

QUALIDADE DA MADEIRA DE CLONES POLIPLÓIDES DE EUCALIPTO

Fabiana Rezende Muniz¹, Beatriz Stangherlin Santucci¹, Aurelio Mendes Aguiar¹, José Wilacildo de Matos¹, Leandro de Siqueira¹

¹ Suzano S.A. Brasil

RESUMO

A geração de clones poliploides de eucalipto via indução química pode ser uma alternativa para gerar variabilidade e impulsionar o melhoramento genético do eucalipto. O objetivo desse trabalho foi comparar clones de eucalipto tetraploides e a testemunha diploide quanto à qualidade da madeira para a produção de polpa de celulose e papel, por meio de análises de propriedades físicas e anatômicas da madeira. Foram avaliados seis materiais genéticos híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, sendo cinco clones tetraploides e o clone diploide que deu origem aos tetraploides. Os tetraploides foram gerados via indução química *in vitro* utilizando colchicina e tiveram a poliploidização confirmada via citometria de fluxo. Em seguida, foram aclimatizados em casa de vegetação e instalados em minijardim clonal. Mudanças produzidas a partir de estacas retiradas deste minijardim clonal foram enviadas para plantio de campo (teste clonal com 20 repetições) no Estado do Mato Grosso do Sul. Aos cinco anos e seis meses de plantio, cinco árvores de cada um dos seis materiais genéticos foram colhidas, cavaqueadas e seguiram para avaliações laboratoriais. A qualidade da madeira dos clones estudados foi caracterizada a partir da determinação da densidade básica e da composição química. Já as características morfológicas das fibras foram determinadas para as polpas marrom obtidas a partir do cozimento das madeiras. Os resultados obtidos permitiram observar que a densidade básica média do clone diploide é cerca de 7% maior do que a média dos valores obtidos para os clones tetraploides, sendo que não houve diferença estatística significativa entre as densidades básicas determinadas para os cinco poliploides. Já o comprimento médio e a largura das fibras dos clones tetraploides são cerca de 16% e 20%, respectivamente, maiores que as dimensões encontradas para o clone diploide testemunha. Apesar dos demais parâmetros morfológicos indicarem uma menor população fibrosa e um maior *coarseness* para as fibras dos poliploides sintéticos, os índices de qualidade da polpa celulósica calculados para os seis materiais indicaram comportamentos similares, com diferenças menores

que 3% entre as médias dos poliploides e os valores do diploide. Destarte, os resultados obtidos indicam um bom potencial para uso da poliploidia no melhoramento genético de eucalipto e na geração de novos clones.

Palavras-chave: eucalipto poliploide, qualidade da madeira, papel e celulose.

INTRODUÇÃO

A poliploidia é o aumento no número de conjuntos de cromossomos de uma espécie vegetal. São consideradas poliploides as espécies que contêm mais de dois genomas ou conjuntos cromossômicos completos dentro de um mesmo núcleo, ou seja, que não são diploides. Muitas espécies cultivadas são poliploides naturais, originados durante o processo de evolução dessa espécie, como cana-de-açúcar, trigo, batata, café, morango e algodão (Wood *et al.*, 2009).

Poliploides artificiais podem ser gerados por meio do uso de agentes antimitóticos, os quais agem na formação das fibras de fuso acromático durante a divisão celular, impedindo a separação dos cromossomos na anáfase e ocasionando a duplicação da quantidade de cromossomos. O agente antimitótico mais amplamente utilizado é a colchicina (Pereira *et al.*, 2012; Castillo *et al.*, 2020). Mas a eficácia na obtenção artificial de poliploides depende não somente do agente antimitótico, mas de uma série de outros fatores, como sua concentração, o tipo de explante e a forma de exposição do explante. Sendo assim, são necessários testes e experimentos para se desenvolver um protocolo eficiente para geração de poliploides (Pereira *et al.*, 2012).

Para as espécies diploides e arbóreas, como o eucalipto, há um grande interesse em explorar a poliploidização artificial induzida. Isso porque a poliploidia é considerada uma alternativa para impulsionar os ganhos do melhoramento genético, sendo empregada para diferentes finalidades e culturas, podendo maximizar características de interesse, como produtividade e tolerância a estresses (Souza *et al.*, 2022; Castillo *et al.*, 2020).

No caso do eucalipto, a poliploidia pode apresentar bom potencial também para diferenciação das propriedades físicas e anatômicas da madeira (Souza *et al.*, 2021), o que influenciaria a produção de papel e celulose.

Com isso, esse trabalho teve como objetivo comparar clones de eucalipto poliploides com a testemunha diploide quanto à qualidade da madeira e à morfologia das fibras, obtendo-se assim informações relevantes para a compreensão da adequação dos materiais para a produção de celulose e papel.

MÉTODOS

1. Geração dos clones poliploides

Os clones utilizados nesse estudo são híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Os poliploides são tetraploides ($2n=4x$), ou seja, possuem quatro conjuntos de cromossomos e foram gerados via indução *in vitro*, com uso do agente antimitótico colchicina. O clone diploide utilizado como testemunha foi o fornecedor de material vegetal (brotos *in vitro*) para as induções químicas.

Após o tratamento com a colchicina, os brotos foram multiplicados e avaliados via citometria de fluxo, para quantificação do conteúdo de DNA e confirmação da ploidia. Em seguida, foram aclimatizados em casa de vegetação e destinados à formação de minijardim clonal para multiplicação e produção de mudas clonais via estaquia.

2. Teste clonal

Vinte repetições de cada um dos materiais genéticos avaliados nesse estudo foram levadas para experimento de campo no Estado do Mato Grosso do Sul, em 2015. Além dos seis materiais aqui avaliados, outros 94 também foram avaliados no mesmo teste de campo, incluindo outros clones tetraploides e clones operacionais usados como testemunhas. O delineamento utilizado para o teste foi o Delineamento em Blocos Incompletos, Látice 10x10, uma planta por parcela (*single tree plot* – STP), com 20 repetições por tratamento.

Após cinco anos de cultivo, foi realizada medição de altura e diâmetro à altura do peito (DAP) e seleção com base em volume. Os cinco clones tetraploides utilizados nesse estudo (T1 a T5) foram os melhores em volume no teste clonal e, por isso, foram selecionados, juntamente com seu clone testemunha diploide (D), para avaliação da qualidade da madeira.

3. Amostragem para as análises de qualidade da madeira

Após cinco anos e seis meses de plantio, cinco árvores de cada um dos seis materiais genéticos selecionados (cinco tetraploides e um testemunha diploide) foram certificadas geneticamente e tiveram a ploidia confirmada via citometria de fluxo. Em seguida, tais árvores foram abatidas, e as toras produzidas foram então secas e cavaqueadas. Os cavacos obtidos foram classificados e posteriormente reservados para a determinação da qualidade da madeira.

4. Determinação da qualidade da madeira

A qualidade da madeira dos clones estudados foi caracterizada a partir da determinação da densidade básica e da composição química.

A densidade básica das amostras de madeira foi determinada de acordo com o método do *Máximo Teor de Umidade* (Foekel *et al.*, 1971), que mensura a relação entre o peso dos cavacos absolutamente secos (g) e o seu volume em estado de completa saturação de água. A saturação dos cavacos foi realizada a partir da impregnação com água a 65 ± 5 °C e $1,5\pm 0,5$ kg/cm² de pressão por um tempo mínimo de 72 horas. Já a massa seca dos cavacos foi obtida após secagem em estufa a 105 ± 2 °C por aproximadamente 16 horas, até ser constatado o peso constante das amostras. Os valores de massa obtidos para os cavacos completamente saturados e os cavacos totalmente secos foram então utilizados para o cálculo da densidade básica.

A composição química das amostras de madeira foi determinada para amostras de serragem, obtidas a partir da moagem dos cavacos e posterior classificação para a obtenção de frações com dimensões menores que 60 mesh. O teor de extrativos da madeira foi determinado de acordo com metodologia adaptada da norma TAPPI – T204 cm-97 – *Solvent Extractives of Wood and Pulp*. A serragem livre de extrativos foi então utilizada para a determinação do teor de lignina a partir de metodologia adaptada da norma TAPPI – T222 om-98 – *Acid insoluble lignin in wood and pulp*. Por fim, o teor de holocelulose foi determinado por balanço de massa, subtraindo-se do teor total os teores previamente quantificados de extrativos e lignina.

5. Polpação

Para a obtenção de materiais com fibras individualizadas para a posterior caracterização morfológica, realizou-se a polpação das amostras de cavaco de madeira. As reações de polpação foram realizadas a partir do cozimento da madeira a 170 °C por 140 minutos, utilizando um licor branco de sulfidez 25,6% e mantendo-se uma relação licor/madeira de 4:1. Os cozimentos foram realizados em reator rotativo laboratorial tipo autoclave, variando-se a carga alcalina para a obtenção de um Kappa objetivo de 18 ± 1 . As polpas marrons obtidas após a desagregação e depuração dos cavacos tratados foram então reservadas para a caracterização morfológica das fibras.

6. Análise morfológica das fibras

As características morfológicas das fibras que compõem as amostras de polpa marrom foram determinadas por meio do Analisador de Imagem de Fibra FS5 (Valmet). Este equipamento permite a caracterização das medidas morfológicas por obtenção e análise de imagens das fibras quando em fluxo de água laminar, utilizando uma câmera de alta definição com dispositivo de carga acoplada e os princípios básicos de microscopia ótica. Vale mencionar que, enquanto o comprimento e a largura das fibras são parâmetros mensurados a partir das imagens, a

espessura de parede, o *coarseness* e o número de fibras por grama são parâmetros calculados e que levam em conta a massa de amostra utilizada na análise, assim como a densidade da fibra.

A partir dos valores obtidos de comprimento de fibra (c), largura de fibra (d) e espessura de parede (e), calcularam-se índices indicativos da qualidade da polpa celulósica (Foelkel; Barri-chelo, 1975), sendo estes: (1) Índice de Runkel = $2 * e / [d - 2 * e]$; (2) Coeficiente de Flexibilidade = $[d - 2 * e] * 100 / d$; e (3) Índice de Enfieltramento = c / d .

Para a comparação estatística dos resultados obtidos para o clone diploide e os cinco clones tetraploides, foi empregado o método LSD de Fisher em ANOVA a 95% de Confiança.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de qualidade da madeira dos clones estudados, representados neste trabalho pelos valores de densidade básica e composição química, encontram-se detalhados na Figura 1.

Os resultados obtidos permitem observar que a densidade básica média do clone diploide (552 kg/m^3) é cerca de 7% maior do que a média dos valores obtidos para os clones tetraploides ($502 - 524 \text{ kg/m}^3$) (Figura 1 (A)). Menores valores de densidade básica para clones tetraploides quando comparados aos diploides de origem também foram observados por Souza *et al.* (2021). Os valores de densidade básica encontrados neste trabalho são consistentes com os reportados na literatura (Bassa *et al.*, 2007) e também com os mensurados nas fábricas de celulose para a espécie de eucalipto em questão. No entanto, os valores obtidos para os cinco tetraploides sintéticos em estudo não diferiram estatisticamente entre si, resultado este que deve ser destacado. A densidade

básica de uma madeira é resultante de outras características, como anatômicas (teor de vasos, teor de células de parên-quima, tamanho e número de fibras, espessura da parede celular, entre outras), físicas (como a porosidade) e químicas. Deste modo, madeiras de mesma densidade básica, porém de clones e espécies distintos, podem ter comportamentos diferentes nos processos de produção de celulose (Foelkel, C., 2015). No caso deste estudo, a homogeneidade da densidade básica entre os clones tetraploides demonstra um potencial para as florestas plantadas para o setor de celulose, visto que permite um melhor ajuste dos parâmetros do processo visando a otimização da produção.

No que tange a composição química dos materiais em estudo (Figura 1 (B)), observa-se que os teores dos constituintes da madeira – aqui expressos como extrativos, lignina total e holocelulose – são consoantes aos valores reportados para o gênero *Eucalyptus* (Bassa *et al.*, 2007; Gomide *et al.*, 2005; Mokfienski *et al.*, 2008; Sette Jr *et al.*, 2014). Para os clones tetraploides produzidos, foram obtidos teores de extrativos de 3,3% a 3,9%, valores estes 27% a 14% menores que o obtido para o clone diploide testemunha (4,5%). Elevados teores de extrativos estão associados a problemas potenciais na fabricação da celulose, não só pelo aumento do consumo de álcalis para a sua remoção como também pela redução da qualidade da polpa formada, pelas dificuldades no branqueamento e pelo aumento da probabilidade de deposição de pitch nas linhas e nos equipamentos (Gomide *et al.*, 2005). Já os teores de lignina total de todos os materiais avaliados (expressos com base na madeira livre de extrativos) estiveram entre 27,2% e 27,9%, sendo esta diferença menor do que o intervalo de confiança da própria metodologia de análise.

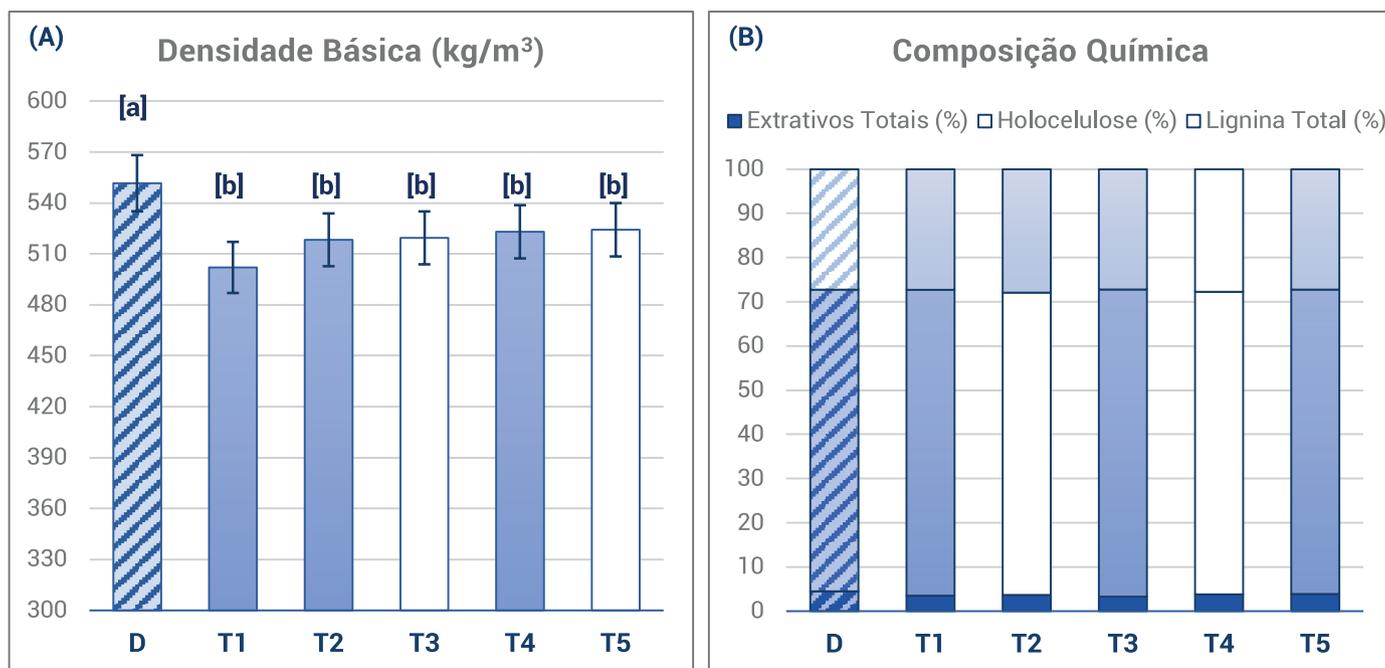


Figura 1: Qualidade da madeira do clone testemunha diploide (D) e dos 5 clones tetraploides produzidos (T1 a T5) – (A) Densidade básica e (B) Composição química. Os índices destacados acima das barras e de mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o método LSD de Fisher a 95% de confiança

A análise morfológica das fibras constituintes de uma polpa celulósica é uma ferramenta importante para compreender o potencial de uma determinada madeira para a produção dos diferentes tipos de papel. Isto porque as principais variáveis de processo, como refinação e formação, e as propriedades de qualidade do papel são função, além de outros aspectos, do perfil de fibrilação, delaminação, colapsabilidade, resistência individual ou mesmo da flexibilidade das fibras que compõem a polpa (Barrichelo; Brito, 1976; Foelkel, 2009; Foelkel, 2010). Em outras palavras, as dimensões das fibras, assim como a população fibrosa em uma determinada massa, são aspectos considerados na avaliação da qualidade de uma madeira para a produção de celulose e papel por estarem relacionadas com as propriedades físicas e com as características superficiais e óticas do produto.

Vale ressaltar que, no presente estudo, as características morfológicas foram determinadas para amostras de polpa marrom, isto é, para fibras individualizadas obtidas após o processo de cozimento da madeira, porém não submetidas ao branquea-

mento para a remoção dos teores residuais de lignina. De acordo com Levlin e Söderhjem (1999) tanto a redução da madeira em cavacos quanto as condições de cozimento e branqueamento provocam a alteração das dimensões das fibras. Enquanto o processo de cavaqueamento pode reduzir o comprimento das fibras por corte, a solubilização da lignina e das hemiceluloses as torna mais finas e flexíveis. Ademais, os tratamentos mecânicos aos quais as fibras são submetidas durante a polpação, como mistura e desintegração, podem deformá-las e induzir curvaturas graduais e contínuas (“curl”) e curvaturas torcidas (“kink”), o que conseqüentemente influenciará em um comprimento projetado menor que o comprimento real.

A partir do gráfico apresentado na Figura 2(A), observa-se que o comprimento médio das fibras dos clones tetraploides (0,87 - 0,91 mm) é cerca de 16% maior que o comprimento médio das fibras do clone diploide (0,77 mm). Relação similar entre os comprimentos médios dos clones tetraploides e das testemunhas diploides foi observada por Souza *et al.* (2021), que

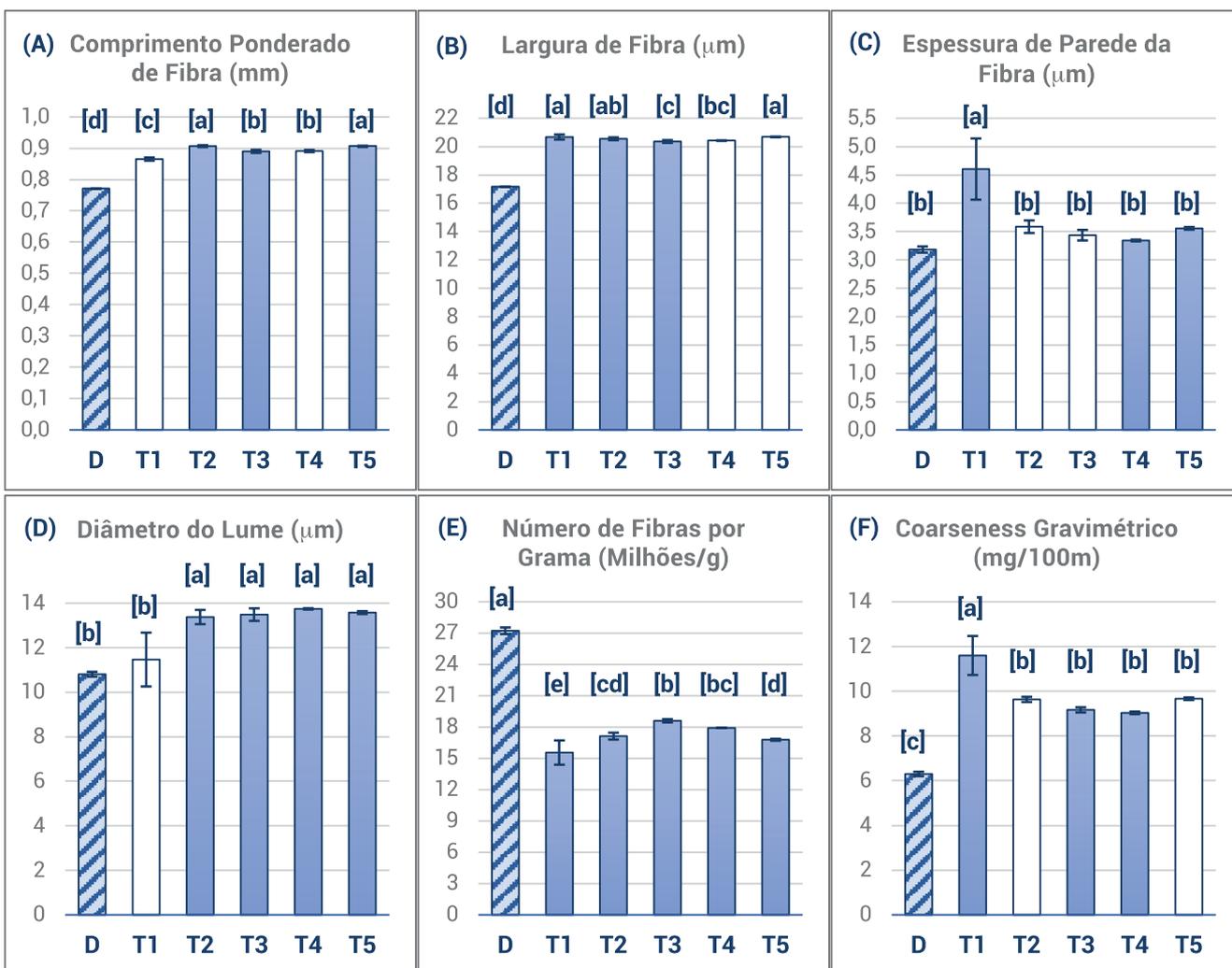


Figura 2. Propriedades morfológicas das fibras das polpas marrom obtidas a partir do clone testemunha diploide (D) e dos cinco clones tetraploides produzidos (T1 a T5). Os índices destacados acima das barras e de mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o método LSD de Fisher a 95% de confiança

reportou um incremento de 21% neste parâmetro morfológico. A um nível de significância de 0,05, constatou-se similaridade estatística apenas entre os clones T3 e T4 e entre os clones T2 e T5. Contudo, destaca-se que a diferença entre os comprimentos médios das fibras dos 5 tetraploides variou apenas de 2% e 5%.

De modo geral, fibras mais longas permitem a obtenção de papéis de maior resistência. Segundo Barrichelo e Brito (1976), o comprimento médio das fibras possui relação positiva com a resistência à tração, a resistência ao rasgo e a resistência ao arrebatamento do papel. Além da qualidade do produto, a resistência à tração a seco e a úmido e a resistência ao rasgo possuem uma alta relevância na fabricação do papel por estarem diretamente associadas ao bom andamento das máquinas. Contudo, apesar dessa propriedade morfológica ser fundamental para a obtenção de um papel com boas propriedades mecânicas, outros fatores podem exercer importante influência, como a resistência intrínseca das fibras, sua capacidade de colapsabilidade e a geração de ligação entre fibras (Lainio, 2009). Sob outra perspectiva, fibras mais curtas possuem menor tendência de flocular, permitindo assim uma melhor formação da folha além de uma maior lisura superficial; adicionalmente, possibilita uma distribuição mais homogênea de tamanhos de poros, beneficiando assim a absorção de tinta nos processos de impressão. (Santos, 2005; Rodrigues, 2016). No caso de produtos Tissue, enquanto a qualidade dos papéis tipo toalha pode ser beneficiada pela incorporação de fibras de maior comprimento pelo ganho em propriedades físicas, os papéis tipo sanitários e faciais podem ter seu grau de maciez reduzido (Ramires, 2013).

De modo similar ao observado para o comprimento médio, a largura média das fibras dos clones poliploides (20,4 – 20,7 mm) é cerca de 20% maior que a largura das fibras do clone testemunha (17,2 mm), conforme ilustrado no gráfico da Figura 2 (B). Novamente, tal comportamento é similar aos resultados publicados por Santos *et al.* (2021), que indicaram um incremento de 22% na largura das fibras, o que representou um aumento na largura média dos diploides de 17,7 mm para uma largura média dos tetraploides de 21,6 mm. Ademais, os valores obtidos de largura de fibra são consoantes aos reportados na literatura para espécies de eucalipto, sendo considerados diâmetros externos estreitos (Gomide, 2005; Tomazello Filho, 1985). Com exceção dos clones T1 e T5, as larguras médias dos diferentes materiais estudados não se mostraram similares estatisticamente a um nível de significância de 0,05; no entanto, a diferença entre as larguras das fibras dos cinco tetraploides variou em no máximo 1,6%.

Papéis produzidos com fibras mais largas apresentam, em geral, um maior volume específico aparente e uma menor resistência ao ar, podendo ainda ser observada uma maior facilidade de drenagem. Entretanto, apresentam maior tendência de floculação na caixa de entrada, podendo assim prejudicar a formação da folha e as ligações entre fibras e, conseqüentemente, as propriedades de resistência do papel.

Diferentemente das demais dimensões morfológicas, a espessura média da parede celular dos clones tetraploides (3,34 a 3,59 mm) não diferiu estatisticamente do valor obtido para o clone diploide (3,18 mm), conforme apresentado no gráfico da Figura 2 (C). A única exceção é clone T1, que apresentou uma espessura de parede de 4,60 mm – valor este 32% maior que a média obtida para os demais clones poliploides. Apesar de não diferirem estatisticamente, a média dos valores encontrados para os clones tetraploide T2, T3, T4 e T5 é cerca de 9% maior do que o valor encontrado para o clone testemunha. Fibras com paredes mais espessas resultam, em geral, em papéis com estrutura mais aberta e porosa, o implica em maiores valores de volume específico aparente (Demuner *et al.*, 1991; Silva Jr. *et al.*, 1996)), aspecto este de interesse para a produção de papéis absorventes (Mokfienski *et al.*, 2008).

A relação percentual entre a espessura da parede celular e a metade da largura da fibra é descrita como a Fração de Parede. Fibras com paredes mais espessas em relação à largura da fibra (ou maiores Frações de Parede) possuem a característica de serem mais rígidas (ou menos flexíveis) e com maior resistência à ação de forças de consolidação e à colapsabilidade o que, por sua vez, implica em uma menor área de contato e uma menor formação de ligações interfibras. Conseqüentemente, a conformidade da estrutura do papel é dificultada e obtêm-se menores valores das propriedades de resistência físico-mecânica (Valente *et al.*, 1992; Santos, 2005; Foelkel; Barrichelo, 1975). Ao mesmo passo que apresentaram maiores valores de espessura de parede, os clones tetraploides T2, T3, T4 e T5 apresentaram, em média, diâmetros de lume 25% maiores que o diploide e 18% maiores que o clone T1.

Os gráficos presentes nas Figuras 2 (E) e (F) explicitam de modo mais expressivo a diferença morfológica entre os clones poliploides e a testemunha diploide através dos valores obtidos de número de fibras por grama e coarseness, respectivamente.

O número médio de fibras por grama obtido para os clones poliploides (15,6 – 18,6 milhões/g) é cerca de 37% menor que a população fibrosa encontrada para o clone testemunha (27,2 milhões/g). No caso deste estudo, esse resultado foi fortemente influenciado pelo maior comprimento e a maior largura das fibras dos tetraploides. Em relação aos demais clones tetraploides, o clone T1 apresentou uma população fibrosa 12% menor devido à maior espessura de parede. Um maior número de fibras por unidade de massa resulta em um maior número de pontos de contato e, conseqüentemente, de ligações entre as fibras, o que implica em uma maior densidade aparente além de maiores índices de resistência à tração e ao estouro. Ademais, uma maior população fibrosa acarreta em maior capacidade de dispersão de luz e maior opacidade do papel pelo maior número de interfaces fibra-ar (Santos, 2002).

Já o *coarseness* de uma polpa, definido como a massa seca de fibras dividida pelo contorno de comprimento da fibra e expresso em miligramas por cem metros lineares, possui tendência inversa ao número de fibras por grama. O *coarseness* gravimétrico médio obtido para os tetraploides (9,0 - 11,6 mg/100m) é 56% maior que o valor obtido para a testemunha diploide (6,3 mg/100m). Enquanto os valores de *coarseness* obtidos para os poliploides T2, T3, T4 e T5 não diferiram estatisticamente entre si, o clone T1 apresentou um valor cerca de 16% maior que a média dos demais.

O *coarseness* está associado ao peso individual de cada fibra e, portanto, à espessura e à fração de parede da fibra, além de sua densidade (Foelkel, 2009). Segundo Foelkel (2009), fibras com maiores valores de *coarseness* (ou seja, mais pesadas), tendem a ser mais rígidas e com maior resistência ao colapsamento, o que dificulta a formação de ligações entre as fibras e a consolidação da folha de papel. Destarte, o papel produzido apresenta uma rede mais solta e frouxa, resultando em maior porosidade, volume específico, rugosidade, capacidade de absorção, drenabilidade além de maior opacidade. Adicionalmente, valores maiores de índice de rasgo são observados. De modo contrário, fibras de menor *coarseness*, por serem mais colapsáveis, apresentam melhores valores de resistência à tração e uma melhor refilabilidade da massa; ademais, resultam em uma melhor for-

mação pela redução dos flocos e maior mobilidade das fibras (Foelkel, 2007; Kerekes; Schell, 1995).

Além das propriedades morfológicas, os índices que correlacionam o comprimento médio, a espessura da parede, além dos diâmetros externos e internos das fibras, são informações importantes para a fabricação de papel por estarem associados com a qualidade e as propriedades do produto. A partir dos valores das dimensões morfológicas obtidos para os cinco clones tetraploides e para o clone diploide testemunha, calcularam-se o Índice de Runkel, o Coeficiente de Flexibilidade e o Índice de Enfeltramento das fibras, ilustrados no gráfico presente na Figura 3.

O Índice de Runkel é a razão entre duas vezes a espessura da parede celular e o diâmetro lume. Este índice fornece uma importante análise a respeito da capacidade de ligação entre as fibras de um material, cuja qualidade para a produção de papel pode ser classificada em cinco categorias: I) excelentes ($\leq 0,25$); II) muito boas (0,25-0,5); III) boas (0,5-1,0); IV) regulares (1,0-2,0); e V) inapropriadas ($\geq 2,0$) para a produção de papel (Runkel, 1952 *apud* Rocha; Potiguara, 2007). Maiores valores de Índice de Runkel refletem uma maior rigidez e um menor grau de colapsabilidade das fibras, características estas que resultam em menos ligações interfibras. De acordo com Barrichelo e Brito (1976), esta propriedade apresenta uma relação negativa com a resistência à tração.

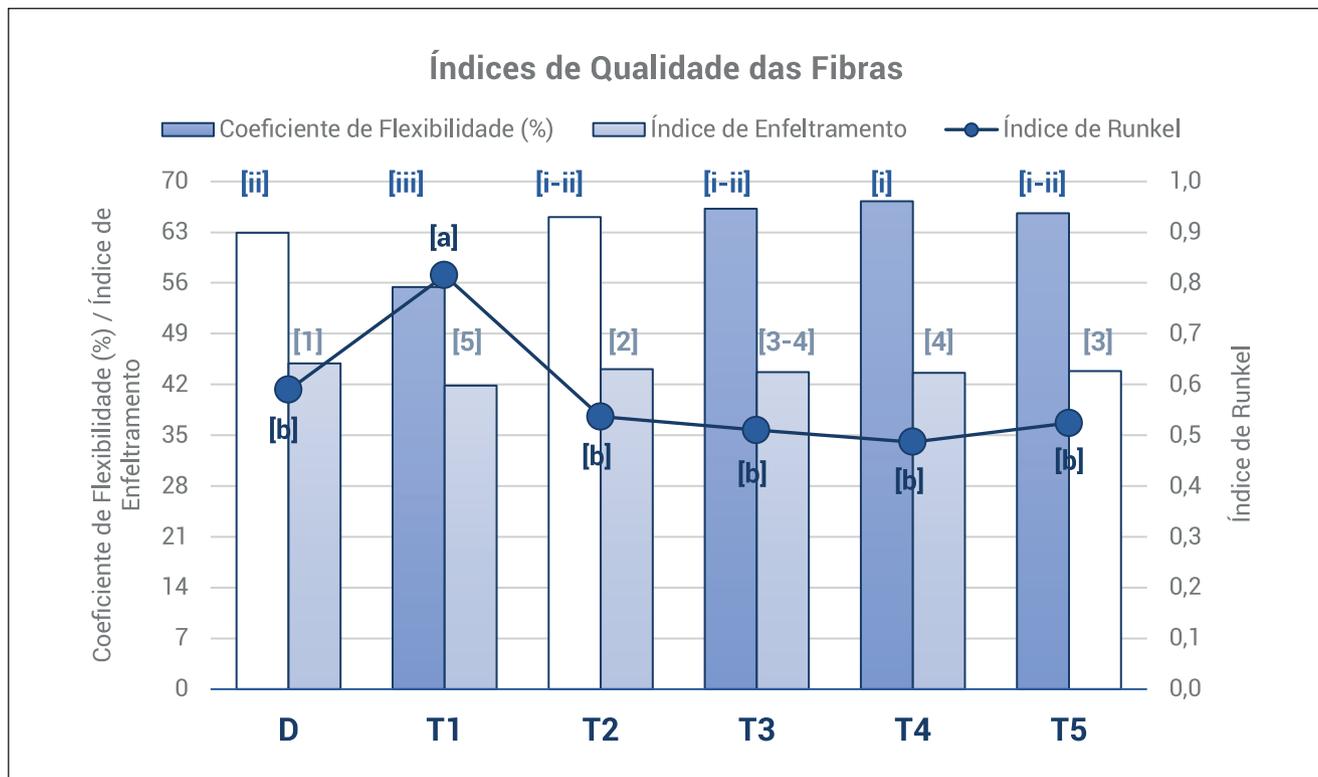


Figura 3: Valores médios dos índices de qualidade das fibras das polpas marrom obtidas a partir do clone testemunha diploide (D) e dos cinco clones tetraploides produzidos (T1 a T5). Os índices destacados acima das barras e de mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o método LSD de Fisher a 95% de confiança (Índice de Runkel – letras; Coeficiente de Flexibilidade = algarismos romanos minúsculos; Índice de Flexibilidade = algarismos árabes)

Os valores de Índice de Runkel obtidos tanto para os clones poliploides produzidos (0,49 – 0,81) quanto para o clone testemunha (0,59) permitem a classificação destes materiais como de “boa qualidade para a fabricação de papel”. Valores similares de Índice de Runkel para madeiras de híbridos *E. grandis* x *E. urophylla* foram reportados por Souza *et al.* (2021) (0,53 – 0,68) e Santos (2005) (0,47 – 0,60). Com exceção do clone T1, os valores de Índice de Runkel obtidos para os tetraploides (0,49 – 0,54) não diferiu estatisticamente do diploide a um nível de significância de 0,05, comportamento este também similar ao observado por Souza *et al.* (2021).

O Coeficiente de Flexibilidade de uma fibra é a relação percentual entre o diâmetro do lume a largura média das fibras. Em outras palavras, é o inverso da Fração de Parede de uma fibra, e expressa a flexibilidade, a colapsabilidade e o potencial de formação de ligações interfibras. Como resultado de maiores Coeficientes de Flexibilidade, observa-se o aumento nas resistências ao arrebentamento e à tração, além da formação de um papel mais denso e com menor volume específico aparente (Foelkel; Barrichelo, 1975).

Os valores médios de Coeficiente de Flexibilidade obtidos neste trabalho estão dentro da faixa recomendada por Foelkel (1978), que indicou valores superiores a 40% (ou de frações de parede inferiores a 60%), abaixo dos quais a rigidez das fibras pode afetar expressivamente a ligações interfibras e a formação da folha e, conseqüentemente, as propriedades físico-mecânicas e óticas do papel. Apesar dos maiores valores de espessura de parede, obtiveram-se Coeficientes de Flexibilidade para os clones tetraploides T2, T3, T4 e T5 (65,1-67,3%), em média, 5% maiores que o obtido para o diploide (62,9%), principalmente devido à maior largura de suas fibras. O clone T1, por sua vez, apresentou um Coeficiente de Flexibilidade cerca de 16% menor que os demais poliploides em estudo. Novamente, os valores de Coeficiente de Flexibilidade encontrados neste trabalho são consistentes com os reportados na literatura para madeiras de híbridos *E. grandis* x *E. urophylla* por Souza *et al.* (2021) (57,7-65,1%) e Santos (2005) (62,8-67,8%).

Já o Índice de Enfeltramento é a relação entre o comprimento médio e a larguras das fibras, e expressa a possibilidade de formação de ligações interfibras. Este parâmetro possui relação direta com a resistência ao rasgo, sendo que maiores valores de Índice de Enfeltramento indicam melhores características do papel relacionadas ao rasgo e às dobras duplas. (Gonzalez *et al.*, 1986). Apesar de serem diferentes estatisticamente, o valor de Índice de Enfeltramento obtido para os poliploides (41,9-44,1) é cerca de 3% menor que o obtido para o clone testemunha (44,9). Em relação aos demais tetraploides, o clone T1 apresentou um valor de índice cerca de 4,5% menor. Os valores obtidos neste trabalho são relativamente menores que os reportados por Menegazzo

(2012) para madeiras de híbridos *E. grandis* x *E. urophylla* (45,4-49,3), porém maiores que os publicados por Souza *et al.* (2021) (31,3-36,5).

CONCLUSÕES

Os aspectos de qualidade da madeira e morfologia dos clones tetraploides sintéticos, além dos índices de qualidade das fibras para a produção de polpa celulósica, permitem inferir um bom potencial da poliploidia no melhoramento genético de eucalipto.

Com relação à qualidade da madeira, a média dos valores de densidade básica dos poliploides diferiram em apenas 7% do valor médio obtido para o clone testemunha, sendo que não foram observadas variações significativas entre o teor de lignina dos seis materiais em estudo.

Do ponto de vista morfológico, o comprimento médio e a largura das fibras dos clones tetraploides são cerca de 16% e 20%, respectivamente, maiores que as dimensões encontradas para o clone diploide, o que implicou em populações fibrosas 37% menores e valores de coarseness gravimétricos 56% maiores.

Apesar das diferenças observadas nos aspectos morfológicos, os índices de qualidade das fibras dos poliploides diferiram de modo pouco ou não expressivo em relação à testemunha. Ao mesmo passo que os valores de Índice de Runkel obtidos para os clones tetraploides não diferiram estatisticamente do valor obtido para o diploide, os valores de Coeficiente de Flexibilidade foram sutilmente maiores (cerca de 5%) e os Índices de Enfeltramento sutilmente menores (cerca de 3%).

Um maior potencial de diferenciação morfológica foi observado para o clone T1, cuja espessura de parede 32% maior que a mensurada para os demais tetraploides implicou em uma população fibrosa 12% menor e um valor de coarseness 16% maior. Conseqüentemente, este clone apresentou um alto valor de Índice de Runkel (0,81) e um menor Coeficiente de Flexibilidade (55,4%), sugerindo a maior rigidez de suas fibras e, potencialmente, menores valores resistência à tração e ao arrebentamento do papel formado. De modo contrário, o papel produzido a partir deste material poderá potencialmente apresentar maiores valores de porosidade, volume específico, rugosidade, capacidade de absorção, drenabilidade além de maior opacidade.

Outro ponto de destaque foi a homogeneidade morfológica observada entre os clones tetraploides T2, T3, T4 e T5. A similaridade entre os parâmetros morfológicos dos materiais que compõem uma polpa permitem ao papeleiro um maior controle sobre as propriedades do produto final. ■

AGRADECIMENTO

À empresa Suzano S.A. por viabilizar e permitir esse importante estudo.

REFERÊNCIAS

- Barrichelo, L. E. G.; Brito, J. O. *A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel*, Brasília (DF), PNUD/FAO/IBDF/BRA, 145 p., 1976.
- Bassa, A. G. M. C.; Silva Jr., F. G.; Sacon, V. M. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids, *Scientia Forestalis*, vol. 75, n. 1, p. 19-29, 2007.
- Castillo, A., López, V., Tavares, E., Santiñaque, F., Dalla Riza, M. Polyploid induction of *Eucalyptus dununii* Maiden to generate variability in breeding programs, *Agrociencia Uruguay*, vol. 24, p. 381, 2020.
- Demuner, B. J.; Doria, E. L. V.; Silva Jr., E. C.; Manfredi, V. As propriedades do papel e as características das fibras de Eucalipto. In: *Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP*. São Paulo, 1991. Anais São Paulo: ABTCP, p. 621-641, 1991.
- Foekel, C. E. B. As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose Kraft para fabricação de papel. In: *Eucalyptus Online Book*. 48p., 2007.
- Foekel, C. E. B. Madeira do eucalipto: da floresta ao digestor. *Boletim Informativo IPEF*, vol. 6, p.72-87, 1978.
- Foekel, C. E. B. Qualidade da madeira do Eucalipto: acerca dos acertos e erros na utilização da densidade básica como indicador de qualidade de madeiras, *Eucalyptus Online Book*, Capítulo 42, p. 177, 2015.
- Foekel, C. E. B.; Brasil, M. A. M.; Barrichelo, L. E.G. M. Métodos de determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas, *IPEF*, n. 2/3, p. 65-74, 1971.
- Foekel, C. E. B. Propriedades papeleiras das árvores, madeiras e fibras celulósicas dos eucaliptos, In: *Eucalyptus Online Book*, Capítulo14, 110p., 2009.
- Foekel, C. E. B. Qualidade da Madeira de eucalipto para atendimento das exigências do mercado de celulose e papel. ° *Celsius Degree / Grau Celsius*, 2010.
- Foekel, C. E. B.; Barrichelo, L. E. G. Relações entre características da madeira e propriedades da celulose e papel, In: *CONGRESSO ANUAL DA ABTCP – Semana do Papel*, 8. São Paulo, 1975. Anais São Paulo: ABTCP, p. 40-53, 1975.
- Gomide, J. L.; Colodette, J. L.; Oliveira, R. C.; Silva, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil, *Revista Árvore*, vol. 29, n.1, p. 129-137, 2005.
- Kerekes, R. J.; Schell, C. J. Effects of fiber length and coarseness on pulp flocculation. *Tappi Journal*, vol. 78, n. 2, p.133-139, 1995.
- Lainio, U. Natural and synthetic fibres improving tensile strength and elongation of paper products. 2009. 84f. Dissertação. Lappeenranta University of Technology. *Lappeenranta*, 2009.
- Levlin, J. E.; Söderhjelm, L. Pulp and paper testing. *Atlanta: Tappi Press*, vol. 17, 288 p., 1999.
- Menegazzo, M. L. Características morfológicas de celuloses branqueadas de *Pinus* e *Eucalyptus* em analisador óptico automático de fibras. 2012. 77f. Dissertação. Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Botucatu, 2012.
- Mokfienski, A.; Colodette, J. L.; Gomide, J. L.; Carvalho, A. M. M. L. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto, *Ciência Florestal*, vol. 18, n. 3, p. 401-413, 2008.
- Pereira, R. C., Davide, L. C., Techio, V. H., Timbó, A. L. O. Duplicação cromossômica de gramíneas forrageiras: uma alternativa para programas de melhoramento genético, *Ciência Rural*, vol. 42, n. 7, p.1278-1285, 2012.
- Ramires, H. O. R. Alternativas tecnológicas para melhoria de propriedades mecânicas de papéis Tissue e sua aplicação para diferentes polpas kraft de eucalipto. 2013. 135f. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.
- Rocha, C. B. R.; Potiguara, R. C. V. Morfometria das fibras das folhas de *Astrocaryum murumuru* var. *murumuru* Mart. (ARECACEAE). *Acta Amaz.* vol. 37, n. 4, p.511-516, 2007.
- Rodrigues, A. C. C. Morfologia de vasos e fibras da madeira de poliploide e clones híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* visando a produção de papel. 2016. 35f. Monografia. Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro, 2016.
- Runkel, R. O. H. Pulp from tropical wood. *TAAAP*, vol. 35, n. 4, p. 174-178, 1952.
- Santos, C. R. Qualidade da madeira e sua influência nas características de papéis imprimir & escrever e tissue. 2002. 45f. Monografia. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2002.
- Santos, S. R. Influência da qualidade da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do processo kraft de polpação na qualidade da polpa branqueada. 2005. 178f. Dissertação. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2005.
- Sette Jr., C. R.; Tomazello Filho, M.; Da Silva Jr., F. G.; Laclau, J. P. Alterações nas características químicas da madeira com a substituição do K por Na em plantações de eucalipto, *Revista Árvore* [on-line], vol. 38, n. 3, p. 569-578, 2014.
- Silva Jr., F.G.; Valle, C. F.; Muner, J. C. G. Programa de qualidade da madeira da Votorantim Celulose e Papel – VCP. *O Papel*, vol. 57, n. 1, p. 35-43, 1996.
- Souza, T. S., Muniz, F. R., Techio, V. H., Missiaggia, A. A. and Ramalho, M. A. P. Potential use of polyploid eucalypt in forestry, *Industrial Crops & Products*, vol. 177, p. 11464, 2022.
- Souza, T. S.; Daolio, M. F.; Mori, F. A.; Ramalho, M. A. P.; Mingossi, F. B.; Missiaggia, A. A.; Techio, V. H. Polyploidy as a strategy to improve the industrial quality of eucalypt wood, *Wood Science and Technology*, vol. 55, p. 181-193, 2021.
- TAPPI – T204 cm-97 – *Solvent Extractives of Wood and Pulp*.
- TAPPI – T222 om-98 – *Acid Insoluble Lignin in Wood and Pulp*.
- Tomazello Filho, M. Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto cultivadas no Brasil. *IPEF*, n. 29, p. 25-36, 1985.
- Valente, C. A.; Sousa, A. P. M.; Furtado, F. P.; Carvalho, A. P. “Improvement program for *Eucalyptus globulus* at PORTUCEL: Technological component”. *APPITA*, vol. 45. n. 6, p. 403- 407, 1992.
- Wood, T. E., Takebayashi, N., Barker, M.S., Mayrose, I., Greenspoon, P.B. and Rieseberg, L. H. The frequency of polyploid speciation in vascular plants, *Proc Natl Acad Sci USA*, vol. 106, p. 13875-13879, 2009.
- González, J. C.; Gomide, J. L.; Vital, B. R. Estudos tecnológicos da madeira de brotações de *Eucalyptus grandis* para produção de celulose Kraft. *Revista Árvore*, vol. 10, n. 1, p. 1-15, 1986.