

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

Scheila Terezinha da Silva Paes

**Qualidade da madeira de *Populus deltoides* para a produção de celulose de fibra curta**

Curitibanos, SC

2023

Scheila Terezinha da Silva Paes

**Qualidade da madeira de *Populus deltoides* para a produção de celulose de fibra curta**

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

Curitibanos, SC

2023

Ficha de identificação da obra

Paes, Scheila Terezinha da Silva  
Qualidade da madeira de *Populus deltoides* para a  
produção de celulose de fibra curta / Scheila Terezinha da  
Silva Paes ; orientador, Magnos Alan Vivian, 2023.  
53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus  
Curitibanos, Graduação em Engenharia Florestal,  
Curitibanos, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Florestal. 2. Álamo Americano. 3.  
Composição química. 4. Densidade básica. 5. Caracterização  
morfológica. I. Vivian, Magnos Alan. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia  
Florestal. III. Título.

Scheila Terezinha da Silva Paes

**Qualidade da madeira de *Populus deltoides* para a produção de celulose de fibra curta**

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

Curitiba, 17 de novembro de 2023

---

Prof. Dr. Marcelo Bonazza  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

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

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Karina Soares Modes  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Vinicius Costa Cysneiros  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à Deus e a minha família.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por me guiar na jornada da vida.

À minha família e ao meu namorado por ser minha rede de apoio para qualquer situação, por se fazer presente em todos os momentos e por acreditar no meu potencial.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por fazer parte da minha vida pessoal e profissional, bem como, permitir que alunos de classes sociais baixas e todas as etnias, também possam sonhar com uma educação de qualidade.

Às minhas amigas Gabriela Moraes da Silva e Vitoria Cozer pela amizade e companheirismo ao longo de todo o curso.

Ao professor Magnos Alan Vivian pela orientação, ensinamentos e apoio ao longo do curso, tal como, para a realização deste trabalho.

A todos os professores do curso de Engenharia Florestal da UFSC que contribuíram de forma significativa para a minha formação. Também agradeço ao professor Francides e ao Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE), da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo (USP), pela realização das análises químicas.

À todas as pessoas que de alguma maneira fizeram parte da minha caminhada até aqui e contribuíram para a realização deste sonho.

Sem vocês nada disso seria possível.

De todo coração, muito obrigada!

## RESUMO

A produção de polpa celulósica do segmento de fibras curtas do Brasil está concentrada na utilização de espécies/híbridos do gênero *Eucalyptus*. Portanto, estudos com novas espécies que possam vir complementar e serem novas alternativas ao segmento são essenciais. Desta forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar as propriedades físico-químicas e anatômicas da madeira de *Populus deltoides*, aos 8 anos de idade, visando a produção de celulose de fibra curta. Para isso, utilizou-se 5 árvores da espécie, das quais foram retirados discos, para avaliação da morfologia das fibras (dimensões e indicadores anatômicos de qualidade para produção de papel), densidade (básica e verde) e composição química (teores de cinzas, extrativos, lignina e holocelulose). Com relação a morfologia das fibras a espécie apresentou valores médios de 1,20 mm, 30,65; 22,43 e 4,11  $\mu\text{m}$  para as dimensões de comprimento, largura, diâmetro do lúmen e espessura da parede celular, respectivamente, sendo classificadas como largas, espessas e de comprimento médio. Os indicadores anatômicos obtidos, tais como, fração parede (27,28%), coeficiente de flexibilidade (72,72%) e índice de Runkel (0,39), indicam boa qualidade para a produção de celulose e papel, com exceção do índice de enfiamento (39,06), o qual foi considerado inferior ao mínimo recomendado. Levando em consideração as densidades básica (0,289  $\text{g/cm}^3$ ) e verde (0,893  $\text{g/cm}^3$ ) observadas, a espécie pode ser classificada como madeira leve ou de baixa densidade. Em relação à composição química, observaram-se teores de lignina (27,00%) e holocelulose (67,54%) similares aos valores encontrados para espécies de *Eucalyptus*, amplamente utilizadas para a fabricação de polpa celulósica no Brasil. Apenas os teores de extrativos (5,46%) e cinzas (0,66%) foram acima do normalmente relatado para espécies utilizadas para produção de papel. Conclui-se, a partir da avaliação das propriedades da madeira de *Populus deltoides*, que a espécie apresenta potencial para ser utilizada na produção de polpa celulósica de fibras curtas, com boas dimensões e indicadores de qualidade das fibras, teores de holocelulose e lignina similares as espécies hoje empregadas, como é o caso do *Eucalyptus*. Os únicos pontos negativos, e que devem ser melhores avaliados são a baixa densidade básica, bem como os elevados teores de extrativos e cinzas.

**Palavras-chave:** Álamo Americano. Densidade básica. Composição química. Caracterização morfológica. Polpa celulósica.

## ABSTRACT

The pulp production in the short fiber segment in Brazil is concentrated on the use of species/hybrids of the Eucalyptus genus. In view of this, studies with new species that may complement and be new alternatives to the segment are essential. Therefore, the objective of the present study was to evaluate the physical-chemical and anatomical properties of *Populus deltoides* wood at 8 years old, aiming at the production of short fiber pulp. To this end, 5 trees of the species were used, from which discs were removed, to evaluate the fibers morphology (dimensions and anatomical indicators of quality for paper production), density (basic and green) and chemical composition (ash, extractives, lignin and holocellulose content). Regarding fiber morphology, the species presented average values of 1.20 mm, 30.65; 22.43 and 4.11  $\mu\text{m}$  for the dimensions of length, width, lumen diameter and cell wall thickness, respectively, being classified as wide, thick and medium length. The anatomical indicators obtained, such as wall fraction (27.28%), flexibility coefficient (72.72%) and Runkel index (0.39), indicate good quality for the pulp production and paper, with the exception of and felting index (39.06), which was considered below the recommended minimum. Taking into account the basic (0.289  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) and green (0.893  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) densities observed, the species can be classified as light or low-density wood. Regarding chemical composition, lignin (27.00%) and holocellulose (67.54%) contents were observed similar to the values found for Eucalyptus species, widely used for the manufacture of pulp in Brazil. Only the extractives (5.46%) and ash (0.66%) levels were above those normally reported for species used for paper production. It is concluded, based on the evaluation of the properties of *Populus deltoides* wood, that the species has the potential to be used in the production of short fiber pulp, with good dimensions and fiber quality indicators, holocellulose and lignin contents similar to species currently used, such as Eucalyptus. The only negative points, which should be better evaluated, are the low basic density, as well as the high levels of extractives and ash.

**Key words:** Eastern cottonwood. Basic density. Chemical composition. Morphological characterization, cellulosic pulp.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Confecção das baquetas: A) Delimitação da baqueta no sentido medula-casca, onde os números 1, 2 e 3 representam a porção de 0, 50 e 100%, respectivamente; B) Fragmentos confeccionados a partir das baquetas e usados na maceração. ....	25
Figura 2 – Maceração das fibras: A) Amostras já imersas na solução de maceração e em banho maria; B) Amostras após o processo de maceração, prontas para montagem das laminas temporárias. ....	25
Figura 3 – Imagens capturadas para mensuração: A) Imagem com aumento de 40x para mensuração do comprimento; B) Imagem com aumento de 400x para mensuração da largura e diâmetro do lúmen. ....	26
Figura 4 – Determinação da densidade: A) Cunhas opostas após a completa saturação; B) Determinação da massa verde; C) Determinação do volume verde. ....	27
Figura 5 – Classificação da amostra composta para análise química: A) Peneira classificatória; B) Fração entre 40 e 60 mesh classificada. ....	28
Figura 6 – Variação das dimensões das fibras da madeira de <i>P. deltoides</i> : (A) Comprimento; (B) Largura; (C) Diâmetro do lúmen; (D) Espessura da parede. ....	30
Figura 7 – Variação dos parâmetros indicadores da qualidade da madeira de <i>P. deltoides</i> : (A) fração parede; (b) coeficiente de flexibilidade; (C) índice de Runkel; (D) índice de enfeltramento. ....	33
Figura 8 – Densidade verde e básica da madeira de <i>P. deltoides</i> aos 8 anos de idade. ....	36
Figura 9 – Composição química da madeira de <i>P. deltoides</i> aos 8 anos de idade. ....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das dimensões das fibras da madeira do gênero <i>Populus</i> com outras espécies do gênero <i>Eucalyptus</i> . .....	31
Tabela 2 – Comparação dos indicadores anatômicos de qualidade da madeira do gênero <i>Populus</i> com outras espécies do gênero <i>Eucalyptus</i> .....	34
Tabela 3 – Comparação da densidade básica da madeira do gênero <i>Populus</i> com outras espécies do gênero <i>Eucalyptus</i> . .....	37
Tabela 4 – Comparação da composição química da madeira do gênero <i>Populus</i> com outras espécies do gênero <i>Eucalyptus</i> . .....	40

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

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

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

IAWA – International Association of Wood Anatomists

LQCE – Laboratório de Química, Celulose e Energia

SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura

TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USDA – United States Department of Agriculture

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</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	SETOR DE CELULOSE E PAPEL.....	15
2.2	<i>Populus deltoides</i> Marsh. ....	16
2.3	PROPRIEDADES DA MADEIRA QUE AFETAM NA POLPAÇÃO .....	19
2.3.1	Anatomia e morfologia das fibras.....	19
2.3.2	Densidade básica da madeira .....	20
2.3.3	Composição química da madeira.....	21
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
3.1	COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS .....	24
3.2	MORFOLOGIA DAS FIBRAS E INDICADORES ANATÔMICOS .....	24
3.3	DENSIDADE BÁSICA E VERDE.....	26
3.4	COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....	27
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>30</b>
4.1	MORFOLOGIA DAS FIBRAS E INDICADORES ANATÔMICOS .....	30
4.2	DENSIDADE BÁSICA E VERDE.....	36
4.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....	39
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>44</b>
	<b>ANEXO A – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE LIGNINA</b> .....	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o setor de árvores cultivadas está entre as principais atividades que são responsáveis por compor a economia brasileira, gerando emprego, renda e capital para o país, contribuindo expressivamente para formação do PIB nacional (IBÁ, 2023). Inserida na cadeia produtiva do setor de florestas plantadas está presente a indústria de transformação de produtos de base florestal, da qual faz parte a indústria de celulose e papel, sendo esta responsável por contribuir com valores expressivos para a balança comercial do setor, destacando a grande relevância de tal segmento industrial para a economia brasileira.

A produção brasileira de polpa celulósica é expressiva no mercado internacional, fazendo com que, no ano de 2022, o Brasil ocupasse o lugar de principal país exportador de celulose no mundo, tendo como principais destinos China (40%) e Europa (30%), além de estar em segundo lugar no ranking mundial dos maiores produtores de celulose (IBÁ, 2023). Com relação a produção de papel, o Brasil também está entre os maiores produtores, ocupando a nona colocação, sendo destinada principalmente aos países da América do Sul, além do mercado interno (IBÁ, 2023). Conforme dados da IBÁ (2023) o aumento na produção de celulose destaca-se a cada ano, confirmando que a indústria de celulose e papel está em constante expansão no Brasil.

Os dados supracitados demonstram a importância do mercado de celulose e papel brasileiro, tanto internamente quanto externamente, com tais resultados sendo possíveis de serem alcançados devido aos altos investimentos em pesquisas ao longo dos anos, com o objetivo de atingir melhorias tanto nos processos industriais, quanto na obtenção de matéria-prima de qualidade. Sendo esta última focada nos gêneros *Eucalyptus*, destinado para o segmento de “fibras curtas”, e o *Pinus* para o segmento de “fibras longas”, sempre buscando a obtenção de um processo industrial com baixo custo, alto rendimento e alta qualidade das polpas produzidas.

Levando em consideração a importância do setor de celulose e papel para o Brasil, dado sua dimensão e alta demanda por matéria-prima, torna-se arriscado apoiar-se apenas em poucas espécies para o fornecimento desta, visto que as mesmas estão sujeitas a serem afetadas por pragas ou doenças específicas, prejudicando a disponibilidade ao processo industrial. Além disso, há a competição por matéria-prima com outros segmentos da cadeia

produtiva do setor de florestas plantadas, como lenha, madeira serrada, chapas, carvão vegetal, etc. Diante deste cenário surge a importância da busca por matérias-primas que apresentem características favoráveis a fabricação de polpa celulósica e que sejam capazes de suprir a demanda do setor, justificando assim, o investimento em pesquisas desenvolvidas com o objetivo de avaliar a qualidade de outras espécies fibrosas potenciais, além do *Pinus* e *Eucalyptus*.

Dentre tais espécies, pode-se citar o *Populus deltoides* Marsh., conhecido popularmente como álamo americano, o qual pertence à família Salicaceae (MEDEIROS; HOPPE, 2002; LAU, 2017), originário dos EUA e Canadá (USDA, 2014), onde apresenta grande interesse econômico. A espécie em questão é considerada de grande porte e rápido crescimento (WHITE, 2017), com tronco ereto e cilíndrico (LORENZI *et al.*, 2003), boa resistência a doenças (CAO; CONNER, 1999), além de alta adaptabilidade a diferentes tipos de solo (MEDEIROS; HOPPE, 2002). A espécie foi introduzida no Brasil no início do século XX (LAU, 2017), entretanto, a partir de 1991, que deram-se início a plantios da mesma em escala comercial, destinada a indústria, usada principalmente para produção de caixotaria, laminados e confecção de palitos de fósforos, além de fins paisagísticos (SBS, 2006).

Neste sentido, como a espécie apresenta potencial de crescimento e boa adaptação, estudos sobre as características de sua madeira, são de suma importância, visto que há poucos estudos na literatura brasileira a respeito da espécie. Dentre as características da madeira que afetam no processo de polpação tem-se as propriedades físicas, químicas e anatômicas, as quais ditam como a madeira irá se comportar durante o processo de polpação, relacionando-se ao consumo específico de matéria-prima, consumo de reagentes, tempo de cozimento, teor de rejeitos, qualidade da polpa, entre outros aspectos envolvidos no processo de polpação. Assim, estudos avaliando estas propriedades são extremamente relevantes, pois por meio destes é possível apurar o real potencial de uma determinada espécie para produção de celulose e papel.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades físico-químicas e anatômicas da madeira de *Populus deltoides* aos 8 anos de idade, visando a produção de celulose de fibra curta.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar a morfologia das fibras da madeira e sua variação radial (medula-casca);
- Determinar os indicadores anatômicos de qualidade da polpa celulósica e papel;
- Determinar a densidade básica e verde da madeira;
- Determinar a composição química da madeira.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 SETOR DE CELULOSE E PAPEL

O período de pandemia pelo qual o mundo passou entre os anos de 2020 e 2022, trouxe diversas dificuldades para países do mundo inteiro e afetou a vida das pessoas de diversas formas, tanto no âmbito familiar quanto financeiro, período pelo qual diversos segmentos que são responsáveis por compor as atividades econômicas brasileira foram afetados. Neste período de acordo com o relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2022; IBÁ, 2023), a cadeia produtiva de árvores plantadas manteve-se resistente, batendo recorde durante os anos de pandemia e, principalmente, no período pós-pandêmico onde houve diminuição das restrições relacionadas ao momento. No ano de 2022 o setor obteve uma receita bruta de R\$ 260,0 bilhões, sendo este total responsável por representar 1,3% do PIB nacional (IBÁ, 2023), certificando a importância do setor para o Brasil.

Atualmente, o Brasil possui 9,94 milhões de hectares de florestas plantadas, dos quais 76% (7,6 milhões de hectares) são representados pelo cultivo de Eucalyptus, 19% (1,90 milhões de hectares) pelo cultivo de Pinus e 5,0% cultivados com outras espécies, sendo estas, seringueira, acácia e teca (IBÁ, 2023). As áreas cultivadas com Eucalyptus estão concentradas principalmente nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo, enquanto que as áreas cultivadas com Pinus ocorrem nos estados de Paraná e Santa Catarina (IBÁ, 2023).

A cadeia produtiva do setor de árvores cultivadas é responsável pela fabricação de produtos de madeira, celulose, papel, painéis reconstituídos, pisos laminados, além de carvão vegetal, os quais são responsáveis por gerar renda e empregos para o país. No ano de 2022 a balança comercial do setor de árvores plantadas foi de US\$ 13,2 bilhões, sendo tal valor resultado tanto de importações, que representaram US\$ 1,1 bilhão, quanto de exportações, as quais foram responsáveis por representar US\$ 14,3 bilhões (IBÁ, 2023). É importante ressaltar que o produto que mais se destaca dentro das exportações é a celulose, a qual contribuiu com US\$ 8,4 bilhões do total de exportações (IBÁ, 2023).

O Brasil continua como uma das referências mundiais na produção de celulose, ocupando no ano de 2022 a posição de maior exportador e segundo maior produtor de celulose no ranking mundial (IBÁ, 2023). Tais dados crescem a cada ano, confirmando que o

setor está em constante expansão, tornando-se cada vez mais importante para a economia brasileira, além de salientar a importância do produto no contexto mundial (NASCIMENTO; CAMPOS, 2021).

Os principais destinos da exportação de celulose produzida pela indústria brasileira são China (40%) e Europa (30%), salientando que a China ocupa o lugar de principal importador de celulose proveniente do Brasil desde 2004 (IBÁ, 2023; NASCIMENTO; CAMPOS, 2021). Ainda de acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2023), no ano de 2022 foram produzidos um total de 25 milhões de toneladas de celulose, desse total 21,9 milhões foram provenientes de celulose de fibra curta, 2,5 milhões de fibra longa, sendo estas duas produzidas a partir de espécies de *Eucalyptus* e *Pinus*, respectivamente, além de 0,6 milhões provenientes de pastas de alto rendimento.

Com relação ao papel, o principal produto produzido a partir da celulose, o Brasil está na nona colocação entre os maiores produtores do mundo. A produção de papéis subiu 3,5% em 2022, em relação ao ano anterior, alcançando 11,0 milhões de toneladas, sendo os papéis de embalagens o principal responsável por causar tal aumento na produção, o qual somou 6,1 milhões de toneladas, ou seja, um aumento na produção de 7% (IBÁ, 2023). O mercado interno é o principal consumidor do produto, com 77,2% da produção sendo comercializada dentro do país e 22,8% destinados à exportação, tendo como destino alguns países da América do Sul e América do Norte (IBÁ, 2023).

## 2.2 *Populus deltoides* Marsh.

O *Populus deltoides*, popularmente conhecido como álamo americano, álamo do Canadá, choupo ou *cottonwood*, como é chamado nos EUA, pertence à família Salicaceae e ao gênero *Populus* (LAU, 2017; WHITE, 2017). De acordo com Medeiros e Hoppe (2002) o *Populus deltoides* é o indivíduo arbóreo mais importante do ponto de vista econômico, entre as espécies que representam o gênero *Populus* (MEDEIROS; HOPPE, 2002; LAU, 2017; WHITE, 2017).

O gênero *Populus* é originário do Hemisfério Norte, no entanto a ocorrência natural da espécie *P. deltoides* restringe-se aos Estados Unidos, onde ocorre amplamente nas regiões

sul, nordeste, centro oeste e em alguns locais da região oeste do país, e ao Canadá, ocorrendo nas regiões sudeste e sudoeste do mesmo (USDA, 2014; WHITE, 2017).

*P. deltooides* é uma espécie dióica, a qual possui flores unissexuadas separadas em plantas diferentes, sendo uma masculina e outra feminina, e assim como em outros representantes das Salicáceas, o perianto é insignificante ou mesmo ausente, sendo esta a principal característica dos representantes da família (MEDEIROS; HOPPE, 2002; USDA, 2021). As inflorescências masculinas da espécie são grandes e avermelhadas, enquanto que as femininas são pendentes e de coloração amarela-esverdeada, as quais são produzidas pela planta após a passagem do estágio juvenil para o estágio adulto, onde a mesma entra em estágio reprodutivo que ocorre entre 7 e 10 anos para a espécie (HSU *et al.*, 2006; USDA, 2021).

Com relação às sementes, segundo Medeiros e Hoppe (2002) e White (2017), a espécie é caracterizada pela produção de grandes quantidades, que geralmente são dispersas a longas distâncias pelo vento ou pela água. Ainda de acordo com os mesmos autores, as sementes possuem uma taxa de germinação entre 60 e 90%, embora o índice seja alto, o principal modo de reprodução usado para a espécie, quando o objetivo é o plantio comercial, é a propagação vegetativa via estaquia. Isto, devido ao rápido crescimento que a espécie expressa quando propagada vegetativamente. A planta também é considerada de alta diversidade genética e heterozigidade, hibridizando-se com frequência (HARLOW; HARRAR, 1967 *apud* MEDEIROS; HOPPE 2002; WHITE, 2017).

De acordo com Lorenzi *et al.* (2003), o *P. deltooides* é uma espécie caducifólia, cuja característica é a perda das folhas durante alguma estação do ano, geralmente no inverno. É também considerado de rápido crescimento e de grande porte, podendo alcançar até 30 m de altura e 120 cm de diâmetro a altura do peito (DAP), desde que inserido em ambientes com condições favoráveis ao seu desenvolvimento (MEDEIROS; HOPPE, 2002; WHITE, 2017). As raízes da espécie são profundas e de boa adaptabilidade a diferentes tipos de solo, tolerando desde um solo seco até um solo úmido, e um pH desde muito baixo a levemente alto. A boa capacidade da espécie de resistir a ambientes secos dá-se principalmente ao baixo potencial osmótico e redução da capacidade osmótica que a planta possui (MEDEIROS; HOPPE, 2002; ABRAHAM *et al.*, 2018).

O indivíduo arbóreo possui o tronco ereto e cilíndrico, sendo este de casca rugosa, cor parda e profundas fissuras longitudinais, quando adulto (LORENZI *et al.*, 2003, p. 336). A madeira possui o cerne de coloração que varia do amarelo claro ao castanho e albúneo esbranquiçado, o qual se funde gradativamente com o cerne (USDA, 2021). Nos EUA a espécie pode atingir até 58 m de altura, 180 cm de DAP e um Incremento Médio Anual em volume sólido com casca entre 20 e 40 m<sup>3</sup>/ha/ano (CARVALHO, 1998).

Sendo assim, características como rápido crescimento, rápida colheita, a facilidade na propagação vegetativa, qualidade da madeira, e resistência a doenças, fazem com que o álamo seja uma das principais espécies florestais para obtenção de madeira e celulose em países como China, EUA e Canadá, onde apresenta grande interesse econômico (LITTLE, 1979; CAO; CONNER, 1999).

Já no Brasil a espécie foi introduzida entre os anos de 1905 e 1910, nos municípios de Curitiba, no estado do Paraná, e Caieiras em São Paulo (LAU, 2017). Posteriormente, no ano de 1959, houve uma tentativa de introduzir clones provenientes da Argentina e Itália, entretanto, estes não se adaptaram às condições climáticas do Brasil, e apenas a partir de 1980 passou-se a introduzir-se clones mais adaptados às condições edafoclimáticas do país, que resultaram em um bom crescimento da espécie, e aumentando o interesse em plantios comerciais destinados à indústria a partir de 1991, onde os primeiros viveiros para produção de mudas da espécie foram instalados (MIO; AMORIM, 2000; SBS, 2006; JAVARINI, 2011).

Segundo Lorenzi *et al.* (2003), no Brasil a espécie é cultivada principalmente nas regiões do Planalto do Sul do país, onde é destinada sobretudo à produção de caixotaria, laminados e confecção de palitos de fósforos, além de fins paisagísticos. Além de tais usos, a espécie também pode ser destinada para produção de celulose, vigas, mourões, móveis, objetos, matéria-prima para produção de biomassa (LITTLE, 1979; MEDEIROS; HOPPE, 2002; ABRAHAM *et al.*, 2018).

## 2.3 PROPRIEDADES DA MADEIRA QUE AFETAM NA POLPAÇÃO

### 2.3.1 Anatomia e morfologia das fibras

Os estudos anatômicos permitem obter, além da identificação de espécies, informações sobre a estrutura do lenho, o que possibilita identificar as relações entre o lenho e outras características da madeira, como por exemplo, no que se refere a resistência mecânica, permeabilidade, resistência natural e trabalhabilidade (SILVA *et al.*, 2007). Sendo, deste modo, o conhecimento da estrutura anatômica da madeira, de grande importância, já que devido a sua correlação com outras propriedades físico-mecânicas, nos permite obter informações com relação a qualidade e empregabilidade da madeira (PAULA, 2003).

A definição do potencial de uma espécie arbórea para a produção de celulose inicia-se a partir do estudo e da avaliação da estrutura anatômica da mesma, principalmente a partir da determinação da morfologia das fibras, a qual pode dar informações sobre o seu comportamento frente a produção de papel, sendo que estas influenciam de forma direta no grau de refino, na qualidade da polpa, além da resistência física e mecânica do produto final, ou seja, o papel (FAVARO, 2015; NERY *et al.*, 2018). Para Manhães (2011) a morfologia das fibras também é importante para a diferenciação entre polpas de fibras longas, originárias de espécies de coníferas, e polpas de fibras curtas, as quais são originárias das folhosas, que definem duas classes diferentes de *commodities*, dentro dos segmentos de polpas produzidas.

As propriedades do papel que será produzido a partir da polpa celulósica dependem amplamente das diversas fibras que irão compor o mesmo, sendo o comprimento e espessura das fibras, duas propriedades predominantemente importantes, para a característica estrutural do mesmo. Deste modo um comprimento mínimo é requerido para a interação entre as fibras, sendo este comprimento proporcional a resistência ao rasgo do papel (SMOOK, 1989 *apud* FAVARO, 2015).

As folhosas possuem o tecido básico de sustentação mecânica constituído por fibras, diferentemente das coníferas que possuem o mesmo constituído por traqueídeos (KLOCK *et al.*, 2005). As dimensões das fibras presentes nas madeiras de folhosas são menores, geralmente apresentando comprimento médio inferior a 1,5 mm, enquanto que em coníferas o

comprimento destas é maior, além de apresentarem paredes celulares mais espessas e menor diâmetro do lúmen (KLOCK *et al.*, 2005; MANHÃES, 2011).

A morfologia das fibras da madeira, como por exemplo, comprimento e largura, pode variar conforme a espécie, entre árvores da mesma espécie, e dentro da mesma árvore, os quais são diretamente influenciados pela idade cambial, sazonalidade, condições ambientais, fatores genéticos e idade de corte da árvore e diferentes práticas silviculturais, tendendo a aumentar no sentido medula-casca (SHIMOYAMA, 1990; MOREIRA, 1999).

As polpas Kraft de fibras longas possuem maior resistência do que as de fibras curtas, entretanto as polpas de fibras curtas conferem outras qualidades ao papel, tais como superfície mais lisa e opacidade, devido a este motivo, tem-se misturado estes dois tipos de polpa para a fabricação do papel, onde os percentuais das mesmas são definidos de acordo com o tipo de papel que planeja-se produzir (MANHÃES, 2011).

### **2.3.2 Densidade básica da madeira**

As propriedades físicas da madeira são de grande importância para a produção de celulose, sendo a densidade básica a que mais se destaca devido a outras características físico-mecânicas estarem relacionadas a ela, deste modo, atualmente a densidade básica é tida como referência para a avaliação da qualidade da madeira, além da classificação da empregabilidade da mesma (BARRICHELO; BRITO, 1979; MORESCHI, 2014). Na indústria de celulose e papel torna-se importante a determinação de tal parâmetro devido o mesmo influenciar de forma direta no rendimento do processo produtivo de celulose, como por exemplo, na agilidade de impregnação do licor de cozimento e no processo de branqueamento da celulose (BARRICHELO; BRITO, 1979; MORESCHI, 2014).

A densidade básica é a relação entre a massa seca e o volume verde/saturado da madeira, a qual pode ser representada pelas seguintes unidades de medidas:  $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{t/m}^3$  e  $\text{kg/m}^3$  (COELHO, 2021). Durlo (1991) afirma que a densidade básica da madeira é um reflexo primeiramente da espécie, mas também da condição de crescimento que a árvore está exposta, podendo deste modo, variar conforme o gênero, entre as espécies de um mesmo gênero, dentro da mesma espécie e até mesmo, entre diferentes partes da mesma árvore, sendo esta última, no sentido longitudinal (base-topo) e radial (medula-casca). De modo geral, madeiras

com maior densidade são mais resistentes, elásticas e mais duras do que as madeiras de baixa densidade, entretanto, as madeiras mais pesadas, são de difícil trabalhabilidade e de maior variabilidade quanto ao ganho ou perda de umidade (MORESCHI, 2014).

Apesar da densidade estar associada a várias características da madeira que influenciam na sua qualidade, como por exemplo, retratibilidade, secagem, trabalhabilidade, impregnabilidade, durabilidade natural, entre outras propriedades mecânicas da mesma, diversos autores asseguram que apenas tal parâmetro não indica de maneira direta e conclusiva valores das propriedades mecânicas da madeira, como dimensões das fibras, poder calorífico, composição química ou presença de defeitos internos (CHIMELO, 1980 *apud* SILVA *et al.*, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 1990; SILVA *et al.*, 2004). Deste modo, há a necessidade da avaliação conjunta de outros parâmetros além da densidade básica, já que a mesma quando analisada isoladamente não representa um parâmetro seguro para a decisão de um determinado uso da madeira (SILVA *et al.*, 2004).

Quanto a produção de celulose, de acordo com Silva *et al.* (2001), uma madeira adequada para tal finalidade deve ter uma densidade básica que varia entre 400 e 550 kg/m<sup>3</sup>, que de acordo com Durlo (1991), são classificadas como madeiras de peso leve a médio. Para Shimoyama (1990) e Silva *et al.* (2001) espécies que apresentam madeiras com densidade básica inferiores a 400 kg/m<sup>3</sup> podem ser prejudiciais ao processo de polpação de forma a reduzir a produtividade industrial, além da necessidade de consumo de um maior volume de madeira. Já madeiras com elevada densidade básica, apesar de ampliarem a capacidade do digestor elevando a produção na indústria, são responsáveis por tornar o processo de picagem mais difícil, causando o desgaste superior das facas do picador, além de levar a produção de cavacos com dimensões maiores o que dificulta a impregnação de reagentes nos mesmos, aumentando assim, o teor de rejeitos no processo de polpação (SHIMOYAMA, 1990; SILVA *et al.*, 2001).

### **2.3.3 Composição química da madeira**

A qualidade da madeira, assim como da polpa celulósica, sofre grande influência da composição química, sendo que a mesma afeta de forma direta no consumo de reagentes no digestor, no rendimento depurado e no teor de sólidos gerados (FOELKEL, 1977; GOMES,

2002). Deste modo tem-se a necessidade de compreender as características químicas da madeira, para o entendimento de estudos relacionados a processos de produção e branqueamento da celulose, com o objetivo de melhorar as propriedades do produto final obtido a partir da pasta celulósica, ou seja, o papel (FOELKEL, 1977; GOMES, 2002).

Para Klock *et al.* (2005), considerando madeiras de diversas espécies, não há grandes diferenças na composição química elementar da madeira, sendo o Carbono (49 a 50%), Hidrogênio (6%), Oxigênio (44 a 45%) e o Nitrogênio (0,1 a 1%), os principais elementos presentes na mesma. Em relação aos componentes químicos da madeira, de acordo com o mesmo autor, os mesmos são divididos em dois grandes grupos, sendo estes, componentes fundamentais e componentes acidentais.

Os componentes fundamentais são os tidos como a identidade da madeira, estando presentes na estrutura da madeira de todas as espécies, sendo estes a celulose, polioses ou hemiceluloses, e a lignina, onde as proporções e a composição química da lignina e das polioses são diferentes em espécies de coníferas e folhosas e a celulose é um componente uniforme na madeira (KLOCK *et al.*, 2005; DEMUNER, 2011). Já os componentes acidentais ou minoritários são os compostos orgânicos ou extrativos, os quais são solúveis em solventes orgânicos ou água, e os inorgânicos, que correspondem às cinzas. Os componentes minoritários estão relacionados à madeira de determinadas espécies tanto no tipo quanto em quantidade, não sendo essenciais para a estrutura das paredes celulares e da lamela média (KLOCK *et al.*, 2005; DEMUNER, 2011; GIESEL, 2019).

A celulose é o principal constituinte da madeira, estando associada à lignina e as hemiceluloses em forma de fibras, além de ser um dos componentes químicos mais abundantes da natureza, sendo encontrada em todas as plantas do reino vegetal na forma de microfibrilas (FOELKEL, 1977; DEMUNER, 2011). É a principal matéria-prima em indústrias de celulose e papel devido a característica de alta resistência à tração, sendo também insolúveis em álcalis diluídos, água, ácidos e solventes orgânicos neutros (FOELKEL, 1977). Tais características são conferidas a mesma devido a presença de regiões amorfas e cristalinas (KLOCK *et al.*, 2005).

A presença das hemiceluloses na polpa celulósica favorece o processo de refino da mesma e contribuem para uma maior densidade nas operações de formação do papel, elevando a sua resistência, entretanto, devido a estrutura amorfa, tais polímeros não são

estáveis a ataques químicos, sendo parcialmente degradados quando expostos a condições ácidas e alcalinas no processo de cozimento (GIESEL, 2019).

Segundo Foelkel (1977), a lignina é componente mais indesejável da madeira para a produção de polpa celulósica, devido causar o aumento do consumo de reagentes durante o processo de cozimento, além do aparecimento de substâncias coloridas que posteriormente escurecem o papel, sendo importante a remoção da lignina através de processos de branqueamento.

Por fim os compostos acidentais, sejam os extrativos ou materiais inorgânicos, são indesejáveis no processo de produção de polpa celulósica, sendo responsáveis por causar problemas como corrosão, incrustação, sujeira na celulose, além de dificultarem o processo de branqueamento da polpa celulósica, provocando depósitos denominados *Pitch* na superfície de equipamentos, os quais se soltam com o passar do tempo, contaminando a polpa e, conseqüentemente, reduzindo a qualidade da mesma (GUTIÉRREZ *et al.*, 2001; DEMUNER, 2011).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS

Para a realização do presente estudo foram utilizadas cinco árvores de *P. deltoides*, com 8 anos de idade, provenientes de um plantio experimental, localizado na Área Experimental Florestal, da Universidade Federal de Santa Catarina, no município de Curitibanos/SC. Conforme a classificação de Koppen, a região possui o clima do tipo Cfb (EPAGRI, 2002), ou seja, do tipo mesotérmico úmido com verões amenos.

Das cinco árvores coletadas, foram retirados discos da base e DAP (diâmetro a altura do peito = 1,30 m)(DAP médio = 18,8 cm), com aproximadamente 3,0 cm de espessura, com o auxílio de uma motosserra. Tais discos foram devidamente identificados de acordo com a árvore e posição no tronco (base ou DAP), armazenados nas dependências do Laboratório de Recursos Florestais, da Universidade Federal de Santa Catarina, e posteriormente usados para a avaliação da densidade, morfologia das fibras e composição química da madeira.

#### 3.2 MORFOLOGIA DAS FIBRAS E INDICADORES ANATÔMICOS

Para a caracterização morfológica das fibras utilizou-se os discos provenientes da base de cada árvore, dos quais confeccionou-se baquetas com 2,0 cm de largura, no sentido radial (medula-casca), nas quais delimitou-se as posições 1 (0%), 2 (50%) e 3 (100%) (0%=próximo a medula, 100%=próximo a casca) (Figura 1A), e a partir destas foram confeccionados blocos, os quais foram reduzidos a pequenos fragmentos para serem submetidos a maceração (Figura 1B).

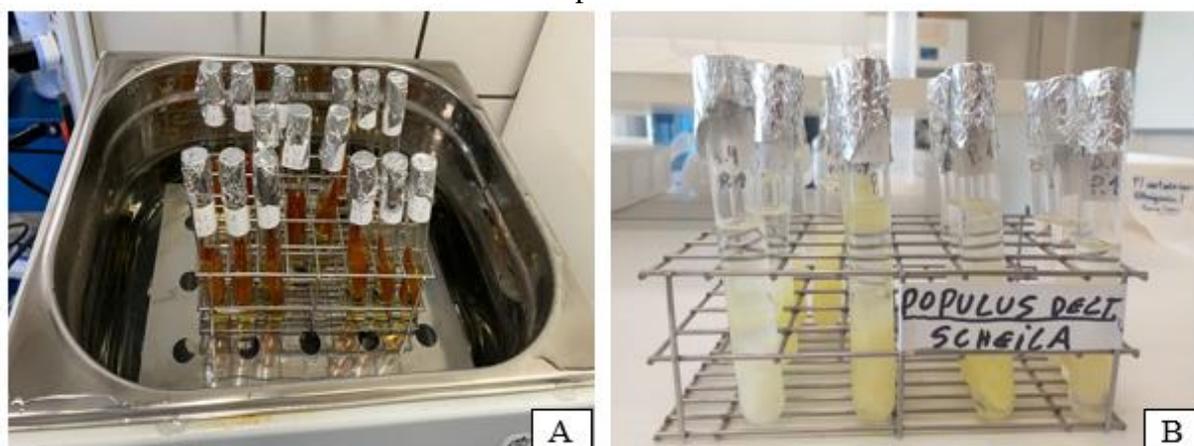
Os fragmentos foram macerados seguindo a metodologia descrita por Sarto (2012), a qual foi realizada em uma solução de maceração contendo ácido acético, ácido nítrico e água, na proporção de 5:2:1, respectivamente, em banho maria (Figura 2A), com aproximadamente 100°C, até a individualização das fibras, a qual ocorreu em aproximadamente 1 hora. Após a realização do procedimento de maceração, as fibras foram lavadas com água destilada para a retirada do excesso da solução de maceração, e conservadas em tubo de ensaio (Figura 2B), também com água destilada.

Figura 1 – Confeção das baquetas: A) Delimitação da baqueta no sentido medula-casca, onde os números 1, 2 e 3 representam a porção de 0, 50 e 100%, respectivamente; B) Fragmentos confeccionados a partir das baquetas e usados na maceração.



Fonte: O autor (2023).

Figura 2 – Maceração das fibras: A) Amostras já imersas na solução de maceração e em banho maria; B) Amostras após o processo de maceração, prontas para montagem das lâminas temporárias.



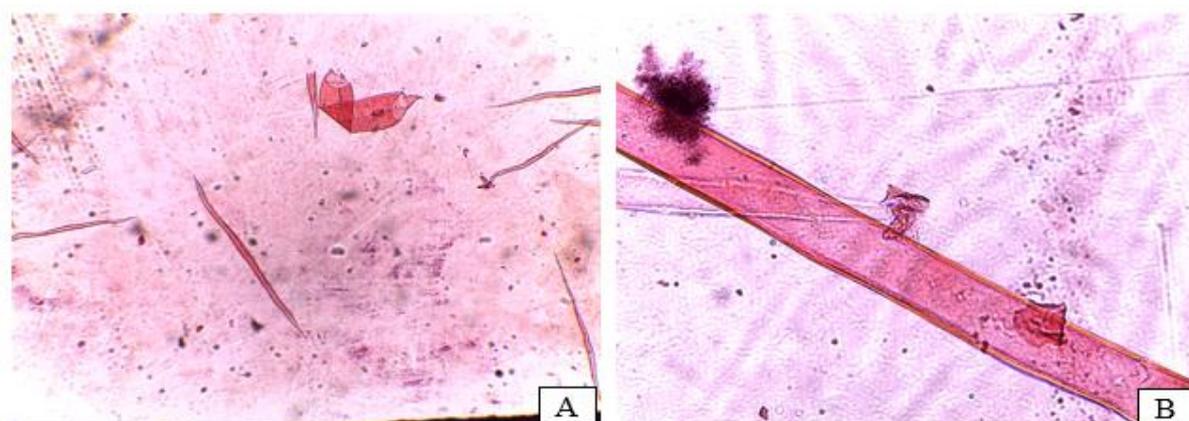
Fonte: O autor (2023).

Posteriormente, o material macerado foi utilizado para a montagem de lâminas temporárias, adicionando-se à mesma 1 gota de safranina, 1 gota de glicerina e 1 gota de água, objetivando melhor visualização das características, sendo estas o comprimento e largura das fibras, bem como diâmetro do lúmen das mesmas. Para a visualização de tais características foram obtidas imagens em microscópio com câmera digital acoplada.

Para a captura das imagens de comprimento utilizou-se o aumento de 40x (Figura 3A), e para a largura e diâmetro do lúmen, lentes com aumento de 400x (Figura 3B), no microscópio. Foram mensuradas um total de 350 fibras e após calculados os parâmetros e

indicadores de qualidade da polpa celulósica sendo eles, espessura da parede celular, fração parede, coeficiente de flexibilidade, índice de enfeltramento e índice de Runkel, conforme as equações 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Figura 3 – Imagens capturadas para mensuração: A) Imagem com aumento de 40x para mensuração do comprimento; B) Imagem com aumento de 400x para mensuração da largura e diâmetro do lúmen.



Fonte: O autor (2023).

$$E = \left( \frac{L-DL}{2} \right) \quad (1)$$

$$FP = \left( \frac{2 \times E}{L} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$CF = \left( \frac{DL}{L} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$IE = \left( \frac{C}{\frac{L}{1000}} \right) \quad (4)$$

$$IR = \left( \frac{2 \times E}{DL} \right) \quad (5)$$

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

### 3.3 DENSIDADE BÁSICA E VERDE

Para determinação da densidade utilizou-se os discos provenientes do DAP, dos quais confeccionou-se duas cunhas opostas, que foram mantidas em água até a completa saturação (Figura 4A). Posteriormente determinou-se a massa úmida das amostras (Figura 4B)

e o volume verde/saturado pelo método de imersão ou balança hidrostática (Figura 4C), segundo a norma NBR 11.941, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003).

Figura 4 – Determinação da densidade: A) Cunhas opostas após a completa saturação; B) Determinação da massa verde; C) Determinação do volume verde.



Fonte: O autor (2023).

Para determinação da massa seca as amostras foram secas em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , até atingir massa constante, indicando que a mesma estava livre de umidade. Assim, por meio da massa úmida, massa seca e do volume saturado realizou-se o cálculo de densidade verde e básica através das equações 6 e 7, respectivamente.

$$Dv = \frac{Mu}{Vs} \quad (6)$$

$$Db = \frac{Ms}{Vs} \quad (7)$$

Em que:  $Dv$  = densidade verde ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $Mu$  = massa úmida (g);  $Db$  = densidade básica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $Ms$  = massa seca (g);  $Vs$  = volume saturado ( $\text{cm}^3$ ).

### 3.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para determinação da composição química da madeira utilizou-se as partes sobressalentes dos discos retirados na posição do DAP, os quais foram reduzidos a cavacos, moídos em moinho do tipo *Willey* e classificados em peneiras (Figura 5A), onde a fração de serragem entre 40 e 60 *mesh* foi selecionada (Figura 5B).

Figura 5 – Classificação da amostra composta para análise química: A) Peneira classificatória; B) Fração entre 40 e 60 mesh classificada.



Fonte: O autor (2023).

As análises 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. A partir da serragem classificada, realizou-se as análises químicas a fim de determinar os seguintes parâmetros, em triplicata: teores de cinzas (TAPPI T211 om-02), extrativos totais (TAPPI T 204 cm-17), lignina total (de acordo com os procedimentos adaptados pelo LQCE/ESALQ/USP (VIVIAN, 2015)), e o teor de holocelulose (obtido por diferença, por meio da equação 8).

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - (\text{TE} + \text{TL}) \quad (8)$$

Em que: TE = Teor de extrativos totais (%); TL = Teor de lignina total (%).

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram analisados com o auxílio de planilhas eletrônicas no Excel<sup>®</sup> e do software estatístico Sisvar (versão 5.7). A composição química e densidade da madeira compreenderam apenas uma análise descritiva, a partir da avaliação da média, desvio padrão e coeficiente de variação. Já para morfologia das fibras, visando avaliar as diferenças entre as dimensões das fibras no sentido radial, nas posições de 0, 50 e 100%, realizou-se a Análise de Variância (ANOVA).

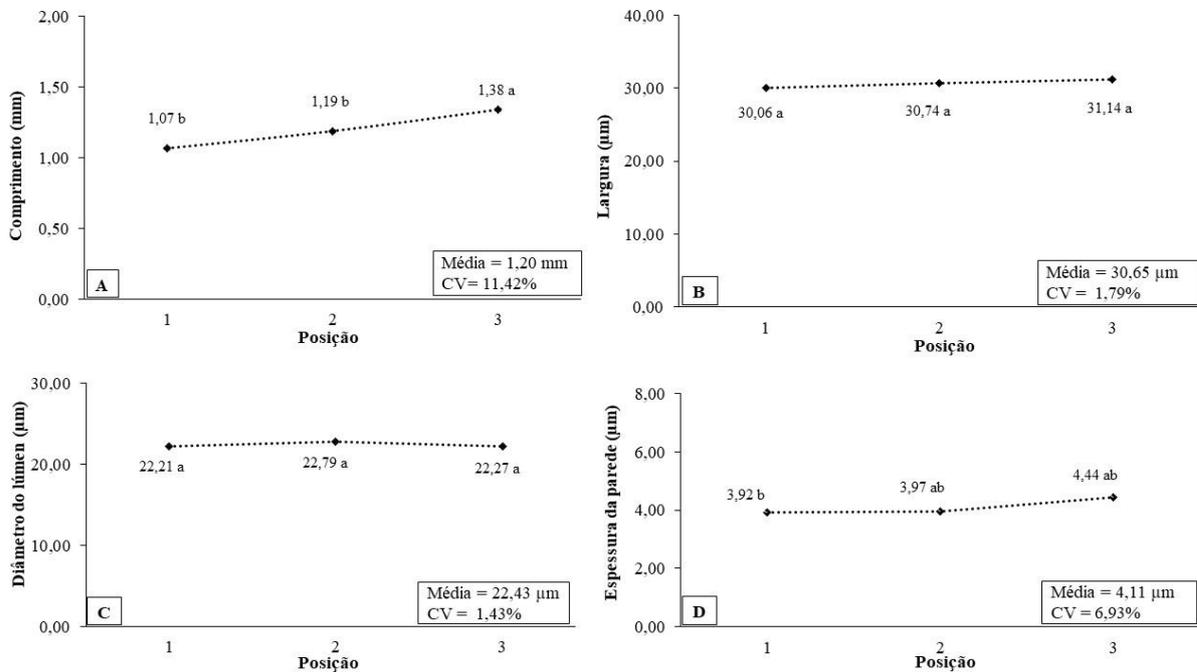
Inicialmente verificou-se a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias através do software Sisvar (versão 5.7). Ao ser verificado que os pressupostos foram atendidos, aplicou-se a ANOVA, em Delineamento Experimental Inteiramente Casualizado, que quando significativo aplicou-se o teste de Post Hoc de Tukey (ao nível de 5% de significância), o qual consiste em comparar pares de médias com o objetivo de verificar onde os dados foram significativos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MORFOLOGIA DAS FIBRAS E INDICADORES ANATÔMICOS

Na figura 6 pode ser observada a variação das dimensões das fibras da madeira de *P. deltoides* no sentido radial (medula-casca), sendo a posição 1 próxima a medula (0%), 2 próxima ao centro (50%) e 3 próxima a casca (100%).

Figura 6 – Variação das dimensões das fibras da madeira de *P. deltoides*: (A) Comprimento; (B) Largura; (C) Diâmetro do lúmen; (D) Espessura da parede.



Em que: CV = coeficiente de variação; Letras a e b indicam diferenças estatísticas entre as posições avaliadas (Tukey,  $p > 0,05$ ).

Fonte: O autor (2023).

As dimensões médias das fibras de *P. deltoides* aos 8 anos de idade, obtidas no estudo em questão, foram: 1,20 mm, 30,65 µm; 22,43 µm e 4,11 µm, para comprimento, largura, diâmetro do lúmen e espessura da parede, respectivamente. De acordo com o teste de Tukey, as dimensões diferiram-se estatisticamente para o comprimento e espessura da parede ao longo do sentido radial, enquanto que para a largura das fibras e diâmetro do lúmen não houve variação estatística entre as posições avaliadas.

Observa-se que com exceção do diâmetro do lúmen que inicialmente apresentou comportamento crescente e após a posição 2 decrescente, todas as dimensões mostraram tendência de crescimento ao longo das posições avaliadas no sentido radial do tronco. Sendo tal comportamento esperado devido a variação de idade que ocorre nos indivíduos arbóreos no sentido medula-casca, sendo que de acordo com Vidaurre (2011), conforme os indivíduos arbóreos vão ficando mais velhos, além de ocorrer variações nas propriedades físicas e químicas, também há variações nas propriedades anatômicas da madeira, interferindo assim nas dimensões das fibras da mesma.

É possível observar que há uma baixa variação das dimensões das fibras ao longo das posições entre as dimensões avaliadas, sendo tal comportamento decorrente da idade das árvores estudadas, as quais possuíam apenas 8 anos, tendo sua madeira representada apenas por lenho juvenil, não havendo assim, diferenças abruptas entre as dimensões das fibras avaliadas, principalmente em relação ao comprimento. De acordo com Bendtsen e Senft (1986), a transição entre lenho juvenil e adulto no *P. deltoides* ocorre com aproximadamente 17 anos de idade.

Na tabela 1 pode ser observada a comparação das dimensões das fibras da madeira de *P. deltoides* com a mesma espécie em outros estudos, bem como com espécies do gênero *Eucalyptus*, o qual é o mais utilizado no Brasil, para produção de celulose do segmento de fibras curtas.

Tabela 1 – Comparação das dimensões das fibras da madeira do gênero *Populus* com outras espécies do gênero *Eucalyptus*.

<b>Espécie</b>	<b>Idade (anos)</b>	<b>C (mm)</b>	<b>L (µm)</b>	<b>DL (µm)</b>	<b>EP (µm)</b>
<i>P. deltoides</i> <sup>1</sup>	8	1,20	30,65	22,43	4,11
<i>P. deltoides</i> <sup>2</sup>	8	0,82	17,99	13,13	3,90
<i>P. deltoides</i> <sup>3</sup>	10	0,97	18,67	14,62	4,00
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> <sup>4</sup>	5	1,01	16,57	8,87	3,85
<i>E. urograndis</i> <sup>5</sup>	8	0,90	16,91	5,59	5,61
<i>E. grandis</i> <sup>6</sup>	5	1,04	18,00	-	3,80

Em que: C = Comprimento; L = Largura; DL = Diâmetro do lúmen; EP = Espessura da parede celular.

Fonte: <sup>1</sup> O autor (2023); <sup>2</sup> Sozim (2020); <sup>3</sup> Sozim (2020); <sup>4</sup> Vivian (2015); <sup>5</sup> Gonzalez *et al.* (2014); <sup>6</sup> Baldin *et al.* (2017).

Sozim (2020) ao estudar a madeira de *P. deltooides* obtida de árvores com diferentes idades, encontrou valores médios de 0,82 mm, 17,99  $\mu\text{m}$ , 13,13  $\mu\text{m}$  e 3,90  $\mu\text{m}$ , e 0,97 mm, 18,67  $\mu\text{m}$ , 14,62  $\mu\text{m}$  e 4,00  $\mu\text{m}$ , para as dimensões de comprimento, largura, diâmetro do lúmen e espessura da parede, aos 8 e 10 anos de idade, respectivamente.

Vivian (2015), ao avaliar as variáveis comprimento, largura, diâmetro do lúmen e espessura da parede do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 5 anos de idade, encontrou valores de 1,01 mm, 16,57  $\mu\text{m}$ , 8,87  $\mu\text{m}$  e 3,85  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Já Gonzalez *et al.* (2014) avaliaram a relação entre dimensões de fibras e de densidade ao longo do tronco da madeira de *E. urograndis* e obtiveram valores de 0,90 mm, 16,91  $\mu\text{m}$ , 5,59  $\mu\text{m}$  e 5,61  $\mu\text{m}$  para o comprimento, largura, diâmetro do lúmen e espessura da parede, sucessivamente. Enquanto Baldin *et al.* (2017), citam valores médios de 1,04 mm para o comprimento das fibras, 18,00  $\mu\text{m}$  para a largura e 3,80  $\mu\text{m}$  para a espessura da parede celular, no estudo conduzido para o *E. grandis*. Sendo os valores obtidos no presente estudo, superiores aos citados pelos autores para o gênero *Eucalyptus*.

O comprimento das fibras tem relação direta com a resistência mecânica, sendo que de acordo com Foelkel (1977), quanto mais longas forem as fibras de uma madeira, maior será a tendência destas manterem-se unidas quando sujeitas a grandes esforços, aumentando o grau de colapso da mesmas, assim como, a resistência mecânica do papel gerado. Além disso, as fibras podem ser classificadas quanto ao seu comprimento desde extremamente curtas até extremamente longas, estando as fibras de *P. deltooides* aqui avaliadas, classificadas como médias (METCALFE; CHALK, 1983) já que seu comprimento médio encontra-se entre 0,90 e 1,60 mm.

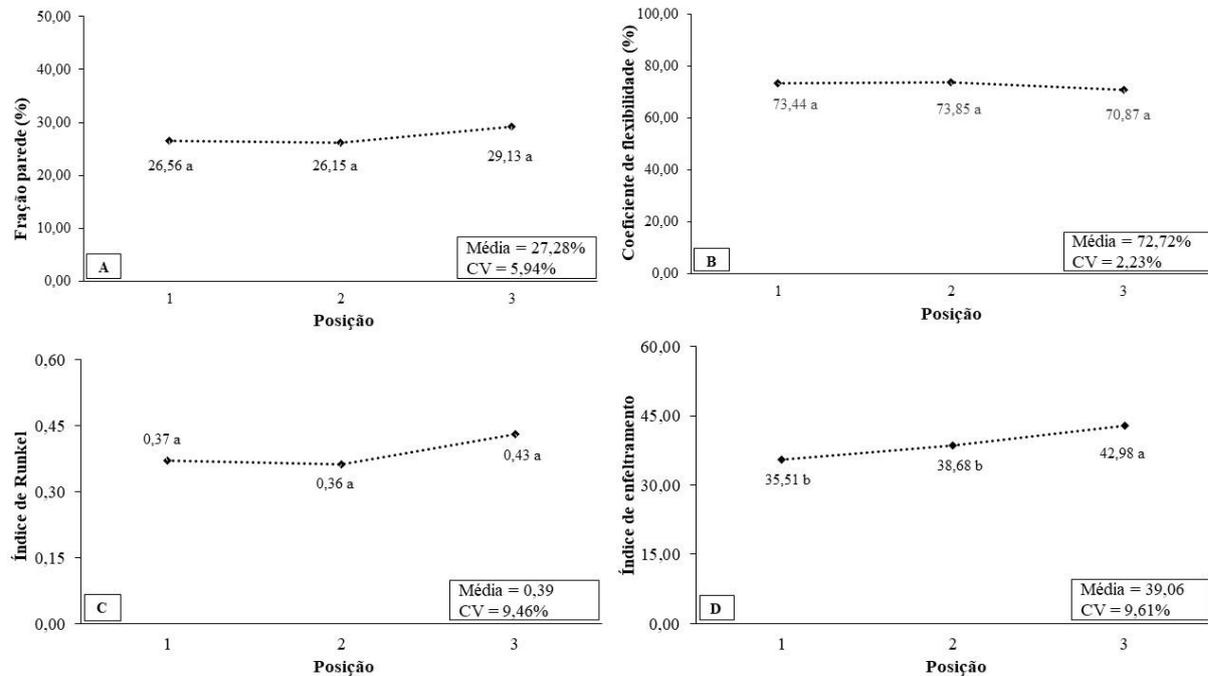
Em relação as dimensões largura, diâmetro do lúmen e espessura da parede celular, estas influenciam na quantidade de espaços vazios na madeira, dando indicativos a respeito da densidade básica da espécie, tal como, das características do papel produzido. Em consonância com Manimekalai *et al.* (2002), o valor médio encontrado de espessura de parede celular das fibras para a madeira de *P. deltooides* avaliada no estudo em questão, permite classificá-las como espessa, ou seja, valores entre 3 e 5  $\mu\text{m}$ .

Em conformidade com Baldin *et al.* (2017), madeiras com fibras de paredes mais espessas conferem ao papel produzido maior porosidade e opacidade, gerando maiores capacidades de impressão, enquanto as fibras de paredes mais finas, influenciam na formação

de papéis mais densos e com elevada resistência a ruptura e a tensão, além de que fibras mais longas contribuem para uma maior resistência ao rasgo, enquanto que fibras curtas favorecem a formação da folha, no momento da produção do papel.

A figura 7 representa a variação dos parâmetros indicadores da qualidade da madeira de *P. deltoides* para a fabricação de papel no sentido radial. Os valores médios obtidos para os índices indicadores da qualidade da madeira de *P. deltoides* para a produção de polpa celulósica foram 27,28%, 72,72%, 0,39 e 39,06 para a fração parede, coeficiente de flexibilidade, índice de Runkel e índice de enfieltramento, respectivamente.

Figura 7 – Variação dos parâmetros indicadores da qualidade da madeira de *P. deltoides*: (A) fração parede; (b) coeficiente de flexibilidade; (C) índice de Runkel; (D) índice de enfieltramento.



Em que: CV = coeficiente de variação; Letras a e b indicam diferenças estatísticas entre as posições avaliadas (Tukey,  $p > 0,05$ ).

Fonte: O autor (2023).

Segundo o teste de médias de Tukey, com exceção do índice de enfieltramento, não houve diferenças estatísticas dos parâmetros ao longo das posições avaliadas. Com base na figura 7, observa-se que a fração parede e índice de Runkel tendem a decrescer até a posição 2 e aumentar após a mesma, o coeficiente de flexibilidade possui tendência de aumento até a segunda posição e decresce a partir da mesma, enquanto que o índice de enfieltramento

apresenta tendência de aumento no sentido medula-casca com a terceira posição diferindo-se estatisticamente das anteriores. Saturnino (2020) cita que a variação entre tais posições avaliadas, sem que haja uma estabilização, é normal em indivíduos jovens e a medida que ocorre a transição de madeira juvenil para adulta, tais dados tendem a estabilizar.

Na tabela 2 pode ser observada a comparação dos parâmetros indicadores de qualidade da madeira de *P. deltooides* com outro estudo com a mesma espécie, bem como espécies do gênero *Eucalyptus*.

Tabela 2 – Comparação dos indicadores anatômicos de qualidade da madeira do gênero *Populus* com outras espécies do gênero *Eucalyptus*.

<b>Espécie</b>	<b>Idade (anos)</b>	<b>FP (%)</b>	<b>CF (%)</b>	<b>IR</b>	<b>IE</b>
<i>P. deltooides</i> <sup>1</sup>	8	27,28	72,72	0,39	39,06
<i>P. deltooides</i> <sup>2</sup>	8	44,42	82,67	0,55	49,15
<i>E. grandis x E. urophylla</i> <sup>3</sup>	5	46,00	54,00	0,90	62,39
<i>E. grandis</i> <sup>4</sup>	8	41,99	58,00	0,76	-

Em que: FP = fração da parede; CF = coeficiente de flexibilidade; IR = índice de Runkel; IE = índice de enfieltamento.

Fonte: <sup>1</sup> O autor (2023); <sup>2</sup> Sozim (2020); <sup>3</sup> Vivian (2015); <sup>4</sup> Baldin *et al.* (2017).

Sozim (2020), Vivian (2015) e Baldin *et al.* (2017) obtiveram valores de fração parede de 44,42%, 46,00% e 41,99% para o *P. deltooides*, *E. grandis x E. urophylla* e *E. grandis*, sucessivamente, estando o valor encontrado no estudo em questão abaixo dos citados pelos autores. A fração parede é um indicativo do tipo de parede celular da espécie, assim como, do grau de rigidez da mesma, visto que a fração parede pode ser considerada desde muito espessa (fração parede > 70%) até muito delgada (fração parede < 20%), influenciando em uma maior ou menor rigidez da mesma. Deste modo, a madeira de *P. deltooides* aqui avaliada, pode ser classificada como de fração parede delgada e de rigidez baixa, ou seja, madeiras com valores médios em um intervalo entre 20 e 35%.

Baldin *et al.* (2017) e Foelkel (2007) citam que fibras com valores de fração parede acima de 40% são mais difíceis de colapsar durante a fabricação do papel, ficando mais propensas a produzirem uma rede mais frouxa e sem muita ligação entre as fibras. Já, polpas produzidas a partir de espécies que apresentam fibras com as paredes finas resultam em maior rendimento no processo de polpação, assim como, maior entrelaçamento e maiores possibilidades de contato entre as mesmas, fazendo com que haja melhorias nas propriedades,

tais como tração, estouro, rasgo, dobramento, resistência superficial e resistência interna da folha (BALDIN *et al.*, 2017).

Com relação ao coeficiente de flexibilidade, Sozim (2020), Vivian (2015) e Baldin *et al.* (2017) citam valores médios de 82,67%, 54,00% e 58,00%, sendo o valor médio encontrado para o *P. deltoides* no presente estudo superior aos obtidos por Vivian (2015) e Baldin *et al.* (2017) para o gênero *Eucalyptus* e inferior ao encontrado por Sozim (2017) para o *P. deltoides*. O coeficiente de flexibilidade dá indícios do grau de achatamento que as fibras sofrem no processo de fabricação do papel, sendo que quanto maior o seu valor, maior a flexibilidade das fibras e maior a probabilidade de ocorrer ligações entre estas, resultando em maior resistência à tração e ao estouro (SHIMOYAMA; WIECHETECK, 1993; VIVIAN *et al.*, 2015). De acordo com a classificação proposta por Nisgoski (2005), madeiras com coeficiente de flexibilidade entre 50 e 75%, como é o caso da espécie avaliada neste estudo, possuem boa superfície de contato e boa união entre fibras, com grau de colapso parcial, o que é positivo no processo de produção de papel.

Já em relação ao índice de Runkel, Sozim (2020) encontrou o valor médio de 0,55 para a madeira de *P. deltoides* aos 8 anos de idade, Vivian (2015) obteve o valor médio de 0,90 para o híbrido *E. grandis x E. urophylla* aos 5 anos, enquanto que Baldin *et al.* (2017) citam um valor médio de 0,76 para o *E. grandis* aos 8 anos, sendo o valor encontrado no presente estudo para o *P. deltoides* inferior aos relatados.

De acordo com Vivian *et al.* (2015) e Vasconcelos (2005) o índice de Runkel fornece indicativos sobre o grau de colapso das fibras ou traqueídeos durante o processo de fabricação do papel, sendo que, quanto mais baixo for o índice de Runkel, melhor será a matéria-prima para a produção de papel. Deste modo, quanto mais alto for o índice de Runkel, menor será o grau de colapso das fibras, proporcionando uma superfície de contato menor, resultando em menos ligações entre as fibras, o que é desfavorável para a produção de determinados tipos de papel (VIVIAN *et al.*, 2015). Portanto, conforme com a classificação proposta por Runkel (1952), citado por Tostes *et al.* (2013), a madeira de *P. deltoides* se enquadra como grau II, ou seja, valores entre 0,25 e 0,50, sendo assim, classificada como muito boa para a produção de papel.

Por fim, com relação ao índice de enfiamento, o valor médio aqui obtido foi inferior aos valores médios encontrados por Sozim (2020) e Vivian (2015) para o *P. deltoides*

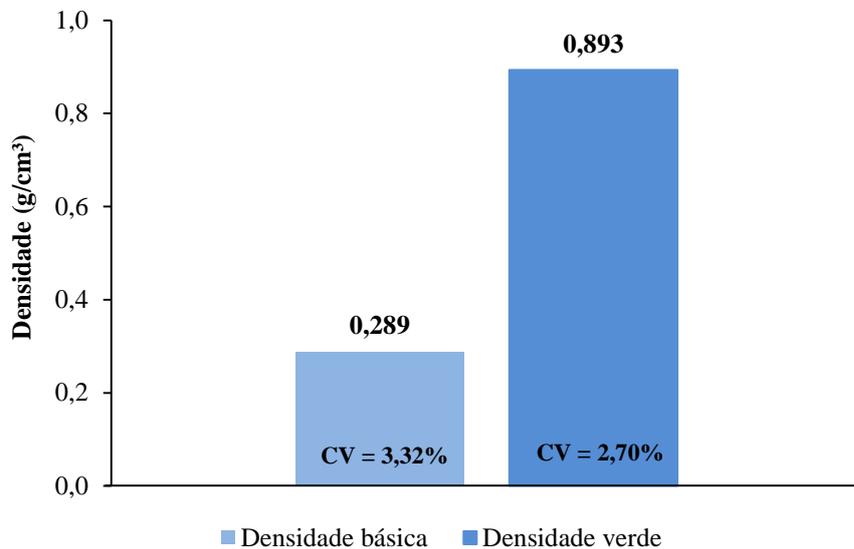
e *E. grandis* x *E. urophylla*, respectivamente. O índice de enfieltramento é tido como a relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra, sendo que quanto maior for o valor obtido para tal índice, maior será a flexibilidade das mesmas, sendo exigido um valor mínimo de 50 para que as fibras sejam flexíveis o suficiente para uso na indústria de celulose e papel (NIGOSKI, 2005).

Desta forma, a madeira de *P. deltooides* aos 8 anos de idade avaliada no presente estudo possui o índice de enfieltramento abaixo do valor mínimo citado para a produção de papel, sendo este o único parâmetro que ficou abaixo do recomendado. Nos demais indicadores, como fração parede, coeficiente de flexibilidade e índice de Runkel, a madeira de *P. deltooides* apresenta bom potencial de utilização para fabricação de papel, em especial para o segmento de fibras curtas.

#### 4.2 DENSIDADE BÁSICA E VERDE

Na figura 8 podem ser observadas as médias de densidade verde e básica obtidas para a madeira de *P. deltooides* aos 8 anos de idade.

Figura 8 – Densidade verde e básica da madeira de *P. deltooides* aos 8 anos de idade.



Em que: CV = coeficiente de variação.  
Fonte: O autor (2023).

A densidade básica da madeira de *P. deltoides* foi de 0,289 g/cm<sup>3</sup> enquanto que a densidade verde foi de 0,893 g/cm<sup>3</sup>. Tal valor de densidade básica permite classificar a madeira em questão como leve ou de baixa densidade, pois está abaixo de 0,40 g/cm<sup>3</sup>, conforme classificação proposta pela International Association of Wood Anatomists (IAWA, 1989). Em conformidade com Foelkel (2012), a densidade básica de madeiras do gênero *Populus* varia entre 0,25 a 0,40 g/cm<sup>3</sup>.

Na tabela 3, pode ser observada a comparação entre a densidade básica obtida no presente estudo para a madeira de *P. deltoides* com valores citados na literatura para a mesma espécie, assim como espécies do gênero *Eucalyptus*, sendo este o gênero mais utilizado no Brasil nas indústrias de celulose e papel.

Tabela 3 – Comparação da densidade básica da madeira do gênero *Populus* com outras espécies do gênero *Eucalyptus*.

<b>Espécie</b>	<b>Idade (anos)</b>	<b>Densidade básica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<i>P. deltoides</i> <sup>1</sup>	8	0,289
<i>P. deltoides</i> <sup>2</sup>	8	0,370
<i>E. urograndis</i> <sup>3</sup>	8	0,510
<i>E. dunni</i> <sup>4</sup>	7	0,511
<i>E. grandis x E. urophylla</i> <sup>5</sup>	5	0,447

Fonte: <sup>1</sup> O autor (2023); <sup>2</sup> Sozin (2020); <sup>3</sup> Gonzalez *et al.* (2014); <sup>4</sup> Sbardella (2018); <sup>5</sup> Vivian (2015).

É possível observar que a densidade básica obtida no presente estudo situa-se abaixo do valor encontrado no estudo conduzido por Sozin (2020) para o *P. deltoides* aos 8 anos, que ao avaliar as propriedades físico-mecânicas da madeira da espécie em diferentes idades no regime de manejo para multiprodutos, obteve uma densidade básica de 0,370 g/cm<sup>3</sup>. Gonzalez *et al.* (2014) e Sbardella (2018) citam densidades básicas parecidas, 0,510 g/cm<sup>3</sup> e 0,511 g/cm<sup>3</sup>, para as madeiras de *E. urograndis* aos 8 anos e *E. dunni* aos 7 anos na região do Distrito Federal e Curitiba (SC), respectivamente, sendo a densidade básica obtida no estudo em questão inferior a encontrada pelos autores. Já Vivian (2015) obteve uma densidade básica de 0,447 g/cm<sup>3</sup> para o híbrido *E. grandis x E. urophylla*, aos 5 anos, provenientes da região de Telêmaco Borba (PR).

Tais diferenças entre as densidades comparadas são esperadas, visto que a densidade básica é influenciada por diversos fatores, tais como, ambiente onde a espécie está inserida, fertilização do indivíduo arbóreo ao longo do seu crescimento, composição anatômica, idade,

posição no tronco da árvore, lenho inicial, lenho tardio e largura de anéis de crescimento. Tais características influenciam para que haja uma variação da densidade básica dentro de uma mesma espécie e até mesmo dentro de uma mesma árvore no sentido base-topo e medula-casca.

Em conformidade com Silva *et al.* (2001), para as indústrias de celulose é desejável o uso de madeiras com densidade básica entre 0,40 e 0,55 g/cm<sup>3</sup>, as quais são classificadas como madeiras de média densidade, já que o uso de madeiras com densidade abaixo ou acima destas, podem implicar em algumas dificuldades operacionais durante o processo de polpação.

Para Shimoyama (1990) e Silva *et al.* (2001) madeiras com densidade abaixo de 0,40 g/cm<sup>3</sup> podem resultar em um baixo rendimento do processo, havendo assim, a necessidade de um maior volume de matéria-prima para se obter a mesma produtividade que se teria com uma madeira de maior densidade. Já madeiras com densidade acima de 0,55 g/cm<sup>3</sup>, conforme os mesmos autores, além de dificultarem o processo de picagem da madeira, causando um maior desgaste das facas do picador, interferem na impregnação do licor de cozimento, o que pode resultar em um maior teor de rejeitos no processo de polpação, o que também contribui para diminuição do rendimento e aumento de custos no processo. De acordo com Bonfatti Júnior *et al.* (2019) em uma fábrica de celulose e papel a madeira é responsável por causar os maiores custos de produção, por isso deve ser analisada com atenção.

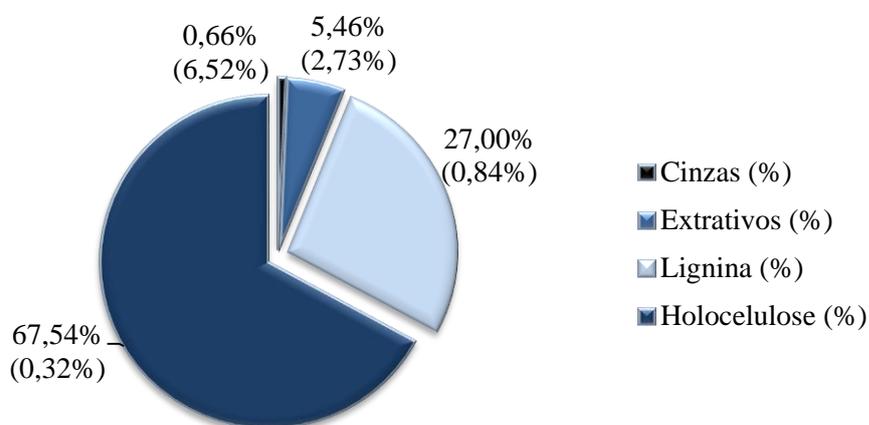
Portanto, levando em consideração apenas o parâmetro densidade básica a madeira de *P. deltoides* seria inadequada para o uso nas indústrias de celulose e papel. Entretanto para Silva *et al.* (2004) apenas a avaliação de tal parâmetro de forma isolada, não é um indicativo seguro para a definição da finalidade da madeira, havendo a necessidade de o mesmo ser avaliado em conjunto com outros parâmetros.

Quanto a densidade verde, é a relação entre a massa e o volume da madeira, ambas em condições de completa saturação, ou seja, quando as fibras, os vazios celulares e intercelulares encontram-se em estado de completa saturação, ocupados por água (MELO, 2002). Esta é importante principalmente no abastecimento e compra/venda de madeiras pelas indústrias, devido tais negociações serem realizadas a partir das variáveis peso e volume, sendo importante saber relacionar peso, volume e densidade verde, já que a madeira está no seu estado saturado, quando tais transações ocorrem, assim, influenciando no peso e volume de madeira recebida (LOUSADA *et al.*, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2011; FOGLIATO, 2018).

### 4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Na figura 9 observam-se os componentes químicos (cinzas, extrativos, lignina e holocelulose) da madeira de *P. deltoides*. Os teores médios obtidos para os componentes cinzas, extrativos, lignina e holocelulose da madeira de *P. deltoides*, foram de 0,66%, 5,46%, 27,00% e 67,54%, respectivamente, os quais apresentaram um baixo coeficiente de variação, sendo representado entre parênteses no gráfico.

Figura 9 – Composição química da madeira de *P. deltoides* aos 8 anos de idade.



Fonte: O autor (2023).

Na tabela 4, pode ser encontrada a comparação da composição química da madeira de *P. deltoides* com outro estudo com a mesma espécie, bem como outras espécies do gênero *Eucalyptus*. Ressalta-se que a comparação com o gênero *Eucalyptus* é importante devido o mesmo ser o mais cultivado no Brasil e usado pelas indústrias como matéria-prima para a produção de celulose de fibra curta.

O teor de cinzas obtido no presente estudo situa-se abaixo do encontrado por Lau (2017), de 0,98%, para a madeira de *P. deltoides* aos 11 anos de idade, e acima dos valores 0,21% (VIVIAN, 2015), 0,24% (COELHO, 2021), 0,21% (COELHO, 2021), 0,18% (GUIMARÃES *et al.*, 2013) para o *E. grandis x E. urophylla*, *E. urophylla x grandis*, *E. grandis*, sendo estas aos 5 anos, e por fim, para diferentes procedências de *E. grandis* aos 31 anos de idade.

Tabela 4 – Comparação da composição química da madeira do gênero *Populus* com outras espécies do gênero *Eucalyptus*.

<b>Espécie</b>	<b>Idade (anos)</b>	<b>TC (%)</b>	<b>TE (%)</b>	<b>TL (%)</b>	<b>TH (%)</b>
<i>P. deltoides</i> <sup>1</sup>	8	0,66	5,46	27,00	67,54
<i>P. deltoides</i> <sup>2</sup>	11	0,98	3,67	27,01	-
<i>E. grandis x E. urophylla</i> <sup>3</sup>	5	0,21	2,63	27,12	70,25
<i>E. urophylla x grandis</i> <sup>4</sup>	5	0,24	3,73	28,76	67,52
<i>E. grandis</i> <sup>5</sup>	5	0,21	1,46	29,17	69,37
<i>E. grandis</i> <sup>6</sup>	31	0,18	7,99	29,34	62,66

Em que: TC = teor de cinzas; TE = teor de extrativos totais; TL = teor de lignina; TH = teor de holocelulose.

Fonte: <sup>1</sup> O autor (2023); <sup>2</sup> Lau (2017); <sup>3</sup> Vivian (2015); <sup>4</sup> Coelho (2021); <sup>5</sup> Coelho (2021); <sup>6</sup> Guimarães *et al.* (2013).

Embora o teor de cinzas encontrado no estudo em questão esteja acima dos encontrados para as outras espécies do gênero *Eucalyptus*, o mesmo encontra-se dentro do intervalo de 0,40 e 0,80% (LAU, 2017), esperado para as folhosas. Tal variação é comum de se ocorrer devido os componentes inorgânicos da madeira serem resultados, principalmente, da influência do local e dos tratos culturais recebidos pela planta durante seu desenvolvimento (BAEZA; FREER, 2001 *apud* LAU, 2017). Altos teores de cinzas são indesejáveis no processo de polpação, devido os mesmos serem responsáveis por causarem danos aos digestores, tais como incrustações, enferrujamento e como consequência ao processo de polpação, interferindo assim, na qualidade da polpa e do papel que será produzido, podendo causar contaminações a mesma.

Com relação ao teor de extrativos, o mesmo é superior aos teores de 3,67; 2,63; 3,73; 1,46%, obtidos por Lau (2017) para o *P. deltoides*, Vivian (2015) para o *E. grandis x E. urophylla*, Coelho (2021) para o *E. urophylla x grandis* e Coelho (2021) para o *E. grandis*, entretanto inferior aos 7,99% obtido no estudo conduzido por Guimarães *et al.* (2013), para o *E. grandis*.

Para Klock *et al.* (2005), em geral, a composição química da madeira de espécies de folhosas é representada em média por 5,0% de extrativos, deste modo, o teor de 5,46% aqui obtido, está um pouco acima do normal esperado para as folhosas. Assim como altos teores de cinzas e lignina, os altos teores de extrativos também são indesejáveis no processo de polpação, devido os mesmos levarem a altos consumos de reagentes no processo, já que na etapa de impregnação o álcali ativo presente no licor de cozimento deverá primeiramente neutralizar os extrativos para somente então reagir com a lignina propriamente dita.

Já a quantidade de lignina observada no presente estudo foi similar ao relatado por Lau (2017) para o *P. deltoides*, assim como ao valor citado por Vivian (2015) para o *E. grandis* x *E. urophylla*. Os valores citados por Coelho (2021) para o *E. urophylla* x *grandis* e *E. grandis*, respectivamente, e por Guimarães *et al.* (2013) para o *E. grandis* foram um pouco superiores ao obtido para o *P. deltoides* no presente estudo.

Conforme citado por Biermann (1996) *apud* Lau (2017) e Klock *et al.* (2005), o teor de lignina para as folhosas encontra-se na faixa de 16 a 25%, assim, o teor de lignina aqui observado também encontra-se relativamente acima do esperado, mas levando em consideração que foi menor ao entrado para outras espécies do gênero *Eucalyptus*, que são amplamente utilizadas no setor de celulose e papel, o teor de lignina aqui obtido não seria um problema ao processo de polpação.

Elevados teores de lignina são considerados um problema no processo de polpação, já que o principal objetivo do mesmo é a dissolução da lignina que encontra-se principalmente na lamela média, a qual é considerada um agente cimentante responsável por causar a união das fibras. Ao causar a dissolução da lignina, as fibras são individualizadas, formando uma massa fibrosa, ou seja, a polpa celulósica, sendo assim, altos teores de lignina dificultam o processo de polpação, casando maiores consumos de reagentes no processo, interferindo nas propriedades físico-mecânicas da polpa, além de interferir na obtenção de um baixo número kappa, o que é muito importante para o processo químico kraft de polpas branqueadas.

Quanto ao teor de holocelulose, o principal componente químico de interesse no processo de polpação, ficou bem próximo do valor citado por Coelho (2021) para o *E. urophylla* x *grandis*, abaixo do encontrado por Vivian (2015) e Coelho (2021) para o *E. grandis* x *E. urophylla* e *E. grandis*, respectivamente, e acima do obtido por Guimarães *et al.* (2013).

Elevados teores de holocelulose são extremamente importantes para o processo, o qual irá ditar o rendimento do mesmo, sendo que quanto maior o teor de holocelulose, maior o rendimento do processo, sendo o valor encontrado no estudo em questão similar ao encontrado para as outras espécies do gênero *Eucalyptus*.

O uso de espécies que apresentem baixos teores de cinzas, extrativos e lignina, e altos teores de holocelulose, são interessantes para o processo, já que a polpa celulósica é obtida a partir da eliminação dos componentes químicos, tais como, extrativos, cinzas e

lignina presente na madeira, possibilitando assim, o alto rendimento e qualidade do processo (SEGURA, 2015; VIVIAN *et al.*, 2020).

De forma geral, com base na composição química observada para a madeira de *P. deltoides*, a mesma apresenta bom potencial para produção de polpa celulósica, pois os teores de holocelulose e lignina são similares às espécies do gênero *Eucalyptus*, principal fonte de matéria-prima para o segmento de fibras curtas. Apenas os teores de cinzas e extrativos foram acima dos valores normalmente relatados para o gênero *Eucalyptus*, demandando um pouco de atenção nestes quesitos.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados alcançados no estudo em questão pode-se concluir que a madeira de *Populus deltoides*, aos 8 anos de idade, apresenta:

- fibras com comprimento, largura, diâmetro do lúmen e espessura de parede de 1,20 mm, 30,65; 22,43 e 4,11  $\mu\text{m}$ , respectivamente, podendo assim ser classificadas como de comprimento médio e de parede celular espessa. Apenas o comprimento e a espessura da parede diferiram-se estatisticamente ao longo do sentido radial, aumentando da medula em direção a casca;

- indicadores anatômicos classificados como de boa qualidade para fabricação de papel quanto à fração parede (27,28%), coeficiente de flexibilidade (72,72%) e índice de Runkel (0,39), sendo que apenas o índice de enfiamento (39,06) apresentou-se abaixo do recomendado. O único indicador que apresentou diferença significativa ao longo do sentido radial foi o índice de enfiamento;

- densidades básica e verde de 0,289 e 0,893  $\text{g}/\text{cm}^3$ , respectivamente, podendo ser classificada como madeira leve ou de baixa densidade, estando abaixo da faixa considerada ideal para produção de polpa celulósica;

- teores de lignina (27,00%) e holocelulose (67,54%) similares aos valores encontrados para espécies de *Eucalyptus*, amplamente utilizadas para a fabricação de polpa celulósica no Brasil. Apenas os teores de extrativos (5,46%) e cinzas (0,66%) foram acima do normalmente relatado para espécies utilizadas para produção de papel;

Conclui-se, levando em consideração as propriedades avaliadas, que a espécie apresenta potencial para ser utilizada na produção de polpa celulósica de fibras curtas, com boas dimensões, bons indicadores de qualidade das fibras, teores de holocelulose e lignina similares as espécies hoje empregadas, como é o caso do *Eucalyptus*. Os únicos pontos negativos, e que devem ser melhores avaliados são a baixa densidade básica, bem como os elevados teores de extrativos e cinzas.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11.941: Madeira: Determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ABRAHAM, P. E. *et al.* Quantitative proteome profile of water deficit stress responses in eastern cotton wood (*Populus deltoides*) leaves. **Plos One**, v. 13, n. 2, e0190019, 2018.
- ALFONSO, V. A. *et al.* IAWA list of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.
- ANTUNES, F. S. **Avaliação da qualidade da madeira das espécies *Acacia crassicarpa*, *Acacia mangium*, *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus globulus* e *Populus tremuloides***. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- BALDIN, T. *et al.* Anatomia da madeira e potencial de produção de celulose e papel de quatro espécies jovens de *Eucalyptus* L’Hér. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 2, p. 114-126, 2017.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **A utilização da madeira na produção de celulose**. Piracicaba: IPEF, 1979. (Circular Técnica, 68).
- BENDTSEN, B. A.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation grown cottonwood and loblolly pine. **Wood Fiber Science**, v. 18, n. 1, p. 23-28, 1986.
- BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob efeito do espaçamento e da adubação**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.
- BONFATTI JÚNIOR, E. A. *et al.* Bamboo kraft pulping. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 4, p. 791-796, 2019.
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Influência da época de colheita e da estocagem na composição química da biomassa florestal. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 1, p. 66-78, 2012.
- CAO, F. L.; CONNER, W. H. Selection of flood-tolerant *Populus deltoides* clones for reforestation projects in China. **Forest Ecology and Management**, v. 117, p. 211-220, 1999.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies introduzidas alternativas às dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* para reflorestamento no Centro-Sul do Brasil**. In: GALVAO, A. P. M. (Coord.). *Espécies não tradicionais para plantios com finalidades produtivas e ambientais*. Colombo: Embrapa Florestas, 1998. p. 75-99.

- COELHO, M. U. **Impacto da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* na eficiência dos processos de polpação Kraft estendidos**. 2021. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.
- DEMUNER, W. P. **Predição do impacto da madeira em fábrica kraft de Eucalipto**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.
- 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.
- DURLO, M. A. **Tecnologia da madeira: peso específico**. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1991. (Série Técnica, 8).
- EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA – EPAGRI. **Caracterização Regional**. Editora: Cepa, SC, 2002.
- FANTUZZI NETO, H. **Qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose Kraft**. 2012. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- FAVARO, J. S.C. **Estudos da polpação Kraft, branqueamento e refino de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- FLOGLIATTO, M. M. **Qualidade da madeira de *Cryptomeria japonica* para produção de polpa celulósica**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2018.
- FOELKEL, C. **As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para a fabricação de papel**. In: *Eucalyptus* Online Book & Newsletter, 2007.
- FOELKEL, C. **Espécies de Importância Florestal para a Ibero-América: Álamos ou Choupos (*Populus* spp.)**. In: Pinus Letter 2012. Disponível em: [https://www.celsofoelkel.com.br/pinus\\_39.html](https://www.celsofoelkel.com.br/pinus_39.html). Acesso em: 18 de out. de 2023.
- FOELKEL, C. E. B. **Qualidade da madeira: teoria**. 5. ed. Belo Oriente: UFV, 1977. 292 p. Disponível em: <http://www.celsofoelkel.com.br/artigos/ufv/02.%20Qualidade%20da%20Madeira.%201977.1979.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2021.
- FOELKEL, C. E. B.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **O Papel**, local, v. n. x, p. 35-40, 1992.

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 81-89, 2014.

GIESEL, M. **Avaliação da qualidade da madeira com diferentes tempos de estocagem para a produção de celulose e papel**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

GOMES, D. F. F. **Estudo da qualidade da madeira de clones de Eucalyptus cultivados no Brasil: produção de polpa kraft de qualidade**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

GUIMARÃES, I. L. *et al.* Caracterização química e física da madeira de procedência de *Eucalyptus*. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 636 – 646, 2013.

GUTIÉRREZ, A. *et al.* The biotechnological control of pitch in paper pulp manufacturing. **Trends in Biotechnology**, v. 19, n. 9, p. 340-348, 2001.

HORA, A. B. **Panoramas Setoriais 2030: papel e celulose**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017. 225 p. ISBN 9788587545633. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/14214>. Acesso em: 14 de fev. de 2022.

HSU, C.Y. *et al.* Poplar FT2 shortens the juvenile phase and promotes seasonal flowering. **The Plant Cell**, v. 18, n. 8, p. 1846-1861, 2006.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório anual 2022**. São Paulo: IBÁ, 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório anual 2023**. São Paulo: IBÁ, 2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 4 dez. 2023.

JARDIN, J. M. *et al.* Avaliação da qualidade e desempenho de clones de eucalipto na produção de celulose. **O papel**, v. 78, n. 11, p. 122-129, 2017.

JAVARINI, E. **Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de *Populus deltoides*, plantado nas várzeas do vale médio do Rio Iguaçu**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial da Madeira) – Centro Universitário de União da Vitória, União da Vitória, 2011.

KLOCK, U. **Polpa e Papel – Propriedades do papel**. Curitiba: UFPR, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 53p. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/polpaepapel/papelpropriedades2013.pdf>. Acesso em: 19 de out. 2023.

KLOCK, U. *et al.* **Química da madeira**. 3ª edição revisada. Curitiba: UFPR, 2005.

- KOASKI, D. **Qualidade energética da madeira de *Eucalyptus dunnii* Maiden**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2019.
- LAU, P. C. **Produção de Painéis de Colagem lateral – EGP com madeira de *Populus deltoides***. 2017. Tese (Doutorado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- LITTLE, E. L. **Checklist of United States Trees (Native and Naturalized)**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1979.
- LORENZI, H. *et al.* **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003.
- LOUSADA, J. *et al.* Relações entre peso, volume e densidade para a madeira de pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait.) cultivado em Portugal. **Silva Lusitana**, v. 2, n. 16, p. 183-196, 2008.
- MANHÃES, G. F. **Elasticidade de substituição: contribuição à análise de competitividade da indústria brasileira de celulose**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- MANHÃES, G. F. **Elasticidade de substituição: contribuição à análise de competitividade da indústria brasileira de celulose**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- MANIMEKALAI, V.; PAVICHANDRAN, P.; BALASUBRAMANIAN, A. Fibres of *Sorghum bicolor* (L.) Moench and their potential use in paper and board making. **Phytomorphology**, v. 52, n. 1, p. 55-59, 2002.
- MEDEIROS, J. G. S.; HOPPE, J. M. Efeito da aplicação de calcário em estacas de *Populus deltoides* Bartr. Ex Marsh cultivadas em vaso. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p. 161-167, 2002.
- MELO, J. E. **Madeira: Características e Aplicações**. 1º ed. Brasília: LPF, 2002.
- METCALFE, C. R.; CHALK, L. **Anatomy of the dicotyledons - Wood structure and conclusion of the general introduction**. 2 ed. Oxford: Clarendon Press, 1983. 2.v.
- MIO, L. L. M.; AMORIN, L. Doenças do Álamo. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 30, n. 1/2, p. 139-153, 2000.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; CARRIJO DE MELO, D. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I - estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005.

MOREIRA, W. S. **Relações entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira**. 1999. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. 4. ed. Curitiba: UFPR, 2014.

NASCIMENTO, N. G.; CAMPOS, A, C. O setor de celulose e papel no Brasil e no Paraná: inserção competitiva e concentração regional. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 19, n. 2, p. 2, 2021.

NEIVA, D. *et al.* Chemical composition and kraft pulping potential of 12 eucalypt species. **Industrial Crops and Products**, v. 66, p. 89–95, 2015.

NERY, I. R. A. M. *et al.* Estudo morfológico de fibras de três espécies do Cerrado como fonte de matéria prima para celulose e papel. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 3., 2018, Recife. **Anais [...]**. Recife: Cointer - PDVAGRO, 2018.

OLIVEIRA, E. *et al.* Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Viçosa: **IPEF**, 1990. (Boletim Técnico, 2).

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.

OLIVEIRA, E. B. *et al.* **Determinação da Quantidade de Madeira, Carbono e Renda da Plantação Florestal**. Colombo: Embrapa Floresta, 2011. 39 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 220).

PAULA, J. E. Caracterização anatômica da madeira de sete espécies Amazônicas com vistas à produção de energia e papel. **Acta Amazonica**, v. 33, n.2, p. 243-262, 2003.

SARTO, C. **Avaliação do processo Super Batch para produção de polpa celulósica a partir de *Bambusa vulgaris***. 2012. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SBARDELLA, M. **Avaliação da qualidade da madeira de *Eucalyptus dunnii* visando a produção de polpa celulósica**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2018.

SEGURA, T. E. S. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada**. 2015. Tese (Doutorado

em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* sp.** 1990. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

SHIMOYAMA, V. R. S.; WIECHETECK, M. S. S. Características da madeira e da pasta termomecânica de *Pinus patula* var. *tecunumanii* para produção de papel imprensa. **Série Técnica IPEF**, v. 9, n. 27, p. 63-80, 1993.

SILVA, J. *et al.* Importância do eucalipto para a indústria de celulose no Brasil. **Revista da Madeira**, Suplemento especial, p. 90-92, 2001.

SILVA, J. C. *et al.* Influência da idade e da posição radial na massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Floresta**, v. 34, n. 1, p. 13- 22, 2004.

SILVA, J. C.; FILHO, M. T.; OLIVEIRA, J. T. S.; CASTRO, V. R. Influência de idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v. 31, n.6, p. 1081-1090, 2007.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Fatos e números do Brasil florestal**. São Paulo: 2006.

SOZIM, P. C. L. **A madeira de *Populus deltoides* obtida de árvores de diferentes idades e seus multiprodutos**. 2020. Tese (Doutorado Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2020.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **T204 cm-97**: solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI Press, 1997.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **T211 om-02**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525 °C. Atlanta: TAPPI Press, 2002.

TOSTES, L. C. L. *et al.* Morfometria das fibras do sistema radicular de *Philodendron bipinnatifidum* Schott (Família Araceae; subgênero Meconostigma). **Biota Amazônia**, v. 3, n. 3, p. 15-22, 2013.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. *Populus deltoides* Bartr. ex. Marsh. 2021. Disponível em:

[https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag\\_654/volume\\_2/populus/deltoides.htm](https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ag_654/volume_2/populus/deltoides.htm). Acesso em: 16 mar. 2023.

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

VIDAURRE, G. *et al.* Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469-480, 2011.

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) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

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

VIVIAN, M. A.; MODES, K. S.; CAETANO, A. P. Potencial da madeira de *Pinus glabra* para produção de polpa celulósica. **Madera y Bosques**, v. 26, n. 3, e2632058, 2020.

WHITE, L. A. S. **Diversidade genética de populações naturais de *Populus deltoides* e *Myrcia ovata* e atividade antifúngica de óleos essenciais de *M. ovata***. 2018. Tese (Doutorado em Agricultura e Biodiversidade) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

## ANEXO A – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE LIGNINA

1. Pesar 300 mg de serragem seca e livre de extrativos e transferir para erlenmeyer de 250 mL;
2. Adicionar 3 mL de  $H_2SO_4$  72% resfriado a 10 - 12°C;
3. Manter em banho-maria e adicionar 84 mL de água destilada quente, transformando o  $H_2SO_4$  72% em  $H_2SO_4$  3%;
4. Colocar o erlenmeyer em autoclave, devidamente vedado com papel alumínio, a 118 °C (27 psi) durante 60 minutos;
5. Filtrar através de cadinho sinterizado tarado, fazendo um fundo com papel de filtro, e transferir toda a lignina do erlenmeyer para o cadinho;
6. Lavar com 700 mL de água quente;
7. Levar o cadinho à estufa a  $103 \pm 2$  °C até peso constante;
8. Pesar o cadinho seco;
9. Calcular o teor de lignina residual (L.R.) através da fórmula:

$$L.R. (\%) = \left[ \frac{\text{massa a,s final}}{0,30 \left( 1 - \frac{E.T.}{100} \right)} \right] \times 100$$

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

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

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