

CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DA MADEIRA DE CASTANHO NA DIRECÇÃO PERPENDICULAR AO FIO – RECURSO A TÉCNICAS DESTRUTIVAS E NÃO DESTRUTIVAS DE ENSAIO

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

A avaliação e a caracterização mecânica de provetes de madeira limpa de Castanho, à compressão perpendicular ao fio, são realizadas por meio de ensaios laboratoriais, com a determinação de parâmetros que descrevem o comportamento linear das madeiras, nomeadamente o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e ainda a resistência à compressão perpendicular ao fio. O comportamento mecânico dos provetes ensaiados é discutido atendendo à orientação das camadas de crescimento face à direcção de introdução da força. Igualmente é analisada a possibilidade de prever esse mesmo comportamento através de medições não destrutivas por meio da leitura da velocidade de propagação de ultra-sons, da utilização do Resistógrafo, do Pilodyn e da avaliação da massa volúmica.

1. INTRODUÇÃO

A madeira representa um dos mais antigos, e de carácter mais tradicional, materiais estruturais utilizados nas construções monumentais no nosso país. Em particular, a madeira de castanho (*Castanea sativa* Mill.) aparece sobretudo associada a construções de elevado carácter social e com aplicações nobres, tanto à luz das suas aplicações estruturais como do ponto de vista estético.

Qualquer intervenção cuidada com vista à conservação ou à reabilitação de uma construção existente implica um conhecimento profundo do material constituinte da estrutura, quer do ponto de vista mecânico, quer do ponto de vista da sua caracterização física. Este conhecimento constitui o suporte para avaliar o comportamento estrutural a curto prazo e prever a contínua adaptação e capacidade de resposta do material face a factores adversos que possam surgir a longo prazo.

As últimas décadas têm apresentado diversos desenvolvimentos ao nível das técnicas e dos equipamentos de ensaio que permitem, diminuindo a subjectividade e aumentando o rigor das análises estruturais, diagnosticar e inspeccionar o património histórico. De entre muitos métodos e técnicas de ensaio, os não destrutivos têm ganho especial interesse devido ao facto de se apresentarem como uma verdadeira solução sobretudo se tivermos em linha de conta a integridade e segurança das estruturas.

Estes métodos podem ser agrupados em duas classes: métodos globais de ensaio e métodos locais de ensaio (Bertolini, 1998). Os primeiros englobam geralmente as técnicas ultra-sónicas e vibracionais dos elementos. Os métodos locais, de que são exemplos o Resistógrafo (Rinn, 1994) e o Pilodyn (Gorlacher, 1987), são geralmente utilizados *in-situ* como auxílio na apreciação visual dos elementos e estruturas de madeira para avaliação da incidência e gravidade dos defeitos e do estado de conservação do material (Machado, 1997).

De uma forma simplificada pretende-se comparar a secção residual útil com as variações de massa volúmica geralmente associadas à perda de material. Estes métodos apresentam uma enorme facilidade de aplicação prática, transporte e eficiência.

Presentemente estes métodos são utilizados isoladamente ou em conjunto com outros métodos e técnicas não destrutivas, às quais se pode adir a contribuição de ensaios destrutivos realizados em laboratório e que permitem, de uma forma mais correcta e acurada, estudar a variabilidade das características mecânicas de elementos de madeira (Uzielli, 1992).

O principal objectivo deste trabalho é a caracterização mecânica de provetes de madeira limpa de Castanho (*Castanea Sativa* Mill.) através da obtenção, por meio de ensaios laboratoriais de compressão, de parâmetros que descrevem o comportamento linear das madeiras, nomeadamente o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e ainda a resistência à compressão perpendicular ao fio. Igualmente pretende-se discutir a possibilidade de estimar os parâmetros atrás referidos através de ensaios não destrutivos sem que deste modo seja afectada a capacidade resistente dos elementos de madeira em serviço. O comportamento mecânico dos provetes ensaiados é discutido atendendo à orientação das camadas de crescimento face à direcção de introdução da força.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Material

Inicialmente todos os provetes apresentavam as dimensões de 5x5x30 cm. Os ensaios de ultra-sons foram realizados sobre estes provetes, sendo que posteriormente todos eles foram seccionados em 3 amostras de 5x5x10 cm: 2 delas foram ensaiadas destrutivamente e na última foram realizados os restantes ensaios não destrutivos (Pilodyn e Resistógrafo).

Foram ensaiados 164 provetes de madeira de Castanho divididos em dois grupos: 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 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.

Por outro lado todos os provetes ensaiados foram divididos em distintos grupos em função da orientação das camadas de crescimento face à direcção de introdução da força. Desta forma foram considerados quatro grupos: (a) difuso; (b) diagonal; (c) tangencial e (d) radial, representados na Figura 1.

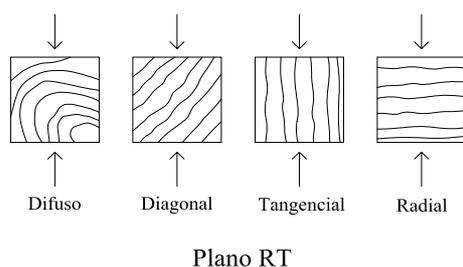


Figura 1 – Disposição dos anéis de crescimento em função da carga aplicada.

Os provetes ensaiados foram previamente condicionados numa câmara climática que mantém uma temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 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 foi realizado com o auxílio de uma máquina de ensaios Baldwin, com uma célula de carga capaz de introduzir uma força máxima de 300 kN e uma força mínima de 6 kN. Adicionalmente utilizou-se um sistema de alimentação da Schenck e a aquisição e amplificação dos dados foi efectuada através de um equipamento da HBM (Spider 8), ver Figura 2 (a).

Os ensaios foram realizados de acordo com o preconizado pela norma Nbr7190/97 sendo que a velocidade de ensaio, na fase cíclica, foi de $6 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ e no último patamar, coincidente com a fase de rotura, foi de $6 \times 10^{-2} \text{ mm/s}$. 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 (limitação imposta pela máquina de ensaio).

Previamente foram realizados uma série de ensaios de calibração do sistema onde se verificou a concordância entre os deslocamentos verticais medidos nas faces dos provetes, por meio de extensómetros mecânicos, e os deslocamentos verticais medidos nos braços da máquina de ensaio, por meio de LVDT's. Dada esta concordância, a montagem do ensaio compreendeu a colocação de 4 extensómetros mecânicos (um em cada uma das faces) permitindo medir os deslocamentos horizontais, e adicionalmente foram colocados 2 LVDT's nos braços da máquina de ensaio que permitem medir os deslocamentos verticais. Por razões de logística de equipamento foram utilizados 3 extensómetros mecânicos da HBM do tipo DD1 e 1 extensómetro mecânico da Schenck, ver Figura 2 (b). Este último, e como resultado do sistema de fixação adoptado, surge por vezes na análise dos resultados como um extensómetro “morto” em parte devido ao facto de não aderir à superfície dos provetes (“saltando”) e não acompanhar os deslocamentos sofridos por estes durante o processo de ensaio.

A resistência à compressão normal às fibras é o valor convencional determinado pela deformação específica residual de 0,2%, como preconizado pela norma utilizada. A rigidez da madeira na direcção normal às fibras é determinada pelo seu módulo de elasticidade. Este é calculado através da inclinação da recta secante à curva tensão-deformação, definida pelos pontos $(\sigma_{10\%}; \epsilon_{10\%})$ e $(\sigma_{50\%}; \epsilon_{50\%})$ correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência convencional à compressão normal às fibras, sendo dado por:

$$E_{c90} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{50\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (1)$$

onde $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de compressão normal correspondentes a 10% e 50% da resistência convencional, e $\epsilon_{10\%}$ e $\epsilon_{50\%}$ são as deformações específicas medidas na direcção normal às fibras correspondentes às tensões $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

A humidade relativa do ar e a temperatura do ar durante os ensaios foram registadas por um termohigrógrafo. Durante a realização dos ensaios os valores médios registados foram de $24 \pm 2^\circ\text{C}$ e de $52 \pm 12\%$ de humidade relativa do ar.



(a)



(b)

Figura 2 – Esquema de ensaio: (a) aspecto geral e (b) provete instrumentado.

2.3 Ensaio Não Destrutivo

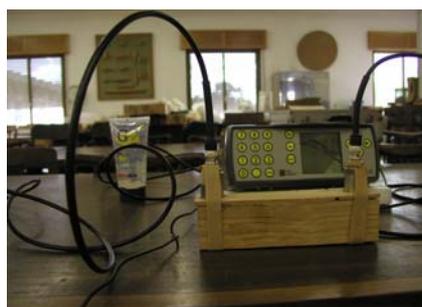
2.3.1 Ultra-Sons

Na realização destes ensaios utilizou-se o equipamento de emissão de ondas ultrasónicas Pundit/Plus e sondas de 150 kHz. Os ensaios foram divididos em 3 tipos distintos de transmissão de sinal: (1) Método Indirecto; (2) Método Directo, paralelo às fibras e (3) Método Directo, perpendicular às fibras. Foram registados os tempos de propagação da onda e considerou-se o meio contínuo e homogéneo.

A técnica baseada no Método Indirecto de transmissão de ondas elásticas, foi utilizada em todas as faces, no caso dos provetes Diagonais e Difusos, e no caso dos provetes Radiais e Tangenciais foi utilizada em pares de faces paralelas, dependendo da orientação dos anéis de crescimento, ver Figura 3 (a). Em termos de análise de resultados foram considerados os valores médios.

No Método Directo, perpendicular às fibras, utilizaram-se secções contíguas do mesmo provete, que distavam entre si 6 cm, ver Figura 3 (c), e nelas foram efectuadas as medições considerando-se os valores médios.

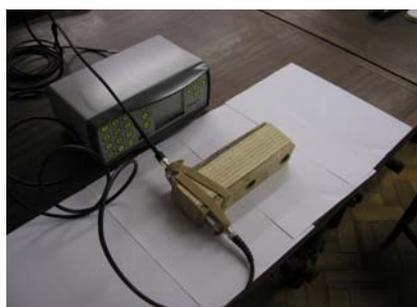
Em todos os métodos, o acoplamento entre as sondas e os provetes utilizados foi efectuado por intermédio de um gel de cabelo convencional, sendo que a única e exclusiva função deste é a de permitir uma boa transmissão da onda elástica entre as sondas e o provete sob ensaio.



(a)



(b)



(c)

Figura 3 – (a) Pormenor de montagem do ensaio – Método Indirecto; (b) Método Directo, paralelo às fibras; (c) Método Directo, perpendicular às fibras.

2.3.2 Resistógrafo

A utilização do Resistógrafo permitiu obter o perfil densidade dos vários provetes utilizados, ver Figura 4 (a). Os furos foram executados paralelamente ao plano RT (planos TL e LR), pois em obra este será, na maioria das situações, um plano inacessível por força das características dos elementos e das suas funções estruturais.

Para todos os provetes, e em função dos gráficos obtidos pelo Resistógrafo, obteve-se uma medida resistográfica. Noutras palavras, a medida resistográfica escolhida representa o quociente entre o integral do diagrama e a altura dos provetes. Desta forma, para cada gráfico obtido pelo Resistógrafo, e para cada medida resistográfica obtida através do diagrama, compararam-se com os valores de densidade e com os valores característicos de resistência de cada provete.

2.3.3 Pilodyn 6J

O Pilodyn 6J foi utilizado com o intuito de correlacionar a densidade de cada provete com o valor da profundidade alcançada pela agulha do aparelho (dureza superficial ou resistência à penetração superficial). O Pilodyn 6J é um equipamento que permite, através da libertação de uma mola (“carregada” manualmente) com uma pancada seca no seu topo, medir a penetração de uma agulha metálica com 2,5 mm de diâmetro, que por efeito da pancada transforma a energia potencial elástica numa energia de impacto. Este impacto leva a que a agulha penetre na superfície dos provetes permitindo desta forma registrar a profundidade a que a agulha penetrou quer no plano TL, quer no plano LR dos provetes Figura 4 (b).



(a)



(b)

Figura 4 – (a) Resistógrafo e (b) Pilodyn.

2.3.4 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

$$\rho_{12\%} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (2)$$

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

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

3.1 Ensaio Destrutivo

Os resultados do ensaio destrutivo, como foi supra referido, são apresentados tendo em conta a orientação das camadas de crescimento face à direcção de introdução da força. Deste modo podemos observar nas tabelas abaixo apresentadas os valores obtidos para cada uma das situações consideradas.

Tabela 1 – Provetes Radiais

	Radial (MCN)					Radial (MCV)				
	E (MPa)	Coef. Poisson			$\sigma_{0,2\%}$ (kPa)	E (MPa)	Coef. Poisson			$\sigma_{0,2\%}$ (kPa)
		GLR	GTR	GLT			GLR	GTR	GLT	
Méd.	783,8	0,03	0,20	0,13	13687,3	779,1	0,03	0,22	0,14	11432,8
Nº	17	17	17	17	17	11	11	11	11	11
CV	16	54	23	41	20	21	58	22	42	29

Tabela 2 – Provetes Diagonais

	Diagonal (MCN)					Diagonal (MCV)				
	E (MPa)	Coef. Poisson			$\sigma_{0,2\%}$ (kPa)	E (MPa)	Coef. Poisson			$\sigma_{0,2\%}$ (kPa)
		GLR	GTR	GLT			GLR	GTR	GLT	
Méd.	610,6	0,04	0,29	0,13	10617,9	628,2	0,03	0,26	0,13	8419,5
Nº	21	21	21	21	21	30	30	30	30	30
CV	14	26	19	28	27	10	24	19	17	17

Tabela 3 – Provetes Tangenciais

	Tangencial (MCN)					Tangencial (MCV)				
	E (MPa)	Coef. Poisson			$\sigma_{0,2\%}$ (kPa)	E (MPa)	Coef. Poisson			$\sigma_{0,2\%}$ (kPa)
		GLR	GTR	GLT			GLR	GTR	GLT	
Méd.	525	0,03	0,17	0,17	9346,2	580,2	0,03	0,18	0,14	10912,8
Nº	19	19	19	19	19	11	11	11	11	11
CV	16	32	21	29	18	11	33	20	16	28

Tabela 4 – Provetes Difusos

	Difuso (MCN)					Difuso (MCV)				
	E (MPa)	Coef. Poisson			$\sigma_{0,2\%}$ (kPa)	E (MPa)	Coef. Poisson			$\sigma_{0,2\%}$ (kPa)
		GLR	GTR	GLT			GLR	GTR	GLT	
Méd.	560,6	0,03	0,21	0,12	7299,6	650,8	0,04	0,24	0,15	8847,1
Nº	18	18	18	18	18	24	24	24	24	24
CV	10	40	23	30	13	20	37	20	26	30

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 quer na direcção axial do elemento em causa quer nas direcções perpendiculares a esta (este é um tempo mínimo resultado da medição das ondas elásticas mais velozes).

Para elementos prismáticos, homogéneos, isotrópicos e cuja largura da secção seja menor que o comprimento de onda da vibração longitudinal que a atravessa pode-se aplicar a relação $E_{din} = v^2 \times \rho$ onde E_{din} representa o módulo de elasticidade dinâmico (N/m^2); v é a velocidade de propagação (m/s) e ρ é a massa volúmica dos provetes (Kg/m^3).

Desta forma importa saber como efectuar a “correção” do módulo de elasticidade dinâmico em comparação com o E_{medio} 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 $E_{médio} = a \times E_{din} + b$

Tabela 5 – Módulo de Elasticidade Dinâmico (Método Directo, perpendicular às fibras)

Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)								
Método Directo, perpendicular às fibras								
	Tangencial		Incli. 45°		Difusa		Radial	
	Novo	Velho	Novo	Velho	Novo	Velho	Novo	Velho
Méd.	1456,2	1661,9	2255,6	2108,8	1664,0	1867,2	2997,2	3083,2
N°	19	12	11	16	10	13	18	13
CV	16	9	19	18	13	25	19	14

Tabela 6 – Módulo de Elasticidade Dinâmico (Método Indirecto)

Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)								
Método Indirecto								
	Tangencial		Incli. 45°		Difusa		Radial	
	Novo	Velho	Novo	Velho	Novo	Velho	Novo	Velho
Méd.	12931,8	12008,2	12188,7	13237,3	13305,6	12391,1	13083,6	12897,3
N°	19	12	11	16	10	13	19	12
CV	16	26	14	21	12	16	16	22

Tabela 7 – Módulo de Elasticidade Dinâmico (Método Directo, paralelo às fibras)

Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)								
Método Directo, paralelo às fibras								
	Tangencial		Incli. 45°		Difusa		Radial	
	Novo	Velho	Novo	Velho	Novo	Velho	Novo	Velho
Méd.	14445,4	14539,9	13367,8	15091,1	16057,0	14601,3	14445,4	14524,5
N°	19	12	11	16	10	13	18	13
CV	19	22	15	13	13	21	19	22

3.3 Resistógrafo

Na Figura 5 (a) e (b), são apresentadas as correlações obtidas entre a medida resistográfica e a massa volúmica de cada provete de MCN e MCV, respectivamente.

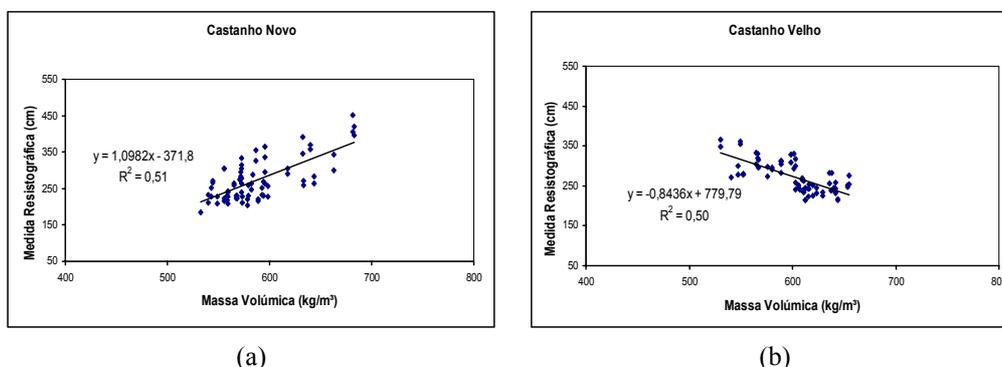


Figura 5 – Relação entre a medida resistográfica e a massa volúmica de cada provete de (a) madeira de Castancho novo (MCN) e (b) madeira de Castancho velho (MCV).

3.4 Pilodyn 6J

Na Figura 6 (a) e (b), são apresentados os resultados obtidos através da utilização do Pilodyn 6J que traduz a relação existente entre a profundidade alcançada pela agulha do equipamento e a massa volúmica de cada provete de MCN e MCV, respectivamente.

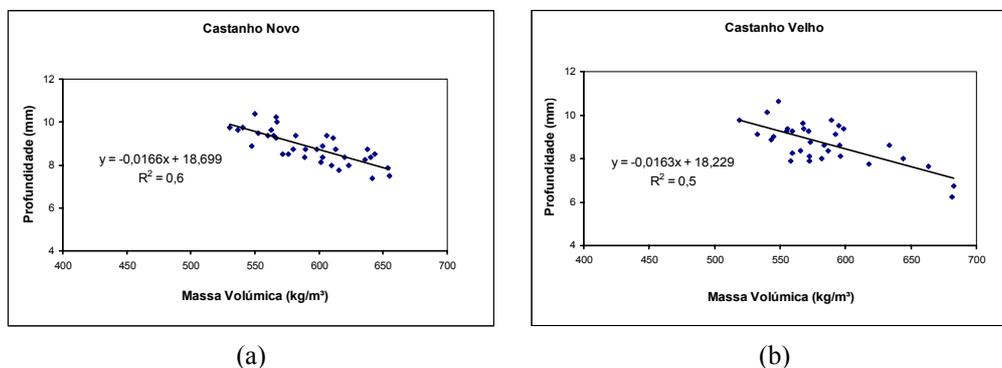


Figura 6 – Relação profundidade/massa volúmica de cada provete de (a) madeira de Castanho novo (MCN) e (b) madeira de Castanho velho (MCV).

4. CONCLUSÕES

A análise dos ensaios destrutivos, permite claramente tipificar, atendendo a orientação dos anéis de crescimento em função da direcção de aplicação da carga, os diversos casos considerados, quer em termos de valores numéricos, quer em termos de tipologias de rotura observadas. Deste modo, a densificação e “ductilidade” observada para os provetes Radiais contrasta com a rotura frágil dos provetes Tangenciais. Os resultados podem facilmente ser explicados à luz da análise anatómica da micro-estrutura celular da madeira de Castanho como membro do grupo das Folhosas, e cujo interesse foi alvo de diversos estudos (Bodig, 1965; Tabarsa, 2001).

Analisando os resultados dos ensaios destrutivos, e atendendo à micro-estrutura anatómica da madeira de Castanho, facilmente se interpretam os valores obtidos, sobretudo os valores do módulo de elasticidade. Verifica-se que os provetes Radiais apresentam o mais elevado valor de módulo de elasticidade (como seria de supor), sendo que os provetes Diagonais apresentam valores muito próximos dos Radiais, sobretudo devido às “parecenças” existentes entre ambos os esquemas de rotura, em determinada fase do ensaio, onde por efeitos de instabilidade vertical as camadas diagonais tendem a horizontalizar.

Os coeficientes de Poisson encontrados são corroborados pelos encontrados na bibliografia utilizada. Estes apresentam coeficientes de variação elevados, resultado da existência de valores pontuais extremos (“outliers”) justificados pela falta de sensibilidade, em determinados intervalos de leitura, dos extensómetros utilizados tendo em conta a baixa gama de deslocamentos registados.

As características mecânicas obtidas para o lote de MCV em comparação com aquelas obtidas para a MCN são, de uma forma geral superiores (13-17%). 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.

A utilização de ensaios não destrutivos apresenta diversas vantagens, sobretudo a facilidade e rapidez de execução dos ensaios. Os resultados obtidos com o Resistógrafo e Pilodyn, e quando comparados com os valores de densidade do material, apresentam uma correlação relativamente boa. Por último, e tendo em conta a subjectividade inerente à utilização e análise dos resultados associada à utilização do Resistógrafo, e em investigações

futuras, irá tentar-se melhor o conceito de medida resistográfica através de uma análise filtrada e mais ponderada de cada situação, evitando-se deste modo erros de leitura e de interpretação dos gráficos.

A relação entre a medida resistográfica e a massa volúmica, correspondente ao lote de madeira de Castanho velho (MCV), apresenta resultados inesperados, pelo que irá ser alvo de um estudo mais aprofundado.

Os valores obtidos pelos ultra-sons sublinham a relação existente entre os módulos de elasticidade dinâmico e médio. Na Figura 7 é apresentado um gráfico onde se pode observar as diversas relações existentes, tendo em conta a orientação das camadas de crescimento face à direcção de introdução da força, considerando o método Directo, perpendicular às fibras, e o lote MCN.

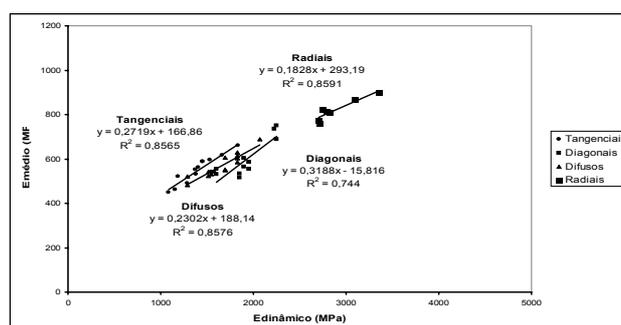


Figura 7 – Relação entre E_{din} e $E_{méd}$, no caso do lote MCN, considerando o método directo, perpendicular às fibras.

5. REFERÊNCIAS

- Bertolini, C.; Brunetti, M.; Cavallaro, P.; Macchioni N., 1998 – “A non destructive diagnostic method on ancient timber structures: some practical application examples”. *Proceedings of 5th World Conference on Timber Engineering, Montreux*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998, Vol. I, p. 456-465.
- Bodig, J., 1965 – “The effect of anatomy on the initial stress-strain relationship in transverse compression”. *Forest Products Journal*. 14, p. 197-202. May, 1965.
- Gorlacher, R., 1987 – “Non destructive testing of wood: an in-situ method for determination of density”. *Holz as Roh- und Werkstoff*. Vol. 45, p. 273-278.
- Machado, J. S.; 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*. 42 (1997) p. 15-18.
- 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.
- Rinn, F., 1994 – “Resistographic inspection of construction timber, poles and trees”. *Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference*. Gold Coast, Australia, Jul. 1994.
- Tabarsa, T.; Chui, Y.H., 2001 – “Characterizing microscopic behaviour of wood under transverse compression. Part II. Effect of species and loading direction”. *Wood and Fiber Science*. Vol. 33 (2), p. 223-232. April, 2001.
- Uzielli, L. 1992 – “Evaluation of timber elements bearing capacity”. *L'Edilizia*. 12, p. 753-762.
- Wood Handbook, Forest Service Agricultural Handbook nº 72, U.S.D.A, 1974, cap. 6.