

Influência da anatomia nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de espécies de um sistema agroflorestal

Alec Duwe dos Santos¹; Elder Eloy¹; Tauana de Souza Mangini²; Rômulo Trevisan¹;
Claiton Nardini².

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia Florestal,
Frederico Westphalen, RS, Brasil.

² Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Engenharia
Florestal, Curitiba, PR, Brasil.

Resumo: Este estudo teve como finalidade avaliar a influência da anatomia nas propriedades físicas e mecânicas de *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan, *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* e *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake provenientes de um sistema agroflorestal. Foram selecionadas cinco árvores de cada espécie, com idade de 9 anos, sendo coletadas amostras para análise das características anatômicas, das propriedades físicas e mecânicas da madeira. As variáveis anatômicas, com exceção do comprimento das fibras e espessura da parede celular, correlacionaram-se com as propriedades físicas da madeira e influenciaram seus valores. Quanto maior a fração de parede celular, frequência de vasos e frequência de raios, maior será a densidade básica e as propriedades mecânicas da madeira. Quanto maior o diâmetro da fibra, diâmetro do lúmen, diâmetro do vaso, altura do raio e largura do raio, maior o teor de umidade da madeira e menores serão os valores das propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Elementos anatômicos, Propriedades Mecânicas, Densidade Básica, Teor de Umidade, Correlação de Pearson.

Influence of anatomy on the physical and mechanical properties of wood from species in an agroforestry system

Abstract: This study aimed to evaluate the influence of anatomy on the physical and mechanical properties of *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan, *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* and *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake from an agroforestry system. Five trees of each species, aged 9 years, samples being collected for analysis of anatomical characteristics analysis of anatomical characteristics and physical and mechanical properties of the wood. The anatomical variables, with the exception of fiber length and cell wall thickness, correlated with the physical properties of the wood and influenced their values. The higher the cell wall fraction, vessel frequency and ray frequency, the higher the basic density and mechanical properties of the wood. The larger the fiber diameter, lumen diameter, vessel diameter, radius height and radius width, the higher the moisture content of the wood and the lower the values of the mechanical properties.

Keywords: **Keywords:** Anatomical elements, Mechanical properties, Basic density,

Moisture content, Pearson correlation.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é uma matéria-prima diferenciada, pois contém propriedades únicas, com constituição orgânica, heterogênea, porosa, higroscópica e anisotrópica (Eloy *et al.*, 2020). SAFs são sistemas que introduzem componentes florestais que interagem em um arranjo temporal com componentes agrícolas em consórcio, desenvolvidos com as características específicas das espécies utilizadas e preservando ao mesmo tempo os recursos naturais (Mangini *et al.*, 2023).

Para o correto aproveitamento da madeira é de extrema importância o conhecimento de suas características físicas, mecânicas e anatômicas, pois permitem a determinação de suas propriedades tecnológicas. O estudo da anatomia da madeira gera informações que contribuem para a caracterização e identificação de espécies vegetais lenhosas, além de proporcionar subsídios para estudos de suas propriedades, reflexos de seu crescimento, comportamento no uso e qualidade da madeira (Battipaglia *et al.*, 2014).

Os elementos anatômicos como vasos, fibras e células do parênquima radial e axial tornam a madeira um material poroso, caracterizando-a como uma estrutura complexa para transporte de fluidos líquidos e gasosos. As dimensões e a frequência das células, por exemplo, afetam diretamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira (Costa *et al.*, 2017), enquanto que outros elementos, como o diâmetro da fibra, a altura e a largura do raio, atuam de maneira oposta, ou seja, facilitando esse processo (Zanuncio *et al.*, 2016).

Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência da anatomia nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de quatro espécies cultivadas em um sistema agroflorestal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 *Descrição do local experimental e coleta das amostras*

A madeira de quatro espécies florestais Parapiatadenia rigida (Benth.) Brenan (angico-vermelho), Peltophorum dubium (Spreng.) Taub. (canafístula), Eucalyptus grandis × Eucalyptus urophylla (eucalipto híbrido) and Schizolobium parahyba (Vell.)



Blake (guapuruvú), foi obtida de um sistema agroflorestal caracterizado por possuir espaçamento de plantio de 12,0 x 1,5 m (12,0 m entre linhas e 1,5 m entre plantas na linha), localizado no município de Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, Brasil (27°22”S, 53°25”W; 480 m de altitude). Segundo a classificação de Köppen o clima predominante da região é o Cfa caracterizado como sub-úmido sub-temperado com temperatura média anual de 18,8 °C e temperatura média no mês mais frio de 13,3 °C.

Foram amostradas cinco árvores com 9 anos de idade por espécie, nas quais foi considerado o diâmetro médio de cada indivíduo. Para determinação das características anatômicas, mecânicas e físicas, foram retirados na região do diâmetro à altura do peito (DAP) a 1,30 m do solo, material em frações e pranchões posteriormente desdobrados em corpos de prova de cada indivíduo.

2.2 Anatomia da madeira

Para a análise anatômica, três amostras por árvore com dimensões de 1,5 × 1,5 × 2,0 cm foram retiradas orientadas para obtenção dos planos anatômicos transversal, longitudinal radial e longitudinal tangencial, resultando em 60 amostras. A microtomia foi realizada de acordo com a norma técnica da IAWA (1989) e a maceração sendo realizada de acordo com as recomendações de Franklin (1945). Com base neste padrão, foram avaliados o diâmetro do vaso (DV), a frequência do vaso (FV), a altura do raio (AR), a largura do raio (LR) e a frequência do raio (FR). No material macerado foram medidos o comprimento da fibra (CF), o diâmetro da fibra (DF), o diâmetro do lúmen da fibra (DL) espessura da parede celular (EP) e fração da parede celular (FP).

2.3 Propriedades físicas e mecânicas da madeira

Para análise da densidade básica e do teor de umidade da madeira, foram retiradas amostras circulares da seção transversal na posição do DAP e utilizadas na preparação dos corpos de prova. Foram avaliadas 25 amostras de cada espécie estudada, provenientes das regiões de cerne e alburno, totalizando 100 exemplares. As determinações foram realizadas utilizando a norma técnica NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

Para avaliação das propriedades mecânicas da madeira realizou-se os ensaios de flexão estática, dureza Janka e compressão perpendicular. Para o ensaio de flexão estática foram produzidos corpos-de-prova com as dimensões de 2,5 x 2,5 x 41,0 cm, sendo avaliados o módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR), tensão no limite proporcional (TLP) e força máxima (Fmáx). Para avaliação da dureza Janka transversal (DJt) e longitudinal (DJI) e compressão normal (Cn), as amostras foram produzidas com as dimensões de 5 x 5 x 15 cm. Todas as propriedades mecânicas foram determinadas utilizando a norma técnica ASTM D 143-94 (2000).

2.4 Delineamento experimental e análise dos dados

O experimento foi avaliado em delineamento inteiramente casualizado. Os dados foram submetidos à análise estatística pelo *Software* “*Statistical Analysis System*”, em que se procedeu com os testes de pressuposições da ANOVA (teste F), de Shapiro-Wilk para normalidade e Bartlett para homocedasticidade de variâncias, em que se verificou que os dados se comportaram de forma normal. No caso da análise de variância significativa adotou-se a comparação múltipla de médias pelo teste de Tukey. A relação funcional entre os elementos anatômicos e propriedades físicas e mecânicas da madeira foi avaliada pelo teste de correlação de Pearson.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise de variância as quatro espécies florestais apresentaram diferença significativa entre si em todos os parâmetros anatômicos avaliados. Quando analisado o teste de médias, observou-se que a espécie *Schizolobium parahyba* apresentou os maiores valores de LF (35,1 μm), DL (27,6 μm) e DV (187,1 μm), assim como, as maiores dimensões dos raios, tanto em altura (256,4 μm) quanto em largura (38,2 μm). Em contrapartida, possui os menores valores para a FV (1,8 vasos mm^{-2}), FR (14,8 raios mm^{-1}) e para a FP (21,6 %) (Tabela 1).

Tabela 1. Elementos anatômicos da madeira das espécies florestais provenientes do sistema agroflorestal



Espécies	DV (μm)	FV (vaso mm^{-2})	AR (μm)	LR (μm)	FR (raio mm^{-2})
<i>P. rigida</i>	89,1 ^{13,5 c}	6,6 ^{1,7 b}	132,9 ^{31,4 c}	19,3 ^{3,2 c}	64,8 ^{2,5 a}
<i>P. dubium</i>	123,9 ^{21,1 b}	4,0 ^{1,3 c}	189,5 ^{45,9 b}	25,1 ^{7,0 b}	35,4 ^{4,1 c}
<i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i>	86,6 ^{23,5 c}	14,8 ^{2,2 a}	168,9 ^{60,8 b}	13,5 ^{3,5 d}	56,0 ^{5,8 b}
<i>S. parahyba</i>	187,1 ^{43,4 a}	1,8 ^{0,9 d}	256,4 ^{47,3 a}	38,2 ^{5,8 a}	14,8 ^{1,3 d}

Espécies	CF (μm)	DF (μm)	DL (μm)	EP (μm)	FP (%)
<i>P. rigida</i>	872,6 ^{116,2 a}	13,4 ^{2,8 c}	5,7 ^{1,6 b}	3,9 ^{0,8 b}	57,8 ^{6,7 ab}
<i>P. dubium</i>	690,2 ^{134,9 b}	21,8 ^{5,9 b}	8,1 ^{4,3 b}	6,8 ^{2,0 a}	64,0 ^{13,8 a}
<i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i>	850,1 ^{160,7 a}	12,9 ^{2,7 c}	5,9 ^{2,0 b}	3,5 ^{0,9 b}	55,2 ^{9,5 b}
<i>S. parahyba</i>	882,1 ^{178,4 a}	35,1 ^{6,1 a}	27,6 ^{5,9 a}	3,7 ^{1,1 b}	21,6 ^{6,5 c}

Onde: DV = diâmetro de vaso; FV = Frequência de Vaso; AR = Altura de Raio; LR = Largura de Raio; FR = Frequência de raio; CF = Comprimento de Fibra; DF = Diâmetro de fibra; DL = Diâmetro de Lúmen; EPC = Espessura da Parede Celular; FPC = Fração da Parede Celular.

Os maiores valores de EP (6,8 μm) e FP (64,0 μm) foram verificados para a espécie *Peltophorum dubium*, não diferenciando da *Parapiptadenia rigida* para esta variável. Em contrapartida, o híbrido *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* apresentou os maiores valores de FV (14,8 vasos mm^{-2}) (Tabela 1).

Quanto aos resultados das propriedades físicas e mecânicas da madeira, pode-se observar que o híbrido *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* apresentou os maiores valores para as propriedades mecânicas MOR, MOE, TLP e FM, não diferindo da *Parapiptadenia rigida* para MOR e FM e, do *Peltophorum dubium* para a FM.

Tabela 2. Propriedades mecânicas e físicas da madeira de espécies florestais provenientes de sistema agroflorestal.

Species	Flexão Estática				Dureza		Compressão Perpendicular		ρ_b (g cm^{-3})	TU (%)
	MOE (MPa)	TPL (MPa)	MOR (Mpa)	FM (N)	DJt (MPa)	DJI (MPa)	MOE (MPa)	TPL (MPa)		
<i>P. rigida</i>	6113b	36,8b	85,3a	2430a	81,4aB	109,5aA	569,6a	15,4a	0,652a	66,6d
<i>P. dubium</i>	6948b	35,1b	60,0b	2138	42,5bB	47,5cA	387,5b	9,2b	0,488b	127,

	a									9b
<i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i>	10304a	57,4a	89,3a	2711a	42,3bB	62,9bA	345,5b	8,6b	0,509b	85,4 _c
<i>S. parahyba</i>	3094c	19,3c	30,9c	952b	11,7cB	18,9dA	157,7c	3,5c	0,277c	192,2 _a

Onde: MOE = Módulo de Elasticidade; TPL = Tensão no Limite Proporcional; MOR = Módulo de Ruptura; FM = Força máxima; DJt = Dureza de Janka transversal; DJl = Dureza de Janka longitudinal; pb = massa específica; TU = Teor de Umidade.

Da mesma forma, a *Parapiptadenia rigida* se destacou com os maiores valores de DJt, DJl, MOE e TLP da compressão perpendicular e pb, em comparação com as demais espécies. Já a *Schizolobium parahyba* apresentou os menores valores para todas as propriedades mecânicas da madeira e maiores valores para TU (Tabela 2).

A avaliação da correlação entre os caracteres anatômicos e as propriedades mecânicas, possibilita verificação da influência de um parâmetro sobre o outro. A partir da análise da correlação de Pearson, foi possível observar que a anatomia da madeira influenciou na maioria das propriedades mecânicas das espécies estudadas (Tabela 3). Há exceção do CF e EP que não apresentaram correlação.

Tabela 3. Correlação de Pearson entre a anatomia e as propriedades mecânicas e físicas de espécies provenientes de sistema agroflorestal.

Variável Anatômica	Propriedades Mecânicas							Propriedades Físicas		
	Flexão Estática			Dureza		Compressão Perpendicular		pb	TU	
	MOE	TPL	MOR	FM	DJt	DJl	MOE			TPL
CF	-0,06 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,02 ^{ns}
DF	-0,70*	-0,72*	-0,87*	-0,84*	-0,76*	-0,78*	-0,65*	-0,71*	-0,88*	0,94*
DL	-0,70*	-0,68*	-0,85*	-0,84*	-0,75*	-0,71*	-0,67*	-0,71*	-0,88*	0,88*
EP	0,03 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,11 ^{ns}
FP	0,64*	0,59*	0,77*	0,77*	0,66*	0,59*	0,61*	0,64*	0,79*	-0,74*
DV	-0,64*	-0,70*	-0,82*	-0,79*	-0,76*	-0,76*	-0,67*	-0,70*	-0,85*	0,88*
FV	0,80*	0,85*	0,72*	0,69*	0,29 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,44*	-0,65*
AR	-0,48*	-0,54*	-0,74*	-0,71*	-0,84*	-0,82*	-0,73*	-0,81*	-0,88*	0,86*
LR	-0,78*	-0,80*	-0,84*	-0,85*	-0,62*	-0,64*	-0,50*	-0,57*	-0,76*	0,84*
FR	0,59*	0,66*	0,86*	0,81*	0,84*	0,84*	0,70*	0,80*	0,92*	-0,95*

Em que: MOR = módulo de ruptura; MOE = módulo de elasticidade; TPL = tensão no limite proporcional; FM = força máxima; DJt = Dureza transversal; DJl = Dureza longitudinal; pb = massa específica; TU = Teor de Umidade; CF = comprimento; DF = diâmetro das fibras; DL = diâmetro de lume das fibras, EP = espessura da parede

das fibras; FP = fração parede das fibras; DV = diâmetro de vaso; FV = frequência dos vasos; AR= altura do raio; LR = largura do raio e FR = frequência dos raios.

* = Correlação de Pearson significativa; ^{ns} = Correlação de Pearson não significativa.

A análise da correlação de Pearson demonstrou uma correlação inversamente proporcional das variáveis DF, DL, DV, AR e LR, com as propriedades mecânicas e para pb (Tabela 3). Já as variáveis FP, FV, FR apresentaram correlação diretamente proporcional com as propriedades mecânicas e com o TU, corroborando com França *et al.*, 2015 e Zanuncio *et al.*, 2016, fundamentando que as dimensões, bem como a frequência e distribuição dos elementos anatômicos afetam diretamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira (França *et al.*, 2015), bem como o processo de secagem (Zanuncio *et al.*, 2016). Quanto maior a fração da parede celular, a frequência dos vasos e a frequência dos raios, conseqüentemente maior será a densidade básica e menor será o teor de umidade da madeira. Em contrapartida, quanto maiores o diâmetro da fibra, o diâmetro do lúmen, o diâmetro do vaso, a altura e a largura do raio, menor será a densidade básica e maior será o teor de umidade da madeira. Este entendimento vai de encontro ao estudo de Pedrazzi *et al.*, 2013, fundamentando que além do CF o estudo da largura também se torna relevante, pois fibras com maiores larguras possuem grande potencial de colapso e facilidade de refino.

Para Zanuncio *et al.*, 2016, uma alta proporção de espaços vazios ocupados pelos vasos confere uma menor massa específica básica, portanto, o estudo dos valores dimensionais dos vasos também é de extrema importância no lenho, pois são eles que conduzem líquidos ao longo de toda a árvore e, conseqüentemente, as alterações nessas dimensões influenciam em algumas propriedades da madeira.

O estudo da anatomia da madeira mostra-se importante em diversas aplicações na área de tecnologia da madeira. Mangini *et al.* (2023) observaram um comportamento inversamente proporcional entre a densidade básica e o teor de umidade inicial de espécies de sistemas agroflorestais, destacando que essa variação decorre da relação entre massa e volume do material. Produtos com valores de densidade básica elevados são adequados para utilizações que exigem maior resistência mecânica, influenciando diretamente na usinagem da madeira (Bandera *et al.*, 2021).

Para aumentar o interesse na implantação de sistemas agroflorestais,



baseados na análise da qualidade da madeira produzida e melhorar o uso final de forma mais eficiente e sustentável, recomenda-se avaliar as variáveis anatômicas, pois estas estão fortemente correlacionadas com as propriedades físicas e mecânicas da madeira. Essas avaliações são relevantes para analisar com maior precisão a remoção de água no processo de secagem e a resistência mecânica da madeira.

4. CONCLUSÃO

As variáveis anatômicas, com exceção do comprimento de fibra e espessura da parede, se correlacionam com as propriedades físicas e mecânicas da madeira das espécies estudadas e influenciam nos seus valores.

Quanto maior a fração da parede das fibras frequência de vasos e frequência dos raios, maior a resistência mecânica e massa específica básica da madeira.

Quanto maior a largura e diâmetro do lume das fibras, diâmetro dos vasos, altura e largura dos raios, menor a resistência mecânica da madeira e maior o teor de umidade da madeira.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **A B N T NBR 7190-**

1: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento.

Rio de Janeiro: ABNT, p. 81, 2022.

AMERICAN SOCIETY. **A S T M D 143-94:** For testing and materials. Standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia: ASTM, 2000.

Bandera, E.; Eloy, E.; Trevisan, R.; Mangini, T. S.; Zanchetta, L. S.; Candaten, L.; Azevedo, N. E. P.; Santos, Y. C. T. Effect of thermal modification on the technological properties of wood from species in an agroforestry system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. 2021.

BATTIPAGLIA, G.; MICCO, V.; SASS-KLAASSEN; TOGNETTI, R.; MÄKELA, A. WSE symposium: Wood growth under environmental changes: the need for a multidisciplinary approach. **Tree physiology**, Oxford, v.34, n.8, p.787-791, 2014.

COSTA, L. J.; LOPES, C. B. DA S.; REIS, M. F. DE C.; CÂNDIDO, W. L.; FARIA, B. D. F. H. DE; PAULA, M. O. DE. Caracterização anatômica e descrição físico-química e mecânica da madeira de *Mimosa schomburgkii*. **Floresta**, Paraná, v.47, n.4, p.383-390, 2017.

Eloy, E.; Bandera, E.; Mangini, T. S.; Zanchetta, L. S.; Trevisan, R.; Caron, B. O. Influence of drying on the physical and mechanical properties of wood from trees grown in an agroforestry system. **Revista Árvore**. 44, pg. 1-9, 2020.

França, T. S. F. A.; Araújo, M. D. C.; Paes, J. B.; Vidaurre, G. B.; Oliveira, J. T. S.; Baraúna, E. E. P. Características anatômicas e propriedades físico-mecânicas das madeiras de duas espécies de mogno africano. **Cerne**. 212(4): pg. 633- 640, 2015.

Franklin, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood: resin

composites, and a new macerating method for wood. **Nature**. V.155, pg. 1-51, 1945.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. **I A W A**: list of microscopic features for hardwood identification. Bulletin, Leiden, 1989.

Mangini, T. S.; Candaten, L.; Trevisan, R.; Eloy, E.; Bandera, E.; Zanchetta, L. S. Taxa e defeitos de secagem ao ar livre de quatro espécies provenientes de um sistema agroflorestal. **Scientia Forestalis**. v. 51, 2023.

PEDRAZZI, C.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; WILLE, V. K. Avaliação morfológica das fibras de polpas Kraft de Eucalipto com diferentes conteúdos de Xilanas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.41, n.100, p. 515-522, 2013.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; DAMÁSIO, R. A. P.; OLIVEIRA, B. S.; CARNEIRO, A. C. O.; COLODETTE, J. L. Relationship between the anatomy and drying in *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* wood. **Árvore**, Viçosa, v.40, n.4, p. 723-729, 2016.