



Aplicações do método de ensaio esclerométrico em peças de eucalipto saligna sm

Julio Soriano¹, Raquel Gonçalves¹, Cinthya Bertoldo¹ & Alex J. Trinca¹

RESUMO

Neste trabalho é avaliada a tendência de correlações entre as resistências a compressão paralela e normal às fibras, por meio de ensaios destrutivos normalizados e parâmetros do ensaio do método esclerométrico. Também se fez comparação com o método de ensaio não destrutivo de ultrassom. Três séries de corpos de prova foram extraídas de uma tora de *Eucalyptus saligna* e ensaiadas na condição de madeira saturada. Dos resultados dos impactos esclerométricos para as três direções anatômicas avaliadas (paralela às fibras, radial e tangencial) foram verificados coeficientes de variação inferiores a 9%. Da análise das tendências de correlações de resistência a compressão com os resultados da esclerometria e ultrassonografia, foram constatados os melhores ajustes para a direção paralela às fibras. Tendo em vista os resultados obtidos, pode-se concluir que a técnica de esclerometria mostrou-se capaz para identificar a homogeneidade do lote ensaiado, justificando haver possibilidades de aplicações do método à madeira.

Palavras-chave: dureza da madeira, ultrassom, ensaios não destrutivos

Application of esclerometric test method in pieces of *Eucalyptus saligna*

ABSTRACT

In this paper the trend of correlations between compressive strength parallel and perpendicular to fibers is studied, obtained by standard destructive tests, and parameters of the esclerometer tests. For purposes of comparison with other non-destructive ultrasound tests were also carried out. Three series of specimens were taken from a log of *Eucalyptus saligna* and tested in wood saturated condition. Results of the esclerometer impacts for the three directions evaluated (parallel to fiber, radial and tangential) coefficients of variation less than 9% were observed. From the analysis of trend of correlations of compressive strength with the results of esclerometer and ultrasound, better adjustments for the direction parallel to the fibers were observed. Considering the results, it can be concluded that the esclerometer technique was able to identify the homogeneity of the batch tested, justifying to have possibilities of applications to the timber.

Key words: hardness of wood, ultrasound, nondestructive testing

¹ FEAGRI/UNICAMP, CP 6011, Cidade Universitária Zeferino Vaz s/n. CEP 13083-875, Campinas, SP. Fone (19) 3521-1040. E-mail: julio.soriano@feagri.unicamp.br; (19) 3521-1034, raquel@feagri.unicamp.br; (19) 3521-1050, cinthyabertoldo@gmail.com; ajtrinca@terra.com.br

INTRODUÇÃO

O estudo das propriedades mecânicas da madeira tem importância em razão de permitir em que se obtenham relações e padronizações que possibilitem o uso desse material da forma mais adequada, quer seja nas construções rurais e urbanas, na produção de móveis, na fabricação de paletes ou de embalagens, dentre outras aplicações.

Atualmente, o desenvolvimento de novas técnicas e de equipamentos apropriados para serem aplicados em ensaios não destrutivos, é de interesse para a determinação das propriedades mecânicas e detecção de defeitos da madeira e que, inclusive, possibilitem que as inspeções sejam também realizadas diretamente em campo. Neste sentido Brashaw et al. (2009) apresentaram compilação dos principais tópicos que vêm sendo foco da comunidade de pesquisadores em ensaios (Non-Destructive Tests - NDT) e em técnicas não destrutivas (Non-Destructive Evaluation - NDE). Os autores enfocaram as pesquisas e as aplicações de NDT e de NDE no continente americano, na Ásia, na Austrália, na Nova Zelândia e na Europa.

Em pesquisa realizada em vigas de Eucalipto citriodora e de Eucalipto grandis, tanto na condição de madeira seca (teor de umidade igual a 12%) quanto de madeira saturada (teor de umidade superior a 30%), Bartholomeu & Gonçalves (2007) destacaram que o ultrassom pode ser ferramenta eficiente para a determinação de propriedades mecânicas de peças estruturais de madeira.

Neste sentido e como a apropriação de método não destrutivo, a esclerometria, técnica de dureza superficial tradicionalmente empregada para se estimar a resistência de peças de concreto, pode também vir a ser viável para inspeções de peças de madeira necessitando-se, para tanto, que se pesquise as possíveis correlações entre as propriedades de dureza superficial e de compressão da madeira.

A dureza superficial, segundo Hansson & Antti (2006), é especialmente importante nas aplicações da madeira destinadas à indústria moveleira e nas utilizações deste material em pisos. Esta propriedade da madeira pode ser determinada pelo método de ensaio destrutivo de dureza Janka, o qual é prescrito pela NBR 7190 (ABNT, 1997). Tendo em vista que o ensaio de dureza pelo método de Janka é realizado em laboratório e com base nas correlações obtidas entre o método de Janka e o método de dureza Brinell, para várias espécies de reflorestamento e nativas, Colenci & Ballarin (2008) enfatizaram a possibilidade do desenvolvimento de equipamentos para a determinação da dureza da madeira diretamente em campo. Em estudo no qual se compararam esses dois métodos para uma espécie de madeira utilizada na produção de móveis e painéis (Eastern beech), Bektas et al. (2001) encontraram correlações bastante promissoras para as três direções anatômicas (longitudinal, radial e tangencial), sendo obtido o menor coeficiente de determinação 0,81 para a direção radial.

A estimativa das propriedades de resistência da madeira em campo, segundo Machado et al. (2003) requer a combinação de diferentes métodos de ensaio e, assim, ao avaliarem as correlações entre ultrassonografia e a resistência a compressão em peças de pinus, os autores obtiveram coeficientes de determinação entre 0,69 e 0,76. Por outro lado, o resultado de

resistência a perfuração e de dureza da madeira, mostrou-se pouco expressivo, com coeficiente de correlação igual a 0,23.

Dentre as diversas variáveis que influenciam as propriedades mecânicas da madeira, tais como resistência a compressão e dureza, Hansson & Antti (2006) destacaram os efeitos da densidade e do teor de umidade, sendo que as espécies com densidades mais elevadas apresentam os valores mais elevados de tais propriedades. Em uma mesma espécie a magnitude da dureza é reduzida com o aumento do teor de umidade. De maneira idêntica à resistência a compressão, a dureza é dependente da direção anatômica das fibras da madeira (Holmberg, 2000).

Conforme Ballarin & Palma (2003) as propriedades anatômicas e mecânicas da madeira são diferenciadas em razão da idade da madeira, com a porção do lenho adulto apresentando características mecânicas superiores e mais homogêneas do que a porção de madeira juvenil. Relevante a questão da homogeneidade do material, Sinclair & Farshad (1987) ao compararem três metodologias de determinação das constantes elásticas da madeira, sendo uma delas destrutiva (flexão estática) e duas não destrutivas (vibração e ultrassom), salientaram que para atingir o objetivo do trabalho todos os corpos-de-prova foram retirados de um só bloco de madeira.

Visando contribuir para o desenvolvimento de novas técnicas de inspeção da madeira de forma não destrutiva o objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento da esclerometria como metodologia de inferência da resistência à compressão de um lote de Eucalipto saligna. A título de comparação com outro ensaio não destrutivo, também foram realizados ensaios de ultrassom nas mesmas peças utilizadas em esclerometria.

MATERIAL E MÉTODOS

Extraíram-se, para o desenvolvimento desta pesquisa, corpos de prova de uma tora de eucalipto da espécie saligna, procedente da região de Itatiba, SP, com diâmetro médio de 70 cm e 490 cm de comprimento, sendo a idade estimada da árvore abatida de 60 anos. As características e dimensões da tora selecionada possibilitaram a extração da madeira da porção de lenho adulto para a confecção dos corpos de prova excluindo-se, desta forma, as regiões medular e de alburno as quais, em função da madeira juvenil, apresentariam maior heterogeneidade de propriedades (Ballarin & Palma, 2003).

Os ensaios esclerométricos e de ultrassom foram realizados nas mesmas peças cúbicas, das quais foram extraídos os corpos de prova padronizados para se realizarem os ensaios de compressão paralela e compressão normal às fibras. Assim, baseando-se na literatura (Sinclair & Farshad, 1987), a retirada da madeira de lenho adulto, aliada ao fato da seleção de uma única tora, foi fundamental para a obtenção de amostragem mais homogênea possível possibilitando, assim, a comparação dos resultados do método esclerométrico com os demais utilizados na presente pesquisa. Desta forma, embora por um lado se soubesse que tal homogeneidade comprometeria a obtenção de correlações conclusivas entre os parâmetros, por outro lado outros fatores de variabilidade seriam excluídos o

que, neste caso, era positivo em razão de, até o presente, serem desconhecidos resultados da esclerometria aplicada à madeira.

Confeção dos corpos de prova

A tora foi desdobrada, proporcionando três peças com seções transversais medindo 15 x 15 cm, Figura 1A, e identificadas como séries 1M, 2M e 3M. De cada uma dessas peças serradas se excluíram as extremidades de 170 cm (Figura 1B) e se eliminaram as pontas que continham fissuras, oriundas das tensões de secagem natural da tora, ocorridas durante o período de descanso no pátio da madeireira.

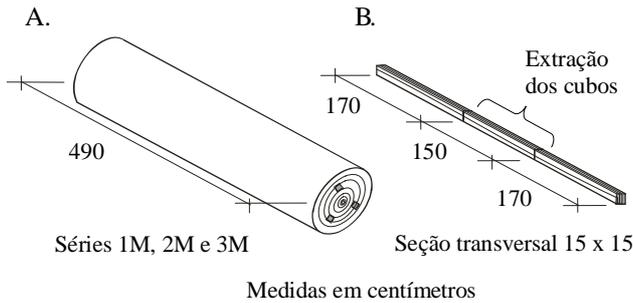


Figura 1. Desdobramento da tora: Representação do fuste e posições do cerne para retirada das séries 1M, 2M e 3M (A), Peça desdobrada de uma das séries e região de extração dos cubos (B)

Da região central de cada peça foram extraídos oito corpos de prova cúbicos com aresta de 15 cm, resultando o total de 24 unidades para os ensaios de esclerometria e ultrassonografia. Na Figura 2A o plano da seção transversal à direção paralela às fibras é representado por (L), o plano tangencial aos anéis de crescimento representado por (T) e o plano radial, por (R).

Após realização de ensaios não destrutivos nos cubos (esclerometria e ultrassom), de cada série foram desdobrados quatro cubos e, de cada qual se extraiu um par de corpos de prova padronizados pela NBR 7190 (ABNT, 1997) para os ensaios de compressão paralela e normal às fibras, Figuras 2B e 2C, respectivamente. Assim, para as três séries foram produzidos 12 prismas, medindo 5 x 5 x 15 cm e 12 primas com 5 x 5 x 10 cm.

Por ocasião dos ensaios os corpos de prova se encontravam com teor de umidade superior a 30%, tal situação que caracteriza a madeira como saturada, conforme informações contidas na literatura, implicando, para a dureza, valores inferiores em relação à situação de madeira seca.

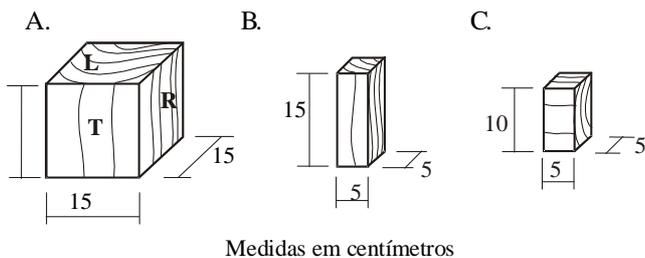


Figura 2. Dimensões dos corpos de prova: Ultrassonografia e esclerometria (A), Compressão paralela às fibras (B), Compressão normal às fibras (C)

Demarcação dos cubos

Os 24 corpos de prova cúbicos foram demarcados para a realização dos ensaios com esclerômetro e ultrassom, conforme a Figura 3. Nos três planos anatômicos (L, R e T), foram marcados nove pontos para as aplicações dos impactos por esclerometria totalizando vinte e sete pontos para cada cubo, enquanto para os ensaios de ultrassonografia em cada face de cada cubo se marcaram treze pontos.

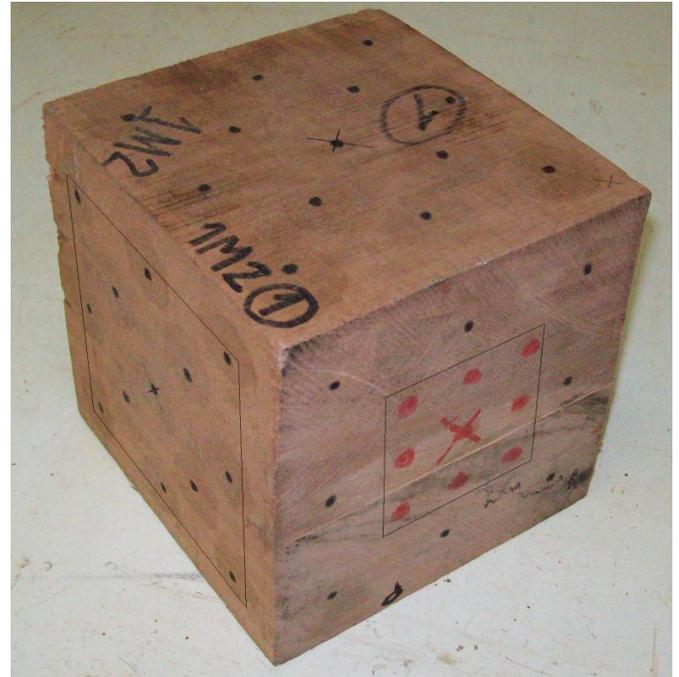


Figura 3. Demarcação dos pontos: ultrassonografia (face esquerda, 13 pontos negros) e esclerometria (face direita, 9 pontos vermelhos)

Ensaio de ultrassom

Realizaram-se os ensaios de propagação de ondas utilizando-se equipamento de ultrassom (USLab) desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos (LabEND) da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI-Unicamp) em associação com uma empresa de base tecnológica (AGRICEF); os transdutores de onda longitudinal e de seção plana apresentavam frequência de ressonância de 45 kHz (Figura 4A).

Para cada direção anatômica (longitudinal, radial e tangencial) foram tomadas 13 medidas de tempo de propagação de onda, determinando-se as velocidades. Para avaliação dos resultados foram adotadas as seguintes nomenclaturas, para a velocidade propagada na direção paralela às fibras (V_{LL}), na direção Radial (V_{RR}) e na direção tangencial aos anéis de crescimento (V_{TT}). De posse das velocidades determinaram-se em cada direção, os valores médios.

Ensaio esclerométrico

Para peças de pequenas dimensões, como no caso de corpos de prova de concreto, para se evitar movimentações durante a aplicação do impacto a literatura recomenda a fixação dessas peças, em máquinas universais ou apoiadas em base rígida.

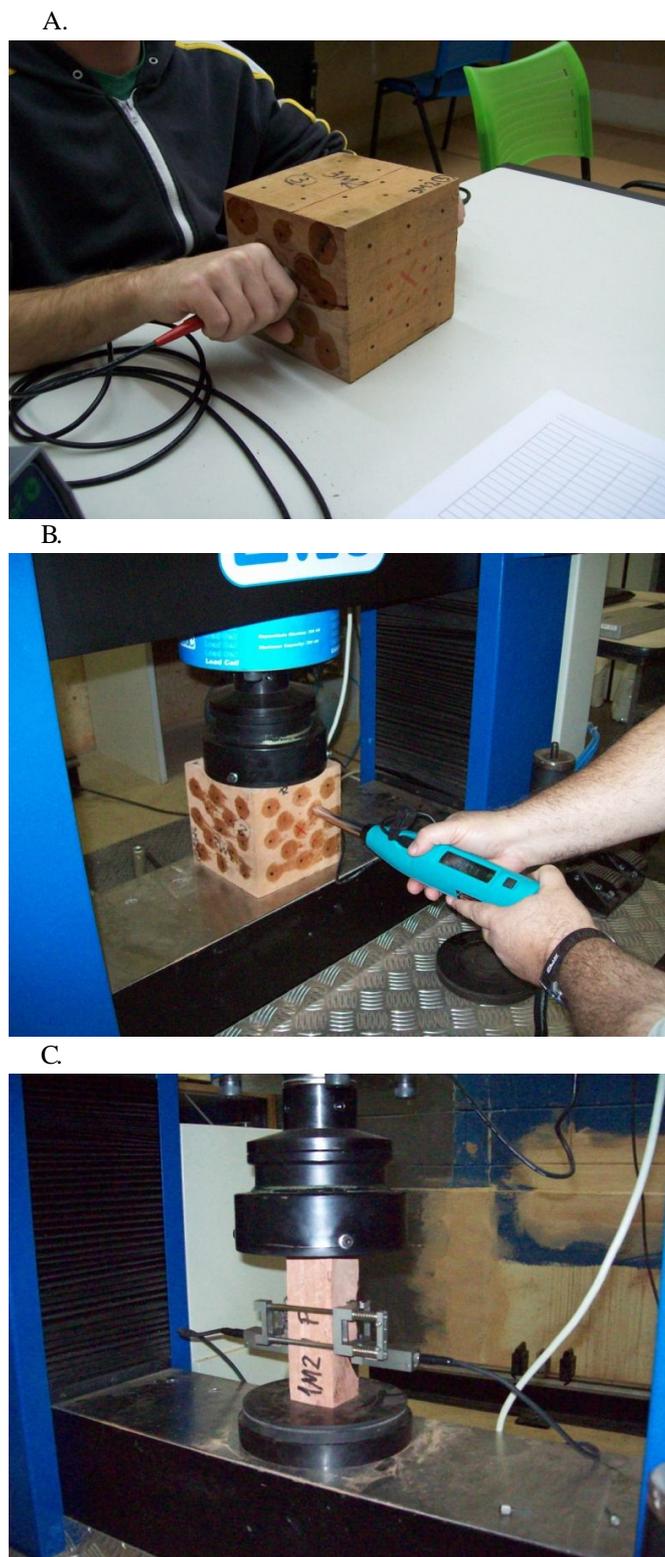


Figura 4. Ensaios de corpos-de-prova. Ultrassonografia (A), Esclerometria (B), Compressão paralela às fibras (C)

Como procedimento para aplicação dos impactos esclerométricos, cada cubo foi fixado na máquina universal de ensaios EMIC (modelo DL30.000), Figura 4B. Para se estimar a força de fixação do cubo, foram tomados 15% da resistência média de compressão normal às fibras na condição de madeira saturada, de tal forma que o material mantivesse comportamento

em regime elástico. Considerando-se, portanto, a espécie Eucalipto saligna e se partindo do valor médio da resistência a compressão paralela às fibras ($f_{c0} = 46,8$ MPa), estabelecido para umidade de 12% NBR 7190 (ABNT, 1997), obteve-se, para seção de 15 x 15 cm, a força de 31,9 kN; com este valor se estabeleceu uma faixa para força de fixação dos cubos entre 25 e 30 kN.

A média de nove índices esclerométricos (relação entre a energia restituída e a energia aplicada, portanto, adimensional), por plano, foi obtida por leitura direta no esclerômetro digital, ou seja, dos nove impactos aplicados perpendicularmente ao plano L, isto é na direção paralela às fibras, obteve-se o valor médio representado por (Q_L). Para os impactos aplicados perpendicularmente aos planos R e T, obtiveram-se os valores nas direções tangencial (Q_T) e radial (Q_R), respectivamente.

Ensaios destrutivos de compressão

Os ensaios de compressão, Figura 4C, foram realizados na máquina universal EMIC (modelo DL30.000), para determinação das resistências a compressão paralela e normal às fibras, obedeceram-se as recomendações do Anexo B da NBR 7190 (ABNT, 1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 contém os resultados dos ensaios não destrutivos aplicados aos corpos de prova cúbicos (esclerometria e ultrassonografia) para as séries 1M, 2M e 3M. A umidade verificada para todos os cubos estava sempre acima de 30%, ou seja, na condição de madeira saturada. Nessas condições de umidade a densidade média do lote resultou em $0,94 \text{ g cm}^{-3}$.

Os valores médios dos impactos esclerométricos, por série, resultaram menores na direção paralela às fibras (Q_L). Por outro lado, as maiores intensidades foram, em geral, obtidas para os impactos aplicados na direção tangencial (Q_T). Os índices esclerométricos se mostraram diferenciados para as três direções ortotrópicas da madeira, tornando possível, como de interesse, discernir a tendência de correlações entre os índices esclerométricos e as resistências de compressão paralela e normal às fibras. Do ponto de vista prático e, devido à acessibilidade aos planos de impacto, isto facilita a inspeção de elementos estruturais em campo, tais como vigas, treliças, postes, mourões, entre outros.

Para a madeira já é conhecido o fato de que a velocidade de propagação das ondas é sempre maior na condição seca que na condição saturada. Gonçalves & Costa (2008) obtiveram resultados para espécies brasileiras que confirmam este fundamento. Além disso, a velocidade de propagação é sempre superior na direção paralela às fibras seguida da velocidade de propagação na direção radial e, por último, pela direção tangencial. Este princípio de propagação de ondas obtido anteriormente para o Eucalipto por pesquisadores brasileiros (Bartholomeu et al., 2003) foi confirmado nos resultados apresentados na Tabela 1, com os valores de velocidade de propagação média obtida em cada face do corpo de prova.

Dos resultados médios obtidos para cada série de cubos observa-se, para a direção paralela às fibras que, o índice

Tabela 1. Valores médios, desvios e coeficientes de variação dos resultados de ensaios não-destrutivos. Impactos esclerométricos nas direções paralela às fibras (Q_L), radial (Q_R) e tangencial às fibras (Q_T), velocidades de propagação de ondas nas direções paralela às fibras (V_{LL}), radial (V_{RR}) e tangencial às fibras (V_{TT})

Cubo	Q_L	Q_R	Q_T	V_{LL} (m s ⁻¹)	V_{RR} (m s ⁻¹)	V_{TT} (m s ⁻¹)
Série 1M						
1	32,0	32,5	42,0	3857	1984	1506
2	32,0	40,0	41,5	3763	1968	1489
3	32,5	39,0	41,5	3813	1954	1505
4	33,0	37,0	42,5	3913	1966	1498
5	33,5	38,0	43,5	3975	1984	1487
6	31,0	34,5	40,5	3755	1988	1482
7	32,5	39,0	43,0	3819	1999	1476
8	31,5	37,5	43,0	3791	2000	1486
Média	32,3	37,2	42,2	3836	1980	1491
Desvios	0,8	2,6	1,0	76,0	16,4	10,8
C.V.(%)	2,5	6,8	2,4	2,0	0,8	0,7
Série 2M						
1	36,6	37,5	39,0	3927	1979	1492
2	34,5	40,0	44,0	3940	1997	1561
3	33,0	35,5	42,0	3876	1989	1557
4	35,0	38,0	41,0	3971	1967	1589
5	36,0	46,5	46,0	4078	1979	1546
6	35,0	38,5	39,5	4054	1927	1510
7	35,5	43,5	44,0	4004	1950	1595
8	36,0	38,5	42,5	4019	1959	1561
Média	35,2	39,8	42,3	3984	1968	1551
Desvios	1,1	3,6	2,4	68,0	22,7	35,5
C.V.(%)	3,2	9,0	5,7	1,7	1,1	2,2
Série 3M						
1	31,0	41,5	44,5	3967	1815	1627
2	35,0	39,5	41,5	3885	1718	1644
3	30,5	37,0	42,5	3795	1903	1656
4	34,0	37,0	39,5	3842	1885	1648
5	32,0	33,4	41,5	3949	1911	1652
6	33,0	39,5	42,0	3883	1922	1651
7	35,0	37,5	42,0	3691	1880	1617
8	32,5	39,5	42,0	3823	1898	1564
Média	32,9	38,1	41,9	3854	1867	1632
Desvios	1,7	2,5	1,4	88,4	68,3	30,7
C.V.(%)	5,2	6,5	3,3	2,3	3,7	1,9
Todas as séries						
Média	33,4	38,4	42,1	3891	1938	1558
Desvios	1,8	3,0	1,6	100,0	66,2	64,8
C.V.(%)	5,3	7,7	3,9	2,6	3,4	4,2

esclerométrico é menor enquanto a ultrassonografia indicou, para a mesma direção, em maior velocidade de propagação de onda; já para as direções normais às fibras, os índices esclerométricos são maiores e os resultados da ultrassonografia, menores. Pode-se associar tais resultados ao fato dos princípios distintos dos métodos em questão, enquanto a ultrassonografia retrata a natureza de propagação de ondas, com maior velocidade para a direção paralela às fibras explicada pela distribuição das células nesta direção, a esclerometria retrata o efeito de impacto superficial havendo, portanto, para esta direção, menor energia restituída.

Analisando-se os resultados obtidos para cada uma das séries, notam-se os menores coeficientes de variação para os valores obtidos por ultrassonografia; entretanto, os

coeficientes de variação calculados por meio dos resultados da esclerometria são inferiores a 18%, valor este admitido pela NBR 7190 (ABNT, 1997) como máximo valor para as estimativas das resistências características.

O fato de os índices esclerométricos terem apresentado resultados inferiores na direção paralela às fibras, reforça os resultados publicados por Silva Filho et al. (1992) de que, ao analisarem oito espécies da região amazônica verificaram que para a grande maioria daquelas espécies, com densidades básicas superiores a 0,66 g cm⁻³ e na condição de madeira saturada, a dureza Janka resultou superior na direção normal às fibras. Do ponto de vista da influência do teor de umidade, a maioria das espécies ensaiadas por Silva Filho et al. (1992) apresentou dureza superior na condição seca do que na condição de madeira verde.

Wiemann & Green (2007) concluíram que a dureza da madeira seca em relação à madeira saturada pode ser superior a 26% em dicotiledôneas de florestas tropicais. Embora as considerações sobre a influência do teor de umidade na dureza da madeira sejam relevantes, a manutenção de uma mesma condição de umidade para todos os ensaios eliminou, no caso desta pesquisa, a influência do referido parâmetro.

A Tabela 2 contém os resultados dos ensaios destrutivos de resistência a compressão paralela às fibras (f_{c0}) e resistência a compressão normal às fibras (f_{c90}) para as três séries 1M, 2M e 3M, nas condições de umidade acima do ponto de saturação. Para o lote formado pelas três séries de corpos de prova, os coeficientes de variação para as resistências paralela e normal às fibras resultaram em 9,5 e 16,2%, respectivamente.

Tabela 2. Valores médios, desvios e coeficientes de variação dos resultados de ensaios destrutivos. Resistências a compressão paralela às fibras (f_{c0}) e normal às fibras (f_{c90})

Corpo de prova	f_{c0} (MPa)	f_{c90} (MPa)
Série 1M		
1	43,7	15,0
2	47,5	17,9
5	50,5	20,1
6	39,1	13,4
Média	45,2	16,6
Desvios	4,9	2,9
C.V. (%)	10,9	17,7
Série 2M		
1	52,0	13,9
2	51,5	13,7
5	51,8	20,1
6	53,4	14,4
Média	52,2	15,6
Desvios	0,8	3,0
C.V.(%)	1,6	19,6
Série 3M		
1	44,1	14,4
2	45,0	17,0
5	45,5	12,4
6	43,3	15,6
Média	44,5	14,9
Desvios	1,0	2,0
C.V. (%)	2,2	13,2
Todas as séries		
Média	47,3	15,7
Desvios	4,5	2,5
C.V.(%)	9,5	16,2

Antes do início das avaliações estatísticas verificou-se se os resultados dos impactos esclerométricos (Q_L , Q_R e Q_T), de velocidade (V_{LL} , V_{RR} e V_{TT}) e de resistência a compressão (f_{c0} e f_{c90}) apresentavam distribuição normal. Esta verificação é importante para a validação dos testes estatísticos utilizados.

Para esta análise foram utilizados as estatísticas “skewness” e “kurtosis” e o gráfico de probabilidade normal. Para o caso dessas estatísticas os valores devem estar compreendidos entre -2 e +2 para que os dados sejam considerados como tendo distribuição normal e, para o caso do gráfico, quanto mais o mesmo se aproximar de uma reta mais os dados se aproximam da distribuição normal. A Tabela 3 resume os resultados das estatísticas obtidas.

Verificou-se, por meio dos valores das estatísticas, que a hipótese de normalidade pode ser aceita para todos os parâmetros, exceto para V_{RR} . Desta forma, as análises estatísticas convencionais para tal amostragem de V_{RR} , não são válidas.

Nas Tabelas 1 e 2 foram apresentados os valores médios e a dispersão dos resultados de cada série de ensaios e de toda a tora. Por meio dos resultados dessas tabelas se verifica que a amostragem utilizada, proveniente de uma só tora, é bastante homogênea. Esta homogeneidade da amostra dificulta a discussão dos resultados, em termos de correlação, já que a obtenção de correlações estatisticamente significativas exige amostragem mais abrangente.

No entanto, tomando-se como base os valores médios das três séries é possível verificar as tendências de comportamento das variáveis. Referidas tendências são importantes no caso desta pesquisa, uma vez que se trata de tema ainda pouco abordado, permitindo direcionar pesquisas futuras.

Para verificar as tendências de comportamento das variáveis foi realizada avaliação estatística de regressão considerando-se os resultados dos ensaios esclerométricos, de ultrassom e de compressão, Tabela 4. Tendo em vista que para cada caso há somente três pares de dados (médias de cada série), é de se esperar que os modelos de regressão não sejam estatisticamente significativos ($P\text{-value} > 0,05$) considerando-se nível de significância de 95%, razão por que os modelos indicados na Tabela 4 representam apenas a tendência de correlação; mesmo assim, é possível avaliar a existência de correlação entre os resultados (R) e verificar o quanto o comportamento da variável independente é explicado pelo comportamento da variável dependente (R^2).

Tendo em vista que V_{RR} não apresentou distribuição normal, não foram aplicadas, para este parâmetro, as análises de regressão.

Para a direção paralela às fibras verifica-se tendência positiva entre f_{c0} e Q_L , ou seja, valores crescentes de Q_L indicam valores

Tabela 4. Parâmetros da regressão obtidos utilizando-se os resultados de impactos esclerométricos (Q_L , Q_R , Q_T), velocidade de propagação de onda (V_{LL} e V_{TT}) e resistência a compressão (f_{c0} e f_{c90})

Modelo de regressão	R	R ² (%)	P-value
$f_{c0} = -42,2 + 2,6735 Q_L$	0,96	92,4	0,1780
$f_{c90} = 26,5 - 0,2811 Q_R$	-0,43	18,9	0,7140
$f_{c90} = -96,1 + 2,6538 Q_T$	0,65	41,8	0,5524
$f_{c0} = -154,0 + 0,0517 V_{LL}$	0,98	96,3	0,1235
$f_{c90} = 34,2 - 0,0119 V_{TT}$	0,98	96,5	0,1192
$Q_L = -40,0 + 0,0189 V_{LL}$	0,99	99,3	0,0545
$Q_T = 45,7 - 0,0023 V_{TT}$	-0,78	60,4	0,4331

crescentes de f_{c0} , o mesmo ocorrendo entre f_{c0} e V_{LL} . A variabilidade de f_{c0} foi 92,4% explicada por Q_L e 96,3% por V_{LL} indicando que podem ser esperados, para uma amostragem maior e mais adequada em termos de variabilidade, correlações significativas entre essas variáveis e, portanto, modelos de predição também significativos.

Para a direção perpendicular às fibras, a tendência foi negativa para Q_R e positiva para Q_T , com melhores correlações para a direção tangencial, Q_T ; contudo, inferiores aos resultados obtidos na direção paralela às fibras. Tendo em vista que para o melhor resultado a variabilidade de f_{c90} é apenas 41,8% explicada pelo impacto esclerométrico Q_T , deve haver outros parâmetros influenciando essa variabilidade e que não puderam ser detectados pela esclerometria. No caso de V_{TT} a tendência de variação foi positiva e a variabilidade de f_{c90} explicada por V_{TT} foi de 96,5%, indicando grande possibilidade de serem obtidos bons modelos de predição para outras amostragens.

Em relação ao comportamento dos dois ensaios não destrutivos, verifica-se tendência de que Q_L e V_L sejam parâmetros correlacionáveis, de vez que a variabilidade de Q_L explicada por V_{LL} foi de 99,3%. No caso de Q_T e V_{TT} a tendência foi negativa, ou seja, o crescimento de um implica no decréscimo do outro e as correlações foram menos significativas, embora não se possa descartar que haja tendência de serem parâmetros correlacionáveis.

Conforme destacado anteriormente a homogeneidade da amostra que é importante para a comparação de métodos de ensaios distintos (Sinclair & Farshad, 1987), dificultou a obtenção de correlações mais significativas entre os ensaios destrutivos e não destrutivos, tendo em vista que para cada conjunto de resultados os pontos são muito próximos (nuvem de pontos). Por isto, os modelos de correlações apresentados serviram apenas para serem analisadas as tendências de correlações entre métodos esclerométrico, destrutivos (f_{c0} e f_{c90}) e da ultrassonografia e, portanto, para a determinação conclusiva de correlações entre índice esclerométrico e os parâmetros desses outros métodos, será necessário efetuar-se um estudo mais amplo com amostragem mais diversificada.

Tabela 3. Valores das estatísticas “skewness” e “kurtosis” para os resultados de impactos esclerométricos (Q_L , Q_R , Q_T), velocidade (V_{LL} , V_{RR} e V_{TT}) e resistência a compressão (f_{c0} e f_{c90})

Estatística	Q_L	Q_R	Q_T	V_{LL}	V_{RR}	V_{TT}	f_{c0}	f_{c90}
Skewness	0,28	1,13	0,34	0,03	-3,85	0,53	-0,29	1,16
Kurtosis	-1,13	1,87	0,52	-0,65	4,47	-1,49	-0,73	-0,27

CONCLUSÕES

1. Para uma amostra homogênea de Eucalipto saligna, verificou-se que os resultados dos índices esclerométricos foram diferenciados para as três direções anatômicas da madeira, sendo que o lote formado por três séries apresentou resultados com coeficientes de variação inferiores a 9%.

2. Os resultados do método esclerométrico podem ser correlacionados aos resultados de ensaios de compressão, havendo melhor tendência para a direção paralela às fibras, tendo sido obtido coeficiente de determinação igual a 92,4%. Para as direções radial e tangencial às fibras, as correlações foram menos significativas que aquela determinada para a direção paralela às fibras.

3. As tendências de correlação dos resultados do método esclerométrico e da velocidade de propagação de ondas, indicaram que esses parâmetros podem ser correlacionados para as direções paralela e tangencial às fibras, sendo, no entanto, mais significativos para a primeira direção.

LITERATURA CITADA

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR7190 - Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 197p.
- Ballarin, A. W.; Palma, H. A. L. Propriedade de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. *Revista Árvore*, v.27, p.371-380, 2003.
- Bartholomeu, A.; Gonçalves, R. Prediction of the module of elasticity (MOE) in beams of *Eucalyptus* using the longitudinal velocity of ultrasonic waves. *E-Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics*, v.12, p.4853-4860, 2007.
- Bartholomeu, A.; Gonçalves, R.; Bucur, V. Dispersion of ultrasonic waves in eucalyptus lumber as a function of the geometry of boards. *Scientia Forestalis*, v.1, n.63, p.235-240, 2003.
- Bektas, I.; Alma, M. H.; AS, N. Determination of the relationships between Brinell and Janka hardness of eastern beech. *Forest Products Journal*, v.51, p.84-88, 2001.
- Brashaw, B.K.; Bucur, V.; Divos, F.; Gonçalves, R.; Lu, R. M.; Pellerin, F.; Potter, S.; Ross, R.J.; Wang, X.; Yin, Y. Nondestructive testing and evaluation of wood: A worldwide research update. *Forest Products Journal*, v.59, n.3, p.7-14, 2009.
- Colenci, A. R.; Ballarin, A. W. Utilização de dureza Brinell na avaliação de resistência mecânica de madeiras. *Revista Energia na Agricultura*, v.23, n.1, p.88-99, 2008.
- Gonçalves, R.; Costa, O. A. L. Influence of the moisture content on longitudinal, radial and tangential ultrasonic velocity for Brazilian wood species. *Wood and Fiber Science*, v.40, p.100-113, 2008.
- Hansson, L.; Antti, A. L. The effect of drying method and temperature level on the hardness of wood. *Journal of Materials Processing Technology*, v.171, p.467-470, 2006.
- Holmberg, H. Influence of grain angle on Brinell hardness. *Holz als Roh-und Werkstoff*, v.58, p.91-95, 2000.
- Machado, J. S.; Costa, D.; Cruz, H. Evaluation of pine timber strength by drilling and ultrasonic testing. In: *Non-Destructive Testing in Civil Engineering (International Symposium NDT-CE-2003)*, 2003, Berlin. Proceedings... Berlin: German Society for Non-Destructive Testing and Federal Institute for Materials Research and Testing, 2003. CD-Rom.
- Silva Filho, D. F.; Rocha, J. S.; Moura, J. B. Influência da densidade na dureza Janka em oito espécies madeireiras da Amazônia central. *Acta Amazonica*, v.22, n.2, p.275-283, 1992.
- Sinclair, A. N.; Farshad, M. A comparison of three methods for determining elastic constants of wood. *Journal of Testing and Evaluation*, v.15, n.2, p.77-86, 1987.
- Wiemann, M. C.; Green, D. W. Estimating Janka hardness from specific gravity for tropical and temperate species. Washington: USDA, 2007. 26p.