

Caracterização físico-mecânica da madeira juvenil de Pinus

Physico-mechanical characterization of pine juvenile wood

**Erick Chagas Mustefaga¹, Éverton Hillig¹, Everton Lorenzetti Tavares¹,
Pâmela Caroline Lau Sozim¹ e Fernando Rusch¹****Resumo**

Árvores jovens de pinus ainda não possuem quantidade significativa de madeira adulta, o que pode ocasionar reflexos em suas propriedades de resistência e rigidez. Por outro lado, as empresas estão reduzindo suas rotações florestais o que contribui para maior oferta deste tipo de madeira, sendo poucas as informações sobre suas propriedades. Por isso, neste estudo foi realizada a caracterização simplificada das propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus taeda* e de *Pinus patula*, de árvores jovens com 12 anos de idade. Foram colhidas nove árvores de cada espécie, para a determinação de sua densidade aparente e de sua resistência e rigidez em diferentes ensaios mecânicos. As árvores colhidas pertenciam a diferentes classes de diâmetro para permitir também a análise desta variável. Verificou-se que a madeira de ambas as espécies apresentou baixa densidade aparente, sendo menor para *Pinus patula* em relação ao *Pinus taeda*. Os valores médios obtidos para as propriedades mecânicas foram compatíveis com os valores referenciais apresentados pela literatura, mas a densidade média obtida para as duas espécies não permitiu enquadrá-las como madeira estrutural segundo a norma NBR 7190/1997 em vigor. Houve correlação significativa entre a densidade aparente da madeira e a maior parte de suas propriedades mecânicas. Foi confirmado que os valores normativos não se aplicaram à madeira obtida de árvores jovens utilizadas nesse estudo e sugerida realização de mais estudos com vista à inclusão das propriedades de flexão estática como parâmetros de classificação estrutural de madeiras.

Palavras-chave: *Pinus taeda*; *Pinus patula*; densidade; resistência; rigidez.

Abstract

Pine young trees do not yet have a significant amount of adult wood, which can cause reflections on their resistance and stiffness properties. On the other hand, companies are reducing their forest rotations which contribute to a greater supply of this wood type, with few information on their properties. Therefore, in this study, the simplified physico-mechanical characterization of *Pinus taeda* and *Pinus patula* wood from 12-year-old young trees was carried out. Nine trees of each species were harvested to determine their apparent density and their strength and stiffness in different mechanical tests. The trees harvested were of different diameter classes to allow also the analysis of this variable. It was verified that the wood of both species had low apparent density, which was lower for *Pinus patula* than *Pinus taeda*. The average values obtained for the mechanical properties were compatible with the literature reference values, but the average density obtained for the two species did not allow them to be classified as structural wood according to NBR 7190/1997 standard. There was a significant correlation between the wood apparent density and major of its mechanical properties. It was confirmed that the normative values did not apply to the wood obtained from young trees used in this study and suggested further studies with the aim of including the static bending properties as parameters of structural wood classification.

Keywords: *Pinus taeda*; *Pinus patula*; density; strength; stiffness.

INTRODUÇÃO

A utilização de espécies do gênero *Pinus* para plantios comerciais no Brasil iniciou na década de 1960, com o estabelecimento de programas de reflorestamento principalmente com *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm. A partir do final da década de 1960, essas espécies foram muito utilizadas nos plantios realizados com incentivos fiscais, especialmente nas regiões sul e sudeste do Brasil. Na década de 1970 foram introduzidas experimentalmente espécies de pinus tropicais no Brasil, entre eles o

1. Departamento de Engenharia Florestal. Setor de Ciências Agrárias e Ambientais. Universidade Estadual do Centro-Oeste. Irati / PR, Brasil.

Pinus patula. *Pinus taeda* é a espécie que tem sido mais utilizada nesse século devido a características como rápido crescimento e resistência a geadas (AGUIAR et al., 2014).

O *Pinus patula* é uma espécie tropical, nativa das montanhas do leste do México, em uma região conhecida como Sierra Madre Oriental (OSPINA et al., 2011). Embora esta espécie tenha distribuição natural restrita, apresenta resultados de sucesso em povoamentos comerciais em diferentes regiões, sendo a conífera plantada mais extensivamente na África do Sul, compreendendo 333.066 hectares ou 51,4% da área total de coníferas (DAFF, 2014).

Também é encontrada nas Américas Central e do Sul (Argentina, Brasil, Venezuela, Colômbia e Equador), na Oceania (Nova Zelândia e Austrália) e na Ásia (TÉLLES et al., 2011; OSPINA et al., 2011). No Brasil, seu desenvolvimento ocorre em regiões de altitude elevada, como no Sudeste do estado de Minas Gerais, no Nordeste de São Paulo, Sudoeste do Paraná, Oeste de Santa Catarina e Nordeste do Rio Grande do Sul (AGUIAR et al., 2014).

No Brasil, plantações de pinus tem sofrido redução do período de rotação florestal. Regimes com dois desbastes e corte raso entre 18 e 20 anos (REMASA, 2016) ou sem desbastes e corte final com 17 anos (WESTROCK, 2017) são exemplos. Nessa idade, em geral, as árvores do gênero *Pinus* ainda não possuem quantidade significativa de madeira adulta e a maior parte do lenho ainda é formada por madeira juvenil. Esse tipo de madeira apresenta características inferiores em termos de resistência e estabilidade dimensional o que pode influenciar nas suas potencialidades de utilização. (SANTINI et al., 2000)

Palermo et al. (2013) verificaram que *P. elliottii* apresentou uma variação de densidade da madeira no sentido radial do tronco que possibilitou a demarcação do lenho juvenil e adulto de sua madeira e que essa variação foi semelhante à encontrada por outros pesquisadores para *P. patula* e *P. taeda*. Diversos autores verificaram para essas espécies que o lenho juvenil ocorre até o 5º anel de crescimento e o lenho adulto após o 14º anel em relação à medula (PATERSON, 1969; UPRICHARD, 1970; BURLEY, 1973; FERREIRA et al., 1978; RINGO; KLEM, 1980; SCHUTZ, 1989; BENDTSEN; SENFT, 1986 Apud PALERMO et al., 2013). Resulta que árvores de 12 anos de idade dessas espécies não apresentam ainda lenho adulto e sim somente lenho juvenil e de transição em sua madeira. Assim, torna-se importante que sejam realizados estudos que avaliem a qualidade dessa madeira, oriunda a partir de árvores jovens.

Oliveira et al. (2006) observaram aumento nas propriedades da madeira de *Pinus taeda* com o aumento da idade da população e com aumento da sua posição (distância) em relação a medula. A densidade aumentou aproximadamente 30% entre as idades de 9 e 20 anos e no sentido da medula para a casca (posição radial); a resistência à compressão paralela às fibras aumentou 50% naquelas idades e em 74% na posição radial; e a resistência à flexão aumentou 50% com a idade e 80% com a posição radial.

A madeira de *Pinus patula* apresentou densidade básica média de 0,443, 0,439 e 0,480 g.cm⁻³, respectivamente para os intervalos de 7-13, 14-20 e mais de 20 anos, em árvores colhidas de plantios na Colômbia (OSPINA et al., 2011). Kamala et al. (2014) investigaram propriedades mecânicas de *P. patula* de 30 anos de idade, constatando médias de módulo de ruptura e de módulo de elasticidade em flexão estática de 105,17 MPa e 10,93 GPa, respectivamente.

No Brasil, a NBR 7190 (ABNT, 1997) normatiza os ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira serrada de coníferas, e estabelece os valores médios de densidade básica e aparente, e de módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras, além de valores característicos, que referem-se ao quinto percentil na curva de distribuição normal de probabilidade, para resistência à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. No ano de 2002 foi iniciada uma proposta de revisão dessa norma, mas no projeto apresentado não houve mudanças dos valores característicos de densidade, resistência e rigidez da madeira de coníferas (ABNT, 2011).

Assim, os objetivos deste trabalho foram realizar a caracterização simplificada, por meio de ensaios físicos e mecânicos, das madeiras de *P. patula* e de *P. taeda*, procedentes de plantios comerciais de 12 anos de idade do Sul do Brasil; e determinar entre as propriedades avaliadas quais são mais representativas para estabelecer a resistência mecânica da madeira.

MATERIAL E MÉTODOS

Procedência e coleta das árvores

Foram colhidas 18 árvores, nove de cada espécie, no município de General Carneiro, região Centro-Sul do estado do Paraná, apresentando altitude média de 1.300 metros. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é caracterizado como clima temperado (Cfb). A precipitação média anual é de 1776 mm e a temperatura média anual de 16,4 °C, com máxima e mínima de 22,9 e 11,7 °C, respectivamente. A região apresenta freqüentes geadas entre os meses de maio e setembro (IAPAR, 2015).

Os plantios de ambas as espécies foram implantados em relevo suave ondulado de segunda rotação florestal, com espaçamento inicial de 3 x 2 m (1667 árvores.ha⁻¹) e estavam com 12 anos de idade. No local dos plantios predominam solos denominados neossolos litólicos, cambissolos e argissolos formados a partir do derrame basáltico. Os povoamentos foram conduzidos com manejo *clearwood*, tendo sofrido um desbaste e poda até 6 m de altura.

De posse do inventário do povoamento, as árvores de cada espécie foram classificadas em função do diâmetro a altura do peito (DAP), tomado a 1,30 m do solo. Foram sorteadas três árvores de cada espécie, em três classes de DAP (17,0 - 22,9 cm; 23,0 - 32,9 cm; ≥ 33,0 cm). Após o corte, o fuste de cada árvore foi traçado em toras de 1,30 m.

As toras foram transportadas para uma serraria, sendo desdobradas em pranchões de 7 cm de espessura e 15 cm de largura. Os pranchões foram submetidos à secagem ao ar livre em local coberto e ventilado por um período de 120 dias até atingirem aproximadamente 25% de umidade.

Propriedades Físico-mecânicas

Ensaio físico-mecânico

Dos pranchões obtidos das toras foram confeccionados seis corpos de prova para cada espécie e cada classe de DAP, atendendo o mínimo de corpos de prova para a caracterização simplificada da madeira da norma NBR 7190 (ABNT, 1997) e totalizando 36 corpos de prova para cada ensaio mecânico. A norma D-143 (ASTM, 2000) cita as condições para extração de amostras de madeira na colheita de árvores e especifica que os corpos de prova extraídos de madeira verde ou seca ao ar devem ser condicionados em ambiente com temperatura de 20 + 3 °C e umidade relativa do ar de 65%. Após, foram realizados os seguintes ensaios: flexão estática, compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, tração paralela às fibras, tração normal às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e dureza Janka nos sentidos axial, radial e tangencial da madeira, utilizando uma máquina universal de ensaios mecânicos.

De todos os corpos de prova, foram tomadas as medidas de comprimento, largura e espessura, e também foram obtido seu peso condicionado e seu peso seco em estufa à 103 °C + 2 °C. Com esses dados, foi calculada a densidade aparente e o teor de umidade de cada corpo de prova utilizado nos ensaios mecânicos. Com base no teor de umidade obtido em cada corpo de prova, os valores de cada propriedade mecânica foram corrigidos para um teor de umidade da madeira de 12%.

Os ensaios físicos e mecânicos foram realizados de acordo com a Norma ASTM D-143 (ASTM, 2000). A opção pela normativa da ASTM ao invés da norma ABNT, deve-se ao fato da norma ASTM especificar as condições de extração de amostra de árvores, enquanto a norma ABNT especifica a amostragem para lotes de madeira. Com isso, a norma ASTM tem padrões para o tamanho dos corpos de prova obtidos para árvores de pequeno diâmetro (menores que 30 cm) e que correspondem às dimensões da maioria das árvores utilizadas nesse estudo. Nesse caso, a diferença em relação à norma ABNT correspondeu ao corpo de prova do ensaio de flexão estática, com dimensões de 25 x 25 x 410 mm, inferior ao tamanho especificado pela norma ABNT e que possibilitou a realização desses ensaios.

Cabe ainda ressaltar que a norma D-143 (ASTM, 2000) e a norma NBR 7190 (ABNT, 1997) especificam mesmas dimensões de corpos de prova para os demais ensaios mecânicos realizados e as demais condições são semelhantes para todos os ensaios realizados neste estudo. Assim, optou-se pela utilização da norma ASTM para os parâmetros de realização dos ensaios e pela norma ABNT para a classificação da classe de resistência e densidade.

Análise dos dados

Propriedades físico-mecânicas

Foi realizado teste de homogeneidade de variância (Levene) e os dados seguiram uma distribuição normal. Dessa forma, os dados das propriedades físico-mecânicas foram submetidos à análise de variância fatorial, considerando o fator espécie e o fator classe de DAP. Havendo diferenças significativas para o fator classe de DAP, foi realizado teste de médias (Tukey). Após, foram calculadas as médias por tratamento para análise da interação quando esta foi significativa. Os testes estatísticos foram realizados ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Classificação da classe de resistência e densidade

Foram calculados para a madeira de cada espécie, os valores médios de densidade aparente e de módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras, bem como os valores característicos para resistência à compressão paralela e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Os valores característicos foram calculados de acordo com a equação dada na norma NBR 7190 (ABNT, 1997) e foram comparados aos valores mínimos de classe de resistência e densidade de coníferas, especificados pela norma.

Análise de correlação e regressão

Foi realizada análise de correlação de Pearson, a 5% de probabilidade de erro, entre a densidade aparente e cada uma das propriedades mecânicas avaliadas, para verificar qual a influência da densidade aparente da madeira em cada propriedade mecânica, sendo utilizados os dados obtidos em cada corpo-de-prova. Para as propriedades mecânicas em que o coeficiente de correlação com a densidade aparente foi superior a 0,5 foi realizada análise de regressão linear.

Análise Multivariada

Os dados médios obtidos foram submetidos à técnica estatística multivariada de extração dos componentes principais, que possibilitou identificar as propriedades mecânicas que apresentaram similaridades e verificar quais poderiam ser agrupadas.

RESULTADOS

Propriedades físico-mecânicas

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios das propriedades físicas e mecânicas para os fatores espécie e classe de DAP e na Tabela 2 os valores médios por tratamento para as propriedades que apresentaram interação significativa entre os fatores.

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas para os fatores espécie e classe de diâmetro.

Table 1. Physical and mechanical properties for species and diameter class factors.

Fator	Nível	ρ_{aparente} (g.cm ⁻³)	f_M (MPa)	E_M (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{v90} (MPa)
Espécie	<i>P. patula</i>	0,32 b	45,3 b	6318 a	6,79 b	31,0 a	9003 a	4,62 b
	<i>P. taeda</i>	0,41 a	56,3 a	6628 a	8,23 a	28,5 b	7532 b	7,52 a
Classe de DAP (cm)	17,0-22,9	0,34 a	48,9 a	6366ab	7,20 a	26,9 b	7236 a	5,14 b
	23,0-32,9	0,39 b	54,6 a	7280 a	7,41 a	33,1 a	8867 a	6,37 a
	≥ 33,0	0,37 ab	48,9 a	5771 b	7,93 a	29,3 b	8701 a	6,70 a
Interação	F1 x F2	1,40 ^{ns}	0,77 ^{ns}	7,00*	10,81*	11,46*	4,41*	4,39*

Fator	Nível	E_{c90} (MPa)	f_{H0} (MPa)	f_{H90R} (MPa)	f_{H90T} (MPa)	f_{t0} (MPa)	E_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)
Espécie	<i>P. patula</i>	211 b	1,89 b	1,22 b	1,11 b	64,2 a	7173 a	2,05 b
	<i>P. taeda</i>	341 a	2,96 a	2,40 a	2,08 a	57,5 a	4674 b	2,82 a
Classe de DAP (cm)	17,0-22,9	222 b	2,39 a	1,40 b	1,43 a	61,3ab	7363 a	2,60 a
	23,0-32,9	258 b	2,36 a	1,87 a	1,64 a	69,4 a	6087ab	2,49 a
	≥ 33,0	349 a	2,55 a	2,14 a	1,72 a	51,8 b	4320 b	2,21 a
Interação	F1 x F2	1,13 ^{ns}	2,96*	9,34*	4,61*	2,28 ^{ns}	0,36 ^{ns}	3,90*

Legenda: ρ_{aparente} , densidade aparente; f_M , módulo de ruptura em flexão estática; E_M , módulo de elasticidade em flexão estática; f_{v0} , resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{c0} , resistência à compressão paralela às fibras; E_{c0} , módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras; f_{c90} , resistência à compressão normal às fibras; E_{c90} , módulo de elasticidade à compressão normal às fibras; f_{t0} , dureza Janka axial; f_{t90R} , dureza Janka radial; f_{t90T} , dureza Janka tangencial; f_{t0} , resistência à tração paralela às fibras; E_{t0} , módulo de elasticidade à tração paralela às fibras; f_{t90} , resistência à tração normal às fibras; médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; *significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F; ^{ns} não significativo.

Tabela 2. Propriedades mecânicas da madeira por tratamento.**Table 2.** Mechanical properties of wood by treatment.

T	E	CD	E _M (MPa)	f _{v0} (MPa)	f _{c0} (MPa)	E _{c0} (MPa)	f _{c90} (MPa)	f _{H0} (MPa)	f _{H90R} (MPa)	f _{H90T} (MPa)	f _{t90} (MPa)
1	Pp	A	5048a	7,41ab	28,07abc	8045ab	3,98a	1,68a	1,03a	1,07ab	2,65ab
2	Pp	B	7487bc	6,36a	30,98bcd	8360ab	5,37ab	1,75a	1,51ab	1,33abc	1,81a
3	Pp	C	6418abc	6,60a	34,09cd	10604b	4,50ab	2,24ab	1,11a	0,94a	1,71a
4	Pt	A	7685c	6,98ab	25,72ab	6426a	6,29bc	3,11c	1,76ab	1,79bcd	2,56ab
5	Pt	B	7074abc	8,46bc	35,29d	9373ab	7,37cd	2,88bc	2,27b	1,95cd	3,18b
6	Pt	C	5124ab	9,26c	24,46a	6797a	8,89d	2,87bc	3,18c	2,50d	2,72ab

Legenda: T: tratamento; Esp.: espécie; CD: Classe de DAP; Pp: *Pinus patula*; Pt: *Pinus taeda*; E_M, módulo de elasticidade em flexão estática; f_{v0}, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{c0}, resistência à compressão paralela às fibras; E_{c0}, módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras; f_{c90}, resistência à compressão normal às fibras; f_{H0}, dureza Janka axial; f_{H90R}, dureza Janka radial; f_{H90T}, dureza Janka tangencial; f_{t90}, resistência à tração normal às fibras; médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Verificou-se que a madeira de *Pinus patula* apresentou valores inferiores à madeira de *Pinus taeda* para densidade aparente e para a maioria das propriedades mecânicas avaliadas, sendo superiores os valores de resistência e de módulo de elasticidade em compressão axial e também de módulo de elasticidade em tração paralela.

De modo geral, se espera que madeiras de maior densidade tenham maior resistência e maior módulo de elasticidade que madeiras de menor densidade, no entanto, para as propriedades mecânicas, outros fatores podem interferir como, por exemplo, o ângulo das fibras em relação ao eixo longitudinal da peça e o grau de polimerização da celulose (MORESCHI, 2012). Dessa forma, esses outros fatores podem explicar os maiores valores dessas propriedades para *Pinus patula*, bem como o fato de que não houve diferença estatística entre a madeira das duas espécies para módulo de elasticidade em flexão estática e para resistência à tração paralela às fibras.

Dentre as três classes de DAP estudadas, se verificou uma tendência da classe entre 23,0 a 32,9 cm (classe de DAP médio) apresentar maior densidade, resistência e rigidez para as propriedades avaliadas. Os principais fatores que podem interferir na densidade, na resistência e na rigidez de madeiras de coníferas de mesma idade da árvore são a posição no fuste (longitudinal e radial), tamanho do anel de crescimento, percentual de lenho tardio e percentual de madeira juvenil/adulta (MATTOS et al., 2011; PALERMO et al., 2013; ROSA et al., 2013; TRIANOSKI et al., 2013). O fato das árvores de classe de DAP médio terem apresentado valores superiores se deve a um ou mais desses fatores citados.

A densidade aparente da madeira de *Pinus patula* (0,32 g.cm⁻³) foi inferior a encontrada por outros pesquisadores para povoamentos de maior idade, como de 0,460 a 0,467 g.cm⁻³ de densidade básica para árvores de 40 a 65 anos de ocorrência natural, no México (CUECUECHA et al., 2015; TÉLLES et al., 2011) e de 0,618 g.cm⁻³ para árvores de florestas plantadas com 25 anos de idade em Mérida, na Venezuela (ZAMBRANO et al., 2013).

Para a madeira de *Pinus taeda*, Morais et al. (2015) encontraram 0,519 g.cm⁻³ de densidade básica na idade de 25 anos e Trianoski et al. (2014) 0,527 g.cm⁻³ de densidade aparente aos 18 anos. A comparação com os valores obtidos nestes estudos confirma o efeito da idade no aumento da densidade da madeira.

As propriedades mecânicas médias das madeiras de *Pinus patula* e de *Pinus taeda*, também foram inferiores às encontradas em diversos trabalhos na literatura, sendo esse fato também atribuído à idade das árvores. Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de propriedades mecânicas para madeiras de ambas as espécies em diferentes idades. Verifica-se que a influência da idade é mais pronunciada na resistência do que na rigidez da madeira de ambas as espécies e que essa influência foi maior a partir dos 18/20 anos de idade.

Classificação da classe de resistência e de densidade

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios de densidade aparente e de módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras, bem como os valores característicos para resistência à compressão paralela e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, calculados conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Tabela 3. Valores médios de propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e de *Pinus patula* em diferentes idades.

Table 3. Mean values of mechanical parts of *Pinus taeda* and *Pinus patula* wood at different ages.

Fonte	Espécie	Idade (anos)	f_M (MPa)	E_M (MPa)	f_{v0} (MPa)	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
Este estudo	<i>P. patula</i>	12	45,3	6318	6,79	31,0	9003
Getahun et al., 2014	<i>P. patula</i>	28	83,8-109,3	5922-7193	-	40-65	-
Wessels et al., 2014	<i>P. patula</i>	16-20	29,5	5755	-	-	-
Este estudo	<i>P. taeda</i>	12	56,3	6628	8,23	28,5	7532
Trianoski et al., 2014	<i>P. taeda</i>	18	64,0	8234	10,5	37	12432
Santini et al., 2000	<i>P. taeda</i>	13	55,0	5841	9	29	8591

Legenda: f_M , módulo de ruptura em flexão estática; E_M , módulo de elasticidade em flexão estática; f_{v0} , resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{c0} , resistência à compressão paralela às fibras; E_{c0} , módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras.

Tabela 4. Valores médios de densidade aparente e de módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras, e valores característicos de resistência ao cisalhamento e de resistência à compressão paralela as fibras, da madeira das espécies estudadas.

Table 4. Mean values of apparent density and modulus of elasticity in compression parallel, and characteristic values of shear strength and of compression strength of the wood species studied.

Espécie	$\rho_{aparente}$ (g.cm ⁻³)	f_{c0k} (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	f_{vk} (MPa)
<i>Pinus patula</i>	0,32	24,1	9003	6,19
<i>Pinus taeda</i>	0,41	23,0	7532	6,93

Legenda: $\rho_{aparente}$, densidade aparente média; f_{c0k} , resistência característica à compressão paralela às fibras; $E_{c0,m}$, módulo de elasticidade médio na compressão paralela às fibras; f_{vk} , resistência característica ao cisalhamento paralelo às fibras.

A densidade aparente média da madeira das duas espécies não permite enquadrá-las em qualquer das classes apresentadas na norma NBR 7190 (ABNT, 1997), que exige mínimo de 0,50 g.cm⁻³. Por outro lado, a resistência característica à compressão paralela e o módulo de elasticidade médio em compressão paralela permitem enquadrá-las na classe C20. Quanto à resistência característica ao cisalhamento, ambas as espécies atendem o exigido para classe C30 da mesma norma.

Verificou-se que, embora procedente de árvores jovens e com densidade aparente inferior, a madeira de ambas as espécies apresentou resistência mecânica que permite classificá-la como madeira estrutural, segundo a norma ABNT. A revisão da Norma NBR 7190, que acabou não concluída, possuía alteração dos requisitos de classificação de madeiras de folhosas, com a inclusão de uma nova classe de madeira estrutural, mas não houve proposta de alteração para coníferas ABNT CB-02 (ABNT, 2011).

Bortoletto (2008) apresentou os valores observados para madeira de *Pinus merkusii* de árvores de 26 anos de idade que foram de 0,438 g.cm⁻³, 44 MPa, 12.872 MPa, 80 MPa, 11.638 MPa e 11 MPa para $f_{básica}$, f_{c0} , E_{c0} , f_{M} , E_M e f_{v0} , respectivamente. O autor considerou os valores compatíveis com diversas outras espécies de pinus de igual ou maior idade, o que corrobora essa necessidade.

Análise de correlação e de regressão

Na Tabela 5 são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre densidade aparente e as propriedades mecânicas para a madeira de ambas as espécies e para cada uma separadamente.

Na Tabela 6 são apresentadas as equações das propriedades mecânicas em função da densidade aparente para a madeira de ambas as espécies, obtidas por regressão linear.

Verificou-se correlação significativa entre a densidade aparente e quase todas as propriedades mecânicas para ambas as espécies, exceto para as variáveis obtidas nos ensaios de cisalhamento e tração paralela, devido à ruptura frágil que ocorre nestes dois ensaios.

Para *Pinus taeda*, foram significativas as correlações de densidade com as propriedades mecânicas de f_M , f_{c0} , f_{c90} , E_{c90} , dureza radial (f_{H90R}) e dureza tangencial (f_{H90T}). Para a madeira de *Pinus patula*, a correlação entre densidade e propriedades mecânicas foram para f_M , E_M , f_{c0} , E_{c0} , f_{c90} , f_{H90R} , f_{H90T} , f_{t0} e E_{t0} .

Dowse e Wessels (2013) obtiveram correlação significativa de 0,593 entre ρ e E_M e de 0,404 entre ρ e f_M para a madeira de *Pinus patula* com idade de 16 a 20 anos. Kamala et al. (2014) com madeira de *P. patula* de 30 anos de idade relataram correlação significativa e equivalente a obtida nesta pesquisa para $\rho_{aparente}$ e f_M (0,83) e para $\rho_{aparente}$ e E_M (0,85).

Com *Pinus taeda*, Trianoski et al. (2014) obtiveram correlações significativas e superiores a este trabalho entre a densidade aparente (TU=12%) e as propriedades mecânicas de f_M (0,89), E_M (0,88),

Tabela 5. Correlação de Pearson entre a densidade aparente e as propriedades mecânicas da madeira das espécies estudadas.

Table 5. Pearson correlation between the apparent density and the mechanical properties of the species studied wood.

Correlação		$\rho_{\text{aparente}} \times$ média ambas espécies	$\rho_{\text{aparente}} \times$ <i>Pinus taeda</i>	$\rho_{\text{aparente}} \times$ <i>Pinus patula</i>
Flexão estática	f_M (MPa)	0,845**	0,770**	0,834**
	E_M (MPa)	0,400*	0,409 ^{ns}	0,702**
Cisalhamento	f_{v0} (MPa)	0,055 ^{ns}	-0,045 ^{ns}	-0,309 ^{ns}
Compressão paralela às fibras	f_{c0} (MPa)	0,766**	0,851**	0,757**
	E_{c0} (MPa)	0,351*	0,318 ^{ns}	0,534*
Compressão normal às fibras	f_{c90} (MPa)	0,891**	0,636**	0,652**
	E_{c90} (MPa)	0,659**	0,817**	-0,365 ^{ns}
Dureza Janka	f_{H0} (MPa)	0,653**	-0,149 ^{ns}	-0,306 ^{ns}
	f_{H90R} (MPa)	0,859**	0,762**	0,514*
	f_{H90T} (MPa)	0,815**	0,515*	0,617**
Tração paralela às fibras	f_{t0} (MPa)	0,423*	0,372 ^{ns}	0,730**
	E_{t0} (MPa)	0,261 ^{ns}	-0,142 ^{ns}	0,873**

Legenda: ρ_{aparente} , densidade aparente; f_M , módulo de ruptura em flexão estática; E_M , módulo de elasticidade em flexão estática; f_{c0} , resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{v0} , resistência à compressão paralela às fibras; E_{c0} , módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras; f_{c90} , resistência à compressão normal às fibras; E_{c90} , módulo de elasticidade à compressão normal às fibras; f_{H0} , dureza Janka axial; f_{H90R} , dureza Janka radial; f_{H90T} , dureza Janka tangencial; f_{t0} , resistência à tração paralela às fibras; E_{t0} , módulo de elasticidade à tração paralela às fibras; ** significativo a 5% de probabilidade de erro; ^{ns} não significativo.

Tabela 6. Equações de regressão linear das propriedades mecânicas da madeira em função da densidade aparente para as espécies estudadas.

Table 6. Linear regression equations of the wood mechanical properties as a function of the apparent density for the species studied.

Propriedades	Equação	R ²	Syx %
Resistência à flexão estática (MPa)	$f_M = -3,186 + 135,196 * \rho_{\text{aparente}}$	0,706	10,54
Resistência a compressão paralela às fibras (MPa)	$f_{c0} = -4,917 + 92,634 * \rho_{\text{aparente}}$	0,574	11,54
Resistência à compressão normal às fibras (MPa)	$f_{c90} = -4,040 + 27,686 * \rho_{\text{aparente}}$	0,787	15,02
Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (MPa)	$E_{c0} = -156,745 + 1191,829 * \rho_{\text{aparente}}$	0,417	31,78
Dureza Janka Axial (MPa)	$f_{H0} = 0,967 + 4,321 * \rho_{\text{aparente}}$	0,410	21,68
Dureza Janka Radial (MPa)	$f_{H90R} = -0,564 + 7,054 * \rho_{\text{aparente}}$	0,731	24,29
Dureza Janka Tangencial (MPa)	$f_{H90T} = -0,195 + 5,320 * \rho_{\text{aparente}}$	0,654	24,83

Legenda: ρ_{aparente} , densidade aparente; f_M , módulo de ruptura em flexão estática; f_{c0} , resistência à compressão paralela às fibras; E_{c0} , módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras; f_{c90} , resistência à compressão normal às fibras; f_{H0} , dureza Janka axial; f_{H90R} , dureza Janka radial; f_{H90T} , dureza Janka tangencial.

f_{c0} (0,87), E_{c0} (0,81), f_{v0} (0,79) e dureza (0,93). Os altos valores dos coeficientes de correlação entre a densidade da madeira e suas propriedades mecânicas demonstram a estreita relação entre essas propriedades e também indicam que a densidade, por ser uma variável de fácil determinação, deve ser usada como parâmetro de estimativa da sua resistência e rigidez.

Nas equações obtidas por regressão linear, foi verificado melhor ajuste entre a densidade básica e as propriedades de resistência da madeira (f_M , f_{c0} e f_{c90}) do que com a sua rigidez (E_{c0}) e dureza. Sabe-se que a densidade da madeira tem estreita relação com sua dureza, no entanto esse ensaio é pontual enquanto a densidade foi determinada para todo o corpo de prova.

Análise Multivariada

Na Tabela 7 são apresentados os carregamentos e a variância explicada para cada um dos componentes principais extraídos pelo método de análise multivariada. Verifica-se que quatro componentes principais explicam 78% da variância total das 13 propriedades mecânicas analisadas.

No componente principal 1 observou-se os maiores carregamentos nas propriedades influenciadas pelas características da madeira no sentido perpendicular às fibras. Dessa forma, f_{H90R} , f_{H90T} , f_{c90} , E_{c90} e f_{v0} foram as propriedades que tiveram os maiores carregamentos nesse componente. No componente principal 2 aparecem a f_{c0} e E_{c0} e no componente principal 3 o f_M e o E_M em flexão estática. Por fim,

Tabela 7. Carregamentos estimados de cada variável selecionada em cada um dos componentes principais extraídos.
Table 7. Estimated loads of each selected variable on each of the extracted main components.

Ensaio	Propriedade	Componente			
		1	2	3	4
Flexão estática	f_M	0,511	0,018	0,774	0,069
	E_M	-0,009	0,093	0,973	0,011
Cisalhamento	f_{v0}	0,778	0,094	-0,098	0,088
Compressão paralela às fibras	f_{c0}	-0,147	0,863	0,068	0,125
	E_{c0}	-0,040	0,908	0,024	-0,180
Compressão normal às fibras	f_{c90}	0,918	-0,071	0,185	-0,032
	E_{c90}	0,836	-0,064	0,089	-0,129
Dureza Janka	f_{H0}	0,635	-0,279	0,222	-0,238
	f_{H90R}	0,905	-0,114	0,048	-0,020
	f_{H90T}	0,863	-0,274	0,116	-0,081
Tração paralela às fibras	f_{t0}	-0,058	0,064	0,025	0,903
	E_{t0}	-0,510	-0,058	0,221	0,713
Tração normal às fibras	f_{t90}	0,313	-0,350	-0,229	0,492
Variância		39,6	15,2	13,7	9,5
Variância acumulada		39,6	54,8	68,5	78,0

Legenda: f_M , módulo de ruptura em flexão estática; E_M , módulo de elasticidade em flexão estática; f_{v0} , resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{c0} , resistência à compressão paralela às fibras; E_{c0} , módulo de elasticidade em compressão paralela às fibras; f_{c90} , resistência à compressão normal às fibras; E_{c90} , módulo de elasticidade à compressão normal às fibras; f_{H0} , dureza Janka axial; f_{H90R} , dureza Janka radial; f_{H90T} , dureza Janka tangencial; f_{t0} , resistência à tração paralela às fibras; E_{t0} , módulo de elasticidade à tração paralela às fibras; f_{t90} , resistência à tração normal às fibras.

aparece no componente 4 a resistência e a rigidez em tração paralela. As propriedades de dureza axial e tração perpendicular não apresentaram carregamentos superiores a 0,700 em qualquer dos quatro primeiros componentes principais.

Para caracterização estrutural da madeira, a norma NBR 7190/1997 determina valores mínimos de resistência característica ao cisalhamento e à compressão paralela e de módulo de elasticidade médio em compressão paralela. A análise demonstra que os valores dessas três propriedades podem representar aproximadamente 55% de todas as propriedades mecânicas aqui avaliadas, porém, nesse estudo, o ensaio de compressão perpendicular às fibras representaria melhor o componente 1 do que o ensaio de cisalhamento.

A resistência e rigidez da madeira em flexão estática estão representadas no componente principal 3 e seus carregamentos explicam 13,7% da variância das propriedades avaliadas. Dessa forma, trata-se de uma propriedade importante, mas que está sendo omitida na classificação da madeira pela norma ABNT 7190/1997 (ABNT, 1997). Diversos autores reportaram o f_M e o E_M em flexão estática da madeira de diferentes espécies do gênero *Pinus* sp. e todos deram ênfase a essa propriedade (Ver Tabela 3).

Por fim, no componente 4, os maiores carregamentos foram nas propriedades de resistência e rigidez em tração paralela. Esse componente explicou 9,5% da variância total e, embora seja um percentual significativo, deve-se considerar a dificuldade em se usar o corpo-de-prova para esse ensaio e também a área da seção transversal submetida ao esforço, de 4 X 4 mm, e sua representatividade em relação ao lote de madeira avaliado.

CONCLUSÕES

A madeira de ambas as espécies obtida de árvores de 12 anos de idade apresentou baixa densidade aparente, que foi menor para *Pinus patula* em relação ao *Pinus taeda*. As propriedades mecânicas de ambas as espécies foram compatíveis com os referenciais da literatura e, comparados com esses, confirmaram o efeito da idade na resistência e na rigidez da madeira.

Houve correlação significativa entre a densidade aparente da madeira e a maior parte de suas propriedades mecânicas, o que sugere que esse parâmetro seja utilizado para estimativa de resistência e de rigidez. As propriedades físico-mecânicas características da madeira comparadas com a classificação da classe de resistência de coníferas da norma NBR 7190/1997 mostrou que, mesmo com baixa densidade, a madeira de ambas as espécies apresentou resistência e rigidez que permitiria sua classificação como madeira estrutural, demonstrando que os valores normativos não se aplicaram à madeira obtida de árvores jovens utilizadas nesse estudo.

A análise multivariada de extração de componentes principais demonstrou a importância das propriedades de flexão estática para a caracterização mecânica das madeiras utilizadas nesse estudo. Dessa forma, e tendo em vista a frequente citação dessas propriedades nos referenciais da literatura, sugere-se mais estudos com vista a inclusão das propriedades de flexão estática (f_M e E_M) como parâmetros de classificação de madeiras em classes de resistência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNICENTRO - Universidade Estadual do Centro-Oeste e a REMASA Reflorestadora S/A pelo suporte recebido para desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR CB-02 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

AGUIAR, A. V.; SOUZA, V. A.; SHIMIZU, J. Y. Espécies de pinus mais plantadas no Brasil. In: AGUIAR, A. V. **Cultivo de Pinus**. 2 ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 13 p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 143 – 94**: Standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia, 2000.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus merkusii*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 237-243, 2008.

CUECUECHA, O. G. V.; CAMPOS, E. M. Z.; GALLEGOS, E. G.; FLORES, J. A. R. Densidad básica de la madera de dos pinos y su relación con propiedades edáficas. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 21, n. 1, p. 129-138, 2015.

DAFF - DEPARTMENT OF AGRICULTURE, FORESTRY AND FISHERIES. **Report on commercial timber resources and primary roundwood processing in South Africa – 2011/2012**. Pretória: Forestry Economics Services, 2014. 115 p.

DOWSE, G. P.; WESSELS, C. B. The structural grading of young South African grown *Pinus patula* sawn timber. **Southern Forests**, Grahamstown, v. 75, n. 1, p.7- 17, 2013.

GETAHUN, Z.; PODDAR, P.; SAHU, O. The Influence of physical and mechanical properties on quality of wood produced from *Pinus patula* tree grown at Arsi forest. **Advanced Research Journal of Plant and Animal Sciences**, Nigeria, v. 2, n. 4, p. 32–41, 2014.

IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento, Londrina, PR. **Monitoramento agroclimático do Paraná**: Cartas Climáticas do Paraná. Curitiba: IAPAR, 2015.

KAMALA, F. D.; SAKAGAMI, H.; MATSUMURA, J. Mechanical properties of small Clear wood specimens of *Pinus patula* planted in Malawi. **Open Journal of Forestry**, v. 4, n. 1, p. 8-13, 2014.

MATTOS, B. D.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; MELO, R. R. DE; SANTINI, E. J. Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de gimnospermas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 1, p. 121-126, 2011.

MORAIS, W. W. C.; HASELEIN, C. R.; SUSIN, VIVIAN, M. A.; MORAIS, J. B. F. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados com *Bambusa tuldooides* e *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 4, p. 1015-1026, 2015.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. 4 ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.

OLIVEIRA, F. L.; LIMA I. L.; GARCIA J. N.; FLORSHEIM S. M. B.; Propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. **Revista do Instituto Florestal**, v. 18, n. 1, p. 59-70, 2006.

- OSPINA, C. M. P.; HERNÁNDEZ, R. J. R.; ANDREA, E. R.; SÁNCHEZ, F. A. O.; URREGO, J. B. M.; RODAS, C. A. P.; RAMÍREZ, C. A. C.; RIAÑO, N. M. H. **El Pino Pátula: *Pinus patula*** Schiede and Deppe in Schlecht. & Cham. Manizales: Editorial Blanecolor, 2011. 105 p.
- PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; SEVERO, E. T. D.; NASCIMENTO, A. M. DO; REZENDE, M. A. de. Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 191-200, 2013.
- REMASA REFLORESTADORA S.A. **Plano de Manejo Florestal**: Resumo Público. 7 eds. Bituruna: Grupo Remasa, 2016. 26 p.
- ROSA, T. S.; HILLIG, É.; VIANA, L. C. Propriedades físicas da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze e sua relação com os anéis de crescimento. **Revista Ciência da Madeira**, v. 4, n. 1, p. 10-12, 2013.
- SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p.85-93, 2000.
- TÉLLES, J. R. G.; MARTÍNEZ, A. V.; ROSA, A. B. D. L.; GRANDE, J. C.; MENDOZA, C. P. Variación radial de la densidad básica en *Pinus patula* Schltdl. et Cham. de três localidades en Hidalgo. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, Cidade do México, v. 2, n. 7, p. 71-78, 2011.
- TRIANOSKI, R.; MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S. PRATA, J. G. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de pinus tropicais. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 21-28, 2014.
- TRIANOSKI, R., MATOS, J. L. M., IWAKIRI, S., PRATA, J. G. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de espécies de Pinus tropicais. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 503-510, 2013.
- WESSELS, C. B.; MALAN, F. S.; NEL, D. G.; RYPSTRA, T. Variation in strength, stiffness and related wood properties in young South African-grown *Pinus patula*. **Southern Forests**, Grahamstown, v. 76, n. 1, p. 37-46, 2014.
- WESTROCK. **Resumo Público do Plano de Manejo**. Três Barras: Divisão Florestal WestRock, 2017. 32 p.
- ZAMBRANO, L.; FMENO, P.; MUÑOZ, F.; DURÁN, J.; GARAY, D.; VALERO, S. Tableros de partículas fabricados com resíduos industriais de madeira de *Pinus patula*. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 19, n. 3, p. 65-80, 2013.

Recebido em: 07/05/2018
Aceito em: 13/11/2018