

Qualidade da madeira de *Podocarpus lambertii* visando à produção de polpa celulósica de fibra longa

Podocarpus lambertii wood quality for the production of long fiber pulp

Magnos Alan Vivian*¹ (ORCID 0000-0001-7793-8425), Olavio Rosa Neto¹ (ORCID 0000-0003-1277-257X), Gabrielly Andrade Duarte¹ (ORCID 0009-0008-2316-3490), Scheila Terezinha da Silva Paes¹ (ORCID 0009-0005-5646-815X), Laiara Miguel Moreira¹ (ORCID 0009-0005-4444-9541), Karina Soares Modes¹ (ORCID 0000-0002-2249-2873), Francides Gomes da Silva Júnior² (ORCID 0000-0002-9142-7442), Mário Dobner Júnior³ (ORCID 0000-0001-7216-781X)

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

²Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

³Florestal Gateados S.A., Campo Belo do Sul, SC, Brasil.

Submissão: 15/02/2024 | Aceite: 22/04/2024

RESUMO

O setor florestal brasileiro está baseado na utilização das madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus*, com destaque para o último no estado de Santa Catarina. Visando diversificar a base florestal para usos industriais, e fornecer informações sobre espécies que possam vir a serem alternativas, tornam-se fundamentais estudos que visem a caracterização de madeiras. Nesse sentido pode-se destacar a espécie *Podocarpus lambertii*, que é uma conífera nativa do sul do país, e que apresenta potencial de uso. Desta forma, o presente estudo teve por objetivo avaliar a qualidade da madeira de *P. lambertii* visando à produção de polpa celulósica de fibra longa. Para isso foram coletadas cinco árvores com 26 anos de idade, originárias de um plantio experimental localizado em Campo Belo do Sul/SC. Destas foram retirados discos para determinação das densidades básica e verde, composição química e análise morfológica dos traqueídeos no sentido medula-casca. As densidades básica (0,397 g/cm³) e verde (0,907 g/cm³) obtidas possibilitaram classificar a madeira como leve ou de baixa densidade. Em relação à composição química, observaram-se teores de cinzas (0,69%) e extrativos (4,40%) dentro do esperado para a madeira de coníferas, porém o teor de lignina foi elevado (36,99%), e o teor de holocelulose baixo (58,61%). As dimensões dos traqueídeos, comprimento (1,92 mm), largura (35,06 µm), diâmetro do lume (25,55 µm) e espessura da parede celular (4,75 µm), permitiram classificá-los como moderadamente longos e espessos. Os indicadores anatômicos de qualidade, fração parede (28,08%), coeficiente de flexibilidade (71,88%), índice de Runkel (0,41) e índice de enfieltramento (53,71), foram considerados muito bons para produção de polpa e papel, com base nas classificações relatadas na literatura. De modo geral, os resultados obtidos foram satisfatórios, indicando que a espécie merece atenção e estudos mais aprofundados, podendo ser uma alternativa ou complemento ao segmento de fibras longas, que hoje é abastecido exclusivamente pelo gênero *Pinus* no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Pinheiro-bravo; conífera nativa; celulose e papel; propriedades da madeira.

ABSTRACT

The Brazilian forestry sector is based on the use of *Eucalyptus* and Pine wood, with emphasis on the latter in the state of Santa Catarina. Aiming to diversify the forestry base for industrial uses, and provide information on species that could be alternatives, studies aimed at characterizing wood are essential. In this sense, the species *Podocarpus lambertii* can be highlighted, which is a conifer native to the south of the country, and which has potential for use. Therefore, the present study aimed to evaluate the quality of *P. lambertii* wood with a view to producing long fiber cellulosic pulp. For this, five 26-year-old trees were collected, originating from an experimental planting located in Campo Belo do Sul/SC. Discs were removed from these to determine the basic and green densities, chemical composition and morphological analysis of the tracheids in the pith-bark direction. The basic (0.397 g/cm³) and green (0.907 g/cm³) densities obtained made it possible to classify the wood as light or low density. Regarding the chemical composition, ash (0.69%) and extractives (4.40%) contents were observed within the expected for coniferous wood, however the lignin content was high (36.99%), and low holocellulose content (58.61%). The dimensions of the tracheids, length (1.92 mm), width (35.06 µm), lumen diameter (25.55 µm) and cell wall thickness (4.75 µm), allowed them to be classified as moderately long and thick. The anatomical

quality indicators, wall fraction (28.08%), flexibility coefficient (71.88%), Runkel index (0.41) and felting index (53.71), were considered very good for the pulp and paper production, based on classifications reported in the literature. In general, the results obtained were satisfactory, indicating that the species deserves attention and more in-depth studies, and could be an alternative or complement to the long fiber segment, which is currently supplied exclusively by the *Pinus* genus in Brazil.

KEYWORDS: Pinheiro-bravo; native conifer; pulp and paper; wood properties.

INTRODUÇÃO

O setor de celulose e papel é de extrema importância para a economia brasileira, sendo que atualmente o Brasil ocupa o primeiro lugar no ranking mundial de exportação de celulose, tendo como principais destinos à China (39,7%) e Europa (29,7%), e o segundo lugar de maior produtor de celulose, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (IBÁ 2023).

No ano de 2022 a produção de celulose brasileira apresentou um crescimento de 10,9% em relação ao ano anterior, atingindo 25,0 milhões de toneladas, demonstrando a constante expansão do setor (IBÁ 2023). Já a produção de papel, no ano de 2022, obteve um crescimento de 3,5% em relação ao ano anterior, totalizando 11,0 milhões de toneladas, fazendo com que o Brasil permanecesse como o 9º maior produtor de papel do mundo.

Com base nos dados citados anteriormente, observa-se a constante evolução do setor, por meio do desenvolvimento de novas tecnologias e matérias-primas, as quais visam aumentar ainda mais a sua capacidade produtiva. Em relação às matérias-primas utilizadas para produção de celulose, elas se dividem em dois segmentos de fibras, o de fibras curtas e o de fibras longas, sendo o primeiro abastecido por espécies do gênero *Eucalyptus*, e o segundo com espécies do gênero *Pinus* (VIVIAN et al. 2022a).

Essa dependência de apenas dois gêneros pode causar grandes impactos na cadeia produtiva caso surjam adversidades para as espécies destes, tornando necessária a diversificação de matérias-primas no setor, justificando assim, pesquisas desenvolvidas com o objetivo de avaliar a qualidade da madeira de diferentes espécies, as quais possam ser alternativas ou complementos para tais finalidades.

Nesse sentido, surge a espécie *Podocarpus lambertii* Klotzsch ex Endl., que é uma conífera nativa do Brasil que pode fornecer madeira para o segmento de fibras longas. Segundo LONGHI et al. (1992), o *P. lambertii*, conhecido vulgarmente por “pinheiro-bravo”, é bastante conhecido pelos botânicos e muito apreciado pela qualidade de sua madeira. A espécie pertence à família Podocarpaceae e ocorre naturalmente em solos de fertilidade química variável, na maioria pobre, bem drenados e com textura que varia de franca a argilosa (CARVALHO 2004).

Visando avaliar a qualidade da madeira para produção de celulose, destacam-se o conhecimento das propriedades físicas, químicas e anatômicas (ANTUNES 2009, DIAS & SIMONELLI 2013), pois estas irão afetar diretamente no rendimento industrial, custo e qualidade do produto final (JARDIM et al. 2017). Entre os fatores físicos destaca-se a densidade, entre os parâmetros químicos os teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e cinzas, já entre os aspectos anatômicos as dimensões dos traqueídeos, como comprimento, largura e espessura de parede celular (ROSA 2003, VIVIAN et al. 2021). Deste modo, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da madeira de *P. lambertii* visando à produção de polpa celulósica de fibra longa.

MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção do material

Para condução do estudo foi utilizada a madeira de *Podocarpus lambertii* Klotzsch ex Endl., com 26 anos de idade, proveniente de um plantio experimental realizado na empresa Florestal Gateados S. A., localizado no município de Campo Belo do Sul/SC. A área de plantio estava localizada a uma altitude de 962 metros, em clima Cfb - subtropical úmido com verões amenos, de acordo com a classificação de Köppen (EMBRAPA 2012).

Foram coletadas cinco árvores da espécie, das quais extraíram-se a primeira tora, com aproximadamente 1,5 m de comprimento e 20,0 cm de DAP (diâmetro à altura do peito = 1,30 m), que foram transportadas para o Laboratório de Recursos Florestais, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Curitiba, para condução da caracterização tecnológica da madeira.

A partir das toras foram retirados discos da base para caracterização morfológica dos traqueídeos, e

discos do DAP que foram utilizados na determinação da densidade. Já para composição química utilizaram-se as amostras sobressalentes dos discos retirados da base e do DAP, como uma amostra composta.

Densidade básica e verde

Para determinação da densidade foram utilizados os discos extraídos do DAP, dos quais foram confeccionadas duas cunhas opostas, as quais foram mantidas submersas em água até completa saturação. Após esse procedimento, foi determinado o volume saturado das mesmas seguindo as recomendações da norma NBR 11.941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 2003). Após a obtenção do volume saturado, realizou-se a pesagem em balança de precisão para a obtenção da massa úmida.

Para obtenção da massa seca das cunhas, as mesmas foram submetidas à secagem à temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, em estufa com circulação forçada de ar. A partir dos valores de massa seca, massa úmida e volume saturado, calcularam-se a densidade básica e verde de cada uma das duas cunhas extraídas, por meio das equações 1 e 2, respectivamente, e a média para cada árvore a partir destas.

$$Db = \frac{Ms}{Vs} \quad (1) \qquad Dv = \frac{Mu}{Vs} \quad (2)$$

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

Composição química

Para determinação da composição química utilizou-se as amostras sobressalentes dos discos retirados da base e do DAP, que foram transformados em pequenos cavacos, formando uma única amostra composta das cinco árvores. Na sequência os cavacos foram transformados em serragem em um moinho do tipo Willey, após classificados em peneiras vibratórias, selecionando-se a fração que ficou retida entre 40 e 60 *mesh*.

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. Entre os parâmetros avaliados, em triplicada, estão: teor de cinzas (TAPPI T 211 om-02) (TAPPI 2002), extrativos totais (TAPPI T 204 cm-97) (TAPPI 1997), lignina (conforme a metodologia adaptada pelo LQCE/ESALQ/USP) (VIVIAN 2015). O teor de holocelulose (celulose + hemicelulose) foi obtido por diferença, conforme Equação 3.

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

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

Morfologia dos traqueídeos e indicadores anatômicos

Para análise da morfologia dos traqueídeos e seus indicadores anatômicos foram utilizados os discos retirados da base de cada árvore, sendo que estes foram previamente lixados, visando à contagem dos anéis de crescimento. Após a delimitação dos anéis, foram confeccionadas baguetas de 2,0 cm de largura, com orientação radial (medula-casca). A partir das baguetas foram amostradas 5 posições: 0, 25, 50, 75 e 100% da distância radial (sendo 0% próximo a medula, e 100% próximo a casca), das quais confeccionaram-se blocos que foram transformados em pequenos fragmentos (palitos) para a maceração dos elementos celulares.

A maceração foi realizada em tubos de ensaio contendo ácido acético, ácido nítrico e água, na proporção 5:2:1, em banho-maria com temperatura de 100°C , por aproximadamente 1 hora, até individualização dos traqueídeos. Após isso, as amostras foram lavadas e mantidas em tubos de ensaio com água destilada.

A partir do material macerado, montaram-se 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 (microscópio: Leica LAS EZ; lupa: ToupView). 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 lume.

Com software específico foram mensuradas as dimensões dos traqueídeos, sendo 35 repetições para cada posição, totalizando 875 medidas (5 árvores x 5 posições x 35 repetições), baseando-se nas recomendações da *International Association of Wood Anatomists* (IAWA 1989). As características mensuradas foram: comprimento (C), largura (L) e diâmetro do lume (DL). E a partir destas determinaram-se os parâmetros de espessura da parede celular (E), fração parede (FP), coeficiente de flexibilidade (CF), índice de enfeltramento (IE) e índice de Runkel (IR), conforme as equações 4, 5, 6, 7 e 8, respectivamente.

$$E = \left(\frac{L-DL}{2}\right) \quad (4) \quad FP = \left(\frac{2E}{L}\right) \cdot 100 \quad (5) \quad CF = \left(\frac{DL}{L}\right) \cdot 100 \quad (6) \quad IE = \left(\frac{C}{\frac{L}{1000}}\right) \quad (7) \quad IR = \left(\frac{2E}{DL}\right) \quad (8)$$

Em que: E = espessura da parede celular (μm); L = largura do traqueídeo (μm); DL = diâmetro do lume (μm); FP = fração parede (%); CF = coeficiente de flexibilidade (%); IE = índice de enfeltramento; C = comprimento do traqueídeo (mm); IR = índice de Runkel.

Análise dos dados

Os dados obtidos foram armazenados e analisados com o auxílio de planilhas eletrônicas e software estatístico Sisvar (versão 5.7). Inicialmente verificou-se a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias. A densidade e a composição química foram avaliadas através da estatística descritiva, já a morfologia de traqueídeos foi submetida à avaliação por análise de variância (ANOVA), e teste de Tukey a 5% de probabilidade, para verificação do efeito da posição radial (medula-casca) nas dimensões dos elementos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade básica e verde

Na Tabela 1 estão representadas as médias das densidades básica e verde obtidas para a madeira de *P. lambertii* no presente estudo, bem como o desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 1. Densidade básica e verde da madeira de *P. lambertii*.

Table 1. Basic and green density of *P. lambertii* wood.

Densidade	Média (g/cm ³)	DP (g/cm ³)	CV (%)
Básica	0,397	0,008	2,01%
Verde	0,907	0,037	4,12%

Em que: DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.

A densidade básica média observada para a madeira de *P. lambertii* aos 26 anos de idade foi de 0,397 g/cm³, com os dados apresentando um baixo desvio padrão (0,008 g/cm³) e baixo coeficiente de variação (2,01%). De acordo com a classificação proposta pela *International Association of Wood Anatomists* (IAWA 1989), a madeira de *P. lambertii* pode ser classificada como leve ou de baixa densidade (< 0,40 g/cm³).

A densidade básica da espécie em questão encontra-se abaixo dos valores citados por TRIANOSKI et al. (2013) e VIVIAN et al. (2015) para a madeira de *Pinus taeda*, os quais observaram valores de 0,415 e 0,435 g/cm³, para madeiras com 17 e 21 anos, respectivamente. Já comparando aos valores citados por VIVIAN et al. (2022b), que avaliaram a madeira de *P. taeda* com 15 e >30 anos, classificadas pelos pesquisadores como madeira juvenil e adulta, com densidade básica de 0,275 e 0,370 g/cm³, respectivamente, os mesmos são inferiores aos obtidos ao *P. lambertii*. As comparações com a madeira de *P. taeda* são importantes, pois a mesma é a espécie mais utilizada no Brasil para fabricação de polpa celulósica de fibra longa, com as fábricas totalmente adaptadas às características da mesma, de acordo com VIVIAN et al. (2015).

A densidade básica indicada para a produção de celulose e papel encontra-se na faixa entre 0,40 e 0,55 g/cm³, as quais são classificadas como madeiras de densidade leve a média, já que madeiras com densidade abaixo ou acima desse valor podem afetar negativamente o processo de polpação (SILVA et al. 2001, DIAS & SIMONELLI 2013). Deste modo, observa-se que levando em consideração apenas o parâmetro densidade básica, a madeira de *P. lambertii*, embora tenha apresentado um valor ligeiramente abaixo da faixa indicada, poderia ser usada para a fabricação de celulose.

SEGURA (2015) e VIVIAN et al. (2020) mencionam que o conhecimento da densidade básica é essencial para o bom funcionamento de uma fábrica de celulose, pois esta afeta diversas etapas do processo. Os autores citam que a densidade afeta a picagem das toras, impregnação e cozimento dos cavacos, estando diretamente relacionada ao rendimento e consumo específico de madeira.

Em relação à densidade verde, observa-se que o valor médio obtido no presente estudo (0,907 g/cm³) é inferior aos citados por BONAZZA et al. (2022), que observaram valores de 0,966 e 1,023 g/cm³ para a madeira de *P. taeda* com 9 e 21 anos, respectivamente. Tal variável é importante no processo de abastecimento e comercialização de madeira pelas empresas e produtores, pois o conhecimento da mesma possibilita conversões entre peso e volume, facilitando a negociação, sem perdas de ambas as partes (OLIVEIRA et al. 2011, VIVIAN et al. 2023). NÚÑEZ (2007) menciona também que a densidade verde é utilizada para estimar o peso da carga dos veículos de extração e transporte de madeira dos reflorestamentos até às empresas.

Composição química

A composição química da madeira de *P. lambertii*, referente aos componentes cinzas, extrativos, lignina e holocelulose, pode ser observada na Figura 1. Os valores médios obtidos apresentaram um baixo desvio padrão (entre parênteses).

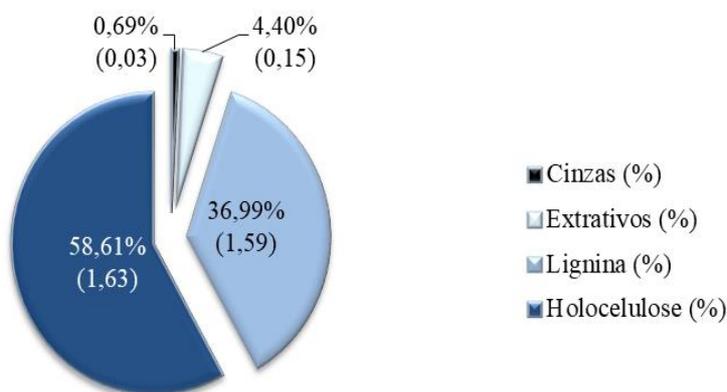


Figura 1. Composição química da madeira de *P. lambertii*.

Figure 1. Chemical composition of *P. lambertii* wood.

O teor de cinzas, que representa a fração inorgânica da madeira, observado para a madeira de *P. lambertii* (0,69%) está em conformidade com o intervalo citado por FENGEL & WEGENER (1989), o qual varia entre 0,1 a 1% para espécies que crescem em zonas temperadas, mas que pode chegar a 5% para àquelas de zonas tropicais e subtropicais. O valor obtido para a espécie em questão situa-se no intervalo de 0,22% (VIDRANO 2019) e 0,74% (VIANA et al. 2021) citado na literatura para o *P. taeda*.

O teor de extrativos totais encontrado para a madeira de *P. lambertii* (4,40%) situa-se na faixa de variação citada por KLOCK & ANDRADE (2013), que mencionam valores entre $5 \pm 3\%$ para coníferas. O valor obtido para a espécie avaliada está acima do teor de extrativos citado por VIVIAN et al. (2015) para o *P. taeda* aos 21 anos (2,83%), porém foi similar ao indicado por VASCONCELOS (2005) para o *P. taeda* aos nove anos de idade (4,50%). De acordo com HASSEGAWA (2003), o teor de extrativos varia em função de fatores edafoclimáticos, fertilização, estação do ano, idade das árvores, sendo que indivíduos mais jovens, com maior proporção de lenho inicial, apresentam maior quantidade de extrativos e lignina, comparada com a madeira de lenho tardio.

CARDOSO et al. (2001) e SEGURA (2012) mencionam que para a indústria de celulose são desejáveis madeiras com baixos teores de cinzas e extrativos, pois estes podem causar problemas como corrosões, entupimentos e incrustações nos equipamentos ("pitch"), diminuindo a vida útil dos maquinários e aumentando os custos de manutenção. Neste sentido, observa-se que a madeira de *P. lambertii* apresenta parâmetros que se assemelham à espécie mais utilizada no Brasil para produção de polpa de fibra longa, que é o *P. taeda*, o que é interessante.

Em relação ao teor de lignina total observado para a madeira de *P. lambertii* (36,99%), este pode ser considerado muito elevado, estando acima do intervalo citado por KLOCK & ANDRADE (2013) para

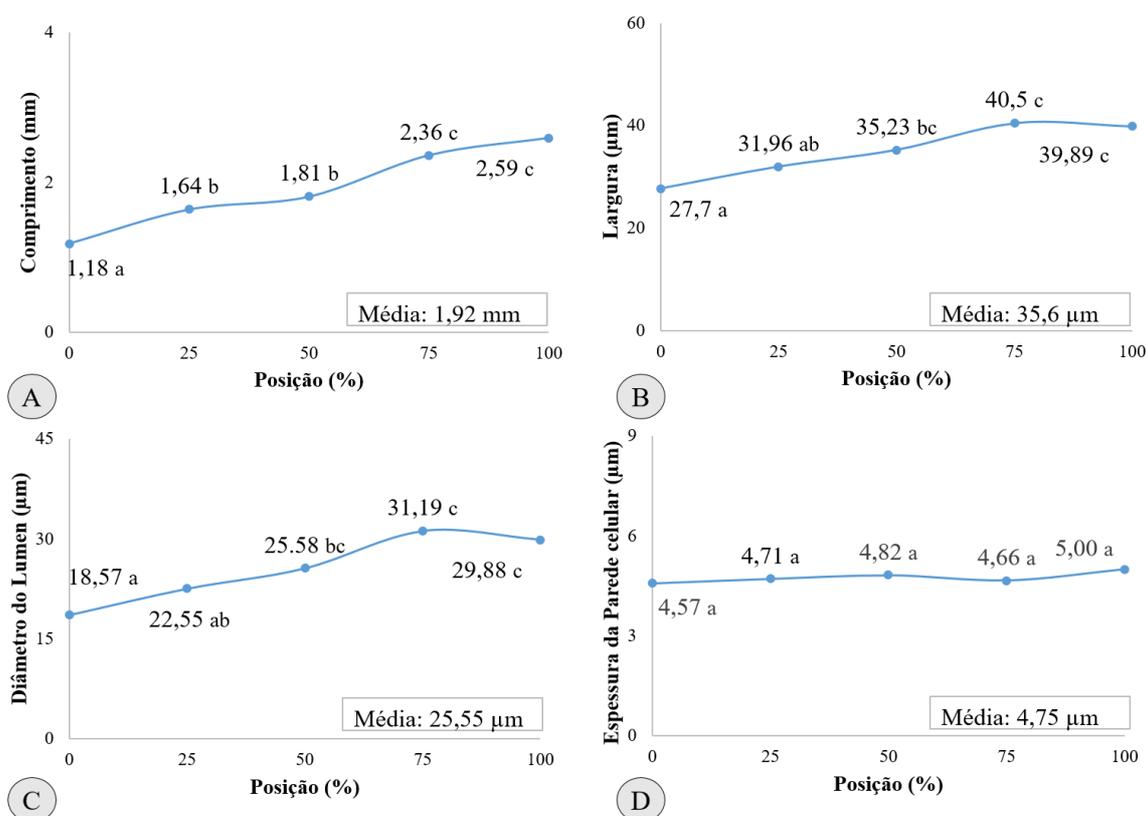
coníferas ($28 \pm 2\%$). Para a madeira de *P. taeda* são relatados na literatura valores de lignina de 28,40 e 29,83% por VASCONCELOS (2005) e AMPESSAN et al. (2015), respectivamente. Uma espécie que apresenta teor de lignina similar ao obtido no presente estudo com o *P. lambertii*, é o *Cupressus lusitanica*, que conforme ALMEIDA et al. (2016), apresentou 36,21%.

Para SEGURA (2012), assim como os extrativos, altos teores de lignina também são considerados indesejados no processo de polpação, pois interferem no rendimento de polpa celulósica e no consumo de reagentes, já que um dos principais objetivos do processo é a remoção da lignina. Desta forma, baixos teores de lignina são desejáveis por tornarem o processo de deslignificação mais fácil, assim como, permitirem condições de cozimento menos intensas e menor degradação das fibras/traqueídeos. Nesse sentido, o valor elevado observado para a madeira de *P. lambertii* foi um aspecto negativo, pensando na utilização da mesma para produção de polpa celulósica. Vale a pena salientar que isto é apenas um indicativo, o qual deve ser comprovado a partir de curvas de polpação.

Por fim, o teor de holocelulose obtido para a madeira de *P. lambertii* (58,61%) foi inferior à faixa esperada para coníferas, que de acordo com KLOCK & ANDRADE (2013), varia entre 65 e 75%. O valor observado para a espécie está abaixo do encontrado por AMPESSAN et al. (2015) e VIVIAN et al. (2015) para o *P. taeda*, que citam valores de 66,17 e 70,46%, respectivamente. Porém é similar ao relatado para a espécie *C. lusitanica* (59,19%) por ALMEIDA et al. (2016). Uma explicação para o baixo teor de holocelulose é o elevado teor de lignina presente na composição de madeira da espécie avaliada. FAVARO (2015) salienta que o teor de holocelulose está intimamente associado ao rendimento da polpação, desta forma o baixo valor obtido para o *P. lambertii* é um aspecto negativo da espécie.

Morfologia dos traqueídeos e indicadores anatômicos

Na Figura 2 encontram-se os valores médios das dimensões dos traqueídeos da madeira de *P. lambertii* ao longo das posições radiais analisadas (0, 25, 50, 75 e 100%), em que 0% representa a posição mais próxima à medula, 100% mais próxima à casca.



(A) comprimento; (B) largura; (C) diâmetro do lume; (D) espessura da parede celular. Letras diferentes indicam variações significativas entre as posições radiais (Tukey $p > 0,05$).

Figura 2. Dimensões dos traqueídeos e sua variação radial para madeira de *P. lambertii*.

Figure 2. Tracheid dimensions and their radial variation for *P. lambertii* wood.

Analisando as dimensões dos traqueídeos ao longo das porções radiais, nota-se que o valor referente ao comprimento foi menor próximo à medula (posição 0% = 1,18 mm), com aumento gradual e significativo no sentido radial, atingindo o valor máximo de 2,59 mm na porção 100%. Com base no valor médio dos traqueídeos (1,92 mm), é possível classifica-los como moderadamente longos, com base na classificação realizada por METCALFE & CHALK (1983).

MARANHO et al. (2006), ao estudarem a madeira de *P. lambertii*, obtiveram um comprimento médio de 2,23 mm, com variação de 1,51 a 2,59 mm entre as camadas de crescimento. Já quando comparado ao gênero *Pinus*, o comprimento dos traqueídeos do *P. lambertii* são bem inferiores, como o relatado por VIVIAN et al. (2015), que citam o valor médio de 3,50 mm para madeira de *P. taeda* com 21 anos de idade.

Geralmente o comprimento é a dimensão que mais é afetada com o passar dos anos da árvore, com tendência de aumento da medula em direção à casca, até o momento que se estabiliza, indicando a transição de madeira juvenil para adulta. Conforme HASSEGAWA (2003), a atividade cambial é mais acelerada durante a formação da madeira juvenil, tendendo a estabilizar durante a formação da madeira adulta, com a maturação do câmbio vascular. Na madeira avaliada neste estudo percebe-se que a estabilização ocorreu a partir da posição de 75% do raio, pois a mesma não diferiu estatisticamente da posição de 100%, indicando que a mesma já pode ser considerada madeira adulta. Com base na contagem e análise dos anéis de crescimento realizada nos discos, observou-se que a posição de 75% equivalia a 16 anos de idade.

Em relação à largura dos traqueídeos, a mesma variou entre 27,70 e 40,50 μm , com valor médio 35,06 μm . O diâmetro do lume variou entre 18,57 e 31,19 μm , com média de 25,55 μm , aproximando-se ao valor encontrado por MARANHO et al. (2006) para a mesma espécie, que foi de 30 μm (25,31 a 32,32 μm). Tanto a largura quanto o diâmetro do lume variaram de forma significativa, aumentando da medula em direção à casca.

Já a espessura da parede celular apresentou uma média de 4,75 μm , muito semelhante à encontrada por MARANHO et al. (2006), de aproximadamente 5,0 μm , em ambos os casos não houve variação significativa no sentido radial, podendo ser classificada como espessa, conforme proposição de MANIMEKALAI et al. (2002).

Quando comparados os dados ao gênero *Pinus*, a largura, diâmetro do lume e a espessura da parede dos traqueídeos do *P. lambertii* são inferiores aos citados por VIVIAN et al. (2015) para madeira de *P. taeda* com 21 anos de idade, que foram 40,55; 27,71 e 6,41 μm , respectivamente.

Na Figura 3 observa-se a variação dos parâmetros indicadores da qualidade da madeira de *P. lambertii*, também representados ao longo das posições radiais (0, 25, 50, 75 e 100%).

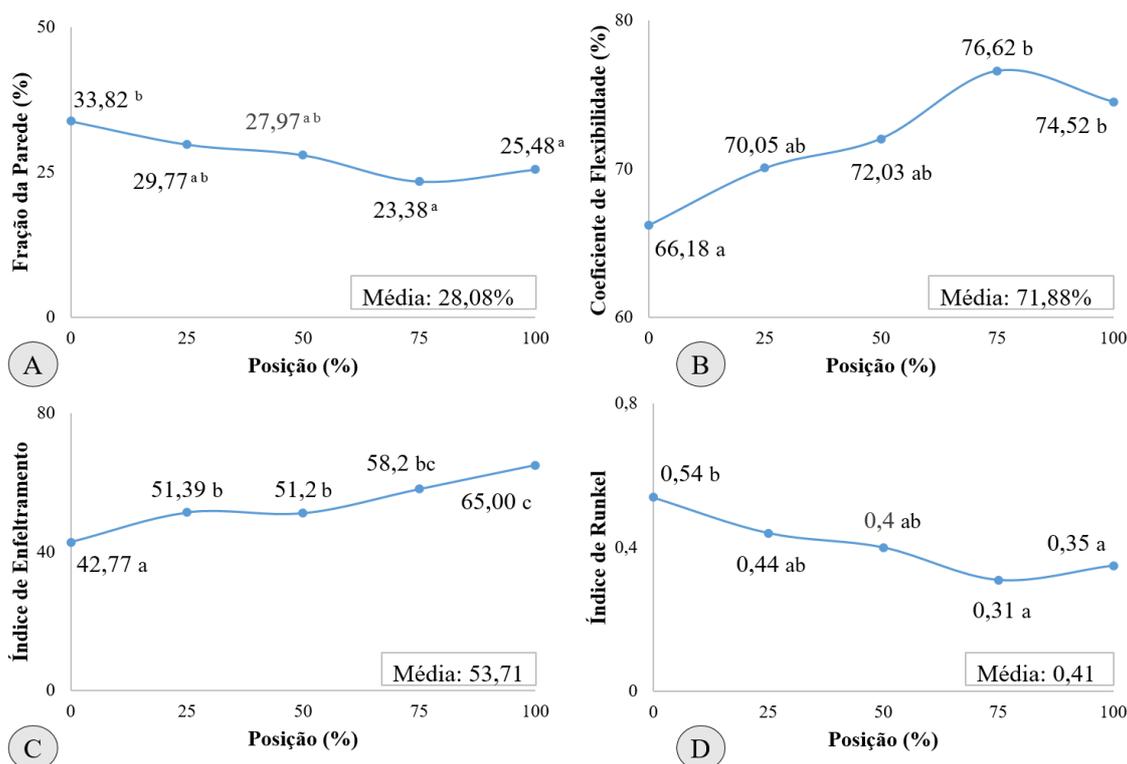
A fração parede apresentou um valor médio de 28,08% (variação significativa entre 23,38 e 33,82%), a qual pode ser classificada, de acordo com KLOCK (2013), como delgada e de baixa rigidez. BALDIN et al. (2017) citam que o ideal é que a fração parede esteja abaixo de 40%, pois assim facilitará o colapso das fibras durante a formação do papel, com ligações mais fortes entre as mesmas. Ainda de acordo com os mesmos autores, as polpas produzidas com espécies que apresentam fibras/traqueídeos com fração parede fina resultam em maior rendimento no processo de polpação, com melhores propriedades de tração, estouro, rasgo, dobramento, resistência superficial e resistência interna da folha.

Já o coeficiente de flexibilidade apresentou um valor médio de 71,88% (variação significativa entre 66,18 e 76,62%), o que de acordo com a classificação proposta por NISGOSKI (2005), apresentará traqueídeos com boa superfície de contato e uma boa união entre os mesmos, com colapso parcial. De acordo com SHIMOYAMA & WIECHETECK (1993) e VIVIAN et al. (2015), o coeficiente de flexibilidade dá indícios do grau de achatamento que as fibras/traqueídeos sofrem no processo de fabricação do papel, sendo que quanto maior o seu valor, maior a flexibilidade das mesmas e maior a probabilidade de ocorrer ligações entre elas, resultando em uma maior resistência a tração e ao estouro.

O índice de Runkel apresentou uma média de 0,41 (variando de forma significativa entre 0,31 e 0,54 no sentido radial), indicando que os traqueídeos da madeira de *P. lambertii* podem ser classificados como muito bons para a fabricação de papel, com base na proposição criada por Runkel e citada por TOSTES et al. (2013), se enquadrando no grupo II (entre 0,25 a 0,50).

VIVIAN et al. (2020) citam que o índice de Runkel dá indicativos sobre o grau de colapso das fibras ou traqueídeos durante o processo de fabricação do papel, que quanto mais baixo for o índice, maior é o grau de colapso, permitindo as fibras uma maior superfície de contato, estabelecendo um maior número de

ligações entre elas, resultando em um papel de maior resistência a tração e ao estouro.



(A) fração parede; (B) coeficiente de flexibilidade; (C) índice de Runkel; (D) índice de enfilramento. Letras diferentes indicam variações significativas entre as posições radiais (Tukey, $p > 0,05$).

Figura 3. Indicadores anatômicos e sua variação radial para madeira de *P. lambertii*.

Figure 3. Anatomical indicators and their radial variation for *P. lambertii* wood.

Por fim, o índice de enfilramento apresentou um valor médio de 53,71 (variando significativamente entre 42,77 e 65,00), estando acima do valor mínimo de 50 para que as fibras sejam flexíveis o suficiente para uso na indústria de celulose e papel, para que possam conferir boas características ao papel produzido, conforme NISGOSKI (2005).

Dentre as espécies observadas na comparação, a madeira de *P. taeda* é a mais comumente utilizada na fabricação de papel de fibra longa, sendo seus valores os principais referenciais nesse sentido. Dessa forma é possível observar que os valores encontrados para fração da parede (28,08%), coeficiente de flexibilidade (71,88%), e índice de Runkel (0,41) para madeira de *P. lambertii* foram similares ou até melhores que os citados por VIVIAN et al. (2015) para o *P. taeda* (32,00%; 68,00% e 0,46, respectivamente).

As características anatômicas dos traqueídeos da madeira de *P. lambertii* são interessantes para fabricação de polpa celulósica, assim novos estudos avaliando seu comportamento em curvas de polpação e produção de papel devem ser realizados, visando aprofundar seu conhecimento, e tornar a espécie uma nova alternativa ou complemento ao segmento de produção de polpa celulósica de fibra longa.

Um ponto a ser levado em consideração é que a questão do crescimento lento do *P. lambertii*, especialmente quando comparado ao *Pinus* que hoje é a conífera mais cultivada do Brasil. Nesse sentido vale destacar que o material avaliado neste estudo não contava com melhoramento genético, ou seja, ainda é passível de avanços significativos neste sentido.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos para a madeira de *P. lambertii* com 26 anos de idade, conclui-se que a mesma apresenta densidade leve ou baixa, estando próximo ao limite mínimo requerido pela indústria para a produção de polpa celulósica. A composição química da mesma está próxima do esperado para a madeira

de coníferas, em especial para os teores de cinzas e extrativos, porém o teor de lignina é elevado, e o teor de holocelulose baixo, o que pode ser prejudicial ao processo de produção de polpa celulósica. As dimensões dos traqueídeos, como comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede celular indicam que os mesmos são classificados como moderadamente longos e espessos, com valores inferiores aos relatados para o *P. taeda*. Já os indicadores anatômicos de qualidade, como fração parede, coeficiente de flexibilidade, índice de Runkel e índice de enfilamento podem ser considerados muito bons para produção de celulose e papel, com base nas classificações relatadas na literatura.

Os resultados obtidos para a madeira de *P. lambertii* foram satisfatórios, com exceção do alto teor de lignina e baixo teor de holocelulose, os demais parâmetros indicam que a espécie merece atenção e estudos mais aprofundados, podendo ser uma alternativa ou complemento ao segmento de fibras longas, que hoje é abastecido exclusivamente pelo gênero *Pinus* no Brasil. Outro ponto que vale enfatizar é que a espécie avaliada não conta com melhoramento genético, deixando em aberto à possibilidade de avanços em suas propriedades por meio de seleção e programas de melhoramento florestal.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Empresa Florestal Gateados S. A. pelo apoio com a madeira utilizada na pesquisa, e ao Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE), da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP) pela realização das análises químicas. Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa que possibilitou a condução da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT. 2003. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Determinação da densidade básica em madeira: NBR 11.941. Rio de Janeiro: ABNT. 6p.
- ALMEIDA CCF et al. 2016. Applicability evaluation of *Cupressus lusitanica* for pulp production. *Maderas, Ciencia y Tecnologia* 18: 651-662.
- AMPESSAN CGM et al. 2015. Otimização do tempo de estocagem de cavacos de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* para a produção de celulose e papel. *Scientia Forestalis* 43: 885-893.
- ANTUNES FS. 2009. Avaliação da qualidade da madeira das espécies *Acacia crassicarpa*, *Acacia mangium*, *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus globulus* e *Populus tremuloides*. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira). Piracicaba: ESALQ. 82p.
- BALDIN T et al. 2017. Anatomia da madeira e potencial de produção de celulose e papel de quatro espécies jovens de *Eucalyptus* L'Hér. *Revista Ciência da Madeira* 8: 114-126.
- BONAZZA M et al. 2022. Efeito da idade, sortimento e tempo de estocagem na densidade verde da madeira de *Pinus taeda* L.. *Ciência Florestal* 32: 735-756.
- CARDOSO GV et al. 2001. Adequação de metodologia amostral de madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus globulus* para determinação do teor de cinzas. In: 34º Congresso Anual de Celulose e Papel. Anais... São Paulo: ABTCP. p.7.
- CARVALHO PER. 2004. Pinheiro-Bravo - *Podocarpus lambertii*, Colombo, PR: Embrapa Florestas (Circular Técnica 95).
- DIAS OA & SIMONELLI G. 2013. Qualidade da madeira para a produção de celulose e papel. *Enciclopédia Biosfera* 9: 3632-3646.
- EMBRAPA. 2012. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado e Colombo: Embrapa Florestas. 333p.
- FAVARO JSC. 2015. Estudos da polpação kraft, branqueamento e refino de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Guaratinguetá: UNESP. 178p.
- FENGEL D & WEGENER G. 1989. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin: Walter de Gruyter. 613p.
- HASEGAWA M. 2003. Qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. de procedência da África do Sul. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 107p.
- IBÁ. 2023. Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual 2023. São Paulo: IBÁ. 92 p.
- IAWA. 1989. International Association of Wood Anatomists. List of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin* 10: 219-332.
- JARDIM JM et al. 2017. Avaliação da qualidade e desempenho de clones de eucalipto na produção de celulose. *O papel* 78: 122-129.
- KLOCK U & ANDRADE AS. 2013. *Química da madeira*. 4.ed. Curitiba: UFPR. 87p.
- KLOCK U. 2013. Polpa e Papel – Propriedades do papel. Disponível em:

- <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/polpaepapel/papelpropriedades2013.pdf>>. Acesso em: 09 de fev. 2024.
- LONGHI SJ et al. 1992. Composição florística e estrutura fitossociológica de um “capão” de *Podocarpus lambertii* Klotz., no Rio Grande do Sul. *Ciência Florestal* 2: 09-26.
- MANIMEKALAI V et al. 2002. Fibras of *Sorghum bicolor* (L.) Moench and their potential use in paper and board making. *Phytomorphology* 52: 61-67.
- MARANHO LT et al. 2006. Variação dimensional das traqueídes ao longo do caule de *Podocarpus lambertii* Klotzsch ex Endl., Podocarpaceae. *Acta Botanica Brasilica* 20: 633-640.
- METCALFE CR & CHALK L. 1983. Anatomy of the dicotyledons: wood structure and conclusion of the general introduction. 2.ed. Clarendon Press.
- NISGOSKI S. 2005. Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 160p.
- NÚÑEZ CE. 2007. Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de Madera. *Revista Ciencia e Tecnologia* 9: 44-50.
- OLIVEIRA EB et al. 2011. Determinação da quantidade de madeira, carbono e renda da plantação florestal. Colombo: Embrapa Floresta. 39p. (Embrapa Florestas. Documentos 220).
- ROSA CAB. 2003. Influência do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus globulus* na produção e na qualidade da celulose kraft. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Santa Maria: UFSM. 149p.
- SEGURA TES. 2012. Avaliação das madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Acacia mearnsii* para a produção de celulose kraft pelos processos convencionais de Lo-Solids. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 99p.
- SEGURA TES. 2015. Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 198p.
- SHIMOYAMA VRS & WIECHETECK MSS. 1993. Características da madeira e da pasta termomecânica de *Pinus patula* var. *tecunumanii* para produção de papel imprensa. *IPEF* 9: 63-80.
- SILVA J et al. 2001. Importância do eucalipto para a indústria de celulose no Brasil. *Revista da Madeira*: 90-92.
- TAPPI. 2002. Technical Association of The Pulp and Paper Industry. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C: T 211 om-02. Atlanta: TAPPI. 5p.
- TAPPI. 1997. Technical Association of The Pulp and Paper Industry. Solvent extractives of wood and pulp: T 204 cm-97. Atlanta: TAPPI. 4p.
- TOSTES LCL et al. 2013. Morfometria das fibras do sistema radicular de *Philodendron bipinnatifidum* Schott (Familia Araceae; subgênero Meconostigma). *Biota Amazônia*, 3: 15-22.
- TRIANOSKI R et al. 2013. Avaliação da estabilidade dimensional de espécies de pinus tropicais. *Floresta e Ambiente* 20: 398-406.
- VASCONCELOS FSR. 2005. Avaliação do processo SuperBatch™ de polpação de *Pinus taeda*. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 104p.
- VIANA ACC et al. 2021. Caracterização física e química das madeiras de pinus e de itaúba. *Madeiras Nativas e Plantadas do Brasil: Qualidade, Pesquisas e Atualidades*. Editora Científica Digital 2: 101-116.
- VIDRANO BA. 2019. Produção de celulose kraft e papel de madeiras de *Pinus taeda* L. e *Pinus patula* Schltdl & Cham. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Santa Maria: UFSM. 139p.
- VIVIAN MA. 2015. Aumento da eficiência do processo kraft de polpação a partir de pré-tratamento de cavacos de madeira de eucalipto. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 125p.
- VIVIAN MA et al. 2015. Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica kraft. *Scientia Forestalis* 48: 183-191.
- VIVIAN MA et al. 2020. Caracterização tecnológica da madeira de *Cupressus lusitanica* visando à produção de polpa celulósica. *Pesquisa Florestal Brasileira* 40: 1-9.
- VIVIAN MA et al. 2021. Características da madeira de *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir). *Scientia Forestalis* 49: 1-13.
- VIVIAN MA et al. 2022a. Efeito da carga alcalina nos parâmetros de polpação da madeira de *Cryptomeria japonica*. *Ciência Florestal* 32: 939-958.
- VIVIAN MA et al. 2022b. Ciclos de produção de *Pinus taeda* L. com mais de 30 anos: uma alternativa para obtenção de madeira para usos sólidos e estruturais. *Ciência Florestal* 32: 573-596.
- VIVIAN MA et al. 2023. Propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Cryptomeria japonica*. *Pesquisa Florestal Brasileira* 43: 1-10.