

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS DE CURITIBANOS  
DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA, BIODIVERSIDADE E FLORESTAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Alexandre Saturnino Cardoso

**Caracterização tecnológica da madeira de *Pinus greggii* Engelm. para produção de polpa  
celulósica**

Curitibanos

2020

Alexandre Saturnino Cardoso

**Caracterização tecnológica da madeira de *Pinus greggii* Engelm. para produção de polpa  
celulósica**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof., Dr. Magnos Alan Vivian

Curitiba

2020

Cardoso, Alexandre Saturnino

Caracterização tecnológica da madeira de *Pinus greggii* Engelm. para produção de polpa celulósica / Alexandre Saturnino Cardoso; Orientador, Magnos Alan Vivian, 2020.

42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação)- Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Curitibanos, Graduação em Engenharia Florestal, Curitibanos, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Florestal. 2. Caracterização tecnológica da madeira. 3. Propriedade física da madeira. 4. Propriedades anatômicas da madeira. 5. Propriedades químicas da madeira. I. Vivian, Magnos Alan. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Florestal. III. Título.

Alexandre Saturnino Cardoso

**Caracterização tecnológica da madeira de *Pinus greggii* Engelm. para produção de polpa celulósica**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Florestal.

Curitiba, 13 de novembro de 2020.



Documento assinado digitalmente  
Mario Dobner Junior  
Data: 24/11/2020 13:28:50-0300  
CPF: 034.250.659-55

---

Prof., Dr. Mário Dobner Júnior  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente  
Magnos Alan Vivian  
Data: 24/11/2020 12:57:20-0300  
CPF: 007.088.210-06

---

Prof., Dr. Magnos Alan Vivian  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Karina Soares Modes  
Data: 24/11/2020 15:59:17-0300  
CPF: 003.082.240-86

---

Prof., Dr. Karina Soares Modes  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Wesley Wilker Corrêa Moraes".

---

Prof., Dr. Wesley Wilker Corrêa Moraes  
Avaliador  
Universidade Estadual de Roraima

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

## **AGRADECIMENTOS**

A Universidade Federal de Santa Catarina por possibilitar o meu crescimento profissional.

Aos professores pela aprendizagem e conhecimento que me repassaram.

Aos orientadores, Magnos Alan Vivian e Karina Soares Modes, pela dedicação e ensinamentos.

A todos os técnicos da Universidade Federal de Santa Catarina e da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz que me ajudaram na realização deste trabalho.

A minha família, especialmente meus pais, Ligia Kaiser Ribeiro e Antônio Ribeiro Cardoso, que sempre estiveram ao meu lado.

Aos meus amigos, por me apoiarem e proporcionarem os melhores momentos.

A Ediane de Souza Waltrick e Rafael Fernandes dos Santos, pelo suporte durante a graduação.

Obrigado!

## RESUMO

O segmento de produção de papel de fibra longa no Brasil está concentrado, basicamente, na utilização de apenas duas espécies do gênero *Pinus* (*P. taeda* e *P. elliottii*), sendo assim, é fundamental a avaliação de novas espécies que apresentam bom crescimento e adaptação aos solos e clima subtropical brasileiros. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar as propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Pinus greggii* Engelm. visando a produção de polpa celulósica. Para isso, foram utilizadas 3 árvores sem melhoramento genético, com 7 anos de idade, das quais foram retirados os discos nas alturas comerciais: 0 (base), DAP, 25, 50, 75 e 100%. Estes foram utilizados para avaliar as propriedades físicas (densidade básica média e ponderada), químicas (teores de cinzas, extrativos, lignina e holocelulose) e anatômicas (dimensões dos traqueídeos e indicadores anatômicos de qualidade para produção de papel). De acordo com a caracterização física, obteve-se para a madeira de *P. greggii* um valor médio de densidade básica de  $0,346 \text{ g.cm}^{-3}$  e ponderada de  $0,343 \text{ g.cm}^{-3}$ , semelhantes aos valores encontrados na literatura para outras espécies de *Pinus*, o que permite classificá-la como leve ou de baixa densidade. Para as dimensões dos traqueídeos obtiveram-se valores médios de 2,31 mm para o comprimento,  $41,30 \mu\text{m}$  para a largura,  $34,81 \mu\text{m}$  para o diâmetro do lúmen, e  $3,25 \mu\text{m}$  para a espessura da parede celular. Quanto aos resultados dos índices de qualidade da polpa celulósica, a espécie obteve destaque para a fração de parede (15,96%), coeficiente de flexibilidade (84,31%), índice de Runkel (0,19) e índice de enfiamento (55,15). 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 cinzas (0,20%). De modo geral, a madeira de *P. greggii* apresenta potencial de uso para produção de polpa celulósica, destacando-se pelos indicadores de qualidade 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, tais características podem aumentar o consumo de reagentes e diminuir o rendimento do processo de polpação, o que precisa ser comprovado em estudos com esta temática. Vale ressaltar a idade das árvores avaliadas e que ainda não existe um programa de melhoramento genético consolidado para a espécie no Brasil.

**Palavras-chave:** Caracterização física. Indicadores de qualidade. Composição química. Celulose de fibra longa.

## ABSTRACT

The long fiber paper production segment in Brazil is basically focusing on the use of only two species of the *Pinus* genus (*P. taeda* and *P. elliottii*), therefore, it is essential to evaluate new species that show good growth and adaptation to Brazilian soils and subtropical climate. In this sense, the present study aimed to evaluate the physical, chemical and anatomical properties of wood *Pinus greggii* Engelm. aimed at the production of cellulosic pulp. For this, 3 trees were used without genetic improvement, with 7 years of age, from which discs were removed at the commercial heights: 0 (base), DAP, 25, 50, 75 and 100%. These were used to evaluate physical properties (average and weighted basic density), chemical properties (ash content, extracts, lignin and holocellulose) and anatomical properties (dimensions of tracheids and anatomical quality indicators for paper production). According to the physical characterization, it was obtained for the wood of *P. greggii* an average value of basic density of 0.346 g.cm<sup>-3</sup> and weighted of 0.343 g.cm<sup>-3</sup>, similar to the values found in the literature for other *Pinus* species, which allows classification it as light or low density. For the dimensions of the tracheids, mean values of 2.31 mm were obtained for the length, 41.30 μm for the width, 34.81 μm for the diameter of the lumen, and 3.25 μm for the thickness of the cell wall. Regarding the results of the cellulosic pulp quality indexes, the species stood out for the wall fraction (15.96%), flexibility coefficient (84.31%), Runkel index (0.19) and infiltration index (55.15). Regarding 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%). In general, the wood of *P. greggii* has potential for use in the production of cellulosic pulp, standing out for the quality indicators and the dimensions of the tracheids, which are similar to the values found for *P. taeda* at the same age, however, it has high levels of lignin and extractives, such characteristics can increase the consumption of reagents and decrease the yield of the pulping process, which needs to be proven in studies with this theme. It is worth mentioning the age of the trees evaluated and the fact that there is still no consolidated genetic improvement program for the species in Brazil.

**Keywords:** Physical characterization. Quality Indicators. Chemical composition. Long fiber cellulose.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>P. greggii</i> com o fuste deformado no município de Ponta Grossa (PR). .....	15
Figura 2 – Determinação da densidade básica: (A) obtenção do volume verde, (B) obtenção do peso seco.....	21
Figura 3 – Preparação das amostras para análise das propriedades anatômicas: (A) discos lixados, (B) confecção das baquetas, (C) confecção dos blocos, (D) confecção dos palitos. ...	23
Figura 4 – Processo de maceração e obtenção de imagens das amostras para determinação das propriedades morfológicas dos traqueídeos: (A) palitos nos tubos de ensaio, (B) as amostras no banho-maria, (C) amostras maceradas, (D) imagem dos traqueídeos.....	23
Figura 5 – Determinação da composição química: (A) cavacos, (B) moagem dos cavacos....	25
Figura 6 – Variação longitudinal da densidade da madeira de <i>P. greggii</i> . .....	26
Figura 7 – Variação das dimensões dos traqueídeos da madeira de <i>P. greggii</i> . (A) Comprimento; (B) Largura; (C) Diâmetro do lúmen; (D) Espessura da parede. ....	28
Figura 8 – Variação dos parâmetros indicadores da qualidade da madeira de <i>P. greggii</i> . (A) Fração parede; (B) Coeficiente de flexibilidade; (C) Índice de Runkel; (D) Índice de enfieltramento.....	30
Figura 9 – Composição química da madeira de <i>P. greggii</i> . .....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da densidade da madeira para espécies do gênero <i>Pinus</i> .....	27
Tabela 2 – Comparação das dimensões dos traqueídeos da madeira avaliadas com espécies do mesmo gênero. ....	29
Tabela 3 – Comparação dos parâmetros de qualidade da madeira com espécies de mesmo gênero. ....	31
Tabela 4 – Comparação da composição química da madeira de diferentes espécies e idades.	33

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEF – Área Experimental Florestal

DAP – Diâmetro à Altura do Peito = 1,30 m

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

ESALQ – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores

LQCE – Laboratório de Química, Celulose e Energia

TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USP – Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	Objetivo geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos .....	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1	<i>Pinus greggii</i> Engelm. ....	15
2.1.1	Propriedade física da madeira para produção de polpa e papel.....	16
2.1.2	Propriedades anatômicas da madeira para produção de polpa e papel .....	17
2.1.3	Propriedades químicas da madeira para produção de polpa e papel .....	18
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>20</b>
3.1	COLETA E PREPARO DO MATERIAL .....	20
3.2	PROPRIEDADE FÍSICA.....	21
3.2.1	Densidade básica .....	21
3.3	PROPRIEDADES ANATÔMICAS .....	22
3.3.1	Morfologia dos traqueídeos .....	22
3.4	PROPRIEDADES QUÍMICAS.....	24
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	25
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>26</b>
4.1	PROPRIEDADE FÍSICA.....	26
4.1.1	Densidade básica .....	26
4.2	PROPRIEDADES ANATÔMICAS .....	28
4.2.1	Caracterização morfológica dos traqueídeos .....	28
4.2.2	Parâmetros indicadores de qualidade da madeira .....	30
4.3	PROPRIEDADES QUÍMICAS.....	32
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>37</b>

## **ANEXO A – Determinação do teor de extrativos totais e lignina da madeira**

**41**

## 1 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 a 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 papelero se destacam no segmento de “fibra longa” devido ao comprimento de seus traqueídeos, que medem entre 3 a 6 mm de comprimento, proporcionando papéis de maior resistência físico mecânica (BASSA, 2006).

Em 2018, o Brasil se consolidou como o segundo maior produtor mundial de celulose, com cerca de 21,1 milhões de toneladas, e o oitavo na produção de papel, com 10,4 milhões de toneladas (IBÁ, 2019). A área total de árvores plantadas totalizou 7,83 milhões de hectares no mesmo período, destes 36% pertencentes às empresas de papel e celulose, 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, 2019).

Como o setor florestal, especialmente o de celulose e papel (segmento 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 à grande demanda do setor por

madeira. 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. Porém, há poucas pesquisas que comprovem a qualidade da madeira cultivada no Brasil para a produção papeleira.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar as características físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Pinus greggii* Engelm. para a produção de polpa celulósica.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar a densidade básica da madeira e sua variação longitudinal no fuste;
- Determinar a composição química da madeira;
- Avaliar a morfologia dos traqueídeos da madeira e sua variação radial;
- Calcular os indicadores de qualidade para produção de polpa celulósica e papel através da morfologia dos traqueídeos;
- Comparar as características da madeira de *P. greggii*, com a madeira de *P. taeda*, tradicionalmente utilizadas para a produção de polpa celulósica.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 *PINUS GREGGII* ENGELM.

*Pinus greggii* Engelm. é uma espécie endêmica do México, pertencente à família *Pinaceae*, também chamado de “pino prieto”, “pino gabarato” ou “pino gabaratillo”. Essa conífera pode chegar a 25 m de altura, sendo utilizado para lenha e construção civil em sua região de origem (BORSATO, 2000).

No México essa espécie pode ser encontrada em dois lugares distintos, na região Central e no Norte do país. Na região Central, as populações estão distribuídas nos estados de Puebla, Hidalgo e San Luís Potosí, onde as altitudes variam entre 1.200 e 1.800 m, em solos ácidos, com precipitação média entre 700 e 1.600 mm anuais. As populações da região Norte, estão localizadas nos estados de Nuevo León e Coahuila, em altitudes entre 2.300 e 2.700 m, no qual, predominam solos de reação neutra a alcalina, em ambiente semiárido, com precipitação média variando entre 400 e 600 mm (SHIMIZU, 2008).

De acordo com Shimizu (2008), as procedências da região central do México implantadas no sul do Brasil foram as que obtiveram os melhores resultados em relação a sua adaptação aos solos e ao clima brasileiro. Já as variedades mexicanas do Norte (Figura 1), conforme o mesmo autor teve uma baixa adaptabilidade nos experimentos brasileiros, devido à redução de vigor, deformações nas acículas, ramos e fuste, comparadas com os indivíduos provenientes da região Central mexicana.

Figura 1 – *P. greggii* com o fuste deformado no município de Ponta Grossa (PR).



Fonte: Shimizu (2008).



O *P. greggii* é conhecido por apresentar florescimento precoce e resistência a geadas, com densidade da madeira variando entre 0,45 a 0,55 g.cm<sup>-3</sup> (SHIMIZU, 2008). Brand *et al.* (2004) citam que a madeira de *P. greggii* tem coloração amarelada pálida, sem desvios de grã, com toras fáceis de serem descascadas e serradas, porém chama a atenção o fato de que a árvore produz uma grande quantidade de ramificações, podendo ocasionar concentração de nós, sendo um aspecto negativo, pelo fato de serem bastante lignificados, aumentando a rigidez da madeira, dificultando a picagem das toras.

Segundo DHAWAN *et al.* (1990 *apud* Brand *et al.*, 2004), o rendimento do *P. greggii* na produção de polpa pré-hidrolisada não branqueada, apresentou rendimento entre 44 a 45%, dentro do limite encontrado em outras espécies, como o *Pinus elliottii* e o *Pinus taeda* (43 a 47%). Em relação às suas propriedades químicas, não se diferencia significativamente de outras espécies do gênero *Pinus*, geralmente possui baixos teores de resina, e pequenos teores de cinzas (0,08%), sendo isso um aspecto importante para a produção de polpa e papel (BORSATO, 2000).

### **2.1.1 Propriedade física da madeira para produção de polpa e papel**

A densidade é um dos principais parâmetros para a avaliação da qualidade da madeira. Ela pode ser descrita de duas maneiras, como densidade básica ou densidade aparente, sendo que a última depende da quantidade de umidade na amostra (DIAS; LAHR, 2004).

De maneira geral, a densidade básica da madeira é a relação entre a massa totalmente seca em estufa (expresso em gramas ou toneladas), e o seu volume (expresso em centímetros cúbicos ou metros cúbicos) no estado máximo de saturação em água (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971).

Já a densidade aparente é determinada através da mensuração da massa e do volume da madeira, a um mesmo teor de umidade, geralmente 12%, valor esse padronizado internacionalmente e também adotado nas normas brasileiras (DIAS; LAHR, 2004).

A densidade pode variar dentro da árvore, entre indivíduos, procedências da mesma espécie e entre espécies. A variação dentro da árvore ocorre tanto no sentido radial, ou seja, na direção da medula para a casca, como no sentido longitudinal, da base em direção ao topo (OLIVEIRA; HELLMEISTER; TOMAZELLO, 2005).

Para a indústria de papel e celulose, a densidade reflete em vários aspectos, como na velocidade de impregnação do licor cozimento e no processo de deslignificação. Através

dessa propriedade é possível conhecer o peso seco, rendimento e a uniformidade dentro da madeira, portanto, é um parâmetro essencial para obtenção de produtos padronizados (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971).

Espécies com alta densidade podem ampliar a capacidade do digestor, elevando a produção nas indústrias, porém, dificulta a picagem das toras, formando cavacos maiores, aumentando o consumo de reagentes e de rejeitos na polpação (SHIMOYAMA, 1990 *apud* BERGER, 2000). Espécies com baixa densidade têm como vantagem a maior facilidade na picagem das toras e na deslignificação, entretanto, apresentam menor rendimento volumétrico do digestor (HECKLER *et al.*, 2014). De acordo com Dias e Simonelli (2013), madeiras com densidade básica entre 0,40 a 0,55 g.cm<sup>-3</sup> estão na faixa ideal para produção de polpa celulósica.

Nas coníferas têm se constatado uma relação direta entre a densidade da madeira e a resistência do papel ao rasgo, e uma relação inversa em referência ao peso específico aparente, no tempo de refinação da celulose para atingir um determinado grau de moagem, na resistência de ruptura e rebentamento do papel (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971).

### **2.1.2 Propriedades anatômicas da madeira para produção de polpa e papel**

De acordo com Burger (1991), a constituição anatômica da madeira das coníferas é mais simples comparada com as folhosas, os seus principais elementos estruturais são: traqueídeos axiais, traqueídeos radiais, parênquima radial (raios), parênquima axial, canais epiteliais e canais resiníferos. Os traqueídeos axiais e raios são os únicos que estão presentes na madeira de qualquer conífera, já os traqueídeos radiais, parênquima axial, células epiteliais e canais resiníferos podem ou não estar presentes, dependendo da espécie.

Os traqueídeos axiais ocupam aproximadamente 95% do volume da madeira, o restante é ocupado pelas demais células. Esses traqueídeos desempenham a função de sustentação mecânica e condução de líquidos extraídos pelas raízes, através de pontuações (NISGOSKI *et al.*, 2017).

Quanto ao formato, os traqueídeos são alongados, estreitos e pontiagudos nas extremidades, possuindo comprimento médio variando entre 2 a 5 mm (BURGER, 1991). O mesmo autor menciona que os traqueídeos axiais dispõem de longevidade curta, sendo assim, perde todo o conteúdo celular, tornando-se tubos ocos, constituídos de lignina em suas paredes, nesse caso, algumas espécies do gênero *Pinus* podem apresentar espessamentos.

Na produção papeleira, características como largura, comprimento, espessura da parede celular, diâmetro do lúmen e entrelaçamento dos traqueídeos ou fibras, são fundamentais para avaliar a qualidade da matéria-prima. Estas características podem ser utilizadas para estimar indicadores de qualidade, como o Índice de Enfeltramento, Coeficiente de Flexibilidade, Índice de Runkel e Fração Parede (NISGOSKI *et al.*, 2017).

O Índice de Enfeltramento é definido como a relação entre o comprimento e a largura do traqueídeo, já o Coeficiente de Flexibilidade é definido pelos vínculos entre o diâmetro do lúmen e a largura do traqueídeo, ambos os indicadores refletem o quão flexíveis são os elementos, e a capacidade deles de entrelaçarem (CASTELO, 2007).

O Índice de Runkel é a relação entre a espessura da parede e o diâmetro do lúmen do traqueídeo, e a Fração Parede corresponde à relação entre a espessura da parede e a largura do traqueídeo, os quais estão associados à rigidez e podem influenciar nas características mecânicas do papel (CASTELO, 2007). De acordo com Santos (2005), quando a fração parede está acima de 40%, os traqueídeos serão pouco flexíveis e extremamente rígidos, ocorrendo uma maior dificuldade na interligação entre eles, gerando papéis com volume específico aparente alto, devido ao grau de colapso ser menor comparado com os traqueídeos com baixa fração parede.

### **2.1.3 Propriedades químicas da madeira para produção de polpa e papel**

As características químicas da madeira para a produção de papel e celulose são essenciais para o estabelecimento de parâmetros de rendimento da polpação, consumo de reagentes, entre outros (ROSA, 2003). A madeira é formada em maiores proporções por celulose, hemicelulose e lignina, e em menores quantidades por extrativos e materiais inorgânicos (cinzas). A celulose, hemicelulose e lignina formam os chamados compostos fundamentais ou majoritários da madeira, já os extrativos e cinzas compõem os ditos compostos acidentais ou minoritários (KLOCK *et al.*, 2005).

A celulose é um polissacarídeo, formado exclusivamente por unidades de  $\beta$ -D-glucose, de alto peso molecular, sendo o principal e mais abundante constituinte da parede celular das fibras (KLOCK *et al.*, 2005). As hemiceluloses também são polissacarídeos, que se diferenciam das celulosas por terem menor grau de polimerização com polímeros ramificados. A holocelulose representa o conteúdo total de polissacarídeos na madeira, é composto por polímeros de celulose e hemiceluloses, sendo muito desejável nos processos de obtenção de polpa celulósica, pois contribuem na resistência da polpa (COELHO, 2017).

A lignina é uma molécula tridimensional, amorfa, complexa, de cadeia ramificada, formada de unidades básicas de fenil propano. É responsável pela adesão entre as fibras/traqueídeos, o que atribui rigidez às células (GOMES, 2007). De acordo com Andrade (2006), a principal finalidade no processo de polpação é a remoção da lignina para liberar a porção de fibras da madeira, portanto, é um composto indesejável na produção de polpa celulósica e, nos processos de branqueamento.

Os extrativos são substâncias químicas que podem ser extraídas com solventes, sendo formados a partir de fenóis, graxas, ácidos graxos, resinas, e outros compostos químicos. Estão localizados no cerne, canais resiníferos, células parenquimáticas, e ductos gomíferos, sendo responsáveis pelas propriedades sensitivas e organolépticas da madeira, como cor, brilho, cheiro, gosto e pela sua durabilidade natural. Na produção de celulose os extrativos são prejudiciais, pois reduzem o rendimento, podem causar incrustações, e aumentam o uso de reagentes químicos na produção de polpa celulósica (GOMES, 2007). A quantidade e composição de extrativos podem variar entre espécies e nas diferentes partes da árvore, assim como podem alterar durante os procedimentos que antecedem o processo de polpação, por exemplo, no período de estocagem da madeira (SILVÉRIO, 2008).

Os materiais inorgânicos (cinzas) correspondem aos minerais retirados do solo para o crescimento da árvore e podem ser encontrados na sua madeira. A sua composição pode variar bastante dependendo das condições ambientais onde a árvore está crescendo, geralmente são constituídos principalmente de potássio e cálcio. Estes cátions podem representar 50% dos materiais inorgânicos da madeira, os outros elementos encontrados são fósforo, cloro, sódio, manganês, magnésio e sílica, já os ânions mais comuns na madeira são os fosfatos, carbonatos, sulfatos e silicatos (KLOCK, 2000). Os materiais inorgânicos são considerados indesejáveis na produção de polpa celulósica, pois podem ocasionar incrustações, corrosão e entupimentos nos equipamentos (FREDDO *et al.*, 1999).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 COLETA E PREPARO DO MATERIAL

Para condução do estudo utilizou-se, a madeira de *Pinus greggii*, com 7 anos de idade, proveniente de plantio experimental realizado na Área Experimental Florestal (AEF), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), localizada em Curitibanos/SC, nas coordenadas 27°18'32.02"S e 50°42'44.98"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).

Alguns experimentos presentes na AEF são mantidos em convênio com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), os quais são destinados ao desenvolvimento de estudos de produção florestal, melhoramento florestal, ecologia e fitossociologia.

O plantio experimental de *Pinus greggii* foi implantado no ano de 2012 pela EMBRAPA, em uma área de 0,2 ha, com espaçamento de 2,5 x 2,5 m, sendo realizada uma poda aos 5 anos de idade, até 3 metros de altura. Em 2018 (quando o plantio tinha 6 anos) foi realizado um desbaste seletivo, retirando 50% dos indivíduos. Além disso, aos longos dos anos, foram conduzidas roçadas periódicas para controle da matocompetição, para possibilitar o desenvolvimento inicial das plantas.

Foram selecionadas 3 árvores com bom estado fitossanitário e diâmetros semelhantes, evitando aquelas plantadas nas bordas do talhão, que foram abatidas com auxílio de uma motosserra. As árvores coletadas apresentavam as seguintes dimensões médias: 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.

Com as árvores no chão, foi realizada a medição com uma fita métrica das alturas e extraídos discos, de 3,0 cm de espessura, em número de dois nas seguintes posições: 0 (base), DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial.

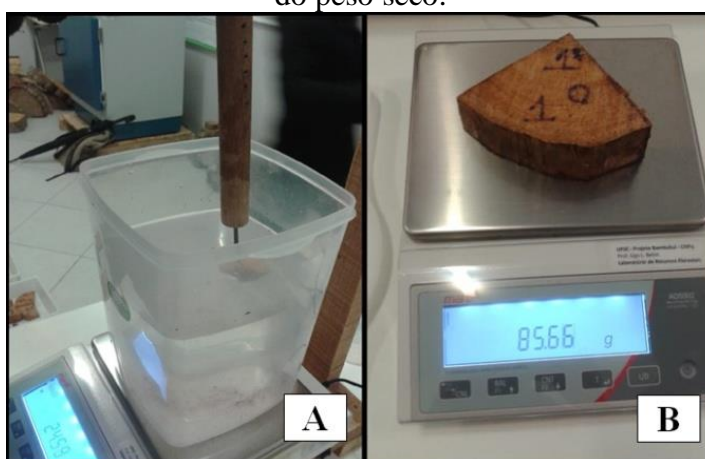
Após a coleta, o material foi transportado para o Laboratório de Recursos Florestais, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Curitibanos, para condução da caracterização tecnológica da madeira de *P. greggii*.

## 3.2 PROPRIEDADE FÍSICA

### 3.2.1 Densidade básica

Para determinação da densidade básica foram utilizados os discos extraídos nas posições: 0, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, de cada árvore, dos quais se confeccionaram duas cunhas diametralmente opostas, que foram mantidas submersas em água até completa saturação (Figura 2A). Após esse procedimento, determinou-se o volume verde das cunhas (cm<sup>3</sup>) seguindo as recomendações da norma NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003).

Figura 2 – Determinação da densidade básica: (A) obtenção do volume verde, (B) obtenção do peso seco.



Fonte: O Autor.

Para obtenção do peso seco das cunhas, essas foram submetidas à secagem a temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , em estufa com circulação forçada de ar. Após esse período, foi mensurada a massa seca (g) de cada cunha (Figura 2B) para cálculo das respectivas densidades básicas (Equação 1).

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

Em que: Db = densidade básica (g.cm<sup>-3</sup>); Ms = massa seca (g); Vv = volume verde (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 (2015).

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

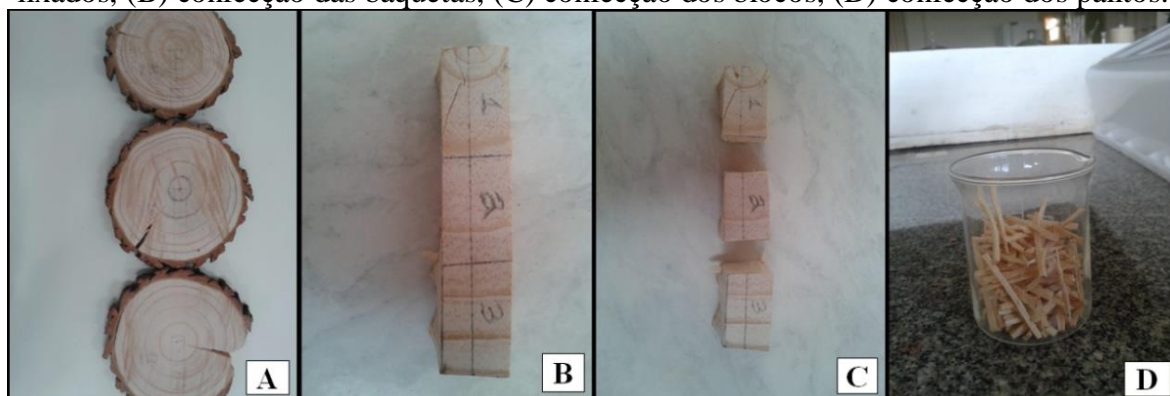
Em que: Dbp = densidade básica ponderada ( $\text{g.cm}^{-3}$ );  $D_B$ ,  $D_{DAP}$ ,  $D_{25\%}$ ,  $D_{50\%}$ ,  $D_{75\%}$  e  $D_{100\%}$  = diâmetros dos discos nas posições de amostragem (cm);  $d_B$ ,  $d_{DAP}$ ,  $d_{25\%}$ ,  $d_{50\%}$ ,  $d_{75\%}$ , e  $d_{100\%}$  = densidade básica dos discos em diferentes alturas ( $\text{g.cm}^{-3}$ ).

### 3.3 PROPRIEDADES ANATÔMICAS

#### 3.3.1 Morfologia dos traqueídeos

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 (Figura 3A). Após a delimitação dos anéis, foram confeccionadas baquetas de 2 cm de largura, com orientação radial (medula-casca) (Figura 3B). A partir das baquetas, marcaram-se 3 posições: 0, 50, e 100% da distância radial (sendo 0% próximo a medula, e 100% próximo a casca), das quais confeccionaram-se blocos (Figura 3C), que foram transformados em pequenos fragmentos (palitos) (Figura 3D).

Figura 3 – Preparação das amostras para análise das propriedades anatômicas: (A) discos lixados, (B) confecção das baquetas, (C) confecção dos blocos, (D) confecção dos palitos.

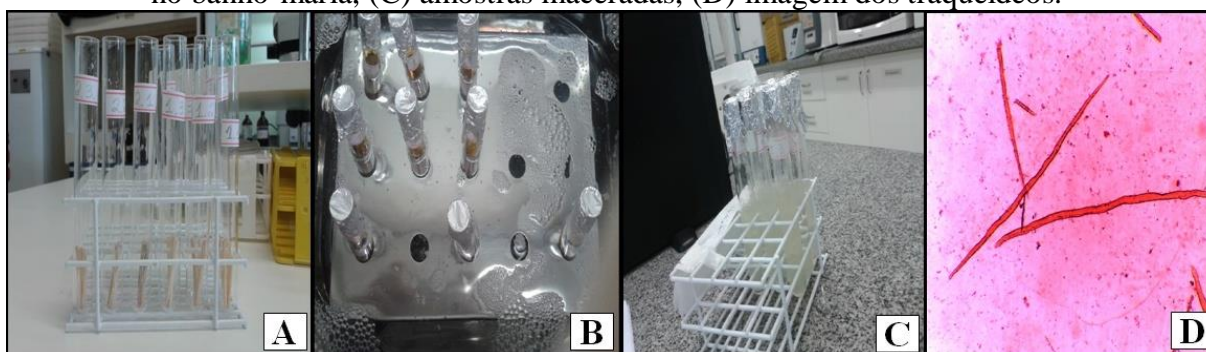


Fonte: O Autor.

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 1 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 1 gota de safranina, 1 gota de glicerina e 1 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 (Figura 4). 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.

Figura 4 – Processo de maceração e obtenção de imagens das amostras para determinação das propriedades morfológicas dos traqueídeos: (A) palitos nos tubos de ensaio, (B) as amostras no banho-maria, (C) amostras maceradas, (D) imagem dos traqueídeos.



Fonte: O Autor.



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.

$$E = \frac{L - DL}{2} \quad (3)$$

$$FP = \frac{2 * E}{L} * 100 \quad (4)$$

$$CF = \frac{DL}{L} * 100 \quad (5)$$

$$IE = \frac{C}{\frac{L}{1000}} \quad (6)$$

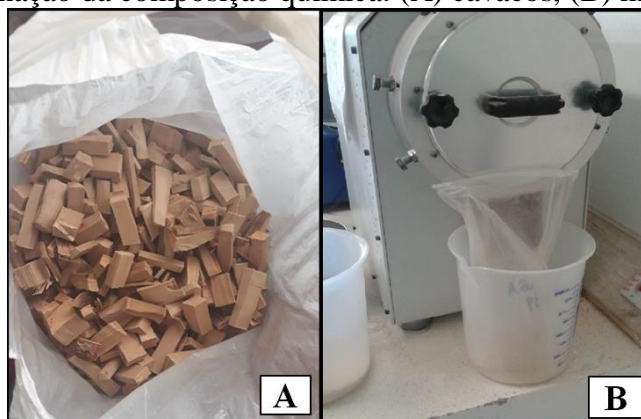
$$IR = \frac{2 * E}{DL} \quad (7)$$

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

### 3.4 PROPRIEDADES QUÍMICAS

Para determinação da composição química, foram utilizados discos retirados do DAP, que foram transformados em pequenos cavacos com facão (Figura 5A), moídos (moinho do tipo Willey) e classificados em peneiras (Figura 5B), selecionando-se as frações de serragem retidas entre 40 e 60 *mesh*.

Figura 5 – Determinação da composição química: (A) cavacos, (B) moagem dos cavacos.



Fonte: O Autor.

As análises químicas foram realizadas pelo Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE), da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo (USP), localizado em Piracicaba/SP. Determinaram-se os seguintes parâmetros, em triplicata: cinzas (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). Os procedimentos estão replicados no Anexo A deste trabalho. A holocelulose (celulose + hemicelulose) foi obtida por diferença, de acordo com a Equação 8.

$$HC = 100 - (TE + TL) \quad (8)$$

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

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

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 t, ao nível de 5% de probabilidade, para os valores no sentido base-topo (densidade) e no sentido medula-casca (morfologia) da madeira.

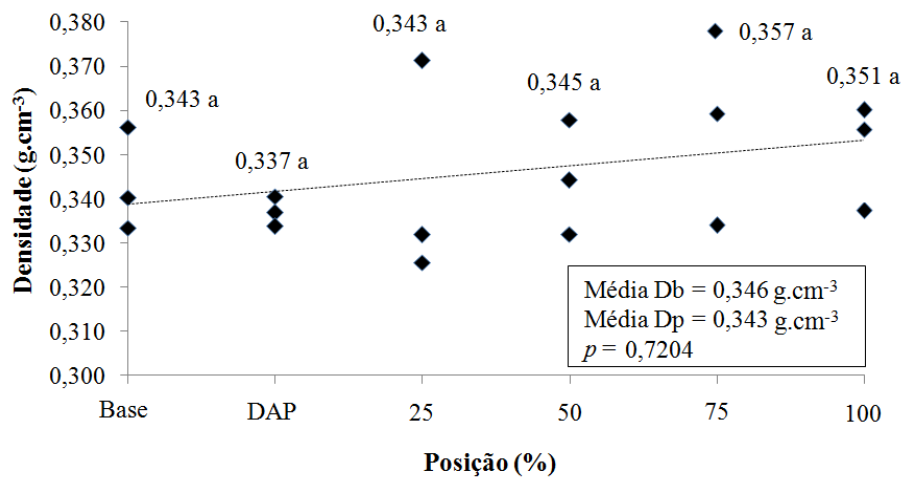
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PROPRIEDADE FÍSICA

#### 4.1.1 Densidade básica

Na Figura 6 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 6 – Variação longitudinal da densidade da madeira de *P. greggii*.



Fonte: O Autor.

A densidade básica média para a madeira de *P. greggii* foi de  $0,346 \text{ g.cm}^{-3}$ , já a densidade ponderada média foi de  $0,343 \text{ g.cm}^{-3}$ . De acordo com o teste de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade, não houve diferença estatística entre as médias de densidade nas diferentes posições longitudinais do fuste das árvores.

Conforme é possível observar na figura 6, 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 média 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 da madeira para espécies do gênero *Pinus*.

<b>Espécie</b>	<b>Densidade (g.cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Idade</b>
<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> O autor (2020); <sup>2</sup> SIMÃO (2011); <sup>3</sup> ANDRADE (2006); <sup>4</sup> BASSA (2006); <sup>5</sup> BITTENCOURT (2004).

Pode-se observar que a densidade básica da madeira de *P. greggii* com 7 anos de idade (0,343 g.cm<sup>-3</sup>) foi semelhante ao encontrado por Simão (2011), que ao avaliar um povoamento de *P. greggii* com 13 anos no município de Correia Pinto (SC), obteve um 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 8 e 9 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), este resultado é semelhante ao encontrado para *P. greggii* com 7 anos, sendo isso um aspecto positivo, pois possibilita reduzir o tempo de rotação e obter madeira de densidade similar.

Vale destacar que a madeira de *P. greggi* avaliada, com 7 anos, basicamente seja composta de madeira juvenil. Não existem estudos mencionando a idade de transição entre madeira juvenil/adulta para o *P. greggi*, 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 madeiras com 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.

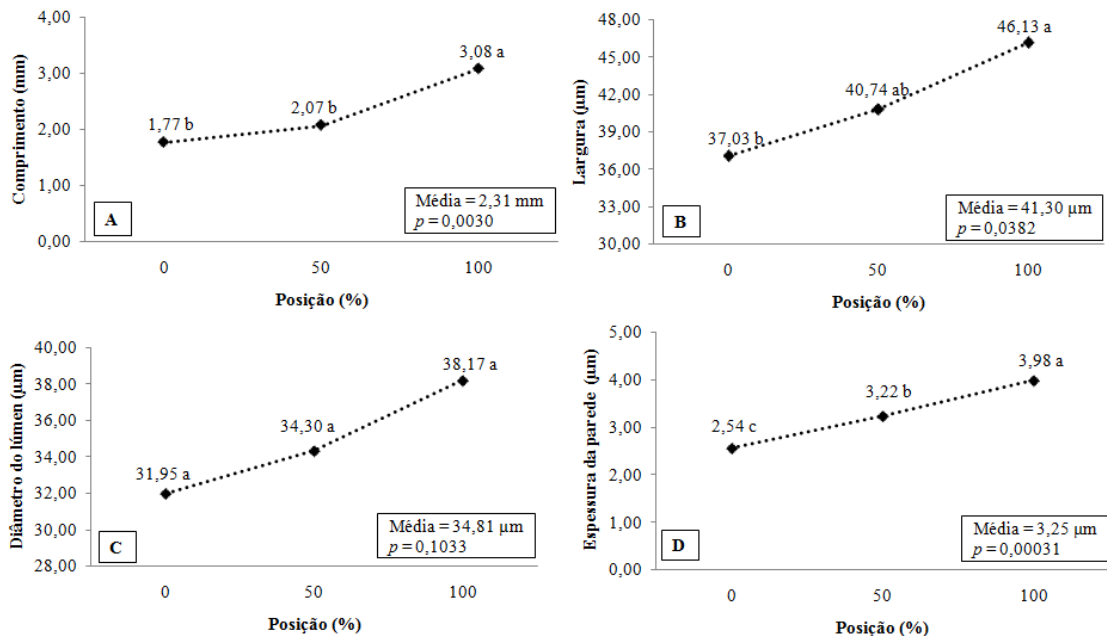
De acordo com Bassa (2006), a densidade para a madeira de *Pinus*, dependendo da idade, varia de 0,300 a 0,400 g.cm<sup>-3</sup>, sendo que árvores com idade entre 8 e 14 anos são destinadas para a produção de papel e celulose, já a madeira de árvores a partir de 20 anos são utilizadas para serraria e laminação.

## 4.2 PROPRIEDADES ANATÔMICAS

### 4.2.1 Caracterização morfológica dos traqueídeos

Na Figura 7 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.

Figura 7 – Variação das dimensões dos traqueídeos da madeira de *P. greggii*. (A) Comprimento; (B) Largura; (C) Diâmetro do lúmen; (D) Espessura da parede.



Fonte: O Autor.

As dimensões médias dos traqueídeos da madeira de *P. greggii*, com 7 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.

Na tabela 2 pode ser observada a comparação das dimensões dos traqueídeos da madeira de *P. greggii*, com a madeira de *P. taeda*.

Tabela 2 – Comparação das dimensões dos traqueídeos da madeira avaliadas com espécies do mesmo gênero.

<b>Espécie</b>	<b>Idade</b>	<b>Comprimento (mm)</b>	<b>Largura (µm)</b>	<b>Diâmetro do lúmen (µm)</b>	<b>Espessura da parede (µm)</b>
<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> O autor (2020); <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 médios de 2,91 mm de comprimento, 57,00 µm de largura, 30,00 µm de diâmetro do lúmen, e 6,60 µm de espessura da parede, sendo superiores, com exceção do diâmetro de lúmen, aos obtidos no presente estudo, o que pode ser atribuído à diferença de idade.

Andrade (2006) obteve para a madeira de *P. taeda* com 8 anos, valores médios de 2,22 mm, com uma variação entre 2,12 a 2,29 mm de comprimento, já para a largura encontrou valores médios de 38,51 µm, com uma variação entre 38,41 a 38,90 µm, com valores médios inferiores ao registrado para a madeira de *P. greggii*.

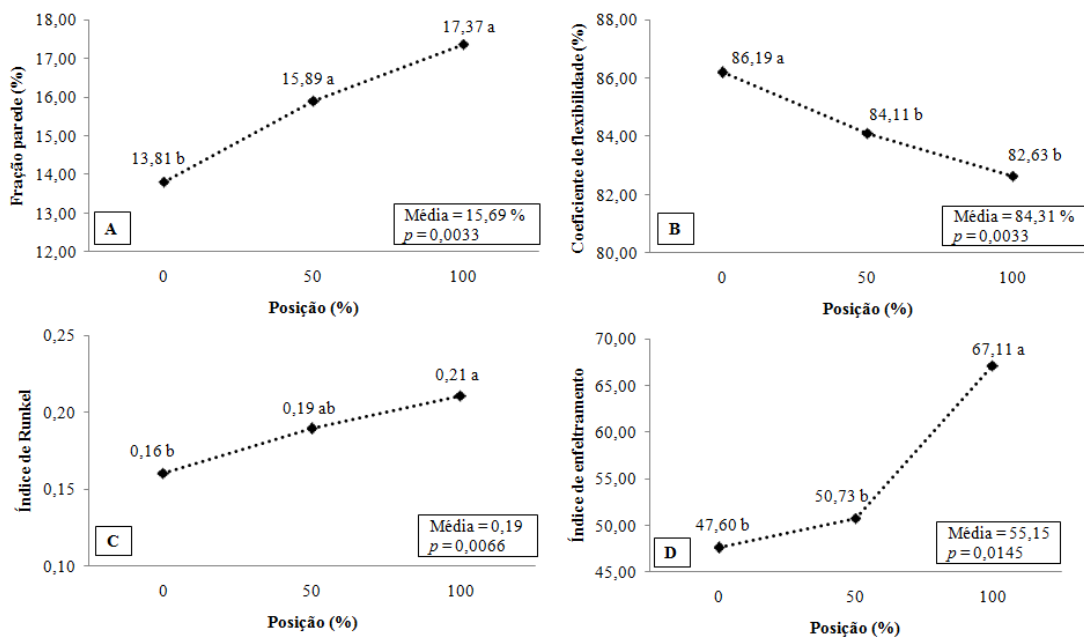
Nisgoski (2005) observou para a madeira de *P. taeda* com 10 anos de idade no município de Três Barras (SC), valores médios de 3,14 mm de comprimento, 39,27 µm de largura, 26,38 µm de diâmetro do lúmen, e 6,45 µm de espessura da parede. Comparando-os com os valores obtidos neste trabalho, podem-se observar dimensões superiores para o comprimento e espessura da parede dos traqueídeos em relação à madeira de *P. greggii*.

Essa diferença entre os estudos de Nisgoski (2005) e Simão (2011) ocorre devido à diferença de idade dos povoamentos estudados e pelo fato do comprimento e espessura da parede dos traqueídeos de lenho tardio ser maiores quando comparados com os de lenho inicial do mesmo anel de crescimento, conforme relatado por Hasegawa (2003).

#### 4.2.2 Parâmetros indicadores de qualidade da madeira

Na Figura 8 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).

Figura 8 – 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 enfeitramento.



Fonte: O Autor.

Os valores médios dos parâmetros indicadores da qualidade da madeira de *P. greggii* com 7 anos foram: 15,96% para fração parede, 84,31% para o coeficiente de flexibilidade, 0,19 para o índice de Runkel, e 55,15 para o índice de enfeitramento.

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 8, a fração parede, o índice de Runkel, e o índice de enfeitramento, aumentam no sentido medula-casca, já o coeficiente de flexibilidade reduz no sentido radial

(medula-casca). A explicação da variação entre as posições radiais avaliadas, sem tendência ou sinal de estabilização, é o fato das árvores utilizadas terem apenas 7 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.

Na Tabela 3 pode ser encontrada a comparação dos parâmetros de qualidade da madeira de *P. greggii* a madeira de *P. taeda*.

Tabela 3 – Comparação dos parâmetros de qualidade da madeira com espécies de mesmo gênero.

<b>Espécie</b>	<b>Idade</b>	<b>Fração parede (%)</b>	<b>Coefficiente de flexibilidade (%)</b>	<b>Índice de Runkel</b>	<b>Índice de enfeltramento</b>
<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> O autor (2020); <sup>2</sup> KLOCK (2000); <sup>3</sup> GOMES (2009), <sup>4</sup> HASSEGAWA (2003).

Hassegawa (2003) estudando a porção de madeira juvenil de *P. taeda* com 25 anos de idade em crescimento no município de Alfredo Wagner (SC) obteve valores médios de 22,70% para a fração parede. Klock (2000) avaliou árvores de *P. taeda* com 11 anos de idade no município de Ventania (PR) e obteve um valor médio de 23,10%. Gomes (2009) encontrou valor de 26,49% para a madeira de *P. taeda* com 9 anos de idade no município de Telêmaco Borba (PR), todos portanto superiores ao registrado para a madeira de *P. greggi* avaliada.

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 Watson e Dadswell (1961) citado por 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* (15,96%), o que é uma vantagem competitiva da madeira de *P. greggi*, embora, estejam abaixo de 40%, que é o limite recomendado na literatura para produção de polpa celulósica de qualidade.



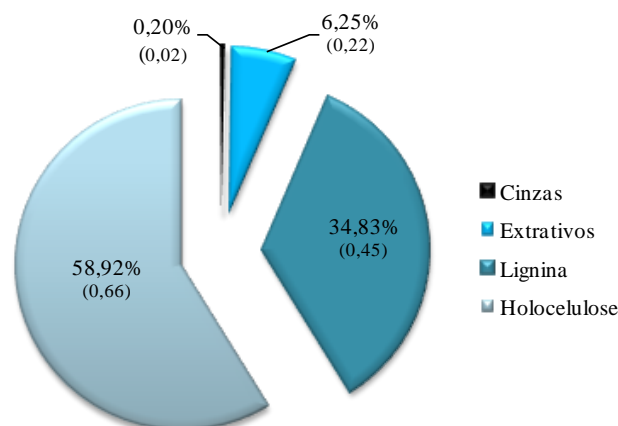
Shimoyama e Wiecheteck (1993) citado por Gomes (2009), afirmam que o coeficiente de flexibilidade indica o grau de achatamento dos traqueídeos durante o processo de produção da polpa celulósica, sendo que quanto maior for esse valor, mais flexível são os traqueídeos, maior a possibilidade de interligação dos traqueídeos 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 enfieltramento 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 arrebentamento (NISGOSKI, 2005).

#### 4.3 PROPRIEDADES QUÍMICAS

Na Figura 9 pode ser observada a composição química da madeira de *P. greggii* aos 7 anos de idade. Os valores em parênteses dizem respeito ao desvio padrão dos dados.

Figura 9 – Composição química da madeira de *P. greggii*.

Fonte: O Autor.

Os valores médios da composição química da madeira de *P. greggii* com 7 anos foram: 58,92% de holocelulose, 34,83% de lignina, 6,25% de extrativos, e 0,20% de cinzas. Os resultados da lignina e extrativos estão acima dos citados na literatura (Tabela 4) e conseqüentemente influenciam negativamente no rendimento de holocelulose, conforme já citado anteriormente. 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 4 pode ser encontrada a comparação da composição química da madeira de *P. greggii* com a madeira de *P. taeda*.

Tabela 4 – Comparação da composição química da madeira de diferentes espécies e idades.

Espécie	Idade	Teor de cinzas (%)	Teor de extrativos (%)	Teor de lignina (%)	Teor de 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> O autor (2020); <sup>2</sup> ANDRADE (2006); <sup>3</sup> BASSA (2006); <sup>4</sup> VASCONCELOS (2005); <sup>5</sup> KLOCK (2000).

De acordo com Fengel e Wegener (1984) citado por Balloni (2009), o teor de cinzas na madeira de coníferas está na faixa de 0,10 a 1%, já o valor para os extrativos está na faixa de 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*.

O teor médio de extrativos da madeira de *P. greggii* (6,25%) é superior aos valores de 4,50% obtido por Vasconcelos (2005), 3,03% observado por Klock (2000), 2,37% avaliado por Bassa (2006), e de 2,15% de 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), os extrativos 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, entretanto, o alto teor de extrativos da madeira de *P. greggii* pode ser um indicativo da qualidade da madeira desta espécie para atividade de resinagem, o que precisa ser comprovado em estudos com esta temática.

A quantidade de lignina encontrada para o *P. greggii* (34,83%) é próximo ao valor de 31,18% obtido por Bassa (2006) para o *P. taeda*. Simão (2011) obteve para a madeira de *P. greggii* um valor de 28,8% de lignina, inferior ao valor encontrado no presente estudo. Andrade (2006) e Klock (2000) encontraram valores de 28,87 e 28,76% de lignina para o *P. taeda*, respectivamente. Vasconcelos (2005) obteve um valor de 29,74% de lignina para árvores de *P. taeda* com 9 anos, o mesmo autor ainda afirma que o resultado da madeira avaliada na presente idade é típico do material comercializado no Brasil.

A holocelulose encontrada para o *P. greggii* (58,92%) é considerada baixa, comparando com os valores citados para o *P. taeda* na literatura (Tabela 4), 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.

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que a madeira de *P. greggii* com 7 anos apresenta:

- Densidade básica média e ponderada de 0,346 e 0,343 g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente, sendo considerada como leve ou de baixa densidade, entretanto, seus valores estão próximos aos encontrados na literatura para as espécies do gênero *Pinus* com idade semelhante. A densidade não apresentou variação significativa ao longo do fuste das árvores.

- Traqueídeos com dimensões médias de 2,31 mm para o comprimento, 41,30 µm de largura, 34,81 µm de diâmetro do lúmen, e 3,25 µm de espessura da parede celular. Os valores obtidos apresentaram semelhanças com outras espécies de *Pinus* na mesma faixa de idade. As dimensões dos traqueídeos apresentaram variações significativas ao longo do sentido radial, com tendência de aumento (medula-casca).

- Bons indicadores de qualidade para produção de polpa celulósica, sendo considerados ótimos para a fração parede (15,96%), para o coeficiente de flexibilidade (84,31%), e para o índice de Runkel (0,19), e bom para o índice de enfiamento (55,15). Os valores diferiram dos citados para *P. taeda*, bem como variam de forma significativa no sentido radial, comprovando a adequação da espécie para finalidade de polpa e papel na idade considerada.

- Baixo teor de cinzas (0,20%), alto teor de extrativos e lignina (6,25% e 34,83%, respectivamente), e baixo teor de holocelulose (58,92%), sendo que tais características podem aumentar o consumo de reagentes e diminuir o rendimento do processo de polpação, o que precisa ser comprovado, através da realização do processo de polpação propriamente dito.

A madeira de *P. greggii* apresenta potencial para a produção de polpa celulósica, destacando-se os indicadores 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 gênero *Pinus* 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 a mesma ainda apresenta margem para ser aprimorada para esta finalidade.

## 6 RECOMENDAÇÕES

A madeira de *P. greggii* apresentou bons indicadores para produção de polpa celulósica com madeira de 7 anos, assim recomenda-se realizar mais estudos com árvores com idades superiores e de outras procedências.

Realizar o processo de polpação e a produção de papel, para confirmar se os indicadores refletem a aptidão da madeira de *P. greggii* para produção de polpa celulósica e papel.

Para abranger o potencial o uso do *P. greggii*, recomenda-se efetuar análises mecânicas da madeira, bem como de sua estabilidade dimensional, além da realização de estudos sobre a aptidão da espécie para produção de resina e carvão vegetal, em função do alto teor de extrativos e lignina identificado.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11941**: Determinação da densidade básica em madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A., FRITZSONS, E.; PINTO JR., J. E. Programa de melhoramento de *Pinus* da Embrapa Florestas. **Documento 233**. Colombo: Embrapa Florestas, Paraná, 2011. 83 p.
- ANDRADE, A. S. **Qualidade da madeira, celulose e papel em *Pinus taeda* L.: influência da idade e da classe de produtividade**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- BALLONI, C. J. V. **Caracterização Física e Química da Madeira de *Pinus elliottii***. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Itapeva, 2009.
- BASSA, A. G. M. C. **Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft através do processo Lo-Solids**. 2006. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.
- BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. sob o efeito do espaçamento e da fertilização**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.
- BITTENCOURT; E. **Parâmetros de otimização no processo de fabricação de celulose e papel**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- BORSATO, R.; **Varição genética em *Pinus greggii* Engelm. e seu potencial para reflorestamento no Sul do Brasil**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.
- BRAND, M. A.; KRAMBECK, L. B. P.; SIMÃO, R. L.; SIMIONI, F. J.; SANQUETTA, C.R.; SASSO, J. G. Ensaio Experimental de espécies do gênero *Pinus* na avaliação das propriedades mecânicas da madeira. *In*: III Encontro de Ciência e Tecnologia, 2004, Lages. **Anais [...]**. Lages: Universidade do Planalto Catarinense, 2004. p. 2-6.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.
- COELHO, U. M. **Avaliação tecnológica da madeira de *Pinus maximinoi* visando sua utilização industrial na produção de celulose kraft**. 2017. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- CASTELO, P. A. R. **Avaliação da qualidade da madeira de *Pinus taeda* em diferentes sítios e espaçamentos através do método não destrutivo de ondas de tensão**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 102-113, 2004.

DIAS, O. A.; SIMONELLI, G. Qualidade da madeira para a produção de celulose e papel. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 3632-3646, 2013.

DOBNER JR., M; HUSS, J.; TOMAZELLO FILHO, M. Wood density of loblolly pine trees as affected by crown thinning and harvest age in southern Brazil. **Wood Science and Technology**, New York, v. 52, n. 2, p. 465-485, jan. 2018. DOI: 10.1007/s00226-017-0983-9

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Atlas climático da Região Sul do Brasil:** Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas, Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012. 333 p.

FISCHER, A. O fomento na indústria de base florestal. **Informe Gepec**, Toledo, v. 13, n. 2, p. 6-19, jul./dez. 2009.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, n. 2/3, p. 65-74, 1971.

FREDDO, A. *et al.* Elementos minerais em madeiras de Eucaliptos e Acácia Negra e sua influência na indústria de celulose Kraft branqueada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 193-209, jan. 1999.

GOMES, A. de F. **Avaliação das características da madeira e da polpa de *Eucalyptus* mediante aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

GOMES, F. A. **Avaliação dos processos Kraft convencional e Lo-Solids para madeira de *Pinus taeda*.** 2009. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

HASSEGAWA, M. **Qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. de procedência da África do Sul.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

HECKLER, C.; SANSÍGOLO, C. A.; MANENTE, F. G.; BASSO, S. Densidade básica da madeira de *Cecropia* sp (EMBAÚBA) e sua influência na produção de celulose Kraft. **Revista científica eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 23, n. 1, p.11-19, fev. 2014.

HENNESSEY, T. C.; DOUGHERTY, P. M.; LYNCH, T. B.; WITTWER, R. F.; LORENZI, E. M. Long-term growth and ecophysiological responses of a southeastern Oklahoma loblolly pine plantation to early rotation thinning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 97-116, abr. 2004. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.01.008

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual IBÁ 2019 ano base 2018**. São Paulo: IBÁ, 2019. 80 p.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. 2000. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 3ª edição revisada. Curitiba: UFPR, 2005. 86 p.

LOPES, O. R. **Influência dos extrativos e da relação cerne / alborno nas análises da madeira por espectrometria de infravermelho próximo para produção de celulose**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

NISGOSKI, S. **Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

NISGOSKI, S.; MULLER, B. V.; MUNIZ, G. I. B.; CUNHA, A. B.; OLIVEIRA, J. R.; ANDREOLLA, V. R. M. Variação Dimensional dos traqueóides axiais ao longo do fuste de *Sequoia sempervirens* Endl (Lamb.). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 16, n. 4, out./dez., p. 510-515, 2017.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; REZENDE, M. A.; NASCIMENTO, A. M.; SEVERO, E. T. D.; ABREU, H. S. 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**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 50- 51, 2003.

ROSA, C. A. B. **Influência do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus globulus* na produção e na qualidade da celulose kraft**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SANTOS, S. R. dos. **Influência da qualidade de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do processo Kraft de polpação na qualidade da polpa branqueada**. 2005. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2005.

SILVÉRIO, F. O. **Caracterização de extrativos de madeira de *Eucalyptus* e depósitos de pitch envolvidos na fabricação de celulose e papel**. 2008. Tese (Doutorado em Ciência Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 2008.

SIMÃO, L. R. **Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo das propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. e *Pinus greggii* Engelm.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.



SHIMIZU, J. Y. Espécies de *Pinus* na silvicultura brasileira. In: SHIMIZU, J. Y. (ed.). **Pínus na silvicultura brasileira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p. 66-67.

TASSISSA, G.; BURKHART, H. E.; BROOKS, T. M. Juvenile-mature wood demarcation in loblolly pine trees. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 30, p. 119-127, abr. 1998.

VASCONCELOS, F. S. R. **Avaliação do processo SuperBatch™ de polpação de *Pinus taeda***. 2005. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2005.

VASQUES, A. G.; NOGUEIRA, A. S.; KIRCHNER, F. F.; BERGER, R. Uma síntese da contribuição do gênero *Pinus* para o desenvolvimento sustentável no Sul do Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 3, p. 445-450, set./dez. 2007.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p.

VIVIAN, M. A. *et al.* Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica kraft. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 48, n. 105, p.183-191, mar. 2015.

VIVIAN, M. A. **Aumento da eficiência do processo kraft de polpação a partir de pré-tratamento de cavacos de madeira de eucalipto**. 2015. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. p. 111-112.

## ANEXO A – Determinação do teor de extrativos totais e lignina da madeira

FONTE: VIVAN, 2015.

### *Extrativos Totais*

1. Pesar o equivalente a 1g absolutamente seco (a.s.) de serragem e transferir para saquinho de papel filtro;
2. Colocar a amostra no corpo do extrator;
3. Fazer a extração com álcool:tolueno (1:2) e álcool 96 ° GL, durante 8 horas em cada solvente, deixando secar ao ar após cada extração;
4. Ligar o banho-maria e mantê-lo em ebulição;
5. Transferir toda a serragem do saquinho para erlenmeyer de 250 mL;
6. Adicionar 100 mL de água destilada e colocar o erlenmeyer no banho-maria (que já deverá estar fervendo) e cobri-lo;
7. Agitar suavemente a cada 15 minutos;
8. Após uma hora filtrar através de cadinho de vidro sinterizado tarado, transferindo toda a serragem do erlenmeyer para o cadinho;
9. Lavar o cadinho com 250 mL de água quente;
10. Levar o cadinho à estufa a  $103 \pm 2$  °C até peso constante;
11. Pesar o cadinho seco;
12. Calcular o teor de “Extrativos Totais” através da fórmula:

$$E.T.(%) = (1 - \text{massa a.s. serragem}) \times 100$$

Em que: Massa a.s. serragem: massa de serragem seca já descontando a tara do cadinho, em g.

### *Lignina*

13. Pesar 300 mg da serragem livre de extrativos seca e transferir para erlenmeyer de 250 mL;
14. Adicionar 3 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 72 % resfriado a 10 – 12 °C;
15. Manter em banho-maria a  $30 \pm 2$  °C durante 1 hora, misturando frequentemente com auxílio de bastonete;

16. Retirar do banho-maria e adicionar 84 mL de água destilada quente, transformando o  $\text{H}_2\text{SO}_4$  72 % em  $\text{H}_2\text{SO}_4$  3 %;
17. Colocar o erlenmeyer em autoclave, devidamente vedado com papel alumínio, a  $118\text{ }^\circ\text{C}$  (27 psi) durante 60 minutos;
18. Filtrar através de cadinho sinterizado tarado, fazendo um fundo com papel de filtro, e transferir toda a lignina do erlenmeyer para o cadinho;
19. Lavar com 700 mL de água quente;
20. Levar o cadinho à estufa a  $103 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  até peso constante;
21. Pesar o cadinho seco;
22. Calcular o teor de lignina residual (L.R.) através da fórmula:

$$\text{L.R.(\%)} = \left( \frac{\text{Massa a.s. final}}{\frac{0,3}{1 - \frac{\text{E.T.}}{100}}} \right) \times 100$$

Em que: Massa a.s. final: massa de lignina seca já descontando a tara do cadinho, em g.

23. Transferir o filtrado obtido nos itens 18 e 19 para balão volumétrico de 1000 mL, completando o volume com água destilada;
24. Preparar prova em branco, diluindo 3 mL de ácido sulfúrico 72 % para 1000 mL;
25. Utilizando cubeta de quartzo e a prova em branco, ajustar o espectrofotômetro em 0 de absorbância no comprimento de onda 215 nm e 280 nm;
26. Prosseguir com a leitura dos filtrados
27. Calcular os teores de lignina solúvel (L.S.) e lignina total (L.T.) através das fórmulas:

$$\text{L.S.(\%)} = \left[ \frac{4.53 \times L_{215} - L_{280}}{300 \times \left( \frac{0,3}{1 - \frac{\text{E.T.}}{100}} \right)} \right] \times 100 \qquad \text{L.T.(\%)} = \text{L.R.(\%)} + \text{L.S.(\%)}$$