de agentes xilófagos e/ou fungos de podridão, bem como diminuem a sua capacidade resistente.

A inspecção realizada permitiu concluir que existem sinais da deterioração das madeiras, sendo as situações mais graves as causadas por fungos e infiltrações de água. Face a isto, preconizaram-se as seguintes medidas:

- nos casos em que a deterioração é intensa a madeira tem que ser totalmente rejeitada, procedendo-se à sua substituição total ou cortando toda a madeira podre e infectada e substituindo-a parcialmente;
- torna-se necessário eliminar toda a humidade, pois este é um passo essencial para a erradicação da podridão.



(a)

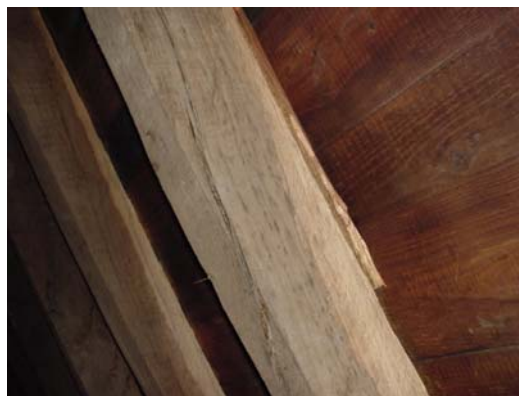


(b)

Figura 9 – (a) pormenor da cobertura e do estado de conservação da tela asfáltica, e (b) madeira atacada por fungos.



(a)



(b)

Figura 10 – (a) pormenor da humidade existente em madeiras do tecto, onde se pode observar a presença de fungos, e (b) fenda em peça de madeira da cobertura.

Mosteiro de Ancede

O Mosteiro de Santo André de Ancede está localizado na freguesia de Ancede, concelho de Baião. Em 1120, o Mosteiro é filiado na Ordem dos Cónegos Regrantes de Santo Agostinho e passados três anos, Calisto II uniu o Mosteiro à Igreja do Porto. Em 1143, D. Afonso Henriques passa a Carta de Couto ao Mosteiro. A ampliação do seu

património fundiário permitiu ao Mosteiro protagonizar um crescimento económico de relevo, assumindo um importante peso económico na região ao longo de toda a Baixa Idade Média. Esta riqueza económica assentou fundamentalmente na cultura vinícola.

Ao longo dos séculos, o Mosteiro foi sujeito a diversas obras de remodelação, e no séc. XVII substituíram-se as duas igrejas que faziam parte do Mosteiro por um novo edifício de três naves com três capelas ornamentadas e com um coro. Com a expulsão das Ordens Religiosas em Portugal durante a 1ª metade do séc. XIX, o Mosteiro foi vendido em hasta pública.

Deste modo, foram efectuadas análises, sobretudo qualitativas, do estado do material e foram também realizados ensaios às madeiras, procedendo-se ao levantamento do estado sanitário das madeiras e registo dos estragos sofridos pelas estruturas, quer pelo ataque de agentes xilófagos, quer devido a humidades ou fungos. Da vistoria efectuada, foi possível detectar as seguintes anomalias:

- como consequência do avançado estado de abandono em que se encontra o edifício, as madeiras encontram-se expostas às intempéries, o que originou em algumas zonas deterioração da madeira por fungos;
- algumas das madeiras inspeccionadas apresentavam furos característicos de saída de insectos, nas suas superfícies, nomeadamente de caruncho pequeno que, em muitos dos casos, provocou degradação significativa da madeira. Em certos elementos observa-se uma redução significativa da sua secção resistente, o que compromete a estabilidade da estrutura, precisando de ser substituídas;
- existência de zonas onde a madeira se encontra queimada/carbonizada;
- nos ensaios realizados com o resistógrafo e com o Pilodyn verificou-se que a grande maioria não oferecia a resistência desejada;
- algumas zonas apresentam escorrências significativas de águas pluviais, o que agrava de forma gradativa o estado de conservação das madeiras, pois facilita o aparecimento de agentes xilófagos e fungos de podridão;
- as madeiras, de uma forma generalizada, não se apresentam em condições de continuar a desempenhar funções estruturais, devido ao seu estado de deterioração, em alguns casos bastante avançado (as bases e as entregas das vigas de suporte da estrutura nas paredes encontram-se em mau estado, sendo que algumas delas se encontram mal apoiadas);



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11 – Exemplos das patologias encontrados: (a,b) presença de humidade e fungos no madeiramento, (c) pormenor da entrega da viga atacada por fungos; e (d) pormenor do soalho do rés-do-chão.

Face ao anteriormente exposto, preconizaram-se as seguintes medidas:

- os pavimentos e os telhados deverão ser reconstituídos, com soluções apropriadas de isolamento acústico no caso dos pavimentos, e de isolamento térmico e estanquidade à água no caso das coberturas. Salienta-se, em particular, a necessidade de pormenorização adequada da entrega do pavimento nas paredes e da funilaria das coberturas;
- a solução a adoptar para as coberturas, provavelmente baseada em asnas tradicionais de madeira, que servem de apoio às madres e restante estrutura de suporte do telhado, deve ser materializada de forma a não gerar impulsos horizontais sobre as paredes de alvenaria;

- sempre que se reparar ou substituir as madeiras das estruturas já existentes, é necessário que as madeiras novas sejam tratadas e aplicadas com teores em água que respondam à classe risco a que vão estar sujeitas em obra;
- independentemente de se tratarem as madeiras, devem-se fazer inspecções periódicas procurando possíveis manifestações da presença dos agentes causadores da deterioração da madeira. A realização de inspecções em alguns locais poderá ser problemática, pelo que terão de ser adoptados pormenores construtivos que facilitem uma futura.



Figura 12 – (a) e (b) pormenores do edifício, (c) cobertura do 1º piso, e (d) aspecto geral do soalho.

Mosteiro de Santa Cruz (Coimbra)

Fundado em 1131 no exterior das muralhas de Coimbra, o Mosteiro de Santa Cruz foi a mais importante casa monástica nos primeiros tempos da monarquia portuguesa. Na primeira metade do século XVI o Mosteiro foi integralmente reformado por ordem de D.

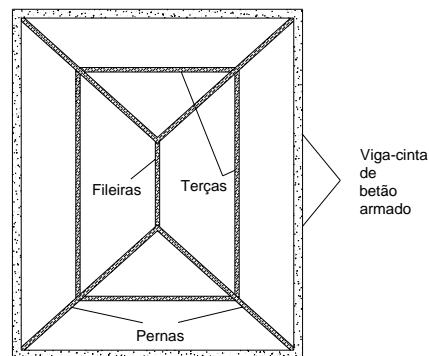
Manuel, monarca que assumiu a tutela do cenóbio. Todo o complexo monástico, a igreja e os túmulos de D. Afonso Henriques e seu sucessor, D. Sancho I, foram reformulados e transferidos para a capela-mor em 1530, onde ainda hoje se encontram.

No presente caso pretendeu-se recuperar a abóbada que cobre o espaço da sala do relicário devido às fendas existentes na abóbada e à deterioração da cobertura. A deformação excessiva da cobertura resultou em modificações sucessivas da solução original da cobertura, com introdução de escoras com apoio na abóbada principal, que resultaram em danos consideráveis na abóbada principal.

A sala do relicário é uma das zonas contíguas do Mosteiro, possuindo uma cobertura tradicional em madeira, com quatro águas com pernas, fileira e terças, uma abóbada principal de madeira fasquiada e estucada, com forma elíptica, e diversas abóbadas secundárias de madeira fasquiada e estucada, com forma de berço. A sala do relicário possui dimensões aproximadas de 12.5m de largura, 15m de comprimento e 11.5m de altura (medida ao fecho da abóbada). Salienta-se que o madeiramento total é extraordinariamente complexo, resultado de diversas intervenções ao longo do tempo.



(a)



(b)

Figura 13 – Aspectos da cobertura: (a) vista geral, obtida a partir de uma abóbada secundária, e (b) planta da cobertura, com elementos estruturais principais

Como consequência de antigas infiltrações de água (solucionadas anteriormente com obras de reparação e beneficiação da cobertura) e devido às flutuações higrotérmicas a que o desvão da cobertura se encontra sujeito, observam-se, em algumas zonas do madeiramento, a presença de manchas de humidade e o desenvolvimento de colónias de fungos de podridão, ver Figura 14. A percentagem do forro em condições deficientes é estimada em 30%.



Figura 14 – Efeito da humidade nos elementos do forro. As manchas de humidade e a presença de fungos de podridão indiciam infiltrações antigas.

A principal causa de degradação observado deve-se às condições de apoio introduzidas em intervenções de reabilitação realizadas anteriormente em diversos elementos estruturais da cobertura. Assim, e devido a uma excessiva deformação destes elementos da cobertura, foram introduzidas escoras adicionais que apoiam directamente na abóbada, originando a deformação desta e o aparecimento de fendas no estuque, ver Figura 15a.

No madeiramento geral da cobertura, observam-se elementos de madeira que foram atacados por caruncho (pequeno) e que se encontram bastante danificados. Este tipo de ataque restringe-se, na maioria das situações, ao borne da madeira, ver Figura 15b e ver Figura 15c. Pontualmente existem situações em que os elementos de madeira apresentam outras patologias/defeitos localizados (nós, secções ocas e secções fendilhadas), que afectam significativamente a sua capacidade resistente. Verifica-se ainda que existem ligações por entalhe deficientes, encontrando-se as peças soltas e sem contacto, ver Figura 15d. Adicionalmente, encontram-se ligadores metálicos em avançado estado de corrosão, fenómeno potenciado pela presença de fezes animais.

Refere-se ainda que o madeiro do fasquiado se apresenta, em geral, em bom estado atendendo à protecção fornecida pela argamassa. No entanto, é relevante salientar o excesso de resíduos (poeiras, detritos animais e restos de madeira resultantes de intervenções anteriores) que se encontram no fasquiado. Além de dificultarem a inspecção da estrutura, estes resíduos apresentam-se como um potencial foco de incêndio.

Estado sanitário das madeiras

Devido ao elevado número de elementos de madeira existentes na estrutura da cobertura, nesta avaliação apenas foram realizados ensaios em elementos necessários para obter informação específica relativa à definição do projecto de consolidação.

Com o intuito de avaliar o estado sanitário das madeiras recorreu-se ao Pilodyn para caracterizar a resistência à penetração superficial, recorreu-se a um formão para inspeccionar as camadas subjacentes à superfície, e recorreu-se ao Resistógrafo para analisar o perfil densidade das madeiras.

De uma forma geral as entregas das vigas de suporte da estrutura nas paredes de alvenaria encontram-se em bom estado.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 15 – (a) deformações excessivas e escora vertical; (b) elementos atacados por caruncho pequeno; (c) ataque generalizado das cambotas da abóbada principal; (d) elemento de madeira sem continuidade estrutural.

CONCLUSÕES

As estruturas de madeira antigas encontram-se geralmente em condições de serem utilizadas, com operações de conservação, substituição localizada e reforço. Neste sentido, os ensaios não-destrutivos são de enorme utilidade no diagnóstico e na avaliação de segurança desta estruturas. Salienta-se, no entanto, que uma avaliação quantitativa baseada puramente em ensaios não-destrutivos deve ser encarada com reservas.

REFERÊNCIAS

Berglind, H.; Dillenz, A.; 2003 – “Detection of glue deficiency in laminated wood with pulse thermography”. *Journal of Wood and Science*, Vol. 49: pp. 216–220.

- Bergsten, U.; Lindeberg, J.; Rindby, A.; Evans, R.; 2001 – “Batch measurements of wood density on intact or prepared drill cores using x-ray microdensitometry”. *Wood Science and Technology*, Vol. 35: pp. 435-452.
- Bernabei, M.; 2005 – “Ricerche Dendrocronologiche in Trentino: La Chiesa dei SS. Ippolito e Cassiano a Castello Tesino (TN)”. *Proceedings of the International Conference The Conservation of Historic Wooden Structures*, Florence, Vol. I: pp. 24-28.
- Bodig, J.; Jayne, B.; 1993 – *Mechanics of wood and wood composites*. 2nded: Krieger Publishing Company: 712 pp.
- Bucur, V.; Garros, S.; Navarette, A.; De Troya, M.; Guyonnet, R.; 1997 – “Kinetics of wood degradation by fungi with x-ray microdensitometric technique”. *Wood Science and Technology*. Vol. 31: pp. 383-389.
- Cruz, H.; Machado, J. ; Nunes, L.; 1994 – “Problemas de conservação de madeira em edifícios”. 2^o Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, ENCORE. Lisboa: LNEC: pp. 301-312.
- Feinberg, J.; 2005 – “Frontier Architecture Found in the Wild Wild West – Conservation of U.S. Western Heritage Wooden Structures, 3 Studies”. *Proceedings of the International Conference The Conservation of Historic Wooden Structures*, Florence, Vol. I: pp. 383-390.
- Giordano, G.; 1999 – *Timber structures engineering*. 5th Edn. Hoepli, Milano.
- Görlacher, R.; 1987 – “Non destructive testing of wood: an in-situ method for determination of density”. *Holz as Roh- und Werkstoff*. Vol. 45: pp. 273-278.
- Isik, F.; Li, B.; 2004 – “Rapid assessment of wood density of live trees using IML Resi for selection in tree improvement programs”. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 33: pp. 1-10.
- Machado, J.; Cruz, H.; 1997 – “Avaliação do estado de conservação de estruturas de madeira. Determinação do perfil densidade por métodos não destrutivos”. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. No 42: pp. 15-18.
- Madsen, B.; 1994 – “Radiological density scanning portable gamma camera based on backscatter tomography”. 9th International Symposium on Non-destructive Testing. Madison, USA: pp. 131-139.
- Rinn, F.; 1994 – “Catalogue of relative density profiles of trees, poles and timber derived from Resistograph micro-drillings”. 9th International Symposium on Non-destructive Testing. Madison, USA: pp. 61-67.
- Rinn, F.; Schweingruber, F.; Schär, E.; 1996 – “Resistograph and x-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and x-ray density charts of different wood species”. *Holzforschung*, Vol. 50(4): pp. 303-311.
- Romagnoli, M.; Nocetti, M.; Sarlato, M.; 2005 – “Datazione Dendrocronologica di Strutture Lignee nei Tetti in Italia Centro-Meridionale. Limiti e Prospettive” *Proceedings of the International Conference The Conservation of Historic Wooden Structures*, Florence, Vol. I: pp. 19-23.

- Ross, R.; Brashaw, B.; Pellerin, R.; 1998 – “Non-destructive evaluation of wood”. *Forest Products Journal*. Vol. 48 (1): pp. 101-105.
- Ross, R.; DeGroot, R.; Nelson, W.; Lebow, P.; 1997 – “The relationship between stress wave transmission characteristics and the compressive strength of biologically degraded wood”. *Forest Products Journal*, Vol. 47(5), pp. 89-93.
- Ross, R.; Pellerin, R.; Volny, N.; Salsig, W.; Falk, R.; 1999 – Inspection of timber bridges using stress wave timing non-destructive evaluation tools – A guide for use and interpretation. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-114. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 15 pp.
- Sandoz, J.; 1989 – “Grading of construction timber by ultrasound”. *Wood Science Technology*, 23: pp. 95-108.
- Tanaka, T.; 2000 – “Wood inspection by thermography”. *NDT.net* – March 2001, Vol. 6, No. 03.
- Togni, M.; 1995 – Elasticità e resistenza di travi lignee antiche di grande sezione: stima con metodologie non distruttive applicabili in opera. Tesi presentata per il conseguimento del titolo di dottore di ricerca in Scienze del Legno. Università degli Studi di Firenze, Firenze, Italia.
- Uzielli, L.; 1992 – Restoring timber structures – Repair and Strengthening – STEP (Structural Timber Education Programme) lecture D4, STEP 2 (STEP/EUROFORTECH) Centrum Hout, The Netherlands, D4/1-D4/10.
- Zombori, B.; 2000 – “In situ non-destructive testing of built in wooden members”. *NDT.net* – March 2001, Vol. 6, No. 03.