



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

BEATRIZ FERREIRA DA SILVA

**IMPACTO DO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL DA MADEIRA NA
PERFORMANCE DO PREPARO DE CAVACOS**

Prof. Dr. Fernando José Borges Gomes
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
DEZEMBRO – 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

BEATRIZ FERREIRA DA SILVA

**IMPACTO DO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL DA MADEIRA NA
PERFORMANCE DO PREPARO DE CAVACOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. Fernando José Borges Gomes
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
DEZEMBRO – 2025

**IMPACTO DO VOLUME MÉDIO INDIVIDUAL DA MADEIRA NA
PERFORMANCE DO PREPARO DE CAVACOS**

BEATRIZ FERREIRA DA SILVA

APROVADA EM: 05/12/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando José Borges Gomes – UFRRJ
Orientador

Prof. Roberto Carlos Costa Lelis – UFRRJ
Membro

Gabriel Espíndola de Araújo – Bracell BSP
Membro

Dedico este trabalho em especial à minha mãe, Marilene, que deixou de viver os próprios sonhos para que eu pudesse realizar os meus. Ao meu pai, Carlos, que me criou navegando sobre a maré alta, para que eu pudesse chegar em terra firme.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder resiliência para concluir este trabalho, especialmente diante do desafio que foi conciliar o estágio híbrido em outro estado, as últimas matérias da faculdade e a construção desta monografia.

À indústria de celulose onde desenvolvi este estudo, deixo minha sincera gratidão pela confiança e disponibilidade necessária para a realização das análises. Ao meu orientador, Fernando Gomes, e aos integrantes do Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica da UFRRJ, agradeço por terem me proporcionado uma base sólida de conhecimentos e por contribuírem de forma essencial para minha formação profissional e acadêmica.

Aos meus pais, Marilene e Carlos, agradeço por nunca medirem esforços para que eu chegasse até aqui. Aos meus irmãos, Gabriel e Matheus, que, mesmo eu nem sempre sabendo demonstrar, foram minha luz nos momentos mais difíceis.

Aos amigos da Universidade, que tornaram a jornada mais leve e significativa, agradeço profundamente — em especial à Diana, Marcelly e Letícia. Aos amigos que ganhei ao longo da vida e que sempre me incentivaram a continuar, deixo também minha gratidão — em especial ao João, meu melhor amigo, que infelizmente não está mais entre nós, mas que sempre acreditou no meu potencial.

Não menos importante, agradeço aos amigos que o estágio me proporcionou e a todo o meu setor, que esteve ao meu lado nas coletas, nas análises das amostras e no aprendizado diário. Sou imensamente grato por ter convivido e evoluído ao lado de pessoas tão incríveis, como Raphael Barbosa, Rafael Malavasi, Alex Ajala, Jean David, Romulo Eloi, Rodrigo Bassoli, Victor Monteiro, Danilo Marques, Bianca Martins, Luciano Indruczaki, Mateus Ruiz, Carlos Henrique e Felype Lima.

A todos que fizeram parte dessa trajetória, meu muito obrigado.

RESUMO

A madeira é a principal matéria-prima da indústria de polpa celulósica, representando cerca de 40-60% do custo total de produção. Os custos da matéria prima têm apresentado tendências de crescimento de custos nos últimos anos e investir em qualidade da madeira, bem como em técnicas de melhor utilização da mesma na indústria vem sendo uma estratégia das fabricas de base florestal para se tornarem mais competitivas. Um dos parâmetros que afetam essa competitividade é a preparação da madeira para o processo de polpação, que engloba etapas de cavaqueamento e posterior classificação dos cavacos. Ainda, a qualidade dos cavacos afeta diretamente a eficiência do cozimento, a uniformidade das fibras e o rendimento da polpação, além de influenciar o consumo de químicos, energia e a qualidade final da polpa celulósica. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto do volume médio individual (VMI) da madeira, na eficiência do preparo de cavacos, com foco na granulometria e na produtividade. Foram analisadas três faixas de VMI, a saber: baixo (0,08–0,10 m³); médio (0,12–0,14 m³); e alto (0,16–0,18 m³). Os resultados observados mostram que valores mais baixos de VMI geram maior variabilidade granulométrica, com aumento de cavacos superdimensionados (*oversize*) e de fração de finos (91,04% de cavacos aceitos), comprometendo a eficiência do processo picagem, uma vez que estes não são utilizados para a polpação, ou quando entram no processo podem gerar palitos ou maior teor de sólidos no processo, ou ainda maiores consumos de químicos. Em contraste, faixas mais elevadas de VMI proporcionaram cavacos mais uniformes e dentro das especificações de processos fabris (96,06% de cavacos aceitos), o que favorece a estabilidade operacional do cavaqueamento e também o desempenho do processo de polpação. Conclui-se assim que o VMI exerce influência direta e significativa sobre a qualidade dos cavacos e a disponibilidade de estoque de cavacos para a processo, evidenciando sua relevância para a otimização dos recursos florestais e a eficiência global da produção de celulose.

Palavras-chave: Qualidade dos cavacos, produtividade, estabilidade operacional.

ABSTRACT

Wood is the main raw material in the cellulose pulp industry, accounting for around 40–60% of total production costs. As raw material costs have been trending upwards in recent years, investing in wood quality and techniques to make better use of wood has become a key strategy for forest-based factories looking to increase their competitiveness. One parameter affecting this competitiveness is how wood is prepared for the pulping process, including chipping and subsequent chip sorting. Furthermore, chip quality directly affects cooking efficiency, fibre uniformity and pulping yield, as well as influencing chemical and energy consumption, and the final quality of the cellulose pulp. Against this backdrop, the present study sought to evaluate the impact of the average individual volume (AIV) of wood on the efficiency of chip preparation, with a particular focus on particle size and productivity. Three AIV ranges were analysed: low (0.08–0.10 m³); medium (0.12–0.14 m³); and high (0.16–0.18 m³). The observed results show that lower VMI values generate greater variability in particle size, resulting in an increase in oversized chips and fines (91.04% of chips accepted). This compromises the efficiency of the chipping process since these are not used for pulping. Alternatively, if they enter the process, they can generate sticks, increase the solids content or even lead to higher chemical consumption. In contrast, higher VMI ranges produced more uniform chips that met manufacturing process specifications (96.06% of chips accepted), favouring operational stability and the performance of the pulping process. Therefore, it can be concluded that VMI directly and significantly influences chip quality and the availability of chip stock for the process, highlighting its importance in optimising forest resources and improving the overall efficiency of pulp production.

Keywords: Chip quality, productivity, operational stability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. Contexto da indústria de Celulose e Papel	2
2.3. Definição e Importância do Volume Médio Individual da Madeira.....	3
2.3. O Preparo de Cavacos como etapa chave no Processo Produtivo	3
2.4. Características físicas da madeira relacionadas ao Preparo de Cavacos.....	4
2.5. Equipamentos utilizados no Preparo de Cavacos	4
2.6. Impacto do VMI na produtividade.....	5
2.7. Rendimento e Eficiência do Processo Kraft e Pré-hidrólise kraft	5
3. OBJETIVOS	6
3.1. Objetivo geral	6
3.2. Objetivos específicos	7
4. MATERIAL E METÓDOS	7
4.1. Material.....	7
4.1.2 Faixas do Volume Médio Individual.....	7
4.2. Métodos	8
4.2.1. Classificação granulométrica dos cavacos	8
4.2.2. Impacto do VMI na produtividade operacional	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
5.1. Distribuição Granulométrica e Classificação de Qualidade	9
5.1.1 Correlação entre VMI e Qualidade Granulométrica	10
5.1.2. Análise dos Superdimensionados e Suas Implicações	11
5.1.3. Influência das Características da Madeira.....	12
5.1.4. Palitos e Finos	13
5.1.5. Classificação por faixas de VMI e desempenho operacional.....	14

5.1.6. Correlação entre o VMI e a produtividade operacional	15
6. CONCLUSÕES.....	16
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

1. INTRODUÇÃO

O setor de celulose e papel brasileiro se consolida como um dos mais competitivos mundialmente, sustentado por elevada produtividade florestal, tecnologia avançada e práticas de manejo sustentáveis que resultam em índices de crescimento superiores aos de outros países produtores (IBGE, 2025). Hoje o Brasil é o segundo maior produtor mundial de polpa celulósica e o primeiro produtor mundial de polpa kraft branqueada de eucalipto. Contudo, os custos de matéria prima (eucalipto e pinus) têm apresentado tendências de aumento no custo de produção o que leva a pesquisas intensas para melhoria nos processos de produção florestal. Nesse contexto, a busca contínua por maior eficiência no uso da terra e ganhos de produtividade por área tem direcionado a silvicultura brasileira para uma trajetória de intensificação dos sistemas de plantios principalmente focado em indicadores tradicionais de qualidade da madeira como densidade e lignina, por exemplo (RIBEIRO et al., 2017)

Contudo, outros parâmetros de qualidade da madeira também precisam ser considerados, por afetarem as operações industriais. Por exemplo, a área de produção de cavacos representa a etapa inicial que conecta diretamente o setor de produção florestal ao processo industrial. Nesse contexto, parâmetros de qualidade da madeira como o volume médio individual (VMI) das árvores precisam ser considerados, pois exercem influência de maneira significativa sobre a produção de cavacos, impactando tanto a produtividade do cavaqueamento quanto a uniformidade do material gerado. O número de toras cortadas simultaneamente no picador industrial é parâmetro determinante para o volume de cavacos produzidos, por conseguinte de grande relevância industrial. Contudo, apesar de sua relevância, este não é um tema usualmente debatido em muitas fabricas de celulose comumente.

A redução do Volume Médio Individual das árvores é decorrente de múltiplos fatores estratégicos que caracterizam a evolução da silvicultura moderna brasileira. O aumento da densidade de plantio representa a principal causa dessa tendência, onde espaçamentos convencionais de 3x2 metros (1.666 árvores/ha) são progressivamente substituídos por configurações mais adensadas, como 3x1 metros ou 3x0,5 metros, elevando o número de árvores por hectare em até 300% (MOULIN et al., 2017). A priorização do volume total por hectare sobre o volume individual emerge como teoria operacional predominante nas empresas florestais, uma vez que o aumento da densidade de plantio frequentemente resulta em incrementos de produtividade de 30% a 50% em volume total de madeira por unidade de área, compensando a redução individual (VERA; LAURA; COUTO, 2023).

Os ciclos de rotação mais curtos constituem outro fator para a redução do VMI, especialmente em plantios de eucalipto voltados para celulose, onde a busca por maior rotatividade de capital tem levado à redução dos ciclos de 7-8 anos para 5-6 anos em regiões com elevado potencial produtivo (CNA BRASIL, 2025). Adicionalmente, a expansão para regiões de menor potencial climático e edáfico devido à escassez de terras nos tradicionais polos produtores do sudeste brasileiro contribui significativamente para a redução do VMI (IBGE, 2025)

Para a indústria de celulose, o VMI representa um parâmetro crítico de qualidade da madeira e impacta diretamente a eficiência operacional de toda a cadeia produtiva

(RODRIGUES et al., 2017). Árvores com menor VMI exigem maior número de ciclos operacionais dos equipamentos de colheita, elevam os tempos improdutivos e reduzem a produtividade das máquinas de corte e picagem, resultando em aumento significativo dos custos unitários de produção (RODRIGUES et al., 2017). No preparo de cavacos, especificamente, o VMI influencia a capacidade de processamento dos picadores, a qualidade granulométrica dos cavacos produzidos e a eficiência global da operação (RODRIGUES et al., 2017).

A qualidade dos cavacos, por sua vez, é determinante para o processo de polpação Kraft e pré-hidrólise kraft, afetando o consumo específico de madeira, o rendimento depurado, as taxas de rejeito e o consumo de reagentes químicos. Cavacos com distribuição granulométrica inadequada, frequentemente associados ao processamento de madeiras de menor diâmetro e VMI reduzido, comprometem a uniformidade do cozimento e elevam os custos operacionais da fábrica de celulose (SOPRANI, 2016).

Desta forma, este trabalho teve como objetivo analisar o impacto do volume individual da madeira na performance do preparo de cavacos, identificando as relações entre o VMI das árvores e os parâmetros dos processos industriais, de modo a compreender melhor os desafios operacionais que a indústria de celulose enfrenta diante das novas tendências de intensificação silvicultural.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Contexto da indústria de Celulose e Papel

A indústria de celulose e papel representam um dos setores mais importantes da economia mundial, sendo o Brasil um dos principais produtores e exportadores globais (IBÁ, 2023). O país destaca-se como um dos líderes mundiais na produção e exportação de celulose, tendo alcançado em 2024 uma produção de 25,5 milhões de toneladas, registrando um crescimento de 5,2% em relação a 2023 (MAIS FLORESTA, 2025). Com esta produção, o Brasil ficou em segundo lugar no ranking mundial, atrás apenas dos Estados Unidos. O país também lidera significativamente nas exportações de celulose, com 15,8 milhões de toneladas exportadas em 2024, representando um crescimento de 10,7% em relação ao ano anterior (FAZ COMEX, 2025).

O setor brasileiro é responsável por uma receita bruta anual de R\$ 260 bilhões, representando 2,7% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, e gera mais de 128 mil empregos diretos e 640 mil empregos indiretos em 540 municípios distribuídos em 18 estados (ABTCP, 2025).

O sucesso do Brasil neste setor está diretamente relacionado às condições climáticas favoráveis para o cultivo de espécies florestais de rápido crescimento, especialmente o eucalipto, que representa aproximadamente 76% da área total de plantios florestais destinados à produção industrial (IBÁ, 2023). As florestas plantadas de eucalipto apresentam elevada produtividade, ciclo de crescimento reduzido e alta qualidade da madeira para produção de celulose, consolidando o país como uma das principais potências no mercado internacional (ELDORADO BRASIL, 2022).

2.3. Definição e Importância do Volume Médio Individual da Madeira

O VMI representa o volume médio de madeira por árvore em um povoamento florestal e é calculado pela divisão do volume total estimado do talhão pelo número de árvores presentes (SILVA, 2017). Este parâmetro é fundamental para o planejamento florestal-industrial e afeta diretamente a produtividade das operações mecanizadas, desde a colheita até o processamento industrial da madeira.

A determinação do VMI é realizada através de inventários florestais que utilizam metodologias consolidadas de amostragem. O método mais comum envolve a medição do diâmetro à altura do peito (DAP) e altura das árvores dentro de parcelas amostrais, seguido da aplicação de equações volumétricas de dupla entrada que consideram estas duas variáveis como preditoras. Outras metodologias incluem a cubagem rigorosa, realizada em árvores já derrubadas, na qual se mensuram seções variáveis ou fixas ao longo do tronco, e o método do xilômetro, que determina o volume por imersão em água (MATANATIVA, 2023).

As variações no VMI entre talhões de uma empresa ou entre regiões geográficas podem ser substanciais, refletindo diferenças em fatores como idade das árvores, qualidade do sítio, densidade de plantio, práticas silviculturais adotadas e genótipo utilizado. Estudos demonstram que áreas com baixo VMI apresentam significativamente menor eficiência operacional das máquinas florestais quando comparadas a áreas com alto VMI, com diferenças de até 30% na eficiência global (SILVA, 2017; SILVA et al., 2022).

No transporte e logística, madeiras com VMI elevado propiciam melhor racionalização do transporte, reduzindo o número de viagens necessárias para movimentação da mesma quantidade de matéria-prima, com impactos positivos sobre o consumo de combustível e emissões de carbono (SILVA, 2017).

Além de influenciar a colheita e no transporte, o VMI impacta a qualidade da madeira processada, que afetam o preparo de cavacos e o desempenho nos processos kraft e pré-hidrólise kraft (GONÇALEZ et al., 2014).

2.3. O Preparo de Cavacos como etapa chave no Processo Produtivo

O preparo de cavacos é responsável pela transformação das toras de eucalipto em cavacos com dimensões adequadas para os processos subsequentes de polpação kraft e pré-hidrólise kraft (FOELKEL, 2009). Esta operação compreende as fases de recepção, lavagem de toras, picagem, classificação granulométrica e estocagem dos cavacos, exercendo influência direta sobre a eficiência de impregnação, cozimento e qualidade da polpa produzida (FOELKEL, 2009).

A qualidade dimensional dos cavacos, especialmente sua espessura, comprimento e uniformidade, apresenta impacto direto sobre o desempenho do digestor e o rendimento depurado da celulose. Cavacos com espessura adequada (entre 4-6 mm) e comprimento ideal (entre 23-28 mm) favorecem a penetração uniforme do licor de cozimento, reduzem a formação de rejeitos, minimizam o consumo de produtos químicos e aumentam o rendimento de conversão da madeira em celulose (FOELKEL, 2010).

Tanto no processo kraft quanto no processo pré-hidrólise kraft, a espessura é o parâmetro mais importante para determinar a qualidade dos cavacos, pois o licor de cozimento deve ser capaz de penetrar em todas as direções (FOELKEL, 2009). O controle intenso sobre a granulometria, regularidade da espessura, ausência de contaminantes e elevada uniformidade física e química do cavaco são essenciais para garantir alta pureza da polpa, baixos teores de rejeitos, elevados índices de viscosidade e eficiente remoção de hemiceluloses (CASTANHO, 2004).

2.4. Características físicas da madeira relacionadas ao Preparo de Cavacos

As características físicas da madeira exercem influência direta sobre o desempenho do preparo de cavacos, afetando tanto a eficiência do picador quanto a uniformidade das partículas geradas e, conseqüentemente, a qualidade do cavaco destinado à produção de celulose. Entre os atributos que mais impactam esse processo destacam-se o diâmetro, a densidade básica, o teor de umidade, a conicidade, a proporção de casca e a presença de defeitos estruturais, como nós e tortuosidade (FOELKEL, 2005).

O diâmetro das toras está diretamente relacionado à regularidade dos cavacos produzidos: materiais de maior diâmetro tendem a gerar cavacos mais homogêneos e com menor formação de finos, enquanto toras mais finas aumentam a variabilidade granulométrica (GOMIDE et al.; 2010).

A densidade básica influencia a resistência ao corte e, por consequência, o consumo energético do picador. Madeiras de baixa densidade tendem a produzir maior proporção de finos e cavacos menos uniformes (FOELKEL, 2005).

O teor de umidade também interfere no desempenho do corte. Madeiras excessivamente secas tendem a ser mais quebradiças, enquanto madeiras muito úmidas produzem cavacos com menor estabilidade dimensional (QUEIROZ et al., 2004).

Do mesmo modo, características como conicidade, tortuosidade e proporção de cascas influenciam a estabilidade da alimentação do picador e a qualidade final dos cavacos. Toras retilíneas, com baixa conicidade e baixa quantidade de casca, são mais favoráveis ao processo e contribuem para um produto de maior uniformidade (GONÇALEZ et al., 2014).

Por mais que todas essas características sejam de grande importância, o foco deste trabalho foi analisar exclusivamente o VMI, considerando que a inclusão de todas as demais variáveis tornaria o estudo demasiadamente extenso e que os padrões de qualidade pré-estabelecidos pela indústria foram devidamente atendidos.

2.5. Equipamentos utilizados no Preparo de Cavacos

O preparo de cavacos compreende uma sequência de operações que transformam toras de madeira em partículas de dimensões específicas adequadas para o processo de polpação. O equipamento principal é o picador de toras, máquina que fragmenta as toras por meio de facas rotativas que exercem corte perpendicular ao eixo da tora, gerando cavacos com espessura determinada pela distância entre as facas (SOARES, 2015).

Após a picagem, os cavacos passam por equipamentos de classificação granulométrica, geralmente peneiras vibratórias que separam as partículas em diferentes classes de tamanho (SOARES, 2015). As classificações padrão incluem cavacos overs (acima de 45 mm), cavacos aceitos (entre 7 e 45 mm) e finos/palitos (abaixo de 7 mm), conforme estabelecido pelos padrões SCAN-CM 40:01 (SCAN, 2001). A norma industrial estabelece que a fração de granulometria principal deva representar pelo menos 80% em peso do total de cavacos, enquanto a fração de finos/palitos não deva exceder 5% em peso (FOELKEL, 2009).

O VMI da madeira afeta significativamente a performance destes equipamentos. Árvores com VMI elevado produzem toras com diâmetro maior e mais uniformes, facilitando a alimentação consistente do picador e reduzindo variações na espessura dos cavacos produzidos. Por outro lado, árvores com VMI reduzido geram toras menores e mais variáveis, aumentando a dificuldade de manutenção de parâmetros operacionais consistentes e elevando a proporção de cavacos fora das especificações granulométricas (COSTA, 2023).

Ainda considerando a produção de cavacos, outro parâmetro importante é a disponibilidade de operação do picador, pois o mesmo comumente é submetido a paradas para ajustes e manutenções programadas, ocorrendo ainda necessidade de intervenções não programadas no dia a dia fabril. Nesse cenário, a disponibilidade dos equipamentos de uma linha de processamento de cavacos constitui-se como um indicador chave de desempenho, e a capacidade desta de produzir maior volume possível de cavacos também é um parâmetro de grande relevância, onde o VMI exerce grande impacto.

2.6. Impacto do VMI na produtividade

Árvores com maior volume individual proporcionam um fluxo mais estável e eficiente na alimentação do picador. O picador consegue manter uma alimentação regular, com o sistema de tração (rolos, esteiras ou sistemas mecânicos) operando próximo à sua capacidade nominal, distribuindo melhor o esforço do motor e mantendo as facas de corte em condições ideais por períodos mais prolongados (BARROS, 2013).

Nas árvores com VMI reduzido, para compensar o menor volume por tora e manter o fluxo produtivo, é comum ocorrer a sobreposição de toras no bocal do picador (UFMT, 2021). Nessa condição, as toras entram de forma desorganizada, dificultando o sistema de tração e aumentando a demanda por torque do motor, o que aumenta o risco de falhas operacionais e compromete a uniformidade e a qualidade dos cavacos produzidos.

O travamento de toras no bocal do picador é uma das principais causas de paradas não programadas na linha de picagem. Enquanto árvores com maior VMI proporcionam um regime de operação mais estável e contínuo, aquelas com baixo VMI tendem a ocasionar ciclos repetidos de parada e retomada do equipamento, reduzindo a eficiência operacional global do picador (UFMT, 2021).

2.7. Rendimento e Eficiência do Processo Kraft e Pré-hidrólise kraft

O processo kraft de polpação apresenta rendimento típico entre 48% a 58%, variando conforme as características da madeira e das condições operacionais adotadas. O rendimento depurado, que considera a polpa celulósica obtida após os processos de depuração, onde ocorre a remoção dos rejeitos (nós, palitos, cavacos não cozidos), é o parâmetro mais crítico para o

desempenho econômico de uma fábrica de celulose kraft, pois até mesmo pequenos incrementos ($\approx 1\%$, por exemplo) no rendimento depurado resultam em redução significativa do consumo específico de madeira (FOELKEL, 2009).

Considerando os custos de madeira, não perder matéria prima no processamento (cavaqueamento), bem como manter disponibilidade de pilhas de cavacos para o processo industrial são de grande relevância na operação industrial. Assim como são essenciais para extrair o máximo da matéria. Uma das fases iniciais do processo é a impregnação dos cavacos, que ocorre nas primeiras fases do cozimento, e é fundamental para a homogeneidade do processo de polpação. Para que os cavacos atinjam a fase principal de deslignificação no digestor, é essencial que estejam impregnados com a maior quantidade de álcali possível. Infelizmente, devido a variações nas granulometrias dos cavacos, não é possível uma impregnação integral já nas fases iniciais do processo. Por isso, a importância de controlar a granulometria dos cavacos, reduzindo o máximo possível variações de comprimento e espessura. Uma impregnação eficiente gera ganho de seletividade, balanceando alta remoção de lignina e baixa degradação dos carboidratos (FROSSARD, 2003).

Valores elevados de rejeitos na polpa não branqueada estão associados a cavacos com espessura excessiva (acima de 8 mm), presença de nós, madeiras anormais e dificuldades na impregnação pelo licor de cozimento. Essas condições promovem formação expressiva de rejeitos, que se correlaciona diretamente com perdas de rendimento e aumento do consumo específico de madeira (CASTANHO, 2004).

No processo pré-hidrólise kraft, que visa a produção de polpa solúvel, e por conseguinte demanda uma celulose de alta pureza e viscosidade ajustada para aplicações industriais especiais, os requisitos em termos de qualidade do cavaco são ainda mais rigorosos. Cavacos precisam ser uniformes, com controle estrito sobre dimensão, pureza química e ausência de materiais indesejáveis. A eficiência da impregnação e da pré-hidrólise depende fortemente da granulometria e das características físicas dos cavacos, influenciadas diretamente pelo volume médio individual (VMI) da madeira (CASTANHO, 2004).

O processo pré-hidrólise kraft requer cavacos uniformes para facilitar a remoção seletiva de hemiceluloses e lignina em estágios iniciais, o que impacta positivamente no rendimento e na qualidade final da polpa solúvel. Cavacos produzidos de madeiras com VMI elevado tendem a apresentar essas características, favorecendo a produção de polpa solúvel com baixas taxas de rejeitos e alta eficiência química (COSTA, 2023).

Assim, tanto no processo kraft quanto no pré-hidrólise kraft, o volume médio individual das toras e a qualidade granulométrica dos cavacos possuem papel decisivo na eficiência do preparo, impregnação, rendimento e qualidade da polpa produzida.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o impacto do volume médio individual (VMI) da madeira, na performance do Preparo de Cavacos.

3.2. Objetivos específicos

- Determinar o percentual das frações granulométricas dos cavacos provenientes das diferentes faixas de VMI;
- Correlacionar o VMI e a qualidade granulométrica dos cavacos;
- Analisar o impacto do VMI na produtividade.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no setor de Preparo de Cavacos em uma fábrica de celulose kraft de eucalipto, localizada no Estado de São Paulo, durante período de estágio na empresa. O trabalho foi desenvolvido no ambiente operacional real da fábrica, utilizando os equipamentos, sistemas e procedimentos padrão adotados pela empresa.

4.1. Material

4.1.2 Faixas do Volume Médio Individual

Neste estudo, foi utilizado o cálculo do VMI, que corresponde ao volume total colhido em um talhão ou área florestal dividido pela quantidade de árvores colhidas nessa mesma amostragem. Essa relação, expressa em metros cúbicos, mostra o volume médio individual das árvores avaliadas na amostra. Considerando como fator os diferentes valores de VMI da madeira processada, foram estabelecidas 3 (três) faixas para análise:

Tabela 1 - Definição das faixas de VMI testadas.

Classificação	VMI	Amostras testadas
VMI Baixo	0,08; 0,10 m ³ /ind	2
VMI Médio	0,12; 0,13; 0,14 m ³ /ind	5
VMI Alto	0,16; 0,18 m ³ /ind	2

Fonte: Próprio autor.

Vale ressaltar que todas as amostras foram coletadas imediatamente após o picador, quando o equipamento havia processado até 4.000 m³. Os dados de VMI das toras foram obtidos a partir do sistema de rastreabilidade da empresa onde se realizou o estudo, que registrou:

- Nome e talhão do projeto
- Placa do caminhão
- Data e hora

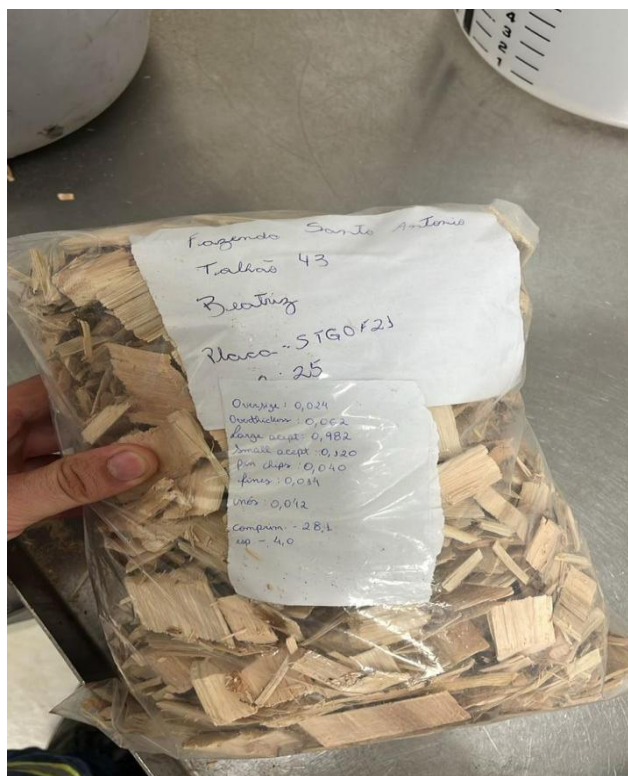


Figura 1 - Coleta de amostra para análise.
Fonte: Próprio autor.

Para a produção de cavacos, foi utilizado o novo modelo de picador disponível na fábrica, equipado com 21 facas no lugar dos picadores convencionais de 18 facas. A quantidade de facas no rotor do picador constitui um parâmetro operacional crítico que influencia significativamente as características dimensionais dos cavacos produzidos, particularmente para madeiras de diâmetro reduzido. Conforme a relação fundamental estabelecida na literatura, a velocidade de alimentação do material (V_a) é determinada pela fórmula $V_a = Z \times \text{RPM} \times C / 1000$, onde Z representa a quantidade de facas, RPM a rotação do tambor em rotações por minuto e C o comprimento nominal do cavaco em milímetros (INFASUL, 2020).

4.2. Métodos

4.2.1. Classificação granulométrica dos cavacos

Para a classificação granulométrica dos cavacos, foram utilizadas peneiras classificatórias, conforme a norma SCAN CM 40:01. Na Tabela 2, são apresentados os valores das dimensões de classificação dos cavacos segundo a norma indicada, e na Figura 2 o equipamento de classificação é apresentado.

Tabela 2 - Classificação de acordo com a norma SCAN 40:01.

Classificação	Tamanho das peneiras
Overs	> 45 mm
Aceitos Maiores	14-45 mm

Aceitos Menores	7-13 mm
Palitos/Finos	<7 mm

Fonte: Próprio autor.



(a)

(b)

Figura 2 - Equipamento de classificação de cavacos utilizando peneiras vibratórias, onde: (a) detalhes da visão frontal do equipamento; e (b) detalhes das peneiras do equipamento onde os cavacos são alimentados.

Fonte: Próprio autor.

4.2.2. Impacto do VMI na produtividade operacional

Foi realizada uma análise comparativa entre diferentes VMIs, considerando a capacidade geométrica do bocal do picador (975 mm). Para cada faixa de VMI, utilizou-se o diâmetro médio das toras para determinar o número máximo de unidades que poderiam ser acomodadas simultaneamente, desconsiderando qualquer sobreposição, aplicando-se a relação $n = \text{floor}(D_{\text{bocal}} / D_{\text{tora}})$. Em seguida, estimou-se o volume alimentado por ciclo por meio do cálculo do volume cilíndrico das toras ($V = \pi \cdot r^2 \cdot h$), adotando-se o comprimento padrão de 8 m.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Distribuição Granulométrica e Classificação de Qualidade

Na Tabela 3 são apresentados os dados da classificação granulométrica das amostras. Foi possível observar que três amostras atingiram qualidade ótima ($\geq 95\%$ aceitos), quatro amostras apresentaram qualidade boa ($\geq 91\%$ aceitos) e duas amostras foram classificadas como regular ($\geq 88\%$ aceitos).

Tabela 3 – Resultados das amostras coletadas de acordo com cada VMI.

VMI	Superdimensionados (<i>Oversized</i> + <i>Overthick</i>)	Cavacos aceitos	Finos/Palitos	Comprimento	Espessura	Densidade
VMI 0,08	3,66%	93,49%	2,85%	29,10 cm	4,20 cm	495 kg/m ³
VMI 0,10	6,92%	88,59%	4,49%	28,70 cm	4,30 cm	-
VMI 0,12	7,12%	89,28%	3,60%	28,40 cm	4,00 cm	494 kg/m ³
VMI 0,13	5,12%	93,37%	1,51%	29,40 cm	4,40 cm	496 kg/m ³
VMI 0,13	6,34%	91,76%	1,90%	28,40 cm	4,00 cm	-
VMI 0,14	2,83%	95,50%	1,67%	28,70 cm	4,00 cm	487 kg/m ³
VMI 0,14	4,09%	91,80%	4,11%	28,40 cm	4,00 cm	499 kg/m ³
VMI 0,16	2,50%	95,79%	1,71%	29,10 cm	4,20 cm	471 kg/m ³
VMI 0,18	2,53%	96,33%	1,14%	27,80 cm	4,60 cm	494 kg/m ³

Fonte: Próprio autor.

5.1.1 Correlação entre VMI e Qualidade Granulométrica

Na Figura 3 são apresentados os dados da fração de cavacos aceitos no processo e as frações desclassificadas. A análise de correlação de Pearson evidenciou correlação positiva forte entre VMI e cavacos aceitos totais ($r = 0,661$), indicando que árvores com maior volume individual tendem a gerar cavacos de melhor qualidade. Inversamente, observou-se correlação negativa entre VMI e rejeitos totais ($r = -0,432$), confirmando que o aumento do VMI está associado à redução de frações de cavacos fora das especificações fabris, o que é desejável na fábrica, pois aumenta a eficiência do processo e a disponibilidade de matéria prima para alimentação do digestor.

Especificamente, o VMI apresentou correlação negativa quando analisado em função das frações de cavacos superdimensionados ($r = -0,345$), sugerindo que madeiras de maior volume médio individual produzem menos cavacos superdimensionados. A correlação com palitos/finos também foi negativa ($r = -0,274$), embora menos pronunciada, ou seja, quanto maior o VMI, menor será a quantidade dessas frações de cavacos obtidos.

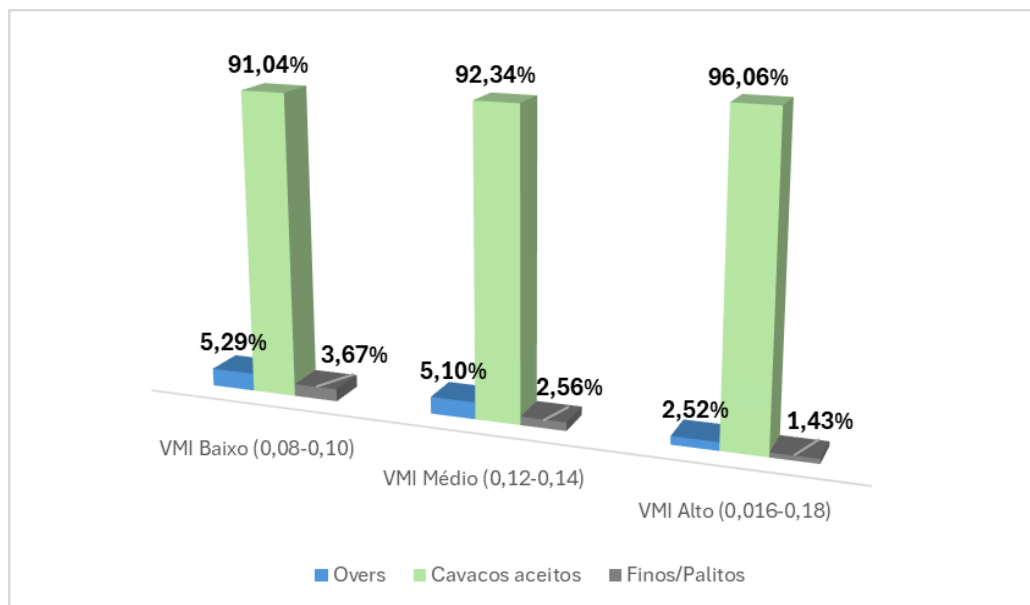


Figura 3 – Valor médio para os resultados de classificação granulométrica de cavacos por cada faixa de VMI avaliada no estudo.

Fonte: Próprio autor.

5.1.2. Análise dos Superdimensionados e Suas Implicações

Em relação aos superdimensionados (oversized + overthick), tiveram quatro amostras que apresentaram teores de overs superiores a 5%. A amostra de VMI 0,10, com 6,92% de overs, registrou o pior desempenho global, com apenas 88,59% de cavacos aceitos totais.

A espessura dos cavacos é reconhecida como a dimensão mais crítica no processo kraft e pré-hidrólise kraft, pois afeta diretamente a penetração do licor de cozimento e a homogeneidade da deslignificação. Cavacos superdimensionados requerem maior carga alcalina e tempo de cozimento prolongado para atingir o mesmo número kappa, reduzindo a eficiência operacional e aumentando o consumo de reagentes.

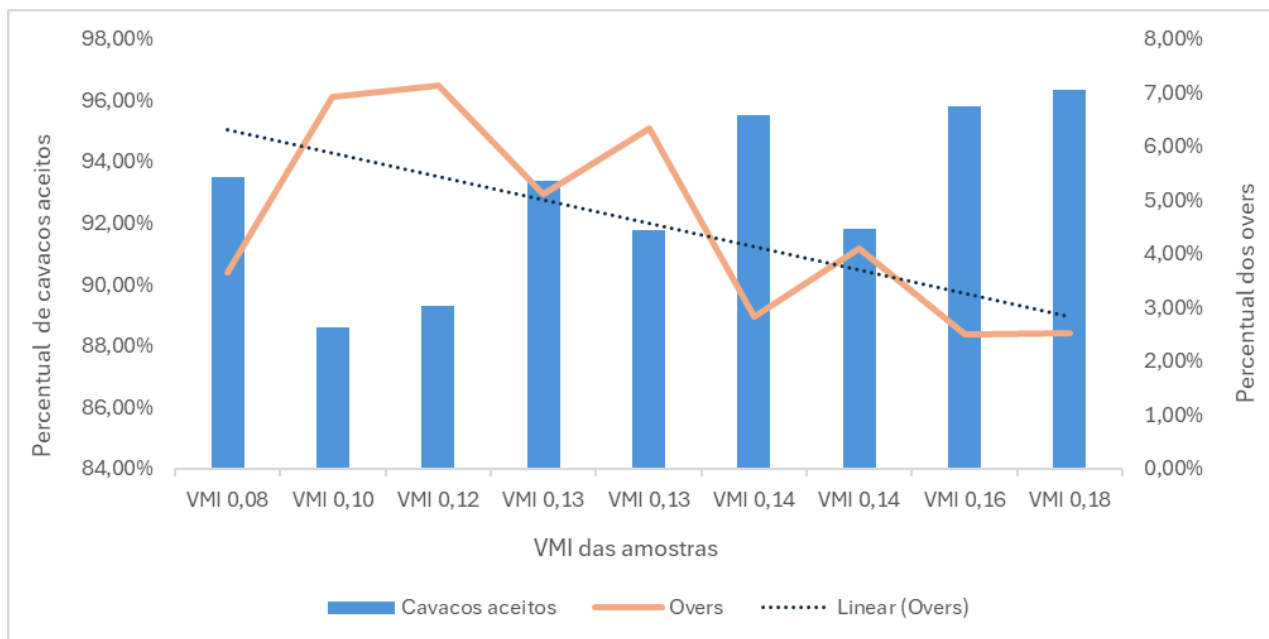


Figura 4- Correlação entre o percentual de cavacos aceitos e o percentual de overs.
Fonte: Próprio autor.



Figura 5 – Imagem demonstrando os cavacos classificados como overs.
Fonte: Próprio autor.

5.1.3. Influência das Características da Madeira

Nesse trabalho, o comprimento e a espessura dos cavacos apresentaram correlações fracas com todas as frações granulométricas. Em outras palavras, o VMI não interferiu de forma

significativa no processo de polpação considerando apenas o comprimento e a espessura dos cavacos.

É importante destacar que a ausência de correlações fortes entre o VMI e as variáveis de comprimento e espessura dos cavacos pode estar relacionada ao picador de 21 facas. Como mencionado anteriormente, esse equipamento proporciona uma picagem mais uniforme e eficiente para árvores de menor diâmetro, reduzindo a variabilidade geométrica dos cavacos. Dessa forma, o desempenho do picador pode ter atenuado possíveis efeitos do VMI sobre essas dimensões físicas. A análise isolada da fração granulométrica overthick poderia fornecer um direcionamento mais preciso sobre essa questão, entretanto, neste trabalho, os cavacos superdimensionados consideraram Oversized e Overthick juntos. Avaliar essas frações de forma independente seria uma boa oportunidade para estudos futuros.

5.1.4. Palitos e Finos

Os palitos e finos, que possuem dimensões inferiores ao padrão, apresentaram média de 3,23%, 2,63% e 1,43%, nas classificações de VMI baixo, VMI Médio e VMI Alto, respectivamente. A amostra de VMI 0,10, que já apresentou alto teor de overs, também registrou um alto percentual de finos/palitos (4,35%), indicando que madeiras com VMI menor tendem a gerar mais rejeitos para o processo.

Tanto palitos quanto finos são prejudiciais ao processo de polpação: os palitos tendem a se aglomerar, dificultando a impregnação e gerando pontos de cozimento irregular, enquanto os finos se degradam excessivamente durante o cozimento, reduzindo o rendimento e aumentando a carga de sólidos no licor negro.



(a)



(b)

Figura 6 - Imagem demonstrando as frações granulométricas classificadas como finos/palitos, onde; (a) palitos; e (b) finos.

Fonte: Próprio autor.

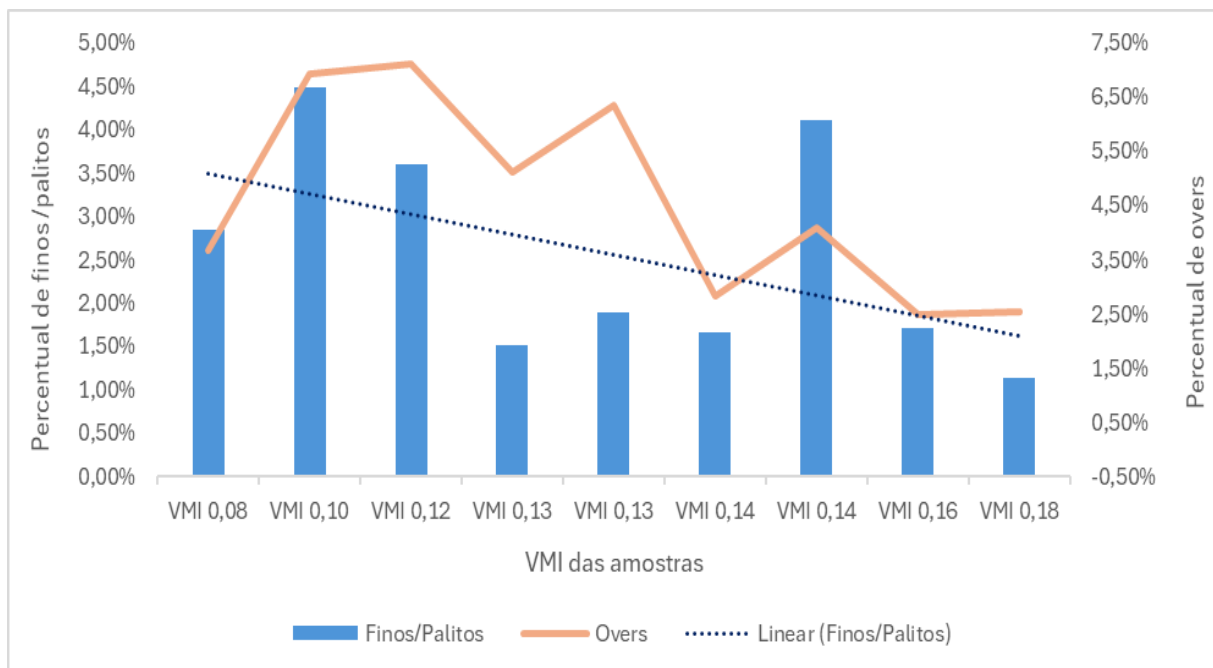


Figura 7 - Correlação entre o percentual de overs e o percentual de finos/palitos.

Fonte: Próprio autor.

5.1.5. Classificação por faixas de VMI e desempenho operacional

A estratificação das amostras por faixas de VMI evidenciou um padrão consistente de melhoria na qualidade granulométrica à medida que o volume individual aumentou. As amostras classificadas como VMI alto ($\geq 0,16 \text{ m}^3$) apresentaram desempenho superior, registrando 96,06% de cavacos aceitos e apenas 3,95% de cavacos fora de especificação. Nessa categoria, a média de overs foi de 2,52%, enquanto os finos/palitos representaram 1,43%, indicando maior uniformidade e menor geração de material indesejado.

Amostras com VMI médio (0,12-0,14 m^3), representando a maioria das observações (seis amostras), apresentaram 92,34% de cavacos aceitos e 7,66% de rejeitos totais, com overs médios de 5,10% e finos/palitos de 2,56%. Esta faixa demonstrou maior variabilidade na qualidade, evidenciando que outros fatores além do VMI influenciam o desempenho.

As duas amostras de VMI baixo (0,08-0,10 m^3) apresentaram desempenho intermediário (91,04% aceitos), mas este resultado deve ser interpretado com cautela devido ao tamanho amostral limitado.

A relação entre VMI e qualidade dos cavacos pode ser explicada por fatores silviculturais e operacionais: árvores com maior volume individual geralmente apresentam troncos mais retilíneos, menor conicidade, menor proporção de casca, e densidade básica mais uniforme (Tonini & Oliveira, 2022). Estas características facilitam a picagem, resultando em cavacos mais homogêneos e com menor proporção de frações extremas.



Figura 8 - Imagem demonstrando as frações granulométricas classificadas cavacos aceitos.
Fonte: Próprio autor.

5.1.6. Correlação entre o VMI e a produtividade operacional

Os resultados indicam que toras mais finas, associadas a VMIs reduzidos, podem ser inseridas em maior quantidade no bocal do picador; contudo, o menor volume individual dessas unidades resulta em um volume total alimentado por ciclo inferior. Já toras de maior VMI permitem a entrada simultânea de um número menor de unidades, mas seu volume individual superior elevou o volume total por ciclo, além de proporcionar um regime de alimentação mais uniforme e estável. Importante ainda observar que este é um valor teórico, pois não considera sobreposição de toras, que podem impactar no volume processado de madeira. Contudo, indica os efeitos de VMI no processo de picagem.

Tabela 4 - Influência do VMI na capacidade teórica de alimentação do picador.

VMI (m ³)	Diâmetro (cm)	Toras que cabem no bocal	Volume total no bocal (m ³)
0,08	9,6 cm	10 toras	0,579
0,10	10,8 cm	9 toras	0,660
0,12	11,8 cm	8 toras	0,700
0,13	12,3 cm	7 toras	0,666
0,14	12,7 cm	7 toras	0,709
0,16	13,6 cm	7 toras	0,813
0,18	15,7cm	6 toras	0,929

Fonte: Próprio autor.

Ainda é importante observar que sobreposições entre toras, aumentam significativamente o risco de travamentos no bocal do picador. Situações como essa reduzem a disponibilidade operacional do equipamento, comprometem o nível das pilhas de cavacos e podem, consequentemente, impactar o desempenho da operação de cavaqueamento, reduzindo o tempo de disponibilidade do equipamento para o processo fabril.



Figura 9 - Comparação da quantidade de toras, em diferentes VMIs, necessárias para ocupar a área de alimentação do picador.

Fonte: Ferreira, Fernando. Volume Médio Individual (VMI): uma variável crítica no desempenho das linhas de cavaco. LinkedIn, 04 out. 2025.

6. CONCLUSÕES

Os resultados confirmam que o VMI exerce influência significativa sobre a qualidade granulométrica dos cavacos e a produtividade operacional das linhas de picagem. A correlação positiva entre VMI e cavacos aceitos demonstra que árvores com maior VMI produzem cavacos de qualidade superior, enquanto a correlação negativa com rejeitos totais confirma a redução de frações indesejáveis conforme o VMI aumenta.

As amostras classificadas como VMI alto apresentaram desempenho operacional superior, com 96,06% de cavacos aceitos, enquanto as de VMI menor demonstraram maior variabilidade. Do ponto de vista operacional, árvores com VMI reduzido, embora permitam maior quantidade de toras no bocal do picador, resultam em menor volume total por ciclo. O risco de sobreposição de toras compromete significativamente a disponibilidade operacional do equipamento. Inversamente, toras de maior VMI proporcionam uma alimentação mais uniforme e estável.

Conclui-se que o VMI não deve ser tratado apenas como uma consequência da floresta. Ele é uma variável de entrada crítica para o desempenho fabril, influenciando a qualidade dos cavacos, a estabilidade operacional e a eficiência econômica do processo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABTCP. **Dados econômicos do setor de celulose e papel**. São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2025.

BARROS, L. **Produtividade e eficiência na picagem de madeira**. Curitiba: Editora UFPR, 2013.

CASTANHO, A. **Controle de qualidade na produção de cavacos e celulose**. São Paulo: Editora Pulp & Paper, 2004.

COSTA, M. **Desempenho industrial e granulometria de cavacos**. São Paulo: Editora UFSP, 2023.

CNA BRASIL. **Ciclos de rotação em eucalipto para celulose**. Brasília: Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, 2025.

ELDORADO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade e produtividade florestal**. Três Lagoas: Eldorado Brasil, 2022.

FOELKEL, C. **Processos de preparo de cavacos para celulose**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2009.

FOELKEL, C. **Granulometria e qualidade de cavacos**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2010.

FOELKEL, C. **Características físicas da madeira e desempenho do picador**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2005.

FROSSARD, P. **Eficiência de impregnação em processos kraft**. Lausanne: EPFL Press, 2003.

GOMIDE, et al. **Diâmetro, finos e uniformidade de cavacos**. Belo Horizonte: Editora UFV, 2010.

GONÇALEZ, et al. **Impacto da qualidade da madeira no preparo de cavacos**. Rio de Janeiro: Editora Técnica Florestal, 2014.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual da indústria de celulose e papel**. Brasília: IBÁ, 2023.

IBGE. **Indicadores econômicos e setoriais do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025.

MAIS FLORESTA. **Produção de celulose no Brasil em 2024**. São Paulo: Mais Floresta, 2025.

MATANATIVA, P. **Métodos de cubagem e inventário florestal**. Porto Alegre: Editora Floresta, 2023.

MOULIN, et al. **Densidade de plantios e volume médio individual em eucalipto**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017.

RIBEIRO, et al. **Intensificação da silvicultura e impactos na qualidade da madeira**. São Paulo: Editora Florestal, 2017.

RODRIGUES, et al. **Impacto do VMI na eficiência operacional da indústria de celulose**. São Paulo: Editora Científica, 2017.

SCAN. *SCAN-CM 40:01: Padrões de granulometria de cavacos*. Estocolmo: Scandinavian Pulp & Paper Research Institute, 2001.

SCHNEIDER, H. **Silvicultura moderna: volume versus densidade de plantio**. Florianópolis: Editora UFSC, 1993.

SILVA, R. **Volume médio individual de árvores em plantios florestais**. Curitiba: Editora UFPR, 2017.

SILVA, R.; et al. **Eficiência operacional de máquinas florestais e VMI**. Curitiba: Editora UFPR, 2022.

SOARES, R. **Equipamentos para preparo de cavacos**. São Paulo: Editora Pulp & Paper, 2015.

SOPRANI, F. **Qualidade da madeira e eficiência industrial**. Rio de Janeiro: Editora Técnica, 2016.

UFMT – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO. **Operação de picadores industriais e VMI**. Cuiabá: UFMT, 2021.

VERA, L.; LAURA, M.; COUTO, F. **Produtividade florestal em plantios densificados**. Belo Horizonte: Editora UFV, 2023.

INFASUL. **Manual técnico de operação de picadores industriais**. Santa Cruz do Sul: INFASUL – Indústria de Fábricas Sul Ltda., 2020.

FERREIRA, F. **Volume Médio Individual (VMI): uma variável crítica no desempenho das linhas de cavaco**. LinkedIn, 04 out. 2025. Disponível em: https://www.linkedin.com/posts/engfmf_celuloseepapel-preparaaexaetodemadeira-processocontaednuo-activity-7353569341658873856-nwV6?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAABTm12cBwSElboKXOsJJvrv8CxFdCGlkOEM. Acesso em: 20 nov. 2025.