

## Avaliação do potencial da madeira de *Pinus greggii* para produção de polpa celulósica

*Evaluation of the potential of Pinus greggii wood for pulp production*

Magnos Alan Vivian<sup>1\*</sup> (ORCID 0000-0001-7793-8425), Alexandre Saturnino Cardoso<sup>1</sup> (ORCID 0000-0002-6390-2269), Karina Soares Modes<sup>1</sup> (ORCID 0000-0002-2249-2873), Francides Gomes da Silva Júnior<sup>2</sup> (ORCID 0000-0002-9142-7442)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, SC, Brasil. \*Autor para correspondência: magnos.alan@ufsc.br

<sup>2</sup>Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.

Submissão: 14/07/2021 | Aceite: 05/11/2021

### RESUMO

O segmento de produção de papel de fibra longa no Brasil está concentrado na utilização de duas espécies do gênero *Pinus* (*P. taeda* e *P. elliottii*). Assim, é fundamental avaliar novas espécies, visando ampliar as alternativas para esse segmento. O presente estudo teve como objetivo avaliar as propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Pinus greggii* visando a produção de polpa celulósica. Foram utilizadas três árvores, com sete anos de idade, das quais foram retirados discos ao longo do fuste. Estes foram utilizados para avaliar as propriedades físicas (densidade básica média e ponderada), químicas (teores de cinza, extrativos, lignina e holocelulose) e anatômicas (dimensões dos traqueídeos e indicadores anatômicos). De acordo com a caracterização física da madeira, obteve-se um valor médio de densidade básica de 0,346 g.cm<sup>-3</sup> e ponderado de 0,343 g.cm<sup>-3</sup>, o que permite classificá-la como leve ou de baixa densidade. Em relação à composição química, a espécie apresentou elevados teores de lignina e extrativos (34,83% e 6,25%, respectivamente) e baixos teores de holocelulose (58,92%) e cinza (0,20%). Para as dimensões dos traqueídeos obtiveram-se valores médios de 2,31 mm de comprimento, 41,30 µm de largura, 34,81 µm de diâmetro do lúmen, e 3,25 µm de espessura da parede celular. Quanto aos resultados dos índices de qualidade, a espécie obteve destaque para a fração parede (15,96%), coeficiente de flexibilidade (84,31%), índice de Runkel (0,19) e índice de enfeltramento (55,15). De modo geral, a madeira de *P. greggii* apresenta potencial para produção de polpa celulósica, destacando-se pelos indicadores anatômicos e pelas dimensões dos traqueídeos, que são semelhantes aos valores encontrados para *P. taeda* na mesma idade. Entretanto, possui elevados teores de lignina e extrativos, que podem aumentar o consumo de reagentes e diminuir o rendimento do processo de polpação, o que precisa ser comprovado em estudos com esta temática.

**PALAVRAS-CHAVE:** caracterização física; indicadores de qualidade; composição química; celulose de fibra longa.

### ABSTRACT

The long fiber paper production segment in Brazil is restrict on the use of only two species of the *Pinus* genus (*P. taeda* and *P. elliottii*), therefore, it is essential to evaluate new species, aiming to expand the alternatives for this segment. In this sense, the present study aimed to evaluate the physical, chemical and anatomical properties of *Pinus greggii* wood aiming at the pulp production. For this, three 7-year-old trees were used, from which disks were removed along the stem. These were used to evaluate physical (average and weighted basic density), chemical (ash, extractive, lignin and holocellulose) and anatomical (tracheid dimensions and anatomical indicators) properties. According to the physical characterization, an average value of basic density of 0.346 g.cm<sup>-3</sup> and weighted of 0.343 g.cm<sup>-3</sup> was obtained, which allows classifying it as light or low density. Regarding the chemical composition, the species showed high levels of lignin and extractives (34.83% and 6.25%, respectively) and low levels of holocellulose (58.92%) and ash (0.20%). For the tracheids dimensions, mean values of 2.31 mm in length, 41.30 µm in width, 34.81 µm in lumen diameter, and 3.25 µm in cell wall thickness were obtained. As for the results of the quality index, the species stood out for the wall fraction (15.96%), flexibility coefficient (84.31%), Runkel index (0.19) and felting index (55.15). In general, the *P. greggii* wood presents potential for the pulp production, standing out for its anatomical indicators and for the tracheids dimensions, which are similar to the values found for *P. taeda* at the same age. However, it has high levels of lignin and extractives, which can increase the consumption of reagents and decrease the yield of the pulping process, which needs to be

proven in studies on this topic.

**KEYWORDS:** physical characterization; quality indicators; chemical composition; long fiber cellulose.

## INTRODUÇÃO

Nos anos de 1950 a 1960, conforme SHIMIZU (2008), era discutido e adotado um modelo de desenvolvimento econômico para o Brasil, no qual, o seu principal objetivo foi substituir as importações brasileiras pela produção nacional. A partir disso, ocorreu o estabelecimento de incentivos fiscais, como o Fundo de Investimento Setorial (FISSET), que durou entre os anos de 1967 e 1989, promovendo o fortalecimento dos segmentos industriais mais importantes do país.

Os incentivos proporcionados pelo governo favoreceram o crescimento das indústrias florestais brasileiras, impulsionando a implantação dos plantios comerciais, sobretudo das espécies exóticas, fator que contribuiu para o aumento abrupto na oferta de madeira (SHIMIZU 2008).

O plantio em escala comercial de espécies do gênero *Pinus* no Brasil iniciou na década de 1960, principalmente nas regiões Sudeste e Sul do país, entretanto, poucas espécies foram exploradas economicamente (AGUIAR et al. 2011). Entre as espécies implantadas para experimentação, destacaram-se o *Pinus taeda* e o *Pinus elliottii*, sendo essas as mais difundidas no país (VASQUES et al. 2007). Até hoje estas duas espécies de *Pinus* são as que mais se evidenciam no Brasil, sendo destinadas para diversos segmentos, como serrarias, laminadoras, fábricas de painéis reconstituídos e de papel. No ramo papeleiro se destacam no segmento de “fibra longa” devido ao comprimento de seus traqueídeos, que medem entre 3 e 6 mm de comprimento, proporcionando papéis de maior resistência físico-mecânica (BASSA 2006).

Em 2019, o Brasil se consolidou como o segundo maior produtor mundial de celulose, com cerca de 19,7 milhões de toneladas, e o décimo na produção de papel, com 10,5 milhões de toneladas (IBÁ 2020). A área total de árvores plantadas totalizou 9,0 milhões de hectares no mesmo período, com o *Pinus* correspondendo a 1,6 milhão de hectares, se concentrando e mantendo-se estável principalmente nos três estados do Sul do país (IBÁ 2020).

Como o setor de celulose de “fibra longa” está concentrado no uso de apenas duas espécies de *Pinus*, especialmente o *P. taeda*, torna-se importante o estudo de novas espécies do gênero que apresentam crescimento rápido e adaptabilidade aos solos e clima brasileiros, tendo em vista a grande demanda do setor por madeira. Além disso, é preocupante ter toda a cadeia produtiva baseada em poucas espécies, pois o fornecimento de matéria-prima pode ser comprometido com o surgimento de pragas e/ou doenças que ataquem especificamente tais espécies. Nesse sentido surge com potencial o *Pinus greggii*, espécie endêmica do México, e que apresenta boa adaptação ao Sul do país (SHIMIZU 2008).

O principal objetivo da caracterização tecnológica da madeira é a avaliação das suas propriedades, sejam elas físicas, químicas, anatômicas ou mecânicas, pois, conhecendo tais características, será possível definir sobre suas principais aptidões de uso. Segundo ROSA (2003) para a indústria de papel e celulose, as principais propriedades de interesse da madeira são: densidade básica (propriedade física); dimensões dos traqueídeos ou fibras (propriedades anatômicas); e os teores de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos (propriedades químicas).

Na literatura, é possível encontrar muitas citações do potencial de uso do *P. greggii* para a produção de polpa e papel (BORSATO 2000, MUNHOZ et al. 2021). Porém, há poucas pesquisas que comprovem a qualidade da madeira cultivada no Brasil para a produção papeleira, sabendo que as características da mesma são influenciadas por vários aspectos, como solo, clima, idade, manejo, etc. Desta forma, o objetivo do presente estudo é avaliar as características físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Pinus greggii* Engelm. para produção de polpa celulósica.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Obtenção do material

Para condução do estudo utilizou-se a madeira de *Pinus greggii*, com sete anos de idade, proveniente de um plantio experimental realizado na Área Experimental Florestal (AEF) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), localizada em Curitiba (SC), nas coordenadas 27°18'29.5"S e 50°42'40.9"O. A área está em uma altitude de 835 metros, e de acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é Cfb - subtropical úmido com verões amenos (EMBRAPA 2012).

O plantio experimental de *P. greggii* foi implantado no ano de 2012, em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), em uma área de 0,2 ha, com espaçamento de 2,5 x 2,5 m, sendo realizada uma poda aos cinco anos de idade, até três metros de altura. Em 2018 (quando o plantio

tinha seis anos) foi realizado um desbaste seletivo, retirando 50% dos indivíduos. Além disso, ao longo dos anos foram conduzidas roçadas periódicas para controle da matocompetição, para possibilitar o desenvolvimento inicial das plantas.

Foram selecionadas três árvores com bom estado fitossanitário e diâmetros semelhantes, evitando aquelas plantadas nas bordas do talhão, que foram derrubadas com auxílio de uma motosserra. As árvores coletadas apresentavam em média as seguintes dimensões: 19,1 cm de diâmetro à altura do peito (DAP = 1,30 m), 13,5 m de altura total, e 9,2 m de altura comercial, esta última considerada até a posição do fuste com diâmetro de 8 cm.

Posteriormente foram extraídos pares de discos, de 3 cm de espessura, nas seguintes posições: 0 (base), DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial. Após a coleta, o material foi transportado para o Laboratório de Recursos Florestais, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Curitiba, para condução da caracterização tecnológica da madeira.

#### Característica física - densidade básica

Com os discos coletados confeccionaram-se duas cunhas diametralmente opostas, que foram mantidas submersas em água até completa saturação. Após esse procedimento, determinou-se o volume saturado das cunhas (cm<sup>3</sup>) seguindo as recomendações da norma NBR 11.941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 2003).

Para obtenção do peso seco das cunhas, essas foram submetidas à secagem a temperatura de 103 ± 2 °C, em estufa com circulação forçada de ar até alcançar massa constante, absolutamente seca. Após isso, foi mensurada a massa seca (g) de cada cunha para cálculo das respectivas densidades básicas (Equação 1).

$$Db = \frac{Ms}{Vs} \quad (1)$$

Em que: Db = densidade básica (g.cm<sup>-3</sup>); Ms = massa seca (g); Vs = volume saturado (cm<sup>3</sup>).

Após a obtenção dos valores da densidade básica de cada uma das duas cunhas extraídas, fez-se a média dos valores registrados para determinação da densidade por disco (posição de amostragem) para determinação da variação dessa propriedade ao longo do fuste das árvores. A partir disso, foi possível calcular a densidade básica ponderada, em função dos valores de densidade básica e do diâmetro dos discos em cada posição. A densidade básica ponderada foi determinada com auxílio da Equação 2, conforme apresentada por VIVIAN et al. (2021).

$$Dbp = \frac{1}{2} \frac{(D_B^2 + D_{DAP}^2) * (d_B + d_{DAP}) * \dots * (D_{75\%}^2 + D_{100\%}^2) + (d_{75\%} + d_{100\%})}{D_B^2 + D_{100\%}^2 + 2 * (D_{DAP}^2 + D_{25\%}^2 + D_{50\%}^2 + D_{75\%}^2)} \quad (2)$$

Em que: Dbp = densidade básica ponderada (g.cm<sup>-3</sup>); D<sub>B</sub>, D<sub>DAP</sub>, D<sub>25%</sub>, D<sub>50%</sub>, D<sub>75%</sub> e D<sub>100%</sub> = diâmetros dos discos nas posições de amostragem (cm); d<sub>B</sub>, d<sub>DAP</sub>, d<sub>25%</sub>, d<sub>50%</sub>, d<sub>75%</sub> e d<sub>100%</sub> = densidade básica dos discos em diferentes alturas (g.cm<sup>-3</sup>).

#### Características químicas - composição

Para determinação da composição química foram utilizados apenas os discos retirados do DAP, que foram transformados em pequenos cavacos, moídos (moinho do tipo Willey) e classificados em peneiras, selecionando-se as frações de serragem retidas entre 40 e 60 *mesh*.

As análises químicas foram realizadas pelo Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE), da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP), localizado em Piracicaba (SP). Determinaram-se os seguintes parâmetros, em triplicata: cinza (TAPPI T 211 om-02), extrativos totais (TAPPI T 204 cm-17) e lignina (residual, solúvel e total, de acordo com os procedimentos adaptados pelo LQCE/ESALQ/USP) (VIVIAN 2015). A holocelulose (celulose + hemicelulose) foi obtida por diferença, de acordo com a Equação 3.

$$HC = 100 - (TE + TL) \quad (3)$$

Em que: HC = teor de holocelulose (%); TE = teor de extrativos totais (%); TL = teor de lignina (%).

#### Características anatômicas – morfologia dos traqueídeos e indicadores anatômicos

Para a análise das propriedades anatômicas, foram utilizados os discos retirados da base, sendo esses previamente lixados, visando evidenciar mais claramente os anéis de crescimento. Após a delimitação dos anéis, foram confeccionadas baquetas de 2 cm de largura, com orientação radial (medula-casca). A partir das baquetas, marcaram-se três posições: 0, 50, e 100% da distância radial (sendo 0%

próximo a medula, e 100% próximo a casca), das quais confeccionaram-se blocos, que foram transformados em pequenos fragmentos (palitos).

Os fragmentos foram macerados em tubos de ensaio contendo ácido acético, ácido nítrico e água, na proporção 5:2:1, em banho-maria com temperatura de aproximadamente 100 °C, por um período de uma hora. Após a individualização dos elementos celulares, as amostras foram lavadas e mantidas em tubos de ensaio com água destilada.

A partir do material macerado, foram montadas lâminas temporárias, adicionando uma gota de safranina, uma gota de glicerina e uma gota de água, visando a obtenção de imagens dos traqueídeos, em resolução apropriada, com auxílio de microscópio e lupa, com câmera digital acoplada, e software específico para aquisição de imagens em computador. Utilizou-se o aumento de 6,3x (na lupa) para obtenção das imagens de comprimento, e o aumento de 400x (no microscópio) para obtenção das imagens de largura e diâmetro do lúmen.

Com software específico foram mensuradas as dimensões dos traqueídeos, sendo 35 repetições para cada posição, totalizando 315 medições (3 árvores x 3 posições x 35 repetições). As características mensuradas foram: comprimento (C), largura (L) e diâmetro do lúmen (DL). A partir destes foram estimados os demais parâmetros e indicadores, conforme as equações a seguir (4 a 8).

$$E = \left(\frac{L-DL}{2}\right) \quad (4) \quad FP = \left(\frac{2E}{L}\right) \cdot 100 \quad (5) \quad CF = \left(\frac{DL}{L}\right) \cdot 100 \quad (6) \quad IE = \left(\frac{C}{L}\right) \quad (7) \quad IR = \left(\frac{2E}{DL}\right) \quad (8)$$

Em que: E = espessura da parede celular ( $\mu\text{m}$ ); L = largura do traqueídeo ( $\mu\text{m}$ ); DL = diâmetro do lúmen ( $\mu\text{m}$ ); FP = fração parede (%); CF = coeficiente de flexibilidade (%); IE = índice de enfeltramento; C = comprimento do traqueídeo (mm); IR = índice de Runkel.

#### Análise dos dados

Os dados obtidos no presente estudo foram armazenados e analisados com o auxílio de planilhas eletrônicas e software estatístico. Para a composição química realizou-se somente a análise estatística descritiva. Já para densidade básica e morfologia dos traqueídeos aplicou-se a análise de variância (ANOVA) e quando observada significância aplicou-se o teste de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade, para os valores no sentido base-topo (densidade) e no sentido medula-casca (morfologia) da madeira.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Característica física - densidade básica

Na Figura 1 pode ser observada a variação da densidade básica da madeira de *P. greggii* no sentido longitudinal (base-topo) do fuste, bem como o valor médio (Db) e ponderado (Dp), este último em função dos diâmetros dos discos.

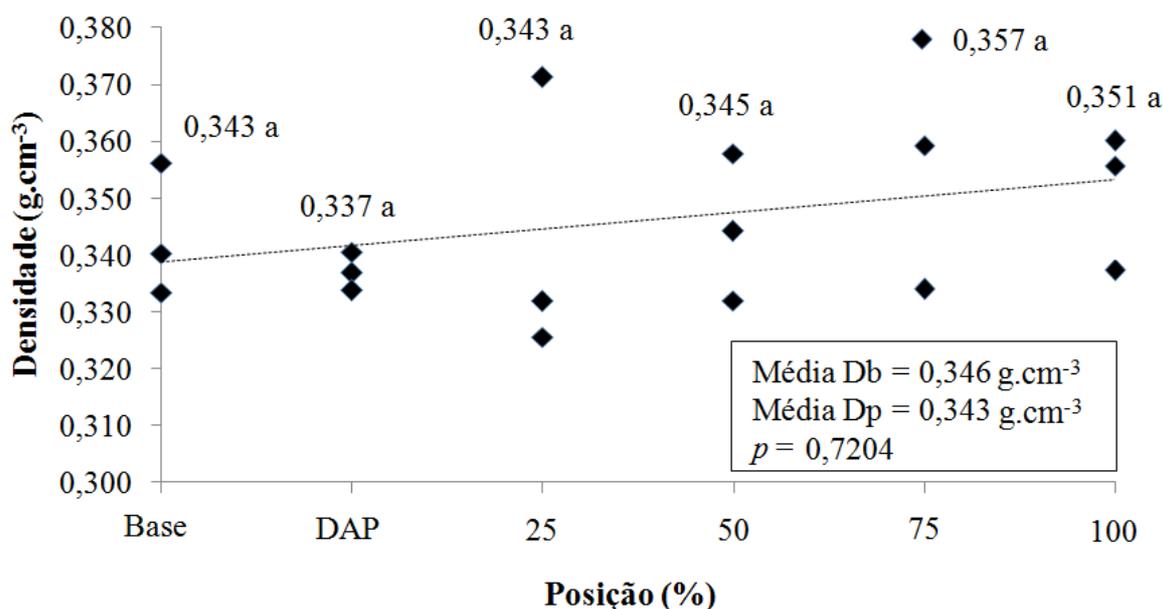


Figura 1. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de *P. greggii*.

Figure 1. Longitudinal variation of the basic density of *P. greggii* wood.

A densidade básica média para a madeira de *P. greggii* foi de 0,346 g.cm<sup>-3</sup>, já a densidade ponderada média foi de 0,343 g.cm<sup>-3</sup>. Não houve diferença estatística entre as médias de densidade nas diferentes posições longitudinais do fuste das árvores ( $p > 0,05$ ).

Conforme é possível observar na Figura 1, mesmo não tendo sido registrada diferença estatística significativa, a densidade básica tende a aumentar no sentido base-topo, esse comportamento é contrário ao observado para coníferas, isso pode ser explicado pela característica da espécie de formar muitos ramos. De acordo com PALERMO et al. (2003), o aumento da densidade ao longo do fuste pode estar relacionado com a disposição da copa, por causa das alterações na estrutura anatômica que ocorrem na região de inserção dos ramos, além disso, outros fatores podem influenciar, como a formação de lenho de reação e a ação do vento.

Na Tabela 1 pode ser observada a comparação da densidade básica da madeira de *P. greggii* com a espécie *P. taeda*, tradicionalmente utilizada para a produção de polpa celulósica de fibra longa.

Tabela 1. Comparação da densidade básica da madeira entre diferentes espécies e idades.

Table 1. Comparison of basic density wood between different species and ages.

Espécie	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Idade
<i>P. greggii</i> <sup>1</sup>	0,343	7
<i>P. greggii</i> <sup>2</sup>	0,350	13
<i>P. taeda</i> <sup>3</sup>	0,362	8
<i>P. taeda</i> <sup>4</sup>	0,332	9
<i>P. taeda</i> <sup>5</sup>	0,347	10

Fonte: <sup>1</sup>Presente estudo; <sup>2</sup>SIMÃO (2011); <sup>3</sup>ANDRADE (2006); <sup>4</sup>BASSA (2006); <sup>5</sup>BITTENCOURT (2004).

A densidade básica da madeira de *P. greggii* com sete anos de idade (0,343 g.cm<sup>-3</sup>) foi semelhante ao encontrado por SIMÃO (2011), que avaliando um povoamento de *P. greggii* com 13 anos no município de Correia Pinto (SC), obteve valor de 0,350 g.cm<sup>-3</sup>. ANDRADE (2006) e BASSA (2006) encontraram valores médios para a madeira de *P. taeda* de 0,362 e 0,332 g.cm<sup>-3</sup> para árvores com oito e nove anos de idade, respectivamente, na região de Telêmaco Borba (PR). BITTENCOURT (2004) obteve para a madeira de *P. taeda* um valor de densidade de 0,347 g.cm<sup>-3</sup> para árvores com 10 anos de idade, na região de Otacílio Costa (SC), próximo da cidade de Curitiba (SC).

Vale destacar que a madeira de *P. greggii* avaliada, com sete anos, era composta basicamente de madeira juvenil, o que foi comprovado neste trabalho no item "características anatômicas". Não existem estudos mencionando a idade de transição entre madeira juvenil/adulta para o *P. greggii*, mas para o *P. taeda*, esta transição ocorre entre 11 e 17 anos de idade (TASSISSA et al. 1998, HENNESSEY et al. 2004, DOBNER JR. et al. 2018).

Na literatura vários autores relatam que a madeira juvenil corresponde aos primeiros anéis de crescimento ou os mais próximos da medula, tendo como característica densidade abaixo de 0,400 g.cm<sup>-3</sup> e traqueídeos mais curtos (KLOCK 2000). A densidade encontrada para o *P. greggii* é considerada baixa, entretanto está dentro da faixa esperada para o gênero nessa idade, devido à madeira juvenil apresentar maior quantidade de lenho inicial e menor quantidade de lenho tardio comparado com a madeira adulta. Segundo ANDRADE (2006) o lenho tardio é composto por traqueídeos com maior espessura de parede, sendo mais denso do que o lenho inicial. Por essa razão, CHIES (2005), BITTENCOURT (2004), e vários autores mencionam que a densidade básica tende a aumentar com a idade.

De acordo com BASSA (2006), a densidade para a madeira de *Pinus*, dependendo da idade, varia de 0,300 a 0,400 g.cm<sup>-3</sup>, sendo que árvores com idade entre oito e 14 anos são destinadas para a produção de papel e celulose, já a madeira de árvores a partir de 20 anos é utilizada para serraria e laminação.

#### Características químicas - composição

Na Figura 2 pode ser observada a composição química da madeira de *P. greggii* aos sete anos de idade. Os valores em parênteses dizem respeito ao desvio padrão dos dados.

Os valores observados para lignina e extrativos estão acima dos citados na literatura (Tabela 2) e conseqüentemente influenciam negativamente no teor de holocelulose. A madeira juvenil apresenta maior quantidade de lenho inicial e de acordo com HASSEGAWA (2003) possui maior quantidade de extrativos e lignina comparada com a madeira de lenho tardio. Na Tabela 2 observa-se a comparação da composição química da madeira de *P. greggii* com a madeira de *P. taeda*.

De acordo com FENGEL & WEGENER (1984), o teor de cinza na madeira de coníferas varia entre 0,10 a 1%, já o valor para os extrativos varia entre 2 a 10%. O resultado encontrado para a madeira de *P.*

*greggii* (0,20%) está dentro do intervalo esperado para o gênero, sendo semelhante aos valores médios de 0,28 e 0,22% obtidos por ANDRADE (2006) e KLOCK (2000), respectivamente, para a madeira de *P. taeda*.

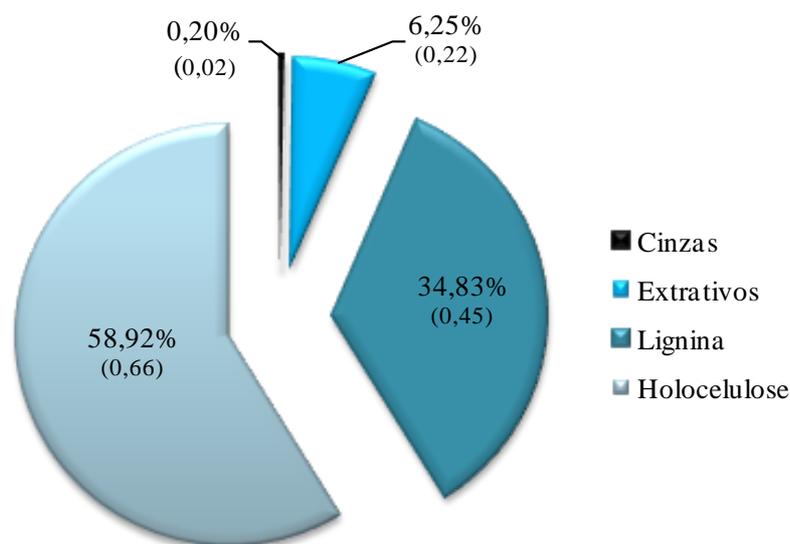


Figura 2. Composição química da madeira de *P. greggii*.

Figure 2. Chemical composition of *P. greggii* wood.

Tabela 2. Comparação da composição química da madeira entre diferentes espécies e idades.

Table 2. Comparison of the chemical composition of wood between different species and ages.

Espécie	Idade	Cinza (%)	Extrativos (%)	Lignina (%)	Holocelulose (%)
<i>P. greggii</i> <sup>1</sup>	7	0,20	6,25	34,83	58,92
<i>P. taeda</i> <sup>2</sup>	8	0,28	2,15	28,87	70,70
<i>P. taeda</i> <sup>3</sup>	9	-	2,37	31,18	66,44
<i>P. taeda</i> <sup>4</sup>	9	-	4,50	29,74	70,26
<i>P. taeda</i> <sup>5</sup>	11	0,22	3,03	28,76	68,00

Fonte: <sup>1</sup>Presente estudo; <sup>2</sup>ANDRADE (2006); <sup>3</sup>BASSA (2006); <sup>4</sup>VASCONCELOS (2005); <sup>5</sup>KLOCK (2000).

Os teores de extrativos e lignina observados para a madeira de *P. greggii* foram superiores aos valores obtidos por VASCONCELOS (2005), KLOCK (2000), BASSA (2006) e ANDRADE (2006) para a madeira de *P. taeda*. Segundo LOPES (2008), as variações edafoclimáticas, idade da árvore, fertilização, estação do ano, entre outros, podem alterar a quantidade e qualidade de extrativos presentes na madeira. De acordo com VIVIAN et al. (2015), altos teores de extrativos e lignina são considerados indesejáveis no processo de polpação, porque podem provocar incrustações (*pitch*) nos equipamentos industriais, aumentando o custo de manutenção e o consumo de reagentes químicos.

A holocelulose encontrada para o *P. greggii* pode ser considerada baixa, comparando com os valores citados para o *P. taeda* na literatura (Tabela 2), isso ocorre devido aos altos teores de extrativos e lignina presente na madeira. De acordo com ANDRADE (2006), esse comportamento ocorre pelo fato dos materiais com idades superiores possuírem melhores características químicas, isto é, o material com menor idade geralmente apresenta menor conteúdo de holocelulose e maior teor de lignina.

#### Características anatômicas – morfologia dos traqueídeos e indicadores anatômicos

Na Figura 3 pode ser observada a variação das dimensões dos traqueídeos da madeira de *P. greggii* no sentido radial (medula-casca), sendo 0% próximo a medula, e 100% próximo a casca.

As dimensões médias dos traqueídeos da madeira de *P. greggii*, com sete anos de idade, foram: 2,31 mm de comprimento, 41,30 µm de largura, 34,81 µm de diâmetro do lúmen, e 3,25 µm de espessura da parede celular. De acordo com o teste de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade, as dimensões diferiram estatisticamente entre as posições radiais, com exceção do diâmetro do lúmen.

Todas as dimensões avaliadas tiveram um comportamento crescente no sentido medula-casca, tendência que segundo HASSEGAWA (2003), é explicada pela atividade e maturação cambial, sendo acelerado durante a formação da madeira juvenil (com aumento das dimensões dos traqueídeos), tendendo

a estabilizar durante a formação da madeira adulta (estabilização das dimensões dos traqueídeos), com a maturação cambial. Como é possível observar, as dimensões estão com tendência de aumento, sem indicativo de estabilização, o que comprova que é formada apenas por madeira juvenil.

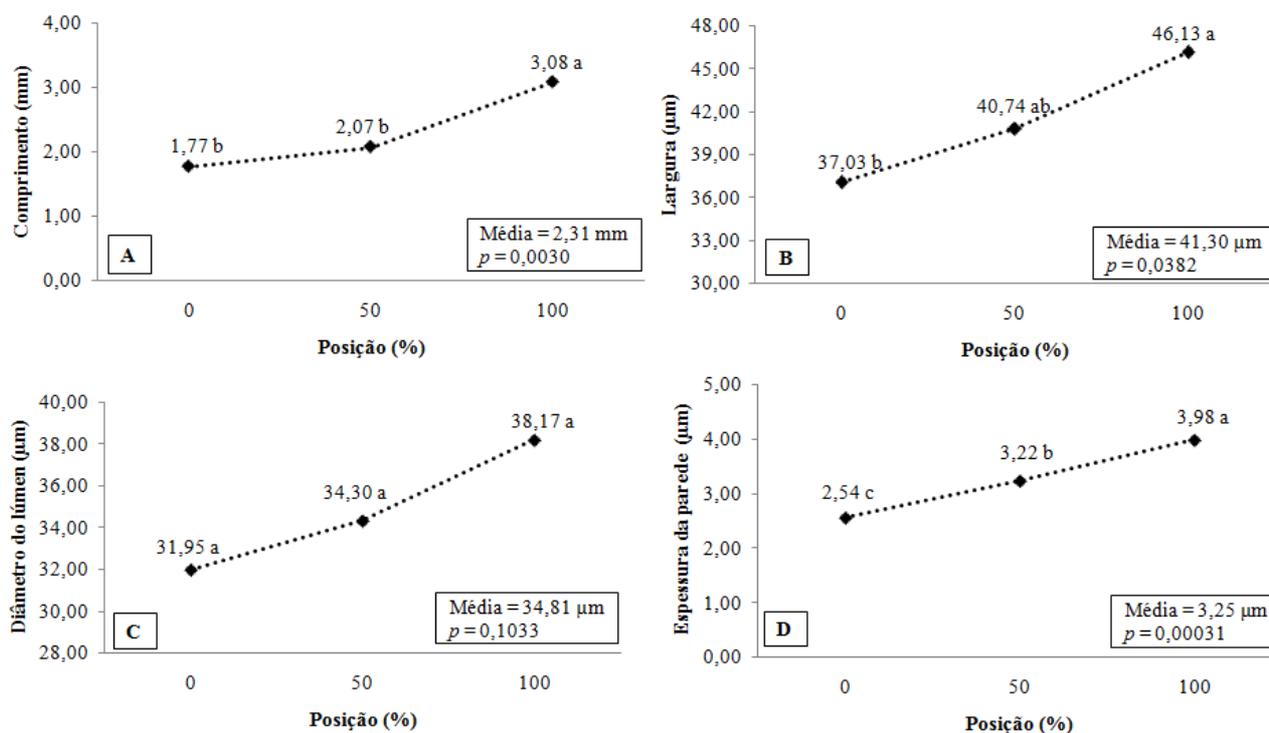


Figura 3. Variação das dimensões dos traqueídeos da madeira de *P. greggii*. (A) comprimento; (B) largura; (C) diâmetro do lúmen; (D) espessura da parede.

Figure 3. Variation in the tracheids dimensions of the *P. greggii* wood. (A) length; (B) width; (C) lumen diameter; (D) wall thickness.

Na Tabela 3 pode ser observada a comparação das dimensões dos traqueídeos da madeira de *P. greggii* com a madeira de *P. taeda*.

Tabela 3. Comparação das dimensões dos traqueídeos da madeira entre diferentes espécies e idades.

Table 3. Comparison of the tracheids dimensions of wood between different species and ages.

Espécie	Idade	Comprimento (mm)	Largura (µm)	Diâmetro do lúmen (µm)	Espessura da parede (µm)
<i>P. greggii</i> <sup>1</sup>	7	2,31	41,30	34,81	3,25
<i>P. greggii</i> <sup>2</sup>	13	2,91	57,00	30,00	6,60
<i>P. taeda</i> <sup>3</sup>	8	2,22	38,51	-	-
<i>P. taeda</i> <sup>4</sup>	10	3,14	39,27	26,38	6,45

Fonte: <sup>1</sup>Presente estudo; <sup>2</sup>SIMÃO (2011); <sup>3</sup>ANDRADE (2006); <sup>4</sup>NISGOSKI (2005).

SIMÃO (2011) obteve para as dimensões dos traqueídeos da madeira de *P. greggii* com 13 anos, valores superiores, com exceção do diâmetro de lúmen, aos encontrados no presente estudo, o que pode ser atribuído à diferença de idade. ANDRADE (2006) obteve para a madeira de *P. taeda* com oito anos, valores inferiores aos registrados para a madeira de *P. greggii*. Já NISGOSKI (2005) observou para a madeira de *P. taeda* com 10 anos de idade no município de Três Barras (SC), valores superiores para o comprimento e espessura da parede dos traqueídeos em relação à madeira de *P. greggii*, porém inferiores em largura e diâmetro de lúmen.

Na Figura 4 pode ser observada a variação dos parâmetros indicadores da qualidade da madeira de *P. greggii* no sentido radial (medula-casca, sendo 0% próximo a medula, e 100% próximo a casca). De acordo com o teste de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade, as médias dos indicadores diferiram estatisticamente nas diferentes posições avaliadas. Conforme se pode observar na Figura 4, a fração parede, o índice de Runkel, e o índice de enfiamento, aumentam no sentido medula-casca, já o coeficiente de flexibilidade reduz no sentido radial. A explicação da variação entre as posições radiais

avaliadas, sem tendência ou sinal de estabilização, é o fato das árvores utilizadas terem apenas sete anos, estando no seu ápice de crescimento. Como já mencionado anteriormente, nesta idade tem-se apenas madeira juvenil, e a transição para madeira adulta, que conseqüentemente levaria a tendência de estabilização, ocorre acima de 10 anos ou mais.

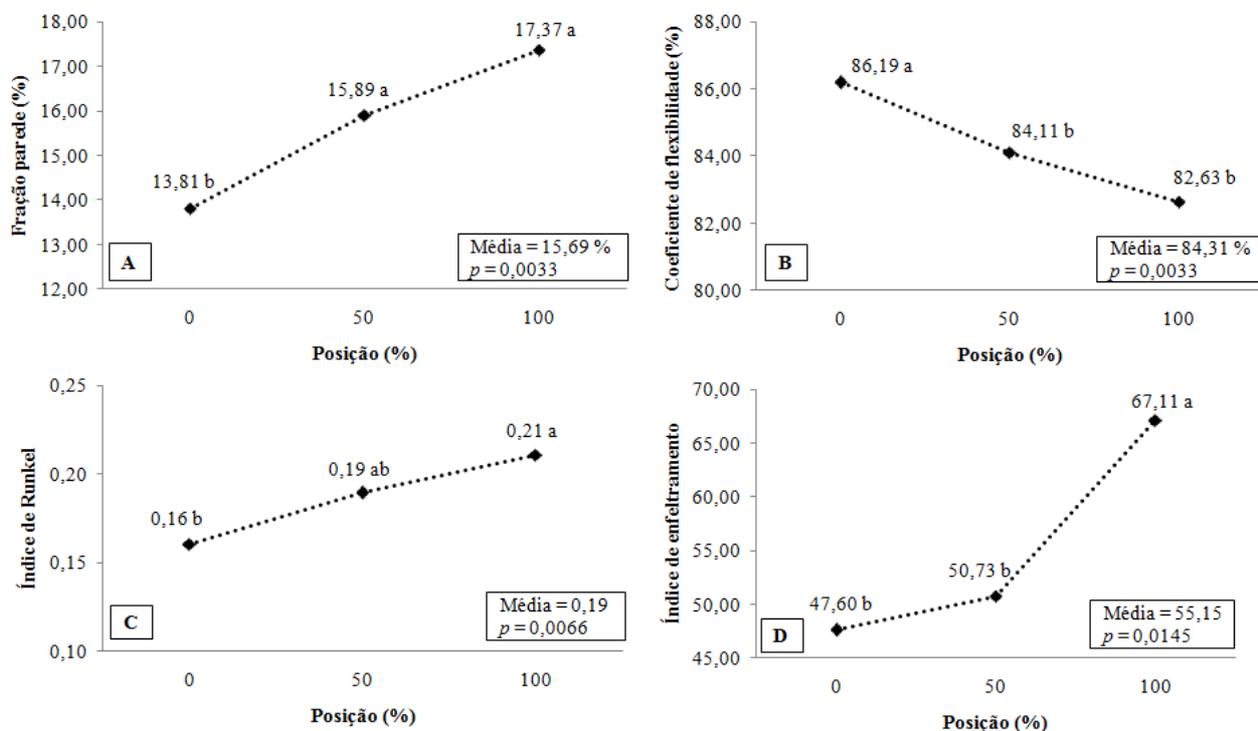


Figura 4. Variação dos parâmetros indicadores da qualidade da madeira de *P. greggii*. (A) fração parede; (B) coeficiente de flexibilidade; (C) índice de Runkel; (D) índice de enfeltramento.

Figure 4. Variation of the parameters indicating the quality of *P. greggii* wood. (A) wall fraction; (B) flexibility coefficient; (C) Runkel index; (D) felting index.

Na Tabela 4 pode ser observada a comparação dos parâmetros de qualidade da madeira de *P. greggii* com a madeira de *P. taeda*.

Tabela 4. Comparação dos parâmetros de qualidade da madeira entre diferentes espécies e idades.

Table 4. Comparison of wood quality parameters between different species and ages.

Espécie	Idade	Fração parede (%)	Coeficiente de flexibilidade (%)	Índice de Runkel	Índice de enfeltramento
<i>P. greggii</i> <sup>1</sup>	7	15,96	84,31	0,19	55,15
<i>P. taeda</i> <sup>2</sup>	11	23,10	76,90	0,33	69,50
<i>P. taeda</i> <sup>3</sup>	9	26,49	73,51	0,36	86,63
<i>P. taeda</i> <sup>4</sup>	25	22,70	77,30	0,31	76,20

Fonte: <sup>1</sup>Presente estudo; <sup>2</sup>KLOCK (2000); <sup>3</sup>GOMES (2009); <sup>4</sup>HASSEGAWA (2003).

A fração parede dos traqueídeos da madeira de *P. greggii* pode ser considerada muito delgada (por estar abaixo de 20%), o que resultará em baixa rigidez. De acordo com NISGOSKI (2005), quanto menor for a fração parede mais flexíveis serão os traqueídeos, melhorando interligação entre eles, resultando na maior resistência do papel a tração e ao estouro. Os valores encontrados para o *P. taeda* na literatura para fração parede são superiores aos obtidos para o *P. greggii*, porém ambos os materiais estão abaixo de 40%, que é o limite recomendado na literatura para produção de polpa celulósica de qualidade.

SHIMOYAMA & WIECHETECK (1993) afirmam que o coeficiente de flexibilidade indica o grau de achatamento dos traqueídeos durante o processo de produção da polpa celulósica, sendo que quanto maior for esse valor, mais flexível são os traqueídeos, maior a possibilidade de interligação entre eles resultando em maior resistência do papel ao estouro e a tração. O valor médio obtido para a madeira de *P. greggii* (84,31%) é superior aos encontrados na literatura para o *P. taeda* (77,30%) por HASSEGAWA (2003), KLOCK (2000) (76,90%) e GOMES (2009) (73,51%), indicando que os traqueídeos apresentarão maior

superfície de contato entre eles.

Conforme NISGOSKI (2005) e VASCONCELOS (2005), o índice de Runkel é classificado nos seguintes grupos: I:  $\leq 0,25$ ; II: entre 0,25 e 0,50; III: entre 0,50 e 1,00; IV: entre 1,00 e 2,00; V:  $>2,00$ , sendo considerado excelente, muito bom, bom, regular e ruim para fabricação de papel, respectivamente. O valor de 0,19 obtido para a madeira de *P. greggii* pertence ao grupo I do índice de Runkel, considerada excelente para a fabricação de papel.

O índice de enfiletramento é a relação entre o comprimento e a largura da fibra/traqueídeo, quanto maior for os valores desse índice, maior será a flexibilidade dos traqueídeos, resultando em papéis com melhores propriedades (NISGOSKI 2005). Por apresentar traqueídeos mais curtos e largos, o índice de 55,15 encontrado para a madeira de *P. greggii* está abaixo dos valores citados na literatura por KLOCK (2000) (69,50), HASSEGAWA (2003) (76,20), e GOMES (2009) (86,63), para o *P. taeda*, entretanto, está acima de 50 que é exigido para a produção de papel com resistência ao rasgo e arrebatamento (NISGOSKI 2005).

## CONCLUSÃO

A madeira de *P. greggii* apresenta potencial para a produção de polpa celulósica, destacando-se os indicadores anatômicos de qualidade que foram ótimos ou bons em quase todos os aspectos, além disso, os resultados das dimensões dos traqueídeos e da densidade apresentaram semelhança aos valores encontrados para o *P. taeda* na mesma idade. O principal aspecto negativo, com o qual se deve ter atenção, é pelo alto teor de lignina e extrativos, que podem afetar o processo de polpação. Vale ressaltar a idade das árvores avaliadas e o fato de ainda não existir um programa de melhoramento genético consolidado para a espécie no país, assim ela ainda apresenta margem para ser aprimorada para esta finalidade.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR AV. et al. 2011. Programa de melhoramento de *Pinus* da Embrapa Florestas. Documento 233. Colombo: Embrapa Florestas. 83p.
- ANDRADE AS. 2006. Qualidade da madeira, celulose e papel em *Pinus taeda* L.: influência da idade e da classe de produtividade. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 94p.
- ABNT. 2003. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Determinação da densidade básica em madeira: NBR 11.941. Rio de Janeiro: ABNT. 6p.
- BASSA AGMC. 2006. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft através do processo Lo-Solids. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 169p.
- BITTENCOURT E. 2004. Parâmetros de otimização no processo de fabricação de celulose e papel. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Curitiba: UFPR. 61p.
- BORSATO R. 2000. Variação genética em *Pinus greggii* Engelm. e seu potencial para reflorestamento no Sul do Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 86p.
- CHIES D. 2005. Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Curitiba: UFPR. 123p.
- DOBNER JR. et al. 2018. Wood density of loblolly pine trees as affected by crown thinning and harvest age in southern Brazil. *Wood Science and Technology* 52: 465-485.
- EMBRAPA. 2012. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas, Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 333p.
- FENGEL D & WEGENER O. 1984. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. New York: Walter de Gruyter. 613p.
- GOMES FA. 2009. Avaliação dos processos Kraft convencional e Lo-Solids para madeira de *Pinus taeda*. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 99p.
- HASSEGAWA M. 2003. Qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. de procedência da África do Sul. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 107p.
- HENNESSEY TC et al. 2004. Long-term growth and ecophysiological responses of a southeastern Oklahoma loblolly pine plantation to early rotation thinning. *Forest Ecology and Management* 192: 97-116.
- IBÁ. 2020. Indústria Brasileira de Árvores. Relatório anual 2020, ano base 2019. São Paulo: IBÁ. 66p.
- KLOCK U. 2000. Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Curitiba: UFPR. 291p.
- MUNHOZ LV et al. 2021. Predicted genetic gains for growth traits and Genotype x Environment interaction in *Pinus greggii*: new perspectives for genetic improvement in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 93: 1-12.
- NISGOSKI S. 2005. Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 160p.
- PALERMO GPM et al. 2003. Análise da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. por meio de radiação gama de

- acordo com as direções estruturais (longitudinal e radial) e idade de crescimento. *Floresta e Ambiente* 10: 50- 51.
- ROSA CAB. 2003. Influência do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus globulus* na produção e na qualidade da celulose kraft. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Santa Maria: UFSM. 149p.
- SHIMIZU JY. 2008. Espécies de *Pinus* na silvicultura brasileira. In: SHIMIZU JY. (Ed.). *Pinus na silvicultura brasileira*. Colombo: Embrapa Floresta. p.66-67.
- SHIMOYAMA VRS & WIECHETECK MSS. 1993. Características da madeira e da pasta termomecânica de *Pinus patula* var. *tecunumanii* para produção de papel imprensa. *Série Técnica IPEF* 9: 63-80.
- SIMÃO LR. 2011. Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo das propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. e *Pinus greggii* Engelm. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 87p.
- TASSISSA G et al. 1998. Juvenile-mature wood demarcation in loblolly pine trees. *Wood and Fiber Science* 30: 119-127.
- TAPPI. 2002. Technical Association of The Pulp and Paper Industry. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C: T 211 om-02. Atlanta: TAPPI. 5p.
- TAPPI. 1997. Technical Association of The Pulp and Paper Industry. Solvent extractives of wood and pulp: T 204 cm-97. Atlanta: TAPPI. 4p.
- VASCONCELOS FSR. 2005. Avaliação do processo SuperBatch™ de polpação de *Pinus taeda*. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 104p.
- VASQUES AG et al. 2007. Uma síntese da contribuição do gênero *Pinus* para o desenvolvimento sustentável no Sul do Brasil. *Floresta* 37: 445-450.
- VIVIAN MA. 2015. Aumento da eficiência do processo kraft de polpação a partir de pré-tratamento de cavacos de madeira de eucalipto. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 125p.
- VIVIAN MA et al. 2015. Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica kraft. *Scientia Forestalis* 48: 183-191.
- VIVIAN MA et al. 2021. Características da madeira de *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir). *Scientia Forestalis*, 49: 1-13.