

Oliveira, M., Sousa, H.S., Branco, J.M., Lourenço, P.B. (2015), Análise comparativa do desempenho de ultrassons na avaliação não destrutiva da madeira de Castanho. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série II, n. 14, janeiro 2015*, 31-43.

Análise comparativa do desempenho de ultrassons na avaliação não destrutiva da madeira de Castanho

Comparative ultrasound performance in the non-destructive evaluation of Chestnut timber

Mário Oliveira

Mestre em Eng. Civil
U.Minho, DEC
Guimarães, Portugal
marioafoliveira@gmail.com

Hélder S. Sousa*

Doutor em Eng. Civil
ISISE, U.Minho, DEC
Guimarães, Portugal
sousa.hms@gmail.com

Jorge M. Branco

Professor Auxiliar,
Doutor em Eng. Civil
ISISE, U.Minho, DEC
Guimarães, Portugal
jbranco@civil.uminho.pt

Paulo B. Lourenço

Professor Catedrático,
Doutor em Eng. Civil
ISISE, U.Minho, DEC
Guimarães, Portugal
pbl@civil.uminho.pt

* autor para correspondência

Resumo

O presente trabalho analisa o desempenho do ensaio de ultrassons na avaliação mecânica de elementos de Castanho (*Castanea sativa* Mill.) quando utilizadas duas sondas com frequências de onda diferentes. Para o efeito, foram determinadas correlações entre medições de ultrassons e resultados de ensaios mecânicos à flexão, utilizando 22 tábuas de Castanho serradas de vigas retiradas de um edifício em reabilitação. Foram considerados diferentes disposições das sondas, materiais de acoplamento e esquemas de ensaio com o objetivo de comparar a eficácia da utilização de frequências de onda de 24 kHz e 54 kHz na previsão do módulo de elasticidade e da resistência à flexão. Foram obtidos coeficientes de determinação entre 0,61 e 0,97 para medições realizadas com as duas frequências de onda em estudo. Foi ainda analisada a influência da presença de defeitos nas medições de ultrassons, para ambas as frequências de onda.

Palavras-chave: Estruturas de Madeira; Ensaio não destrutivo; Ensaio de ultrassons - UPV; Inspeção Visual

Abstract

The present work analyzes the performance of ultrasound testing in the mechanical evaluation of chestnut timber (*Castanea sativa* Mill.) using two waves with different frequencies. For that purpose, correlations between ultrasound tests and bending tests were determined using 22 chestnut timber sawn boards, obtained from a building subjected to rehabilitation works. Different arrangements of transducers, coupling agents and test setups were considered with the aim of comparing the efficiency of 24 kHz and 54 kHz frequency waves in the prediction of Young's modulus and bending strength. In the measurements made with different frequency waves, determination coefficients between 0,61 and 0,97 were obtained. Additionally, the influence of defects in the ultrasound measurements was analyzed, again using both wave frequencies.

Keywords: Timber structures; Non-destructive tests; Ultrasonic Pulse Velocity; Visual inspection

1 Introdução

A reabilitação urbana pode desempenhar um papel relevante no combate à recessão económica que o sector da construção em Portugal atualmente evidencia. Tendo em conta que a madeira é um material comum em construções existentes, especialmente as de carácter histórico ou de valor sociocultural, é necessário definir metodologias que permitam a inspeção e o diagnóstico dos elementos de madeira presentes nestes edifícios, permitindo assim tomar decisões sobre quais os elementos a manter, reparar ou substituir, de forma a melhor planificar a intervenção no edifício em estudo.

Uma forma de proceder à avaliação de elementos de madeira é através da utilização de ensaios não destrutivos, uma vez que em estudos anteriores [1 - 4] foram estabelecidas correlações entre os resultados destes ensaios e propriedades mecânicas da madeira. Em consequência, existe um crescente interesse no estudo da aplicabilidade de técnicas não destrutivas na obtenção das propriedades mecânicas da madeira, entre os quais se destaca o método de ultrassons. Este método assenta no princípio físico que qualquer onda provoca oscilações das partículas do meio onde se propaga, fazendo que estas partículas oscilem em torno da sua posição de equilíbrio com amplitude decrescente em decorrência da perda de energia da onda. Na análise das propriedades mecânicas da madeira a gama de frequências mais favoráveis reside entre os 20 kHz e os 500 kHz, essencialmente devido à alta atenuação em madeira para frequências mais elevadas [5, 6]. Para além dessa situação, em madeira maciça a velocidade de propagação na direção paralela ao fio pode ser três vezes superior à mesma velocidade na direção perpendicular ao fio [7], permitindo assim verificar a existência de defeitos que provoquem a alteração na direção do fio. Em relação aos tipos de medições, [8] refere que as diferenças nos resultados através do método direto (aplicação de transdutores em faces opostas) ou indireto (aplicações de transdutores na mesma face) são de sensivelmente 10%, sendo que a distância média de 40 cm entre transdutores proporciona a melhor aproximação de resultados entre métodos, para as condições de ensaio adotadas.

A aplicação do método de ultrassons para estimar as propriedades mecânicas de elementos existentes em madeira está presente em diversos estudos referentes a espécies resinosas. Na previsão do módulo de elasticidade estático, em [9], os resultados de ultrassons apresentaram um coeficiente de determinação, r^2 , superior a 0,80 enquanto, através da medição do módulo de elasticidade dinâmico, E_{din} , coeficientes de determinação acima de 0,75 foram encontrados nos estudos de [2, 10, 11]. Em [12], a medição da velocidade de propagação de onda obteve valores de r^2 de 0,48 e 0,69, respetivamente, por medições indiretas e diretas, com a resistência à compressão paralela ao fio. No caso de madeira provida de folhosas, designadamente madeira de castanho, o trabalho [13] evidencia que, através de E_{din} , foram obtidos r^2 acima de 0,71 e de 0,74, respetivamente, na obtenção da resistência e módulo de elasticidade de elementos sujeitos à compressão perpendicular ao fio. No entanto, para elementos solicitados na direção paralela ao fio, o trabalho [14] apresenta para elementos comprimidos um r^2 acima de 0,39 e de 0,60, respetivamente, para a resistência e o módulo de elasticidade, e para elementos tracionados um r^2 acima de 0,27 e de 0,58, respetivamente, para a resistência e o módulo de elasticidade.

O método de ultrassons para além de utilizado para medição em elementos de madeira limpa, foi igualmente estudado para análise da variação do tempo de propagação em diferentes fases de um processo de deterioração biológica [15, 16].

No presente trabalho, tendo por base o estudo de 22 tábuas de Castanho (*Castanea sativa* Mill.), pretende-se verificar se a variação da frequência de emissão das ondas ultrassónicas altera a fiabilidade dos ultrassons como método de análise não destrutiva. Para esse efeito, foram realizadas diferentes medições variando a distância entre transdutores em elementos com distintas concentração de defeitos. Os resultados encontrados são posteriormente comparados com os valores de módulo de elasticidade e resistência à flexão obtidos por meio de ensaios mecânicos.

2 Materiais e Métodos

2.1 Amostra

Na campanha experimental foram utilizadas 22 tábuas de Castanho (*Castanea sativa* Mill.) provenientes de 20 vigas retiradas de uma construção, do início do século XX, situada em

Braga. Segundo [17], os comprimentos iniciais das vigas variavam entre os 4 e os 6 m com uma seção transversal nominal de 18,0 cm de altura (coeficiente de variação, CV = 3,1%) e 13,0 cm de base (CV = 6,0%), sendo depois cortadas durante a execução da campanha experimental, em elementos de secção menor, sendo obtidas 48 tábuas com 7x4x300 cm³. No presente trabalho foi analisada uma amostra de 22 desses elementos. A campanha experimental teve como objetivo a verificação da eficácia dos ultrassons na análise não destrutiva de elementos de Castanho. Para esse efeito, previamente procedeu-se à inspeção visual das tábuas e realizaram-se ensaios mecânicos em regime elástico (não destrutivos) para efeito de comparação e validação dos resultados obtidos pelas medições usando ultrassons. Adicionalmente, determinou-se a massa volúmica e o teor em água dos elementos de madeira.

2.2 Inspeção visual

Neste trabalho, a primeira fase da campanha experimental correspondeu à inspeção visual com o objetivo de contabilizar e classificar os diversos defeitos morfológicos dos elementos de castanho, nomeadamente a quantidade e disposição de nós, o alinhamento do fio com o eixo da peça, o aspeto dos anéis de crescimento, as deformações e a eventual presença de dano por ataque biológico [18]. Nesta inspeção foram consideradas normas italianas de inspeção e classificação visual [19, 20] pois estas consideram a aplicação a espécies de madeira comparáveis à espécie em estudo. Após limpeza superficial dos elementos, as tábuas foram identificadas alfabeticamente (de A a V) e as suas faces foram numeradas (de 1 a 4). As faces 1 e 3 representam as faces de maior largura (7 cm) enquanto as faces 2 e 4 representam as faces de menor largura, i.e. a espessura da tábua (4 cm). Para obtenção de uma classificação visual ao longo do comprimento de cada tábua com a possibilidade de comparação entre zonas de madeira limpa e de zonas com defeitos, foi definida uma divisão dos elementos em segmentos, permitindo assim a análise localizada por zonas. Por cada tábua foram considerados 7 segmentos consecutivos com 40 cm, iniciados a 10 cm da extremidade da tábua (ver Figura 1).

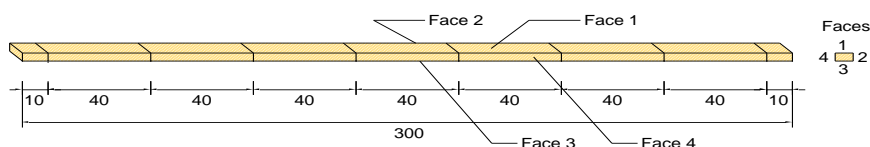


Figura 1 - Numeração das faces e disposição dos segmentos ao longo das tábuas (medidas em cm).

Durante a inspeção visual, os defeitos foram catalogados atendendo à sua localização, dimensões e importância. A norma [20] prevê três classes na caracterização visual de elementos de madeira: I, II e III, atendendo à presença e características dos defeitos visualizados. Para cada classe são definidos limites tendo em conta a importância e severidade de um determinado defeito, sendo que elementos sem defeitos ou com defeitos de menor relevância são classificados com classe I. Conforme se verifique uma maior presença de defeitos será necessário diminuir a classificação de classe I para II, ou para classe III no caso de defeitos mais significativos. No presente trabalho, sempre que os limites normativos para a classe III não eram respeitados devido à presença de um defeito mais significativo, foi considerada uma denominação de não classificável (NC) para o segmento. Para análise da influência de um determinado defeito, foi considerado uma diferenciação entre defeitos conforme os limites propostos para classificação do elemento. Assim, um determinado defeito foi classificado como I, II ou III caso se encontre dentro dos limites impostos em [20] respetivamente para as classes I, II ou III, ou como NC caso não respeitasse os limites impostos para classe III.

2.3 Medições de ultrassons

A avaliação de estruturas existentes em madeira por aplicação do método de ultrassons caracteriza-se por uma elevada variabilidade nos resultados. A medição da velocidade de propagação de onda é influenciada por fatores como a frequência de onda [21, 22], a pressão aplicada pelo utilizador [23, 24], o contacto entre transdutores e o elemento, assim como a

natureza do material de acoplamento [25, 26]. A variabilidade natural da madeira e a presença de defeitos vem ainda acrescentar uma importante fonte de incerteza e dispersão às medições. Nesta campanha experimental, para avaliar a possibilidade de utilização de diferentes frequências de onda e material de acoplamento, foram realizadas diversas variantes de medições com testes de ultrassons. Antes e depois da realização dos ensaios de flexão em regime elástico, as tábuas de madeira foram analisadas com ultrassons pelo método indireto e, após o corte dos provetes para os ensaios de flexão à rotura, pelo método direto paralelo às fibras. Nestas medições o parâmetro considerado foi a velocidade de onda, V , uma vez que esta pode ser diretamente correlacionada com E_{din} , através de

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

onde E_{din} é o módulo de elasticidade dinâmico (N/mm^2), V é a velocidade de onda (m/s) e ρ é a massa volúmica da amostra (kg/m^3). A distância assumida entre sondas foi considerada como a distância entre eixos das sondas. A relação entre E_{din} e o módulo de elasticidade estático ($E_{din} \geq 0,9E_{est}$) é explicada pelo comportamento viscoelástico da madeira, podendo também ser aplicadas algumas relações lineares para modelar esse comportamento [27].

Num material como a madeira, os defeitos são obstáculos à propagação das ondas ultrassónicas e como tal quanto maior a quantidade e significância desses defeitos maior será a perda de intensidade. Na análise e deteção de descontinuidades através do ensaio de ultrassons, a primeira consideração em relação ao método é a definição da frequência de onda a utilizar. O comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência de onda e desempenha um papel importante nessa escolha, pois, em geral, defeitos menores que metade do comprimento de onda do sinal não são detetados. Assim, frequências mais altas (com menor comprimento de onda) apresentam uma maior capacidade de deteção de defeitos menores, no entanto apresentam também maior atenuação. Quando o objetivo é detetar descontinuidades de grandes dimensões, deverá ser adotada uma frequência mais baixa, principalmente se for também requerida maior penetração da onda ultrassónica [28]. Na medição de ultrassons em elementos de madeira de Castanho salientam-se os estudos de [13, 14, 29] com frequência de onda de 150 kHz.

Para determinar se frequências de onda de menor valor são eficazes na análise desta espécie de madeira, neste estudo, foram utilizadas duas frequências de onda de menor gama, uma usualmente aplicada na avaliação de elementos desta espécie de madeira, 54 kHz [3, 16, 30], e uma de menor valor, 24 kHz, para análise comparativa. As medições foram feitas com uma tensão de excitação do transdutor de emissão de 1000 V, com aquisição de dados através de quatro medições por segundo. De forma a minimizar erros de leitura, cada valor de velocidade de onda foi obtido através da média dos dois valores medidos mais próximos, após a realização de três medições no mesmo segmento. Posteriormente, procedeu-se ao cálculo do E_{din} . Com esta metodologia pretende-se averiguar se a redução da frequência de onda permite aumentar a fiabilidade da utilização de ensaios de ultrassons na análise não destrutiva de elementos de Castanho, em particular, na deteção de defeitos (nós).

2.3.1 Acoplantes

Uma das condições necessárias para obtenção de um valor fiável na medição através do ensaio de ultrassons é o adequado contacto dos transdutores (emissor e recetor) ao elemento em estudo. Em elementos existentes de madeira, onde a superfície do material é demasiado rugosa ou até mesmo evidenciando degradação, é comum a utilização de transdutores exponenciais com ponto de contacto pontual entre transdutores e a superfície do elemento. Em laboratório, onde é possível o tratamento das faces dos elementos, podem ser utilizados transdutores com superfície de contacto lisa, sendo estas também mais comuns na medição em outros materiais, como o betão e a pedra. Nestes casos, é utilizada uma substância líquida ou pastosa com o objetivo de favorecer a transmissão das ondas ultrassónicas do transdutor para o elemento em ensaio, evitando a presença de ar entre os meios. A escolha desse material, designado por material de acoplamento ou acoplante, depende das condições da superfície do elemento e do material em estudo. Usualmente, para superfícies com bom acabamento, é utilizado um óleo fino, tal como um gel ou vaselina líquida, já para superfícies mais rugosas deverá ser utilizado um acoplante mais viscoso. Uma vez que a madeira é um material com uma capacidade de absorção significativa, a utilização de gel no acoplamento dos transdutores ao elemento leva a uma constante necessidade de reposição de gel na superfície dos transdutores uma vez que este é facilmente absorvido pela superfície seca de madeira. De forma a ultrapassar esta dificuldade, foi analisada a possibilidade de usar uma camada fina de plasticina como acoplante (ver Figura 2). Para avaliar a eficácia dos dois acoplantes

considerados, gel e plasticina, estabeleceram-se correlações entre medições realizadas a uma amostra de 13 tábuas (escolhidas aleatoriamente) em segmentos consecutivos de 40 cm (7 medições por tábua) considerando ainda, medições com uma posição inicial fixa para o transdutor emissor e distância progressiva com o transdutor receptor.



Figura 2 - Aparência da superfície do elemento após medição com ultrassons aplicando: a) gel; b) plasticina.

2.3.2 Medição por segmentos

A caracterização por ultrassons dos elementos foi realizada através de quatro seqüências de medição realizadas em cada segmento de 40 cm, em intervalos de 10 cm (Figura 3). Desta forma, e juntamente com os resultados da inspeção visual, foi possível analisar a variação da velocidade de propagação do sinal, e em que medida a presença de defeitos, designadamente a presença de nós, influenciou os resultados. Através desta metodologia, mesmo com uma distância constante entre transdutores, as medições contemplaram diferentes distâncias entre um determinado defeito e os transdutores.

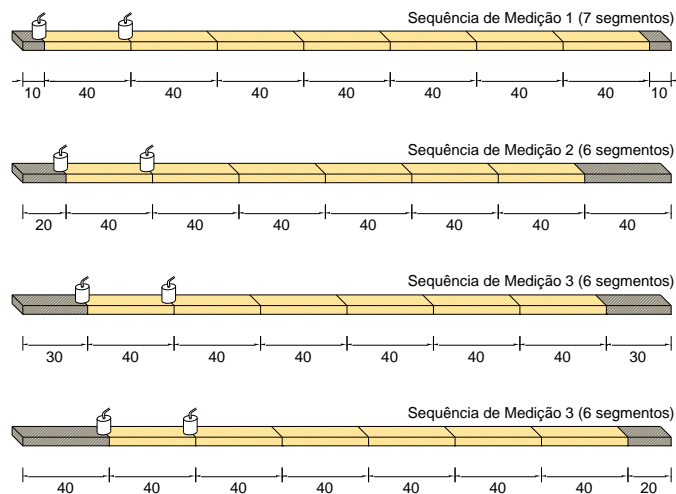


Figura 3 - Esquema das seqüências de medição por segmentos (medidas em cm).

2.3.3 Medição com emissor fixo

Para analisar o efeito da atenuação de intensidade para as duas frequências de onda, foram realizadas medições com incremento progressivo da distância entre transdutores. Assim de acordo com a Figura 4, o transdutor emissor foi fixo a 10 cm do início da tábua, e a distância ao receptor foi gradualmente aumentada de 40 cm, até perda de sinal.

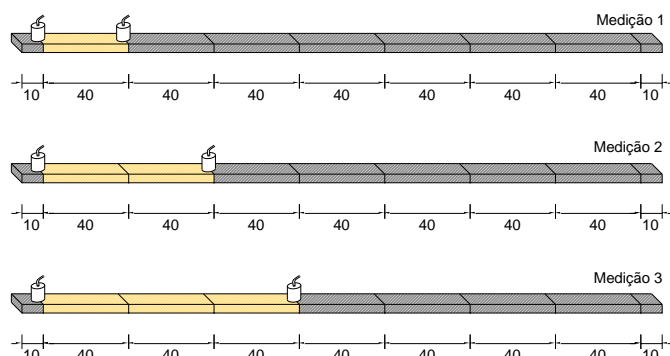


Figura 4 - Esquema das fases de medição com emissor fixo (medidas em cm).

2.3.4 Medição com influência de defeitos

Para avaliar a perda de intensidade da onda ultrassônica tendo em consideração a presença de um defeito e a distância deste aos transdutores, foram consideradas medições centradas num defeito, designadamente um nó isolado ou um conjunto de nós, aumentando progressivamente a distância entre transdutores (Figura 5). As medições foram realizadas com um afastamento inicial de 10 cm entre transdutores, com aumento progressivo de 10 cm até obter uma distância final de 80 cm. Os defeitos escolhidos corresponderam a nós de classificação diferente conforme [20]. A influência da inclusão de outros defeitos, conforme a distância entre transdutores era aumentada, foi também considerada na análise de resultados.

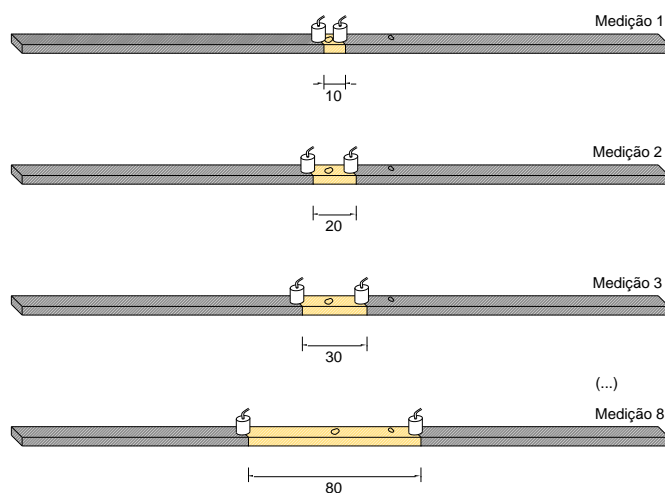


Figura 5 - Esquema das fases de medição com distância progressiva entre transdutores, com exemplo de inclusão de um outro defeito na medição 8 (medidas em cm).

2.3.5 Medição em segmentos para comparação com ensaios de flexão

Com o intuito de analisar a eficiência das medições de ultrassons para análise das propriedades mecânicas de elementos de madeira de Castanho, diferentes segmentos foram selecionados tendo em conta possíveis disposições de nós. Para esses segmentos foram realizadas medições com ultrassons com distâncias entre transdutores iguais às distâncias entre os pontos usados para a medição do módulo de elasticidade estático conforme [31], permitindo assim a comparação direta entre os valores do módulo de elasticidade estático e dinâmico. Estas medições apenas foram realizadas nas faces 1 e 3 das tábuas (Figura 6) por se tratar de um ensaio à flexão simples onde, devido à distribuição e direção das tensões, as faces em causa apresentam um contributo mais relevante.

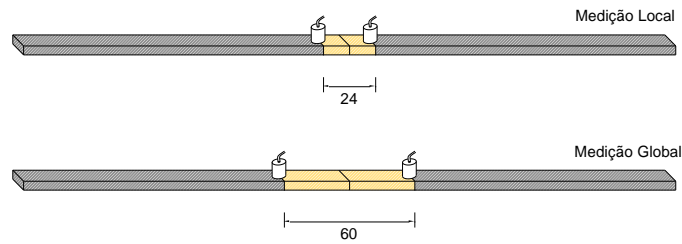


Figura 6 - Esquema das medições correspondentes aos ensaios de flexão (medidas em cm).

2.3.6 Medição por método direto

A medição por método direto foi também considerada em segmentos de 64 cm de comprimento (Figura 7), correspondentes aos elementos que foram selecionados e cortados para ensaios de flexão à rotura. Para esse efeito, os transdutores foram colocados nas faces de topo na direção paralela à orientação das fibras. Após as medições, foi realizada a comparação entre o novo E_{din} e a resistência à flexão, f_m .

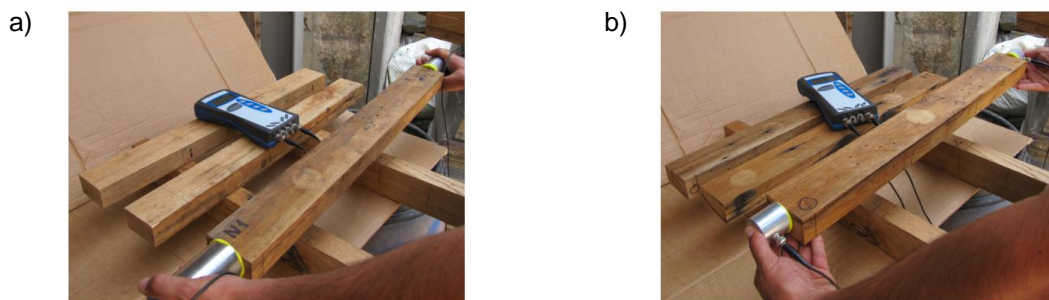


Figura 7 - Método direto com transdutores de: a) 24 kHz; b) 54 kHz.

2.4 Ensaios de flexão

As propriedades de rigidez e resistência à flexão dos elementos de Castanho foram quantificadas através de ensaios de 4 pontos à flexão, segundo a norma europeia [31]. Numa primeira fase, os ensaios foram realizados em regime elástico, para obtenção dos módulos de elasticidade local, $E_{m,l}$, e global, $E_{m,g}$. Numa segunda fase, segmentos selecionados tendo em conta diferentes disposições de nós foram considerados para testes até à rotura para quantificação de f_m . Os provetes utilizados nos ensaios de flexão à rotura foram obtidos pelo corte das tábuas originais em elementos com 64 cm de comprimento.

Os ensaios à flexão foram realizados tendo em consideração os resultados obtidos na inspeção visual, nomeadamente a existência, dimensão e concentração de nós presentes nas quatro faces do elemento de madeira. Os segmentos isentos de nós foram considerados como representativos de elementos de madeira limpa, e tomados como referência para análise da influência de defeitos nas propriedades mecânicas dos restantes segmentos.

2.5 Massa volúmica e teor em água

A massa volúmica e o teor em água dos elementos de madeira em estudo foram quantificados segundo [32] e [33]. Numa primeira fase, a massa volúmica foi calculada considerando as tábuas com as suas dimensões iniciais antes dos ensaios à flexão. Posteriormente, a massa volúmica foi medida após os ensaios mecânicos utilizando provetes de pequenas dimensões retirados junto das zonas de rotura.

3 Resultados

3.1 Medições de ultrassons

Na análise comparativa entre diferentes acoplantes, os resultados das medições evidenciam uma diminuição dos valores de média quando comparadas as medições por segmentos de 40

cm com as medições de emissor fixo e distância progressiva com o recetor, pois o aumento da distância entre transdutores aumenta a probabilidade de inclusão de defeitos e, conseqüentemente, obtém-se uma diminuição da velocidade de propagação. O erro percentual foi também calculado comparando as medições realizadas para o mesmo elemento usando os dois acoplantes em estudo. Nas medições para os segmentos de 40 cm foram obtidos erros percentuais de 1,5% e 3,0%, respetivamente, para a velocidade de propagação e E_{din} , e valores de erro percentuais de 3,8% e 7,2% para o emissor fixo, respetivamente, para velocidade de propagação e E_{din} . Através destas medições, foi verificado que tanto o CV como o erro percentual aumentam para medições onde a distância entre transdutores é progressivamente alargada.

A comparação das medições para diferentes acoplantes é apresentada na Figura 8, para a qual se verifica um r^2 de 0,97 e 0,83, respetivamente, para medições em segmentos de 40 cm e medições com emissor fixo. Tendo em consideração o valor baixo de erro percentual, a correlação forte entre valores e a proximidade entre a correlação obtida e a reta a 45°, foi verificado que a plasticina é uma opção viável para este tipo de medições. Perante isto, as medições efetuadas nas fases seguintes da campanha experimental recorreram à plasticina como acoplante.

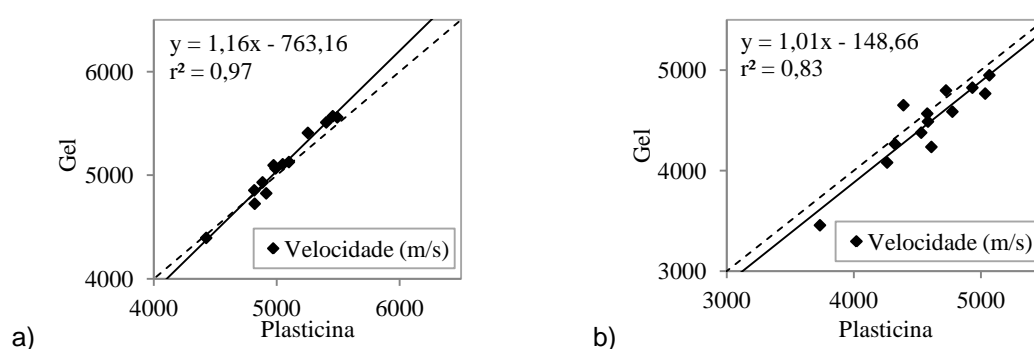
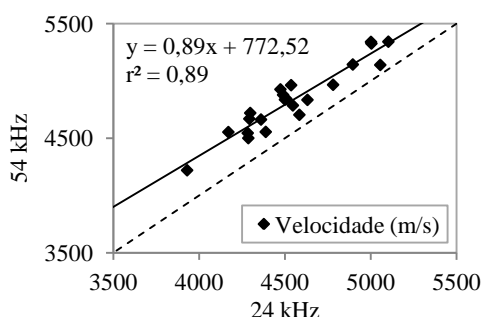


Figura 8 - Correlações entre os materiais acoplantes gel e plasticina, para medições de: a) segmentos de 40 cm; b) emissor fixo. Correlação a traço cheio e linha a 45° com igual medição a traço interrompido. Tamanho da amostra equivalente aos valores médios de 13 tábuas com 7 medições por tábua (91 medições).

Após definido o tipo de acoplante a usar, foram realizadas as medições de ultrassons utilizando transdutores com frequências de 24 kHz e 54 kHz. Os parâmetros estatísticos (média, μ , e coeficiente de variação, CV) para medições a segmentos de 40 cm e sua correlação ($r^2=0,89$) entre frequências de onda diferentes são apresentados na Figura 9. Estes resultados mostram que utilizando transdutores de 54 kHz são obtidos valores, em média, superiores aos registados recorrendo aos transdutores de 24 kHz. Os valores encontrados para o CV são semelhantes em ambos os transdutores.



24 kHz: $\mu = 4550$ m/s; CV = 6,8%
 54 kHz: $\mu = 4840$ m/s; CV = 6,1%

Figura 9 - Correlação entre valores médios por elemento com transdutores de diferentes frequências na medição por segmentos de 40 cm. Correlação a traço cheio e linha a 45° com igual medição a traço interrompido. Tamanho da amostra equivalente aos valores médios de 22 tábuas com 25 medições por tábua (550 medições).

Após analisada a população total dos resultados, esta foi dividida em amostras atendendo à presença de nós de diferentes dimensões e disposições, classificados conforme as indicações da norma [20]. Na Figura 10 apresentam-se os resultados para a velocidade de propagação, para cada frequência de onda em estudo, e para as diferentes classificações de nós atribuídas pela inspeção visual.

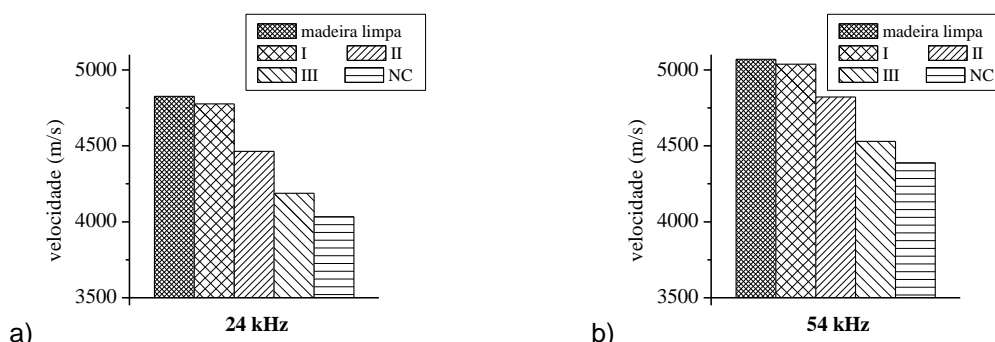
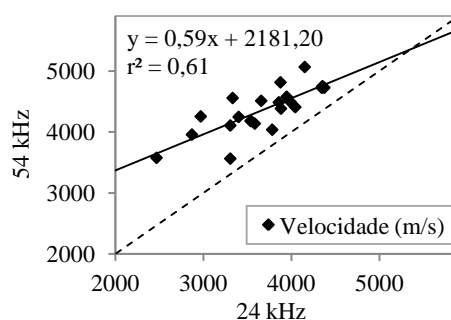


Figura 10 - Comparação das velocidades em segmentos com diferentes níveis de concentração de nós existentes, com transdutores de: a) 24 kHz; b) 54 kHz.

Esta análise evidenciou que a velocidade de propagação foi superior para segmentos livres de defeitos e que diminuiu com os nós presentes nos segmentos em medição. A percentagem de diminuição da velocidade de propagação entre classes, com crescente presença de nós, foi para os transdutores de 24 kHz de 1,0%, 6,5%, 6,2% e 3,7%. Enquanto para os transdutores de 54 kHz as percentagens passaram a ser de 0,6%, 4,3%, 6,1% e 3,1%.

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos no caso das medições com emissor fixo e a correlação entre medições utilizando transdutores de frequência diferente. Estes resultados confirmam que utilizando transdutores de 54 kHz são obtidos valores, em média, superiores aos registados recorrendo aos transdutores de 24 kHz. Considerando o emissor fixo, pelos valores encontrados para o CV, obtém-se uma maior variação quando se utilizam os transdutores de 24 kHz. A perda de sinal para os diversos elementos, ocorreu mais rapidamente perante a existência de uma maior concentração de nós, principalmente de grande dimensão (classe III e NC), sendo que, na maioria dos casos, esta perda ocorreu para menores distâncias entre transdutores quando utilizados os transdutores de 54 kHz.



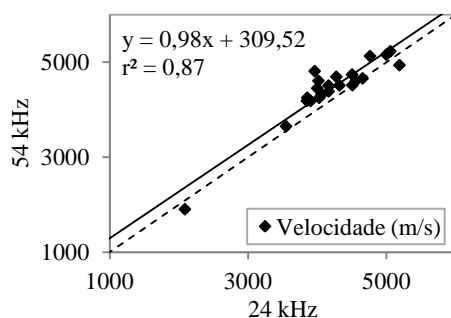
24 kHz: $\mu = 3660$ m/s; CV = 13,5%

54 kHz: $\mu = 4350$ m/s; CV = 8,7%

Figura 11 - Correlação entre transdutores de frequências diferentes para medições com emissor fixo. Correlação a traço cheio e linha a 45° com igual medição a traço interrompido. Tamanho da amostra equivalente aos valores médios de 22 tábuas com média de 5 medições por tábua (110 medições).

Na Figura 12 apresentam-se os resultados das medições de ultrassons realizadas nos testes com afastamento progressivo entre transdutores e mais uma vez se repara, em concordância com o verificado anteriormente, que velocidades de propagação mais elevadas são obtidas com os transdutores com maior frequência de onda. Os valores encontrados para o CV são semelhantes em ambos os transdutores.

O coeficiente de determinação entre transdutores é menor para menores afastamentos entre transdutores (r^2 entre 0.34 e 0.64 para distâncias menores a 40 cm), enquanto para afastamentos a partir dos 40 cm existem correlações fortes (r^2 superiores a 0.82). Apesar das fortes correlações entre resultados de diferentes transdutores, a correlação com a área de defeitos é fraca para qualquer afastamento entre transdutores (r^2 inferiores a 0.20). No entanto é verificado para todos os afastamentos uma tendência para a diminuição da velocidade de propagação com o aumento da área de defeitos.



24 kHz: $\mu = 4200$ m/s; CV = 15,2%

54 kHz: $\mu = 4440$ m/s; CV = 15,2%

Figura 12 - Correlação entre transdutores de frequências diferentes para medições com distância progressiva entre transdutores. Correlação a traço cheio e linha a 45° com igual medição a traço interrompido. Tamanho da amostra equivalente aos valores médios de 20 defeitos analisados em 2 faces das tábuas com 8 medições por face (320 medições).

A Tabela 1 apresenta os resultados das medições de ultrassons em termos de velocidade de propagação V_l e V_g com correspondentes módulos dinâmicos $E_{din,l}$ e $E_{din,g}$, respetivamente, realizadas aos segmentos selecionados para medição de $E_{m,l}$ e de $E_{m,g}$ (ver Figura 6). O subscrito l indica um valor local e o subscrito g indica um valor global, tal como indicado anteriormente. Nesta tabela são apresentados, de igual modo, os valores característicos do cálculo do percentil 5%. As correlações encontradas entre as medições utilizando transdutores com os dois valores de frequência em estudo são apresentadas na Figura 13.

Tabela 1 - Resultados das medições indiretas realizadas nos segmentos dos ensaios de flexão (V_l e V_g em m/s, e $E_{din,l}$ e $E_{din,g}$ em N/mm²).

		Mínimo	Máximo	Média	Valor Característico (5%)	CV (%)
24 kHz	V_l	3830	5380	4530	3940	8,9
	$E_{din,l}$	9430	16700	12200	9590	16,0
	V_g	3540	4840	4070	3540	9,4
	$E_{din,g}$	7380	13520	9820	7760	17,5
54 kHz	V_l	4110	6020	4930	4320	7,0
	$E_{din,l}$	10250	22700	14420	12080	12,1
	V_g	3750	5170	4420	3810	9,1
	$E_{din,g}$	8680	15410	11520	8860	17,1

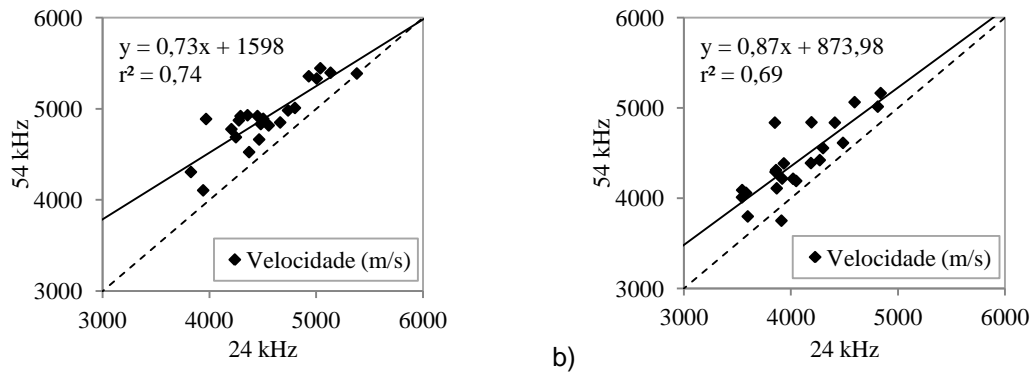
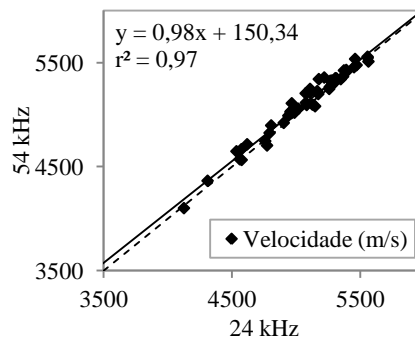


Figura 13 - Correlação entre transdutores com frequências diferentes nos segmentos para medição dos módulos de elasticidade estáticos: a) $E_{m,i}$; b) $E_{m,g}$. Correlação a traço cheio e linha a 45° com igual medição a traço interrompido. Tamanho da amostra equivalente aos valores médios de 22 tábuas com 4 medições por tábua (88 medições).

Apesar das correlações entre medições com transdutores de diferentes frequências de onda continuarem altas, o valor de r^2 diminuiu em relação às análises anteriores, essencialmente pela escolha específica da amostra onde se preconizou uma seleção de segmentos com uma maior diferenciação na concentração de nós. Verifica-se ainda que existe maior afastamento da linha a 45°. O valor de r^2 em relação aos resultados para medição de $E_{m,i}$ é superior ao obtido para a medição de $E_{m,g}$ ($0,74 > 0,69$).

Por fim, são apresentados, na Figura 14, os resultados para as medições de ultrassons pelo método direto, utilizando os transdutores com as duas frequências de onda em estudo. Para estes resultados, foi verificado que a mudança de transdutores não alterou significativamente os resultados das medições, em termos de valores de velocidade de propagação e da sua variação. O valor elevado de r^2 , juntamente com a inclinação da reta de correlação linear próxima da unidade confirmam a inexistência de diferenças significativas entre resultados de medições diretas quanto utilizados transdutores de frequência de onda de 24 kHz e 54 kHz.



24 kHz: $\mu = 4750$ m/s; CV = 4,5%

54 kHz: $\mu = 4800$ m/s; CV = 4,4%

Figura 14 - Correlação entre transdutores de frequência de onda diferente aplicando o método direto. Correlação a traço cheio e linha a 45° com igual medição a traço interrompido. Tamanho da amostra igual a 52 medições.

3.2 Flexão

Os resultados dos ensaios à flexão realizados, em termos de $E_{m,i}$, $E_{m,g}$ e f_m , são apresentados na Tabela 2. Os valores são apresentados considerando os valores dados pela amostra total com e sem diferenciação por tábua de proveniência.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios realizados à flexão simples (N/mm^2) para a amostra correspondente às médias de valores por tábua e para a amostra total sem diferenciação entre tábuas.

		Mínimo	Máximo	Média	Valor Característico	CV (%)
Média de valores por tábua	$E_{m,l}$	7175	15695	10757	7403	19,4
	$E_{m,g}$	5703	12150	9443	6690	16,7
	f_m	31,13	63,00	42,53	31,21	23,3
Amostra total	$E_{m,l}$	1028	18212	10734	4127	36,1
	$E_{m,g}$	1293	13588	9408	5127	25,8
	f_m	11,25	81,71	43,12	13,35	44,4

3.3 Massa volúmica e teor em água

Inicialmente, foi calculada a massa volúmica aparente, ρ , de todas as tábuas, com a sua dimensão e forma inicial. Posteriormente aos ensaios de rotura, um pequeno provete foi retirado da zona de rotura das tábuas para quantificação da massa volúmica, ρ_w , e do teor em água, W , como proposto em norma [32, 33]. Os resultados destas medições são apresentados na Tabela 3.

A correlação entre os resultados obtidos para os elementos na sua forma inicial em relação aos provetes cortados pós rotura é apresentada na Figura 15. A correlação obtida na comparação destas massas volúmica é alta ($r^2 = 0,65$), com um erro percentual médio de aproximadamente 3%. Assim, e como os valores de massa volúmica para ambas as situações são semelhantes, foi adotado o valor de massa volúmica médio de 576 kg/m^3 para cálculo do módulo de E_{din} .

Tabela 3 - Resultados da massa volúmica no instante do ensaio de flexão (ρ e ρ_w em kg/m^3), da massa volúmica ajustada para um teor em água de 12% (ρ_{12} em kg/m^3), da massa volúmica após secagem (ρ_0 em kg/m^3) e do teor em água (W em %).

	Mínimo	Máximo	Média	Valor Característico	CV (%)
ρ	495	628	576	541	5,6
ρ_w	512	627	575	527	6,4
ρ_{12}	519	636	581	534	6,3
ρ_0	492	605	549	503	6,5
W	8,93	10,08	9,67	9,06	3,4

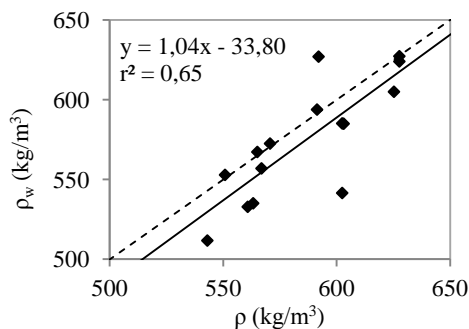


Figura 15 - Correlação obtida entre valores de ρ e ρ_w . Correlação a traço cheio e linha a 45° com igual medição a traço interrompido. Tamanho da amostra igual a 15 medições.

4 Discussão de resultados

A classificação qualitativa do valor do coeficiente de determinação para análise e comparação de resultados será disposta consoante a descrição preconizada em [34]: alta ($r^2 \geq 0,64$), média

($0,64 \geq r^2 \geq 0,36$), baixa ($0,36 \geq r^2 \geq 0,16$), muito baixa ($0,16 \geq r^2 \geq 0,04$), inexistente ($r^2 < 0,04$). Tendo em conta estas definições, de seguida procede-se à análise das várias etapas realizadas no âmbito da campanha experimental com o objetivo de analisar a fiabilidade das medições de ultrassons.

Considerando os valores altos de r^2 (0,97 e 0,83) para as medições realizadas com diferentes acoplantes, verifica-se que a utilização de qualquer um destes é equiparável, sendo que a plasticina foi escolhida devido à facilidade de uso e limpeza de resíduos de acoplante, assim como menor consumo de material.

Na análise das medições a segmentos consecutivos de 40 cm, os valores encontrados para a velocidade de propagação e respetivo E_{din} , são mais elevados, cerca de 6%, quando determinados com recurso aos transdutores de 54 kHz. No entanto, pelo demonstrado na Figura 9, é possível verificar que a correlação obtida entre os valores médios dos resultados experimentais, quando comparados por tábua, é alta ($r^2 = 0,89$). No entanto, para as medições com o emissor fixo e distância progressiva entre transdutores, é obtida somente uma correlação média ($r^2 = 0,61$), evidenciando que a influência da frequência de onda é superior para valores de distância entre transdutores próximos do limite da perda de sinal por atenuação das ondas ultrassónicas. Na análise com distância progressiva entre transdutores, verifica-se que com um limite máximo de 80 cm é possível manter uma correlação alta entre as medições com as duas frequências de onda em estudo ($r^2 = 0,87$). Apesar de se manterem numa gama de correlações altas, as correlações referentes às medições dos módulos de elasticidade local e global (respetivamente de $r^2 = 0,74$ e $r^2 = 0,69$) diminuíram em relação às medições anteriores, devido à seleção de segmentos representantes de uma maior diferenciação entre classes de defeitos. O valor de r^2 mais elevado foi obtido nas medições pelo método direto ($r^2 = 0,97$). Atendendo aos valores altos de correlação obtidos, para o material em estudo, as medições de transdutores com uma das frequências de onda podem ser previstas através das medições usando transdutores da outra frequência de onda em estudo.

O valor de CV dos resultados obtidos pelo método indireto para ambas as frequências de onda estudadas, aumentam significativamente com a distância entre transdutores, sendo a frequência de 24 kHz mais sujeita a acréscimo de CV. As medições que apresentaram menor valor de CV correspondem àquelas obtidas pelo método direto. Em todas as medições, os transdutores de 24 kHz apresentaram maior CV que os transdutores de 54 kHz mas, com exceção das medições com emissor fixo, a diferença entre CV por cada transdutor é reduzida. A maior variação nos valores das medições por transdutores de 24 kHz pode ser também explicada pela sua menor sensibilidade de deteção de defeitos de menores dimensão devido a um maior comprimento de onda, levando a uma distribuição de resultados menos uniforme e o aumento do desvio padrão da amostra. Esse comportamento é evidenciado na análise de diferentes nós classificados por inspeção visual, onde a diferença entre classes superiores (I e II) e inferiores (III e NC) é mais acentuada para as medições com transdutores de 24 kHz.

Em relação à comparação com os ensaios mecânicos à flexão, os valores característicos obtidos para o módulo de elasticidade através das medições de ultrassons são superiores aos valores obtidos nos ensaios mecânicos. O erro percentual médio para estas medições é maior para os transdutores de 54 kHz (Figura 16), tendo sido obtidas correlações médias entre os módulos de elasticidade estáticos, E_{est} , e dinâmico, E_{din} , ($0,41 \leq r^2 \leq 0,47$).

No que se refere a f_m , as medições com ambas as frequências de onda apresentaram resultados de correlação semelhantes. As melhores correlações foram obtidas pelo método indireto realizado para determinação de $E_{m,l}$ (distância entre transdutores de 24 cm), sendo estas correlações altas com r^2 igual a 0,70 e 0,72 respetivamente, para transdutores de 24 kHz e 54 kHz (Figura 17), enquanto para medições de $E_{m,g}$ (distância entre transdutores de 60 cm) as correlações baixaram para 0,62 e 0,63, respetivamente. Correlações médias foram obtidas através do método direto (distância entre transdutores de 64 cm), com r^2 igual a 0,47 tanto para transdutores de 24 kHz como para 54 kHz (Figura 18). Verifica-se assim que se obtiveram correlações mais elevadas com f_m para as medições de ultrassons que avaliavam localmente a zona envolvida na rotura.

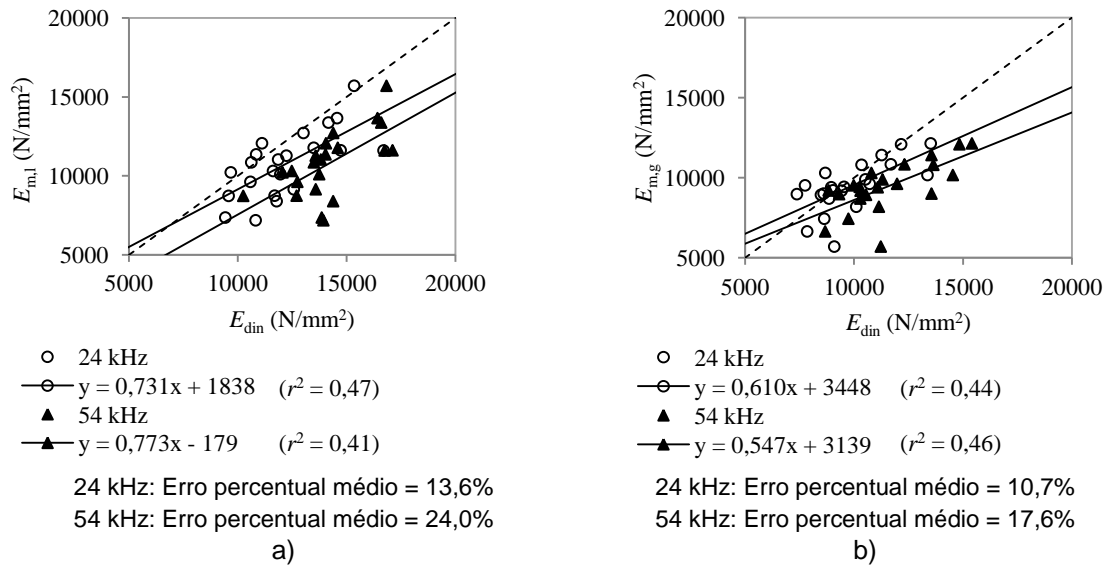


Figura 16 - Correlação entre o módulo de elasticidade dos ensaios de flexão simples, E_{est} , e E_{din} , em segmentos para medição de: a) $E_{m,i}$; b) $E_{m,g}$. Correlação a traço cheio e linha a 45° com igual medição a traço interrompido. Tamanho da amostra equivalente aos valores médios de 22 tábuas com 4 medições por tábua (88 medições).

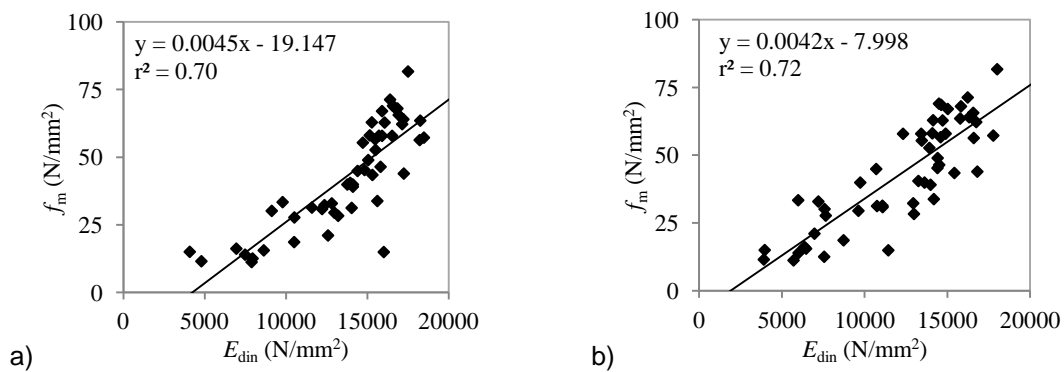


Figura 17 - Correlação entre f_m e E_{din} obtido pelo método indireto aplicado nos segmentos para medição de $E_{m,i}$ com transdutores de: a) 24 kHz; b) 54 kHz. Tamanho da amostra igual a 52 medições.

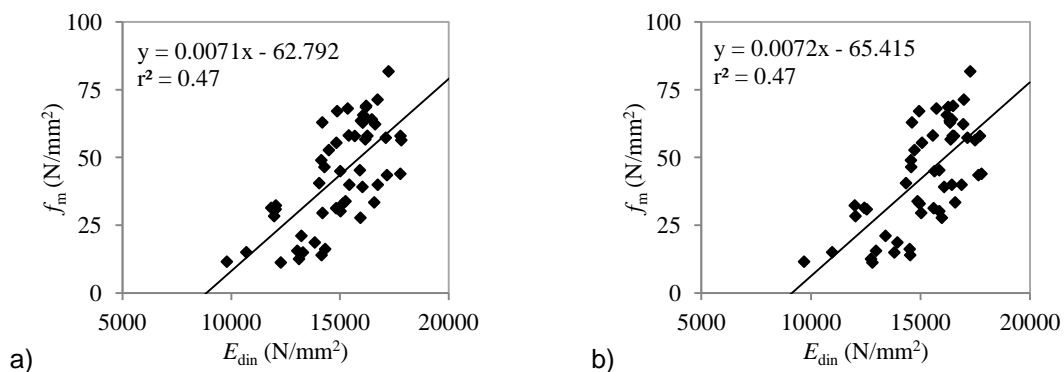


Figura 18 - Correlação entre f_m e E_{din} obtido pelo método direto com transdutores de: a) 24 kHz; b) 54 kHz. Tamanho da amostra igual a 52 medições.

Como os transdutores de 24 kHz apresentaram menor erro percentual, estes podem ser considerados uma melhor escolha para obtenção das propriedades mecânicas em detrimento dos transdutores de 54 kHz. No entanto, atendendo aos valores altos de r^2 entre medições nos mesmos segmentos e valores de r^2 semelhantes na obtenção das propriedades mecânicas dos

elementos, o uso de qualquer uma das frequência de onda em estudo pode ser considerado equiparável.

Comparando os valores estatísticos da Tabela 2 com os valores encontrados em [17], verifica-se que os últimos são superiores. No presente trabalho, para além de somente se considerar uma amostra dos elementos analisados em [17], a diferença de valores reside também no número e localização dos segmentos que foram medidos, sendo que uma percentagem maior de segmentos com defeitos foi analisada. As correlações obtidas entre medições de ultrassons e ensaios mecânicos são inferiores às obtidas em [13, 14] quando comparadas com o módulo de elasticidade tanto à compressão perpendicular como paralela às fibras, sendo necessário salientar que neste estudo foram analisados elementos com defeitos, ao contrário dos trabalhos mencionados onde foram utilizados provetes de madeira sem defeitos. No entanto, apesar de este estudo contemplar ensaios em flexão simples, as correlações com o módulo de elasticidade são mais próximas das obtidas em [14] quando comparadas com o estudo dos elementos em tração paralela às fibras e até mesmo superiores, no caso da resistência à tração paralela às fibras. A aproximação entre valores de coeficiente de determinação advém do facto que os elementos em estudo neste trabalho foram sujeitos à flexão e não à tração, sendo que a resposta à tração é certamente mais sensível à presença de defeitos.

5 Conclusões

O trabalho realizado centrou-se na análise da influência da utilização de diferentes frequências de onda na técnica de ultrassons como método não destrutivo para a avaliação de propriedades mecânicas de elementos de Castanho. A capacidade desta técnica em detetar diferentes níveis de defeitos, assim como de avaliar a variabilidade da rigidez e resistência à flexão, foram estudadas através da variação do acoplante, da distância entre transdutores, da distância entre defeitos, da disposição dos transdutores em relação ao fio, mas essencialmente de transdutores de frequências de onda de 24 kHz e 54 kHz. Para determinar a sua eficiência, foram realizados ensaios mecânicos à flexão tendo os resultados obtidos sido correlacionados com as medições de ultrassons.

Na análise do acoplante a adotar, foi verificado que no caso da madeira uma camada fina de plasticina pode eficazmente substituir o habitual gel, com menores dificuldades de utilização e menores consumos.

A análise dos resultados dos ultrassons em conjunto com a inspeção visual realizada aos provetes demonstrou que os transdutores de 24 kHz são capazes de melhor diferenciar entre diferentes tipos de nós, contudo as medições por transdutores de 54 kHz apresentaram menor variação nos resultados.

Nos diferentes tipos de medições foram obtidos coeficientes de determinação altos quando relacionadas as medições entre diferentes transdutores, sendo que os transdutores de 24 kHz apresentaram erros percentuais menores na relação com os ensaios mecânicos à flexão, tanto para rigidez como para resistência. Os resultados obtidos sustentam que a diferença nas medições com utilização de transdutores com frequências de onda de 24 kHz ou 54 kHz não é significativa.

Agradecimentos

O apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/62326/2009 é agradecido. Os autores agradecem também o apoio de Augusto de Oliveira Ferreira e Companhia Lda. (AOF) pela oferta dos elementos de madeira.

Referências

- [1] Kasal, B.; Anthony R.W. – “Advances in in situ evaluation of timber structures” em *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 6, 2004, p. 94-103.
- [2] Machado, J.S.; Palma, P. – “Non-destructive evaluation of the bending behaviour of in-service pine timber structural elements” *Materials and Structures*, Vol. 44, 2011, p. 901-910.

- [3] Sousa, H.S.; Branco, J.M.; Lourenço, P.B. – “Assessment of strength and stiffness variation within old timber beams” em *8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC2012*, Polónia, Vol. 3, 2012, p. 2079-2087.
- [4] Teder, M.; Pilt, K.; Miljan, M.; Pallav, V.; Miljan, J. – “Investigation of the physical-mechanical properties of timber using ultrasound examination” *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 18, 2012, p. 795-801.
- [5] ASTM – “ASTM 494-89 Standard practice measuring velocity in materials” em *American Society for Testing Materials*, EUA, 1989, 34 p.
- [6] Tanasoiu, V.; Miclea, C.; Tanasoiu, C. – “Non-destructive testing techniques and piezoelectric ultrasounds transducers for wood and built in wooden structures” *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 4, 2002, p. 949-957.
- [7] McDonald, K.A. – “Lumber quality evaluation using ultrasonics” em *4th International NDT Symposium of Wood*, Vol. 4, 1978, p. 5-14.
- [8] Machado, J.S.; Palma, P.; Simões, S. – “Ultrasonic indirect method for evaluating clear wood strength and stiffness” em *7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering, NDTCE'09*, França, 2009, p. 969-974.
- [9] Sandoz, J.L. – “Grading of construction timber by ultrasound” *Wood Science and Technology*, Vol. 23, 1989, p. 95-108.
- [10] Oliveira, F.R.; Candian, M.; Lucchette, F.F.; Calil Jr., C.; Sales, A. – “Avaliação de propriedades de madeira por meio de ultra-som” em *PANNDT - III Pan-American Conference for Nondestructive Testing*, Brasil, 2003.
- [11] Divós, F.; Tanaka, T. – “Relation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Wood” em *Acta Silv. Lign. Hung.*, Vol. 1, 2005, p. 105-110.
- [12] Machado, J.S.; Costa, D.; Cruz, H. – “Evaluation of Pine timber strength by drilling and ultrasonic testing” em *13th International Symposium for Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2003.
- [13] Lourenço, P.B.; Feio, A.O.; Machado, J.S. – “Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood” *Construction and Building Materials*, Vol. 21, 2007, p. 1617-1627.
- [14] Feio, A.O.; Lourenço, P.B.; Machado, J.S. – “Non-destructive evaluation of the mechanical behaviour of chestnut wood in tension and compression parallel to grain” *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 1, 2007, p. 272-292.
- [15] Lee, J.J.; Bae, M.S. – “Determination of Ratio of Wood Deterioration Using NDT Technique” *Journal of the Korean wood science and technology, Mokchae Konghak*, Vol. 32, 2004, p. 33-41.
- [16] Sousa, H.S.; Branco, J.M.; Lourenço, P.B. – “Characterization of cross sections from old chestnut beams weakened by decay” *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 8, 2014, p. 436-451.
- [17] Sousa, H.S.; Branco, J.M.; Lourenço, P.B. – “Use of bending tests and visual inspection for multi-scale experimental evaluation of chestnut timber beams stiffness” *Journal of Civil Engineering and Management*, 2014, em publicação doi: 10.3846/13923730.2014.914083.
- [18] Brites, R. – “Avaliação de Segurança das Estruturas Antigas de Madeira” em *Universidade do Minho - Escola de Engenharia: Tese de Doutoramento*, 2011.
- [19] ENIU – “UNI11035-1, Legno strutturale - Classificazione a vista di legnami italiani secondo la resistenza meccanica: terminologia e misurazione delle caratteristiche” em *Ente Nazionale Italiano di Unificazione*, 2003, 9 p.
- [20] ENIU – “UNI11119, Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera” em *Ente Nazionale Italiano di Unificazione*, 2004, 9 p.
- [21] Bucur, V.; Feeney, F. – “Attenuation of ultrasound in solid wood” *Ultrasonics*, Vol. 30(2), 1992, p. 76–81.
- [22] Bucur, V.; Böhnke, I. – “Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood” *Ultrasonics*, Vol. 32(5), 1994, p. 385–390.
- [23] Biernacki, J.; Beall, F. – “Development of an acousto-ultrasonic scanning system for non-destructive evaluation of wood and wood laminates” *Wood and Fiber Science*, Vol. 25(3), 1993, p. 289-297.
- [24] Emerson, R.N.; Pollock, D.G.; McLean, D.I.; Fridley, K.J.; Ross, R.J.; Pellerin, R.E. – “Nondestructive testing of large bridge timbers” em *Proceedings of 11th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Madison, WI, 1999, p. 175–184.

- [25] Beall, F.C. – “Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties” *Wood Science and Technology*, Vol. 36, 2002, p. 197–212.
- [26] Machado, J.S. – “Avaliação da variação das propriedades mecânicas de pinho bravo (*Pinus Pinaster* Ait.) por meio de ultra-sons” Tese de Doutoramento em Engenharia Florestal, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, Portugal, 2000, 265 p.
- [27] Bonamini, G.; Noferi, M.; Togni, M.; Uzielli, L. – “Il Manuale del Legno Strutturale, Volume I, Ispezione e diagnosi in opera” *Mancosu Editore, Roma*, 2001.
- [28] Kasal, B.; Tannert, T. – “In Situ Assessment of Structural Timber. Technical Committee 215-AST” em *RILEM State of the Art Reports*, Vol. 7, RILEM Publications, 2010, p.124.
- [29] Kotlíňová, M.; Kloiber, M.; Vasconcelos, G.; Lourenço, P.B.; Branco, J.M. – “Nondestructive testing of wood” em *Sborník původních vědeckých prací a monografií, Lesnická práce*, ISBN 978-80-87154-14-4, 2008, 39 p.
- [30] Branco, J.M.; Peixoto, T.; Lourenço, P.B.; Medeiros, P. – “Mechanical characterization of old chestnut beams” em *SHATIS'11 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*, Lisboa, Portugal, 2011, p. 8.
- [31] CEN – “EN408:2010, Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties” em *European Committee for Standardization*, 2010, 36 p.
- [32] ISO – “ISO3130, Wood - Determination of moisture content for physical and mechanical tests” em *International Organization for Standardization*, 1975, 2 p.
- [33] ISO – “ISO3131, Wood - Determination of density for physical and mechanical tests” em *International Organization for Standardization*, 1975, 2 p.
- [34] JCSS – “Probabilistic Model Code Part 3: resistance models - 3.5 properties of timber” em *Probabilistic Model Code, Joint Committee on Structural Safety*, 2006.