

CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA DE CASTANHO À TRACÇÃO PARALELA AO FIO

Artur O. Feio

Universidade do Minho – UM., Departamento de Engenharia Civil, Portugal

José S. Machado

Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC – NEM, Portugal

Paulo B. Lourenço

Universidade do Minho – UM., Departamento de Engenharia Civil, Portugal

RESUMO

O objectivo do presente trabalho consiste na apresentação dos ensaios de tracção paralela ao fio realizados em provetes de Castanho, obtendo-se parâmetros que tentam descrever o seu comportamento mecânico, nomeadamente o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e ainda a resistência à tracção paralela ao fio. Estes parâmetros são particularmente relevantes quando se pretende efectuar análises numéricas de estruturas, como é objectivo futuro.

Serão ainda analisadas as correlações existentes entre as propriedades físicas estudadas (propriedades mecânicas e densidade), com os resultados obtidos em ensaios não destrutivos realizados em laboratório: velocidade de propagação dos ultra-sons.

1. INTRODUÇÃO

Com uma utilização estrutural intimamente relacionada com as suas excepcionais capacidades resistentes à compressão, a madeira é também muitas vezes utilizada em elementos estruturais que estão solicitados a esforços de tracção. Entendendo a madeira como um material lenhoso limpo ou sem defeitos, e sabendo que esta apresenta uma maior resistência quando sujeita a esforços de tracção ao longo das fibras em comparação com a sua resistência perpendicular às fibras, dada a significativa diferença de propriedades ao longo e transversalmente às fibras, importa desta forma conhecer as características mecânicas e física da madeira de Castanho (*Castanea sativa* Mill.) nas mais diversas situações de utilização estrutural e que permitem entender o comportamento de um material anisotrópico como a madeira.

Como parte de um estudo global que visa caracterizar e identificar, até à rotura, as relações tensão-deformação, da madeira de Castanho no referencial global LTR, foi realizada uma campanha experimental com o intuito de dar resposta a este problema.

No entanto alguns investigadores empenharam-se no estudo deste tema sendo que a maioria deles se dedicou única e exclusivamente à determinação dos módulos de elasticidade no plano RT (Bodig, 1973; Sliker, 1988; 1993) considerando a hipótese da existência dum estado uniaxial e uniforme de tensão instalado no referencial de simetria ortotrópica dos provetes, hipótese esta que serve de base às normas vigentes: EN 408 (2000), ASTM D143-94 (1994), NP-621 (1973) e BSI-373 (1957). O cálculo da tensão de rotura à tracção paralela é efectuado através de:

$$\sigma_{Rot.} = \frac{F_{máx.}}{A} \quad (1)$$

onde $F_{máx}$ é a força última e A é a área da secção transversal média do provete.

Outros estudos efectuados tentam comparar e conjugar os ensaios laboratoriais e a respectiva análise de resultados, com simulações numéricas, recorrendo ao MEF – método de elementos finitos. Desta forma são realizadas análises mais acuradas do problema, tentando aproximar da realidade a análise de resultados, sobretudo por efeitos da tentativa de diminuição dos efeitos da heterogeneidade do campo de tensões e deformações, contrariando os princípios de análise de resultados levados a cabo pelas investigações anteriores, incluindo fenómenos como a influência da curvatura dos anéis de crescimento e introdução de factores de correcção que tentam contemplar a complexidade do campo de tensões, fiabilizando os resultados (Pereira, 2003).

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Generalidades

De acordo com o preconizado pela norma Nbr7190/97, o provete de ensaio adoptado possui uma geometria conforme a apresentada na Figura 1 (a). O volume total de cada provete é de, aproximadamente, $3,2 \times 10^{-4} m^3$.

No entanto, e de forma a obter-se um melhor desempenho de ensaio, o provete foi modificado nas zonas de amarração, adoptando-se o provete da Figura 1 (b). Esta alteração deve-se à diferença entre a área efectiva de amarração (garras da máquina), significativamente menor, e a área de amarração do provete original, tendo-se verificando, na maioria dos ensaios-teste realizados, que a rotura estava associada ao esmagamento do provete na zona das garras.

Inicialmente foram ensaiados 30 provetes de madeira de Castanho divididos em dois lotes distintos: um lote corresponde à madeira de Castanho novo (MCN), que representa a madeira que nunca foi utilizada estruturalmente embora provenha de toros que poderiam ser utilizados como tal, e o outro lote corresponde à madeira de Castanho velho (MCV), que representa a madeira que já foi utilizada em obra em elementos estruturais. Esta madeira é originária, principalmente, da região Norte do país.

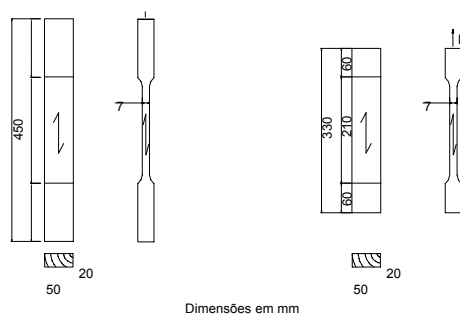


Figura 1 – Geometria do provete adoptado: (a) provete preconizado pela norma; (b) provete adoptado no ensaio.

Os provetes ensaiados foram previamente condicionados numa câmara para mantêm uma temperatura de $20 \pm 2^\circ C$ e uma humidade relativa de $65 \pm 5\%$, estando os provetes condicionados quando se observa uma variação de peso inferior a 0,5% num espaço de 2 horas, de acordo com o preconizado com a norma NP-614. Os pesos foram registados através de uma balança electrónica com 0,01 g de precisão.

2.2 Ensaio Destrutivo

O ensaio destrutivo de tracção foi realizado numa máquina universal de ensaios mecânicos (INSTRON – Model 4483), com uma célula de carga capaz de introduzir uma força máxima de 100 kN. Adicionalmente utilizou-se um sistema de alimentação, aquisição e amplificação de dados que foi idealizado para o efeito e que permitiu, após a montagem da ponte extensométrica utilizada (“full bridge transducers”), obter e registar todas as grandezas medidas.

A medição das extensões verticais e horizontais nos provetes foi realizada por 2 pares de extensómetros, colados em faces opostas, de modo a obter os valores médios dos deslocamentos sofridos pelo provete em ensaio (Yadama, 1991). A cola utilizada foi uma cola própria para este tipo de provete e de material: B-1 da TML – Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. O par de extensómetros verticais (na direcção das fibras; L-60-11 da TML) e o par de extensómetros horizontais (perpendicular às fibras; L-20-11 da TML) foram colocados na zona central do provete, sendo cada elemento do par colocado em faces opostas dos provetes. A montagem da ponte fica completa com a colocação de um provete de referência cuja função é a de anular os efeitos (extensómetros compensadores), e correspondentes componentes numéricas, devidos à variação da temperatura. A montagem dos extensómetros em ponte completa.

A tensão de saída da ponte relativa à tensão de alimentação da ponte é:

$$\frac{\mathcal{B}}{V} = \frac{1+G \cdot \varepsilon}{2+(1-\nu) \cdot G \cdot \varepsilon} - \frac{1-\nu \cdot G \cdot \varepsilon}{2+(1-\nu) \cdot G \cdot \varepsilon} = \frac{(1+\nu) \cdot G \cdot \varepsilon}{2+(1-\nu) \cdot G \cdot \varepsilon} \approx \frac{(1+\nu) \cdot G}{2} \cdot \varepsilon \quad (2)$$

onde G é a sensibilidade dos extensómetros (gage factor) e ν é o coeficiente de Poisson.

Devido ao tipo de extensómetros utilizados, e tendo em conta a influência dos fios utilizados para as ligações, houve a necessidade de se efectuar uma correcção da sensibilidade. Deste modo:

$$G_o = \frac{R}{R+r \cdot L} \cdot G \quad (3)$$

onde G_o é a sensibilidade corrigida; G é a sensibilidade indicada pelo fabricante; R é a resistência em Ω ; r é a resistência total, por metro, dos fios de ligação em Ω/m e L é o comprimento dos fios de ligação em m .

Em termos de ponte extensométrica temos que:

$$G_o = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \text{ com } \frac{\Delta L}{L} = \varepsilon \quad (4)$$

$$V_1 = V \cdot \frac{R}{R \cdot (2+G_o \varepsilon)} \text{ e } V_2 = V \cdot \frac{R \cdot (1+G_o \varepsilon)}{R \cdot (2+G_o \varepsilon)} \quad (5)$$

$$\frac{\mathcal{B}}{V} = \frac{1-G_o \cdot \varepsilon}{2+G_o \cdot \varepsilon} - \frac{1}{2+G_o \cdot \varepsilon} = \frac{G_o \cdot \varepsilon}{2+G_o \cdot \varepsilon} \approx \frac{G_o \cdot \varepsilon}{2} \quad (6)$$

Fazendo a tensão de excitação igual a $5V$, teremos uma tensão de saída da ponte de 6500μ para a extensão máxima de 1000×10^{-6} . A 10^{-6} de extensão corresponde uma tensão de saída da ordem dos 6.5μ .

A amplificação do sinal de saída da ponte é justificada sobretudo pelo efeito na redução do ruído e pela melhoria na exactidão de medição de pequenas extensões. O ganho do amplificador de entrada foi seleccionado de modo a que a uma extensão de 1000×10^{-6} correspondam $2500mV$ à entrada da unidade de aquisição. Para uma tensão de excitação da ponte de $5V$ teremos, assim uma amplificação de:

$$A = \frac{2500}{6.5} = 384.6 \quad (7)$$

Os ensaios foram realizados de acordo com o preconizado pela norma Nbr7190/97 sendo que a velocidade de ensaio foi de 3 mm/min. Esta alteração normativa prendeu-se com o facto de haver necessidade de se realizar o ensaio com controlo de deslocamento, e não através do controlo de força, como indica a norma, por limitação da máquina de ensaios utilizada.

Na fase cíclica que antecede a fase de rotura, não foram registados quaisquer valores de deslocamentos e força, sendo que se manteve a velocidade de 3 mm/min. A finalidade destes ciclos de carga/descarga é o de homogeneizar o material e acomodar possíveis folgas, pelo que não será relevante o registo dos referidos valores.

Adicionalmente foi utilizado um extensómetro mecânico, com uma base de medida de 50 mm (INSTRON 2630_100 Strain Clip-On Extensometers) com o objectivo de se comparar os registos dos dois tipos de extensómetros utilizados: mecânicos versus colados. Deste modo foram ensaiados, só com o extensómetro mecânico, mais um conjunto de 50 provetes (25 de MCN e 25 de MCV).

A humidade relativa do ar e a temperatura do ar durante os ensaios foram registadas por um termohidrófago. Durante a realização dos ensaios os valores médios registados foram de 20-23 °C e de 44-58% de humidade relativa do ar.



Figura 2 – Ensaio destrutivo: (a) vista geral e (b) pormenor de uma das faces.

2.3 Ensaio Não Destrutivo

2.3.1 Ultra-Sons

A emissão de ondas ultra-sónicas foi realizada com o auxílio do PunditPlus e de 2 sondas de 150 kHz. Os ensaios foram divididos em 3 tipos distintos de transmissão de sinal: (1) Método Indirecto ($d=20$ cm); (2) Método Indirecto ($d=45$ cm) e (3) Método Directo, paralelo às fibras. Foram registados os tempos de propagação da onda, e considerou-se o meio contínuo e homogéneo, calculou-se a velocidade de propagação das ondas elásticas.

A técnica baseada no Método Indirecto de transmissão de ondas elásticas ($d=20$ cm e $d=45$ cm) foi utilizada em ambas as faces, ver Figura 3 (a) e Figura 3 (b). Em termos de análise de resultados foram considerados os valores médios. No Método Directo, paralelo às fibras, as medições foram efectuadas nos topos dos provetes, sendo que em termos de análise dos resultados foram considerados os valores médios de 3 leituras em cada provete, ver Figura 3 (c).

Em todos os métodos, o acoplamento entre as sondas e os provetes utilizados foi efectuado por intermédio de um gel de cabelo convencional, sendo que a única e exclusiva função deste é a permitir otimizar a transmissão de energia entre as sondas e a madeira ultrapassando as diferenças de impedância acústica existentes.

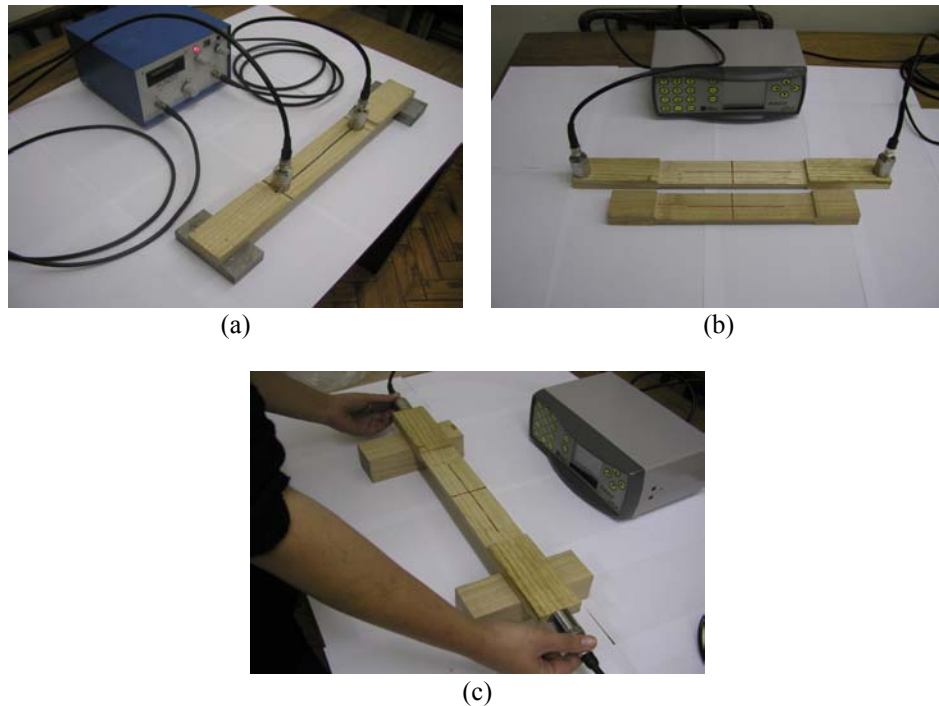


Figura 3 – Ultra-Sons: Método Indirecto ($d=20$ cm); (b) Método Indirecto ($d=45$ cm) e comparação dos 2 tipos de provetes; (c) Método Directo, paralelo às fibras.

2.3.1 Massa Volúmica

A determinação da massa volúmica do lote de provetes considerado foi efectuada de acordo com o preconizado pela norma NP-616. Dadas as condições de condicionamento dos provetes a massa volúmica determinada é a correspondente a um teor em água da madeira de 12%, sendo dada por

$$\rho_{12\%} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (8)$$

onde $m_{12\%}$ é a massa do provete e $V_{12\%}$ é o volume do provete.

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

3.1 Ensaio Destrutivo

De uma forma genérica podemos afirmar que a rotura do lenho em tracção paralela ao fio, apresenta diferentes padrões, Figura 6.

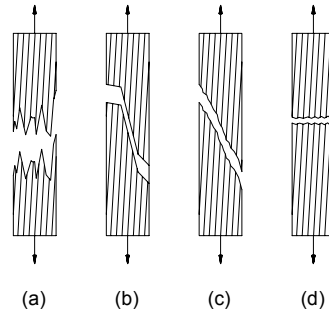


Figura 4 – Tipos de rotura observados no ensaio destrutivo: (a) lascado; (b) combinação de tracção e corte; (c) corte; (d) tracção pura.

Após a realização dos ensaios destrutivos, e confirmando o que teoricamente seria esperado, foram obtidos resultados, em termos de padrões de rotura, semelhantes aos previstos, ver Figura 5.

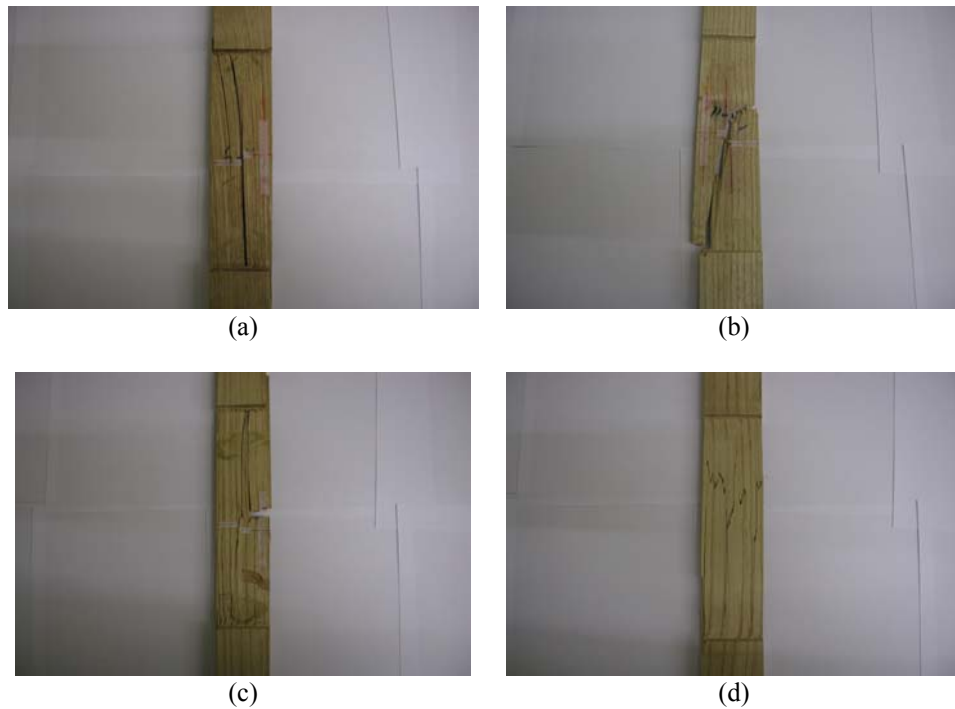


Figura 5 – Tipos de rotura observados no ensaio destrutivo: (a) corte; (b) combinação de corte e tracção; (c) tracção; (d) lascado.

A seguir apresentam-se os resultados obtidos com os extensómetros colados e com o extensómetro mecânico.

Tabela 1 – Resultados obtidos com os extensómetros colados (Ensaio Destrutivo)

| Ensaio Destrutivo (extensómetros colados) | | | | |
|--|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| | MCN | | MCV | |
| | E (GPa) | Coef. Poisson | E (GPa) | Coef. Poisson |
| Méd. | 12,3 | 0,46 | 14,1 | 0,45 |
| DP | 2,28 | 0,04 | 2,00 | 0,04 |
| NP | 15 | 15 | 15 | 15 |
| CV | 18 | 8,09 | 14 | 9,74 |

Tabela 2 – Resultados obtidos com o extensómetro mecânico (Ensaio Destrutivo)

| Ensaio Destrutivo (extensómetro mecânico) | | |
|--|----------------|----------------|
| | MCN | MCV |
| | E (GPa) | E (GPa) |
| Méd. | 12,36 | 13,85 |
| DP | 2,02 | 2,32 |
| NP | 15 | 15 |
| CV | 16,36 | 16,75 |

Na Figura 6 são apresentadas as relações obtidas, em termos de módulo de elasticidade, entre as medições efectuadas com os extensómetros colados e com o extensómetro mecânico.

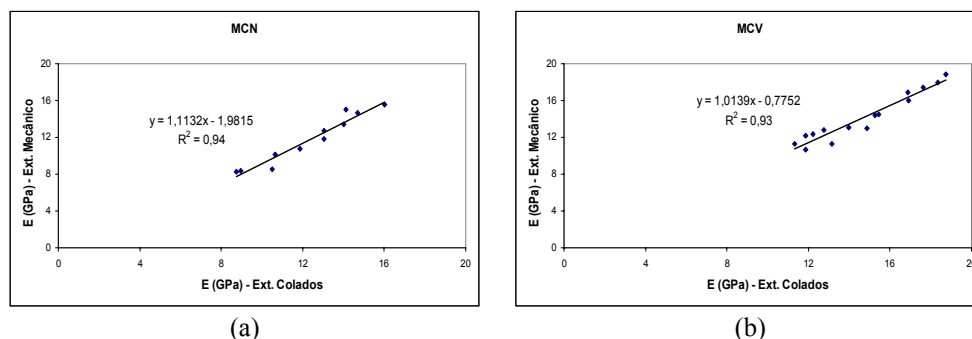


Figura 6 – Relações obtidas entre os valores do módulo de elasticidade medidos com o extensómetro mecânico e os extensómetros colados: (a) MCN e (b) MCV.

3.2 Ultra-Sons

A velocidade de propagação das ondas de pressão de tipo longitudinal num meio elástico depende essencialmente da rigidez e da densidade do meio. Por outro lado, é normalmente possível medir o tempo de atravessamento de um conjunto de ondas elásticas.

Deste modo e atendendo a que:

$$E_{din} = v^2 \cdot \rho \quad (9)$$

onde E_{din} representa o módulo de elasticidade dinâmico em N/m^2 ; v é a velocidade de propagação em m/s e ρ é a massa volúmica dos provetes em kg/m^3 .

Desta forma importa saber como efectuar a “correção” do módulo de elasticidade dinâmico em comparação com o $E_{médio}$ estático, considerado como o valor de referência em termos de projecto (na prática $E_{din} \geq E_{médio}$). Vários autores (Wood Handbook, 1974) apresentam como adequada uma relação linear do tipo:

$$E_{médio} = a \cdot E_{din} + b \quad (10)$$

Em baixo apresentam-se os resultados obtidos, em termos de módulo de elasticidade, com a aplicação dos 3 métodos de ensaio utilizados.

Tabela 3 – Cálculo do módulo de elasticidade: comparação dos métodos

| | Mét. Directo, paralelo fibras | | Mét. Indirecto (d=20 cm) | | Mét. Indirecto (d=45 cm) | |
|-------------|-------------------------------|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| | E (GPa) | | E (GPa) | | E (GPa) | |
| | MCN | MCV | MCN | MCV | MCN | MCV |
| Méd. | 15,0 | 16,0 | 20,6 | 21,2 | 15,7 | 16,7 |
| DP | 2,86 | 2,59 | 3,91 | 3,63 | 2,84 | 2,98 |
| CV | 19 | 16 | 19 | 17 | 18 | 18 |

Na Figura 7 são apresentadas as relações obtidas, em termos de módulo de elasticidade e de ultra-sons, entre os métodos utilizados.

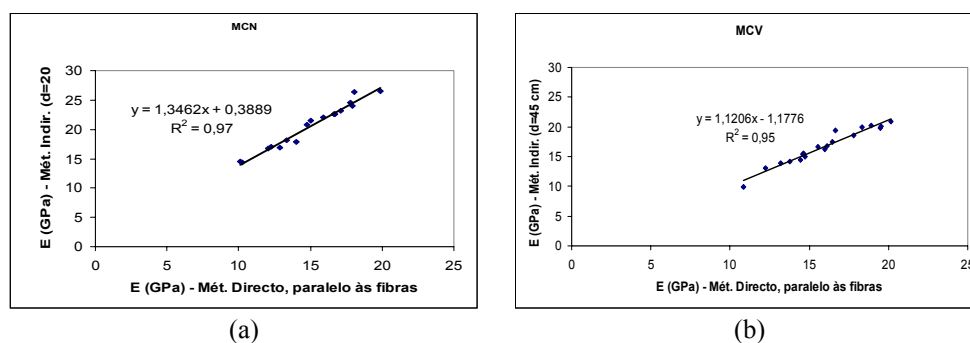


Figura 7 – Relação entre os métodos utilizados: (a) Método Directo/Método Indirecto (d=20 cm), lote MCN e (b) Método Directo/Método Indirecto (d=45 cm), lote MCV.

4. CONCLUSÕES

Numa primeira análise podemos concluir que existe uma excelente relação entre os valores medidos pelos extensómetros colados e pelo extensómetro mecânico ($r^2 \cong 0,94$). Esta constatação permite repensar futuras campanhas de ensaio sem a necessidade de utilização de extensómetros colados que se apresentam mais onerosos e de mais difícil manuseio quando comparados com os mecânicos.

Outra constatação importante prende-se com os valores obtidos para os Coeficientes de Poisson. Estes valores são muito próximos quer no lote MCN, quer no lote MCV, e apresentam um valor médio de $\nu = 0,45$ ($CV \cong 9$).

Por outro lado, os valores médios de tensão de rotura apresentam um CV elevado devido ao facto destes valores serem analisados como um todo, não se atendendo ao tipo/padrão de rotura que apresentam. Enquadrando os diversos provetes consoante os seus padrões de rotura os resultados tendem a melhorar.

Os resultados obtidos com os ultra-sons, e analisando as relações entre os 3 métodos utilizados, apresentam óptimas perspectivas. Os valores mais elevados de E são obtidos com o Método Indirecto (d=20 cm). Este facto está directamente relacionado com o facto de neste troço, em que a velocidade de transmissão de ondas elásticas foi medida, não existirem quaisquer estrangulamentos da secção do provete, como acontece nos outros 2 métodos, ver Figura 1. Nos outros 2 métodos os valores são muito coincidentes.

Em ambos os ensaios os provetes do lote MCV apresentam resultados superiores (MOE) aos do lote MCN (11%). Este facto, possivelmente, resulta da qualidade da madeira que compõe o lote MCV ser superior à do lote MCN, pese o facto desta ter já sido utilizada estruturalmente. Outro factor importante, e que poderá influenciar esta análise, refere-se à proveniência e historial de aplicações estruturais deste lote ser de origem desconhecida.

Por último na Figura 8 são apresentadas as relações existentes entre os resultados obtidos com o ensaio destrutivo e o Método Directo. A análise de r^2 (0.86 para o lote MCN e 0.81 para o lote MCV) permite-nos concluir sobre a boa relação que existe, não só, entre estes 2 métodos, mas de uma forma geral entre os ensaios destrutivos e os ultra-sons.

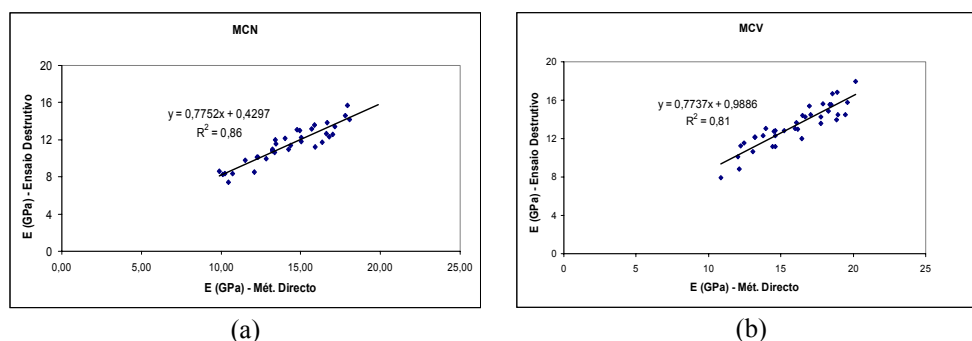


Figura 8 – Relação entre o ensaio destrutivo e o Método Directo: (a) MCN e (b) MCV.

5. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials, “D143-94 – Standard methods of testing small clear specimens of timber”, ASTM, Philadelphia, USA, 1994.
- Bodig, J.; Goodman, J. R., 1973 – “Prediction of elastic parameters for wood”. *Wood Science*, 5(4), p. 249-264.
- British Standards Institution, “Methods of testing small clear specimens of timber”, BSI-373 London, 1957.
- European Committee for Standardization, “EN 408 Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties”, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2000.
- Norma Brasileira, “Nbr7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira”, 1973.
- Norma Portuguesa, “NP-614 Madeiras – Determinação do teor em água”, 1973.
- Norma Portuguesa, “NP-616 Madeiras – Determinação da massa volúmica”, 1973.

- Norma Portuguesa, "NP-621 Madeiras - Ensaio de tracção transversal ", 1973.
- Pereira, J.L.; Xavier J.; Morais, J., 2003 – “Estudo por elementos finitos dum novo método para a determinação das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus Pinaster AIT.* nas direcções perpendiculares ao grão”. Livro de actas do VII Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional, Vol. II. Universidade de Évora.
- Sliker, A., 1988 – “A method for predicting non-shear compliances in the RT plane of wood”. *Wood and Fiber Science*, 20(1), p. 44-55.
- Sliker, A.; Yu, Y., 1993 – “Elastic constants for hardwoods measured from plate and tension tests”. *Wood and Fiber Science*, 25(1), p. 8-22.
- Wood Handbook, Forest Service Agricultural Handbook nº 72, U.S.D.A, 1974, cap. 6.
- Yadama, V.; Davalos, J.F.; Loferski, J.R.; Holzer, S. M., 1991 – “Selecting a gauge length to measure parallel-to-grain strain in southern pine”. *Forest Products Journal*, Vol. 41(10), p. 65-68.