

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES EDAFOCLIMÁTICAS NAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE CLONES DE EUCALIPTO

Palavras-Chave: ENSAIOS DE ULTRASSOM-1, POLIEDROS-2, PARÂMETROS ELÁSTICOS-3

Autores(as):

LIVIA FELIPE ARAÚJO, FEAGRI – UNICAMP

Profa. Dra. CINTHYA BERTOLDO PEDROSO (orientadora), FEAGRI - UNICAMP

1. INTRODUÇÃO

Nas empresas do setor florestal há a preocupação com a qualidade da madeira que está sendo produzida, principalmente devido à influência de diversos fatores ao longo do seu crescimento que podem alterar suas características físicas, químicas, anatômicas e mecânicas e, estas modificações podem interferir na qualidade do material produzido e nos processos industriais.

As condições edafoclimáticas compõem um dos fatores que podem interferir nas características da madeira; Almeida et al. (2019), Costa et al. (2019) e Rocha et al. (2020) através de análises destrutivas, identificaram a ocorrência de influências significativas no incremento médio anual e na densidade básica devido à diferentes variações ambientais, como temperatura e precipitação. Câmara et al. (2020, 2021) descrevem as alterações anatômicas da madeira recorrentes da redução de precipitação, concluindo que esta redução intensificou os efeitos das inter-relações entre clima e características anatômicas da madeira relacionadas a arquitetura hidráulica da árvore.

A madeira, de forma simplificada, é considerada ortotrópica, com três eixos principais de simetria (longitudinal - L, radial - R e tangencial - T) que respondem de forma distinta à ação de cargas. Sendo assim, para a caracterização completa desse material é necessária a determinação de doze constantes elásticas (nove delas independentes): três módulos de elasticidade longitudinais (EL, ER, ET), três módulos de elasticidade transversais (GLR, GLT, GRT) e seis coeficientes de Poisson (μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{RT} , μ_{TR} , μ_{LT} , μ_{TL}).

Ao longo dos anos, com o desenvolvimento de equipamentos, diversos estudos vêm sendo conduzidos corroborando a eficácia e a precisão da tecnologia de ultrassom na caracterização e na inferência de propriedades da madeira (BERTOLDO et al., 2013; GONÇALVES et al., 2014; PINTO et al., 2014; VÁZQUEZ et al., 2015; ESPINOSA et al., 2018). Diversos formatos (esférico, cúbico, disco multifacetado, poliédrico) de corpos de prova podem ser utilizados para a caracterização da madeira por ultrassom, contudo, o formato poliédrico traz grandes vantagens ao permitir, com apenas um corpo de prova, a caracterização completa do material (VÁZQUEZ et al., 2015; GONÇALVES et al., 2014; BUCUR, 2006).

Assim, o trabalho proposto tem como objetivo verificar se as variações edafoclimáticas interferem nas propriedades elásticas da madeira de clones de *Eucalyptus* sp, obtidas por meio da caracterização por ultrassom.

2. METODOLOGIA

2.1 Material

Para o projeto foram avaliados três clones de *Eucalyptus* sp. (A, B e C), com 4 anos de idade, plantados em duas regiões (R1 e R2) com condições edafoclimáticas distintas. Para cada clone e região foram obtidos 5 toretes, provenientes de árvores diferentes, com cerca de 0,60 m cada. Dessa forma, foram utilizados 30 toretes para confecção dos poliedros.

2.2 Confecção dos corpos de prova

Para a confecção dos corpos de prova poliédricos, primeiramente, foi necessário produzir um cilindro com cada torete, esse trabalho foi realizado com auxílio de torno presente no Laboratório de Protótipos da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP). Dessa forma, foram produzidos 30 cilindros de 180 mm de comprimento e 50 mm de diâmetro (Figura 1).

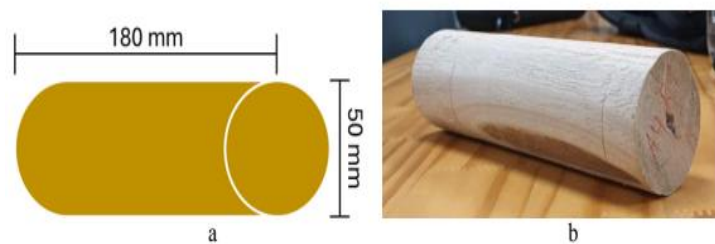


Figura 1 - Representação das dimensões (a) do cilindro (b) produzido para a confecção.

Com a utilização dos cilindros foram determinadas as densidades (ρ) das madeiras por meio da obtenção das dimensões (diâmetro - Φ e comprimento - L), por meio de paquímetro digital e, do peso (m), obtido com a utilização de balança de precisão com duas casas decimais.

A produção dos cilindros foi essencial para a subsequente fase de elaboração dos poliedros por meio de CNC (Controle Numérico Computadorizado - Roland MDX, 540 Desktop Milling Machine, Japão – Figuras 2 a e b), localizada no Espaço Plasma, Laboratório e sede do Programa de Projetos Estudantis Espontâneos (PE2), situado dentro do campus da UNICAMP. O tempo de confecção de cada poliedro constitui parte significativa do projeto, uma vez que, para a produção de cada corpo de prova é estimado um tempo de mais de duas horas (Figura 2c).

Finalizada a produção dos poliedros na CNC, estes foram levados para o Laboratório de Materiais e Estruturas da FEAGRI, onde foram finalizados com a retirada das extremidades residuais dos cilindros, com auxílio de serrote, e o lixamento dessas faces, a fim de proporcionar melhor acabamento para os posteriores ensaios de ultrassom.

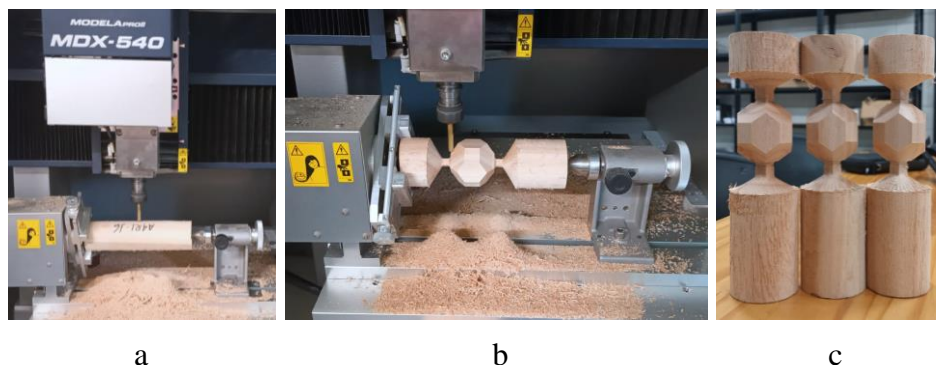


Figura 2 - Posicionamento do cilindro na CNC (a); poliedro sendo produzido pela CNC (b) e poliedros confeccionados para os ensaios de ultrassom (c).

2.3 Ensaios de ultrassom nos poliedros

Precedendo aos ensaios de ultrassom, foi realizada a marcação de todas as faces do corpo de prova em conformidade com os planos da madeira. Essas marcações abrangeram as direções longitudinal (L), radiais (R) e tangencial (T), bem como os planos inclinados à 45° com relação às direções principais (LR1, LR2, LT1, LT2, RT1, RT2). Em sequência, efetuou-se a determinação das distâncias entre cada uma das faces, estabelecendo assim os parâmetros essenciais para os subsequentes cálculos das velocidades, as quais foram utilizadas para a determinação dos coeficientes da matriz de rigidez [C] utilizando-se as equações de Christoffel.

Ao concluir as etapas preparatórias, foram iniciados os ensaios de propagação de ondas nos poliedros, empregando o equipamento de ultrassom (EP1000, Olympus, EUA), em conjunto com transdutores de compressão e de cisalhamento de 1 MHz de frequência (Figura 3). Para assegurar um acoplamento eficiente entre o transdutor e o corpo de prova, utilizou-se glicose de amido.

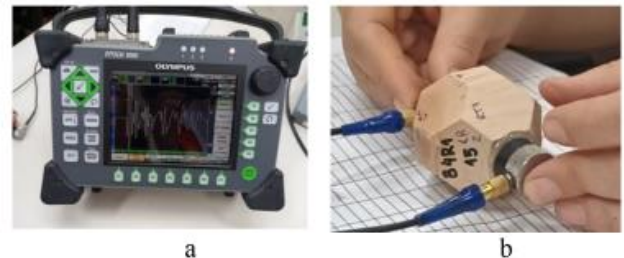


Figura 3 - Equipamento de ultrassom (a) e ensaio de ultrassom em poliedro de madeira (b).

2.4 Cálculo das velocidades de propagação das ondas

Para o cálculo das velocidades longitudinais (V_{LL} , V_{RR} e V_{TT}) utilizou-se o comprimento de percurso da onda e, com o uso do transdutor longitudinal, o tempo de propagação da onda nas direções L, R e T, respectivamente. Considerando as mesmas direções, mas com o uso do transdutor de cisalhamento, foram calculadas as velocidades transversais (V_{LR} , V_{LT} , V_{RL} , V_{RT} , V_{TR} e V_{RT}). Para a determinação das velocidades correspondentes à propagação da onda fora dos eixos de simetria o tempo de propagação da onda foi tomado nas faces que representam eixos inclinados de 45° em relação a cada plano.

Equação 1 - Velocidade longitudinal.

$$V = \frac{L}{t} * 10^6$$

2.5 Cálculo das matrizes de rigidez [C] e de flexibilidade [S]

De posse das velocidades foi determinado os coeficientes da matriz de rigidez [C] utilizando-se as equações de Christoffel. Essa matriz [C] foi então invertida utilizando-se métodos matemáticos e, com essa inversão, foi determinada a matriz de flexibilidade [S] (Figura 4). Com a matriz de flexibilidade foi possível determinar as doze constantes elásticas que caracterizam a madeira, três módulos de elasticidade longitudinais (E_L , E_R , E_T), três módulos de elasticidade transversais (G_{LR} , G_{LT} , G_{TR}) e seis coeficientes de Poisson (μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{TR} , μ_{RT} , μ_{LT} , μ_{TL}).

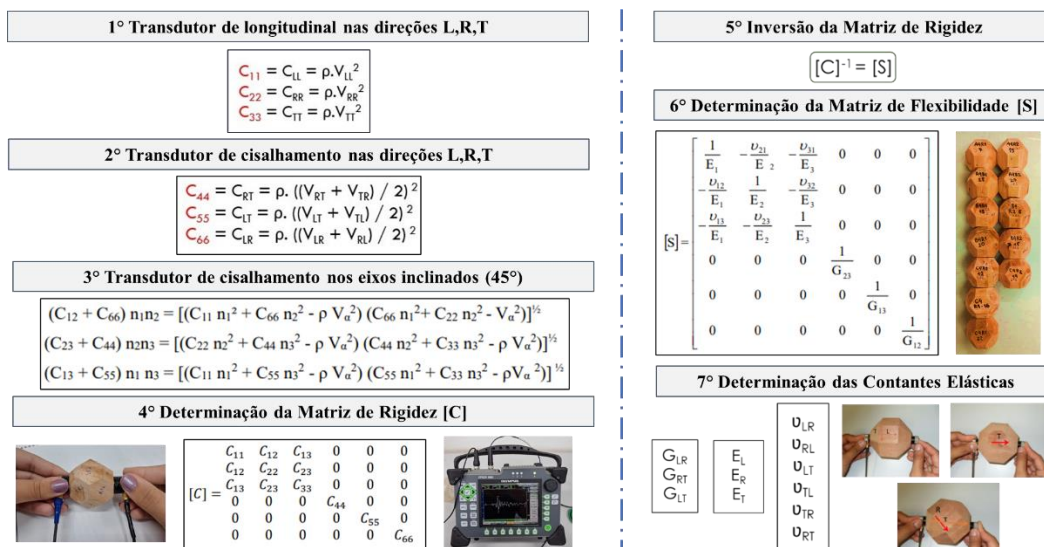


Figura 4 - Delineamento da caracterização da madeira por ultrassom.

2.6 Aplicação do teste de comparação de médias (Multiple Range Test)

Para análise dos resultados, os doze parâmetros elásticos, obtidos da caracterização da madeira por ultrassom, foram avaliados quanto à normalidade, de forma a garantir a viabilidade de uso de estatística paramétrica. Os dados foram então comparados através de testes de comparação de médias (intervalo de confiança e *Multiple Range Test*), a fim de verificar se há diferença estatística significativa entre a madeira dos três clones de cada região e da madeira de um mesmo clone crescida nas duas regiões com características edafoclimáticas distintas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Ao comparar as propriedades elásticas dos clones A, B e C crescidos em cada uma das duas regiões (1 e 2), constatou-se que os parâmetros elásticos relacionados aos módulos de elasticidade longitudinal (E_R , E_L e E_T) e transversal (G_{RT} , G_{LT} e G_{LR}) diferenciam-se estatisticamente, com 95% de nível de confiança (P-valor < 0,05) (Tabela 1). O clone A apresentou os maiores valores para essas propriedades, enquanto o clone C obteve os menores valores, e o clone B apresentou valores intermediários (Tabela 1). Em contraste, os coeficientes de Poisson mostraram valores iguais para os clones A, B e C em ambas as regiões (R1 e R2), conforme apresentado na Tabela 1.

Ao comparar as propriedades elásticas de um mesmo clone, crescido nas diferentes regiões (R1 e R2) percebe-se que, de forma geral, não houve diferença estatística significativa nos parâmetros elásticos para os clones crescidos nas duas regiões (Tabela 2). Especificamente, o clone A apresentou diferença estatística entre as regiões 1 e 2 apenas para um módulo de elasticidade transversal (G_{RT}) e para três coeficientes de Poisson (ν_{TL} , ν_{LR} e ν_{RT} – Tabela 2). O clone B mostrou diferença estatística entre as regiões 1 e 2 para dois módulos de elasticidade, sendo um longitudinal (E_T) e um transversal (G_{LT}), além de um coeficiente de Poisson (ν_{RT}) (Tabela 2). Por outro lado, o clone C não apresentou diferença estatística significativa para os parâmetros elásticos das árvores crescidas nas regiões 1 e 2, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 1 - Valores médios para as propriedades elásticas, coeficientes de variação da média (valores entre parênteses), P-valor e resultados da análise estatística de comparação de médias dos clones (A, B e C) por região (1 e 2).

Parâmetros Elásticos	Região 1				Região 2			
	Clone A	Clone B	Clone C	P-valor	Clone A	Clone B	Clone C	P-valor
E_L (MPa)	9737,8 b (12,79%)	6029,6 a (45,28%)	8193,8 ab (10,82%)	0,0220	11661,2 b (15,07%)	9189,4 ab (26,19%)	8044,8 a (15,59%)	0,0278
E_R (MPa)	1194,6 b (11,49%)	1029,8 ab (2,71%)	893,2 a (17,65%)	0,0105	1392,8 c (8,28%)	1094,0 b (16,67%)	686,7 a (1,31%)	0,0003
E_T (MPa)	725,4 b (23,93%)	955,3 c (8,46%)	428,0 a (12,94%)	0,0004	676,2 b (23,59%)	730,8 b (11,13%)	448,0 a (23,86%)	0,0069
G_{RT} (MPa)	832,0 b (8,18%)	603,4 b (67,90%)	194,8 a (7,05%)	0,0185	613,8 b (24,95%)	394,6 ab (45,69%)	316,2 a (80,95%)	0,0915
G_{LT} (MPa)	710,8 b (13,76%)	1052,8 c (1,53%)	537,0 a (6,98%)	0,0000	770,4 b (13,25%)	686,8 ab (12,14%)	562,2 a (18,88%)	0,0177
G_{LR} (MPa)	1088,7 b (1,57%)	1051,4 b (4,08%)	858,8 a (8,26%)	0,0002	1038,4 b (9,39%)	996,0 b (3,44%)	830,0 a (9,94%)	0,0039
ν_{RL}	0,089 a (12,60%)	0,148 a (58,35%)	0,078a (33,08%)	0,1172	0,096 a (17,56%)	0,100 a (37,46%)	0,065 a (34,80%)	0,1293
ν_{TL}	0,059 a (5,62%)	0,147 b (41,68%)	0,038 a (25,55%)	0,0018	0,046 b (8,12%)	0,062 c (20,13%)	0,032 a (21,78%)	0,0010
ν_{LR}	0,668 a (11,43%)	0,734 a (24,34%)	0,700 a (23,54%)	0,8104	0,822 a (11,78%)	0,790 a (18,28%)	0,730 a (24,64%)	0,6057
ν_{TR}	0,446 a (14,67%)	0,464 a (17,28%)	0,426 a (11,09%)	0,6671	0,378 a (11,74%)	0,420 a (7,01%)	0,472 a (21,88%)	0,1471
ν_{LT}	0,856 b (17,30%)	0,798 b (4,84%)	0,632 a (8,77%)	0,0108	0,834 b (3,56%)	0,750 b (19,39%)	0,587 a (8,06%)	0,0177
ν_{RT}	0,718 ab (6,06%)	0,512 a (26,29%)	0,810 b (24,3%)	0,0227	0,825 a (8,48%)	0,664 a (8,56%)	0,754 a (22,40%)	0,1487

Letras iguais nas linhas indicam igualdade significativa entre os parâmetros elásticos dos clones por região de cultivo enquanto que letras diferentes na mesma linha indicam diferença estatística significativa do parâmetro elástico para os diferentes.

Tabela 2 - Intervalos de confiança das médias das propriedades elásticas e P-valor das comparações de médias para os clones (A, B, C) por região (1 e 2).

Parâmetros Elásticos	Clone A		Clone B		Clone C	
	Intervalo de confiança	P-valor	Intervalo de confiança	P-valor	Intervalo de confiança	P-valor
E_L (MPa)	[-4144,5; 297,75]	0,0809	[-6913,2; 593,6]	0,0882	[-1435; 1733]	0,8337
E_R (MPa)	[-401,67; 5,37]	0,0548	[-284,8; 156,3]	0,5131	[-23,63; 436,69]	0,0705
E_T (MPa)	[-193,93; 292,33]	0,6532	[95,77; 353,13]	0,0044	[-160,50; 120,5]	0,7463
G_{RT} (MPa)	[21,45; 414,95]	0,0343	[-252,82; 670,42]	0,3274	[-428,7; 185,8]	0,3810
G_{LT} (MPa)	[-205,38; 86,18]	0,3734	[264,55; 467,35]	0,0001	[-158,3; 107,88]	0,6679
G_{LR} (MPa)	[-93,11; 193,645]	0,4239	[-7,175; 117,98]	0,0746	[-83,45; 141,05]	0,5704
ν_{RL}	[-0,027; 0,0146]	0,5122	[-0,049; 0,145]	0,2866	[-0,023; 0,048]	0,4417
ν_{TL}	[0,007; 0,0193]	0,0018	[-0,018; 0,0124]	0,6721	[-0,007; 0,0177]	0,3398
ν_{LR}	[-0,295; -0,014]	0,0355	[-0,293; 0,181]	0,6006	[-0,2816; 0,2216]	0,7903
ν_{TR}	[-0,0135; 0,149]	0,0906	[-0,057; 0,145]	0,3367	[-0,1631; 0,0711]	0,3916
ν_{LT}	[-0,134; 0,1778]	0,7530	[-0,1314; 0,226]	0,5501	[-0,049; 0,1397]	0,2845
ν_{RT}	[-0,208; -0,067]	0,0402	[-0,303; -0,0013]	0,0485	[-0,2117; 0,3236]	0,6424

4. CONCLUSÕES:

Os três clones avaliados apresentaram diferenças estatisticamente significativas para os módulos de elasticidades (longitudinal e transversal), porém apresentaram valores iguais estatisticamente para os coeficientes de Poisson. Portanto, este projeto de pesquisa demonstrou que as condições edafoclimáticas, de forma geral, não influenciam significativamente as propriedades elásticas dos clones de *Eucalyptus* sp.

5. AGRADECIMENTOS:

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a João Paulo, José Maria, Juscier, Paulo, Carol e professora Cinthya por suas valiosas contribuições ao meu projeto de iniciação científica. Agradeço ao João Paulo, por me ajudar e me apoiar em todas as etapas do projeto, a José Maria pela disposição em cortar os toretes, ao Juscier pelo suporte técnico e paciência na operação da máquina, e ao Paulo pelo suporte técnico na operação do equipamento de ultrassom. Agradeço também à Carol, minha coorientadora, e à professora Cinthya, minha orientadora, pela orientação e apoio constante ao longo deste trabalho. Este projeto não teria sido possível sem a colaboração e dedicação de todos vocês.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, M.N.F.; VIDAURRE, G.B.; PEZZOPANE, J.E.M.; LOUSADA, J.L.P.C.; SILVA, M.E.C.M.; CÂMARA, A. P.; ROCHA, S.M.G.; OLIVEIRA, J.C.L.; CAMPOE, O.C.; CARNEIRO, R.L.; ALVARES, C.A.A.; TOMAZZELO FILHO, M.; FIGUEIREDO, F.deM.de.; OLIVEIRA, R.F.O. 2019. **Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions**. Forest Ecology and Management, 458.

BERTOLDO, C.; PEREIRA, G.A; GONÇALVES, R. 2023. **Effect of Reducing the Size and Number of Faces of Polyhedral Specimen on Wood Characterization by Ultrasound**. Materials, 16, 4870.

CÂMARA, A. P. et al. **Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial *Eucalyptus* clones**. Forest ecology and management, v. 474, n. 118380, p. 118380, 2020.

CÂMARA, A. P. et al. **Changes in rainfall patterns enhance the interrelationships between climate and wood traits of eucalyptus**. Forest ecology and management, v. 485, n. 118959, p. 118959, 2021.

COSTA, S.E. de L.; SANTOS, R.C. do; VIDAURRE, G.B.; CASTRO, R.V.O.; ROCHA, S.M.G.; CARNEIRO, R.L.; CAMPOE, O.C.; SANTOS, C.P.deS.; GOMES, I.R.F.; CARVALHO, N.F.deO.; TRUGILHO, P.F. 2019. **The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones**. Forest Ecology and Management, 458.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; PELLIS, B.P. 2014. **Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens**. Wood Science and Technology, 48 :269-287.

ROCHA, S.M.G; VIDAURRE, G.B.; PEZZOPANE, J.E.M.; ALMEIDA, M.N.F.; CARNEIRO, R.L.; CAMPOE, O.C.; SCOLFORO, H.F.; ALVARES, C.A.A.; NEVES, J.C.L.; XAVIER, A.C.; FIGURA, M.A. 2020. **Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species**. Forest Ecology and Management, 473.

VÁZQUEZ, C.; GONÇALVES, R.; BERTOLDO, C., BAÑO, V., Veja, A., Crespo, J., and Guaita, M. 2015. **“Determination of the mechanical properties of *Castanea sativa* Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods,”** Wood Science and Technology 49(3), 607-622. DOI:10.1007/s00226-015- 0719-7