ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DE CAVACOS NO PROCESSO DE COZIMENTO DA PRODUÇÃO DE CELULOSE

Michel Ferreira Costa – Aluno do Curso de Engenharia Química
Escola Politécnica - PUCRS

Resumo

A produção de celulose desempenha um papel fundamental na indústria de papel e embalagens, fornecendo matéria-prima para diversos produtos. A qualidade da madeira e seu processamento desempenham um papel crucial na eficiência e qualidade da celulose. Variáveis relacionadas às características da madeira afetam o rendimento, propriedades físicas e químicas da celulose, impactando os custos de produção. Por sua vez, o processamento de celulose possui etapas definidas e é influenciado por variáveis de qualidade, como o percentual de cavacos aceitos e teor de areia, que afetam a eficiência e os custos. Este trabalho visa correlacionar variáveis do processo de produção de cavacos de madeira de eucalipto com a produção de celulose através de correlações de Pearson e Spearman. Resultados mostram que a qualidade dos cavacos impacta o consumo de licor, viscosidade, rendimento e resistência das fibras. Palitos e finos afetam negativamente o processo, enquanto a densidade e teor de areia influenciam a qualidade da polpa.

Palavras-chave: Qualidade dos cavacos. Produção de celulose. Correlação de variáveis.

Abstract

The production of cellulose plays a fundamental role in the paper and packaging industry, providing raw material for various products. The quality of wood and its processing plays a crucial role in the efficiency and quality of cellulose. Variables related to wood characteristics affect the yield, physical and chemical properties of cellulose, impacting production costs. In turn, cellulose processing has defined stages and is influenced by quality variables such as the percentage of accepted chips and sand content, which affect efficiency and costs. This study aims to correlate variables in the process of producing eucalyptus wood chips with cellulose production through Pearson and Spearman correlations. Results show that chip quality impacts liquor consumption, viscosity, yield, and fiber strength. Fines and sticks negatively affect the process, while density and sand content influence pulp quality.

Keywords: *Wood chip quality. Cellulose production. Variable correlation.*

1 Introdução

A produção de celulose é um processo fundamental na indústria de papel e embalagens, fornecendo matéria-prima para a fabricação de uma ampla gama de produtos. As características da madeira e de seu processamento possuem variáveis que influenciam e desempenham um papel crucial na eficiência e na qualidade final da celulose produzida. Diversas variáveis relacionadas à qualidade da madeira têm um impacto direto no rendimento da celulose, nas propriedades físicas e químicas do produto e, consequentemente, nos custos de produção.

O Brasil tem se consolidade como líder mundial no mercado de celulose, na produção de celulose de fibra curta, a qual é oriunda de árvores folhosas, como o eucalipto e a acácia por exemplo, de onde derivam produtos de papéis mais finos, por gerar materiais mais macios e de boa absorção. Os principais produtos desenvolvidos são os papéis utilizados para impressões, em cadernos, lenços, guardanapos entre outros. A competitividade da produção de madeira de eucalipto tem sido o alicerce para este crescimento, bastante fomentado pelo setor de biotecnologia, que tem contribuído muito para o aprimoramento genético de espécies e melhoria de características para o aumento da produtividade e qualidade das florestas e da madeira resultante.

O processamento de celulose possui um sequenciamento bem definido, apresentando etapas de pré-tratamento e beneficiamento, os quais são monitorados e controlados por diversas variáveis de qualidade que influem no bom desempenho do processo. Variáveis como percentual de cavacos aceitos, percentual de finos, teor de areia são parâmetros que afetam a qualidade, produtividade, continuidade e confiabilidade do produto além da obstrução e desgaste de equipamentos dos processos seguintes, acarretando menor eficiência na separação celulose-lignina, aumento de consumo de vapor e químicos e maior geração de rejeitos. Com isto, identificar e compreender como as variáveis dos processos químicos são afetadas pelas variáveis do processo anterior, pode apontar soluções importantes, pontos de foco e de correção, para melhorar a produtividade e reduzir o consumo de químicos e insumos.

Metodologias de correlações de dados amostrais se mostram muito úteis para analisar parâmetros de processos, apontando *insights* significativos os quais podem ser trabalhados para otimizar processos, identificar padrões, tendências e necessidades de controle de qualidade, além de detectar anomalias.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é preencher a lacuna na compreensão e divulgação das informações técnicas relacionadas aos impactos da qualidade dos cavacos nos processos subsequentes de produção de celulose. Para alcançar esse objetivo, serão revisadas as correlações e interações entre as variáveis envolvidas, utilizando métodos estatísticos e análises comparativas de dados reais com a literatura, além de identificar novas relações e interpretações dos impactos dessas variáveis. A análise multivariada é aplicada em dados de processo de uma indústria de produção de celulose, no período de 2021 à metade de 2023 organizados mensalmente, através de práticas laboratoriais e sistemas de supervisão de processo. A relevância desse tema está intrinsecamente ligada à capacidade de extrair *insights* valiosos e desenvolver ações práticas com base nas metodologias e indicativos encontrados. Isso contribuirá para uma compreensão mais profunda dos impactos das variáveis de qualidade dos cavacos nos processos posteriores, oferecendo oportunidades de redução de custos e insumos, bem como melhoria da eficiência de processamento.

2 Fundamentação teórica

2.1 Processamento de cavacos e celulose

A indústria de celulose e papel objetiva a obtenção de um sólido, composto por celulose e hemiceluloses, através de processos químicos e operações unitárias, que solubilizam a lignina. Neste processamento as seguintes etapas podem ser: preparação da madeira, extração da celulose ou polpação, branqueamento da celulose, refinação e secagem (Teixeira et al., 2017).

A indústria brasileira de papel e celulose é altamente competitiva devido à sua produtividade na atividade florestal, resultado de investimentos em pesquisa e desenvolvimento, bem como das condições favoráveis do solo e clima no Brasil (Hora; Melo, 2015). O Brasil se tornou o maior produtor e exportador de celulose mundial em 2022, onde a potência da atividade florestal sustentou e consolidou esta posição conforme dados do Portal Celulose (2023). Existe um potencial significativo de expansão dessa indústria no país, que é impulsionado tanto pela demanda internacional, especialmente para celulose e papel de embalagem, quanto pela demanda interna, uma vez que o consumo nacional de papel ainda está 15% abaixo da média mundial. Em 2022, a produção de celulose no Brasil chegou a 25 milhões de toneladas, representando 10,9% de aumento frente ao ano anterior. As exportações registraram aumento de 22%, chegando a 19,1 milhões de toneladas segundo a Indústria Brasileira de Árvores (Ibá, 2023) (Hora; Melo, 2015; Portal Celulose, 2023; Ibá, 2023).

Materiais lignocelulósicos são compostos principalmente por celulose, hemiceluloses e lignina, e se apresentam de forma estável e estruturada (Rodrigues et al., 2017). A celulose é o principal componente da parede celular da fibra, com apenas um tipo de unidade de açúcar, é um polissacarídeo de cadeira longa e linear, sendo definida como um carboidrato. Hemiceluloses são cadeias menores de polissacarídeos, porém diferem-se da celulose por apresentarem ramificações e diferentes tipos de unidades de açúcar. A lignina é um polímero que não apresenta ordem na disposição de suas cadeias moleculares, com composição química complexa de característica fenólica, a qual é responsável por conferir rigidez ao conjunto de fibras de celulose (D`Almeida, 1988; Teixeira et al., 2017; Rodrigues et al., 2017).

A madeira de eucalipto é uma matéria-prima chave na produção de polpa celulósica, especialmente na América do Sul. A qualidade da madeira é vital para obter alta eficiência, baixos custos e qualidade superior na produção de celulose. Selecionar matérias-primas adequadas é um desafio crucial para alcançar polpa celulósica de alta qualidade. Indústrias enfrentam a tarefa principal de escolher matérias-primas com atributos desejáveis para garantir uma polpa de qualidade. Múltiplos estudos buscam aumentar a produtividade da madeira e sua qualidade para a produção de celulose, concentrando-se na seleção de clones de melhor desempenho (Jardim et al., 2017).

O processo de produção de celulose inicia pela preparação da madeira para etapas de polpação. Estas etapas envolvem manuseio de toras de madeira, as quais são lavadas para remoção de sujeira e impurezas, as toras podem ser recebidas com ou sem cascas, o que determina a presença ou não de uma etapa de descascamento, mas independente desta característica, há uma etapa que utiliza atrito mecânico e jatos de água de alta pressão para remoção de residuais de cascas e impurezas. Em sequência, as toras são fracionadas em cavacos por meio de picadores na etapa conhecida como picagem. (Teixeira et al., 2017). A etapa de picagem é essencial para ampliar a área superficial e uniformizar o tamanho das partículas da madeira. Isso aprimora a eficiência das etapas seguintes do processo, sendo um indicador crucial de qualidade. A uniformização do tamanho das partículas facilita a interação entre a madeira e os reagentes químicos usados nas etapas seguintes, melhorando a difusão desses reagentes na estrutura da madeira, o que é fundamental para os fenômenos de superfície (Teixeira et al., 2017; Rodrigues et al., 2017).

Os cavacos são classificados por tamanho por meio de etapa de peneiramento, o tamanho dos aceites é definido pela configuração e necessidade dos processos de polpação. Na seleção,

os cavacos maiores, acima da medida, denominado *overs*, são “repicados” e retornam ao processo. Os palitos e serragem são separados, podendo ser utilizados como combustível ou comercializados. Esta etapa confere qualidade aos cavacos e remoção de frações indesejadas e prejudiciais ao processo (Rodrigues et al., 2017).

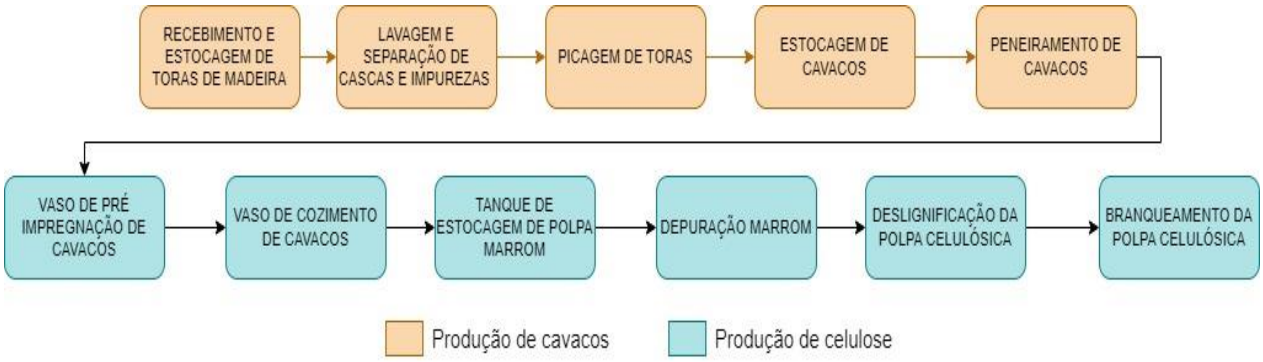
A qualidade da madeira processada tem um impacto significativo nos valores da distribuição granulométrica. Fatores como o diâmetro da tora, umidade e densidade básica da madeira desempenham um papel importante na picagem. A obtenção de cavacos de alta qualidade granulométrica traz vantagens substanciais no processo de cozimento, como a redução no uso de produtos químicos, diminuição das taxas de rejeitos e, especialmente, uma redução no consumo específico de madeira (Soprani, 2016).

Soprani (2016) discorre ainda que a melhoria do rendimento da madeira e a análise do impacto das dimensões dos cavacos na eficiência e qualidade da polpa é uma área de estudo importante para desenvolvimento. Estudos nessa direção são persistentes e remontam a tempos passados. Essas pesquisas destacam que a análise das dimensões dos cavacos, juntamente com outras variáveis do processo de cozimento, pode aprimorar significativamente a eficiência da produção de celulose (Soprani, 2016).

O processo químico predominante na produção de celulose de eucalipto é o Kraft, desenvolvido em 1879 por Carl F. Dahl. Nele, os cavacos de madeira são misturados com um licor de cozimento contendo hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na_2S). Essa mistura é tratada em um reator pressurizado com vapor, onde os cavacos absorvem a solução. Posteriormente, são aquecidos à temperatura adequada para a reação do licor com a lignina presente na madeira, etapa denominada cozimento. Isso leva à dissolução da lignina e à separação das fibras (Soprani, 2016).

Os processos que sucedem a etapa de polpação são deslignificação e branqueamento. A polpa apresenta uma tonalidade marrom devido à presença residual de lignina. Nesta etapa, com uso de agentes branqueadores, como oxigênio, ozônio, dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio, objetiva-se remover ou alvejar a lignina ainda presente na fibra (Teixeira et al., 2017). A Figura 1 representa, de forma macro, as etapas de produção de cavacos e de celulose.

Figura 1 – Macro sequenciamento de produção de cavacos e celulose



Fonte: O autor, 2023.

Conforme Celso Foelkel (2020), que aponta relações dos constituintes da madeira de eucaliptos com o processo Kraft, a densidade da madeira está diretamente relacionada com sua composição química, sendo influenciada pela espessura da parede celular, teor de cerne, idade da árvore, entre outros fatores. Madeiras de baixa densidade ocupam mais volume e podem limitar a produção de fábricas quando a capacidade de alimentação de cavacos aos digestores é insuficiente, resultando em perda de produtividade. Por outro lado, madeiras mais densas apresentam desafios na impregnação e no fluxo de líquidos em seu interior durante o processo de cozimento. Para manter o tempo de cozimento, é necessário aumentar a carga alcalina e/ou a temperatura, o que pode reduzir o rendimento da polpação. Portanto, a densidade da madeira desempenha um papel crucial nos processos de produção de celulose, afetando diversos aspectos operacionais e de eficiência (Foelkel, C., 2020).

Sobre a constituição de lignina, Foelkel (2020) informa que as madeiras usadas na produção de celulose contêm 20 a 30% de lignina em sua composição, parte dela insolúvel em ácido e uma menor parte solúvel em ácido sulfúrico usado na medição de lignina Klason, que leva o nome do autor, que em 1893 desenvolveu um protocolo para determinação da lignina através de hidrólise ácida com ácido sulfúrico conforme Cruz et al (2019). A lignina removida durante a polpação com oxigênio também é encaminhada para o licor preto, aumentando os sólidos secos gerenciados nas fábricas, especialmente em fábricas de celulose branqueada. A remoção de uma unidade de peso seco de lignina da madeira de eucalipto no processo Kraft resulta na remoção de 0,8 a 1,2 unidades de outros importantes constituintes da parede celular dessa madeira (Foelkel, 2020; Cruz et al, 2019).

2.2 Principais variáveis dos processos de produção de cavacos e cozimento

A densidade aparente ou densidade a granel apresenta uma forma de obter-se o peso seco da madeira, é a medida de massa em um determinado volume, o qual considera os espaços preenchidos pelo ar, muito utilizada para materiais sólidos e fracionados, também é comumente associada com a umidade da amostra para que haja o desconto da água e obter-se a densidade aparente seca, sendo expressa em t/m^3 ou kg/m^3. No processo Kraft, a massa e volume de alimentação de cavacos são determinados por equipamentos medidores, denominados tipicamente como medidores de cavacos, os quais se assemelham a válvulas rotativas com bolsões, onde cada bolsão possui volume conhecido, o que permite através da densidade aparente e da contagem de rotações do equipamento, calcular o rendimento do processo (Foelkel, 2015).

A densidade básica da madeira possui elevada complexidade conforme Foelkel et al (1971) descreve, decorrendo da interação de vários fatores, como a espessura da parede das fibras, o volume dos vasos e parênquimas, a proporção entre madeira primaveril e outonal, e o arranjo dos elementos anatômicos, desempenhando papel crucial na determinação das propriedades físicas e mecânicas de diferentes espécies de madeira. Na indústria de celulose e papel, a densidade básica da madeira é vital, desde a compra em volume até o controle do peso seco durante o processamento, buscando uniformidade para padronização do produto. Destaca-se a relação entre densidade básica e a produção de celulose, através da impregnação da madeira e do ritmo de deslignificação da celulose (Foelkel et al, 1971).

Foelkel (2020) descreve que a umidade da madeira, é uma propriedade influenciada pela densidade, pela sazonalidade e pelos tempos de estocagem da madeira, como toras ou cavacos. O volume de cavacos para cálculos de processo é quantificado em base seca, descontando a umidade presente, pois objetiva-se eliminar erros oriundos de contração ou expansão dos cavacos ocasionados pelo volume presente de água. Para Foelkel (2020), o volume dos cavacos devido a inchamento ou ressecamento, influenciam na impregnação do licor de cozimento nos cavacos. A secagem da madeira no campo provoca contração e histerese que implica a não reestruturação da madeira a seu volume original mesmo após tentativas de reidratação, devido a ligações irreversíveis entre suas moléculas. Isso destaca a importância da umidade no processamento da madeira e suas implicações nos diferentes estágios do processo (Foelkel, 2020).

A geometria dos cavacos é mensurada conforme norma SCAN 40:01, por meio de

métodos de análise laboratoriais. Um sistema de mecanismo de agitação com telas de diferentes dimensões, o qual simula uma peneira, objetiva separar em frações uma amostra escolhida de cavacos, tendo por resultado uma amostra granulométrica. Estas frações são separadas em seis, sendo elas: Cavacos grandes e lascas (Overs), cavacos maiores, aceites, aceites menores, palitos e finos (serragem) (Soprani, 2016). Para Foelkel os cavacos de tamanho ideal são os que possuem de 15 a 25 mm de comprimento e de 2 a 8 mm de espessura. Cavacos maiores e de maior espessura são mais difíceis de impregnar com licor, com isso gera-se maior número de rejeitos, os de tamanho pequeno sofrem maior degradação e viram rejeitos, promovem danos mecânicos e consomem mais químicos (Foelkel, 2015).

O teor de areia é um fator importante de medição, uma vez que é tratada como contaminante do processo, embora seja inerte ao processamento Kraft, promove um elevado desgaste em equipamentos por conta da abrasão, além de elevar o volume de rejeitos, levando a necessidade de etapas de tratamentos. Foelkel (2008) ainda destaca o impacto no volume de resíduos do processo, apontando a importância que a redução de terra e areia apresenta, sugerindo o aprimoramento de técnicas de manuseio das toras de madeira em campo para reduzir o volume destes contaminantes no processo (Foelkel, 2008).

O número kappa é de grande importância para avaliação da qualidade da polpa, sendo empregado para a determinação da quantidade de lignina remanescente nas polpas. É uma medida indireta de determinação de lignina, quimicamente utiliza-se permanganato de potássio que reage com os anéis aromáticos presentes na lignina, resultando em dióxido de manganês conforme método ISO 302:2004, posteriormente, por titulação, obtêm-se esta concentração e realiza-se a conversão ao número kappa. Instrumentalmente os analisadores utilizam frequência ultravioleta para esta determinação gerando dados online através da espectroscopia. Conforme Suess (2010), a medida da quantidade de ligações duplas presentes em uma amostra de polpa é um moderno conceito para o número kappa (Suess, 2010; Correia et al, 2019).

A viscosidade de polpa celulósica é crucial para monitorar a degradação da polpa de celulose devido à sua relação com o grau de polimerização. A viscosidade é um indicador da preservação dos carboidratos, que, por sua vez, estão associados a melhores propriedades de resistência física, especialmente aquelas que envolvem a ligação entre fibras. Além disso, fatores como a cristalinidade, a anatomia das fibras e a capacidade de formar ligações entre as fibras também afetam o estado da polpa. Esses fatores podem influenciar a resistência das fibras e sua capacidade de resistir a tensões de ruptura (Caux et al, 2009).

A demanda química de oxigênio (DQO) é também um importante parâmetro para indicar a concentração de matéria orgânica presente em um meio ou amostra. Conforme Afonso e Foltin (2023), a matéria orgânica dissolvida é importante para o controle e processamento de efluentes industriais e Dos Santos (2013) demonstra que no processo Kraft há variação significativa no número Kappa em etapas do branqueamento pelo valor de DQO da polpa que ingressa nesta etapa de processo, havendo também redução no consumo de cloro ativo (Afonso; Foltin, 2023; Dos Santos, 2013).

2.3 Técnicas de análise multivariada

A análise estatística está vinculada a um conjunto de dados os quais se busca ordenar e interpretar, sendo obtidos através de medições e observações de características de objetos, entidades ou indivíduos. É possível através das análises visar custos, quantidades, variações, impactos entre outros fatores, podendo estes estarem relacionados com séries temporais de dados amostrais (Silvestre, 2007).

A estatística multivariada é uma importante ferramenta para identificação de padrões entre uma extensa quantidade de dados, a qual além do planejamento dos experimentos, pelo uso de análises químicas, permite analisar interações entre os parâmetros analisados, obtendo-se informações pelo uso de algoritmos e representações gráficas (Correia; Ferreira, 2007).

2.3.1 Análise descritiva e distribuição dos dados

A distribuição normal, também conhecida como curva de Gauss, é uma distribuição estatística que descreve a forma como muitos eventos naturais se comportam quando representados por dados contínuos. Ela é caracterizada por uma curva simétrica, com uma única moda que coincide com a média e a mediana dos dados. Além disso, a distribuição normal é completamente definida pelos valores da média e do desvio padrão. A importância da distribuição normal na estatística reside no fato de que muitos testes estatísticos, como o teste t de Student, a análise de variância, o coeficiente de Pearson, a regressão linear (especificamente os resíduos) e a análise discriminante, pressupõem que os dados sigam uma distribuição normal. Esses testes são amplamente utilizados na análise de dados clínicos e experimentais para realizar inferências estatísticas robustas e tomar decisões confiáveis (Miot, 2017).

Quando um conjunto de variáveis é estudado simultaneamente, recomenda-se a utilização de técnicas complementares às correlações lineares. Variáveis com alta associação medida por

meio do coeficiente de correlação linear e, com efeitos diretos de mesma intensidade e direção, são consideradas variáveis de causa e efeito, sendo indicadas para a predição da variável principal (Cruz; Carneiro, 2006).

2.3.2 Correlação de Pearson

O Coeficiente de Correlação de Pearson, frequentemente representado por "r" é uma ferramenta crucial na estatística que nos permite avaliar a força e direção da relação linear entre duas variáveis quantitativas. Embora seja amplamente atribuído a Karl Pearson, Stanton (2001) ressalta que o desenvolvimento desse coeficiente remonta a uma colaboração entre Karl Pearson e Francis Galton. Essa medida estatística desvenda a associação linear entre variáveis, a fórmula para o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson é apresentada na Equação 1. O coeficiente de correlação de Pearson (r) varia no intervalo de -1 a 1, o sinal do coeficiente indica a direção do relacionamento (positiva ou negativa), enquanto o valor numérico expressa a força desse relacionamento. Quando mais próximo de |1|, mais forte a correlação, por outro lado valores iguais ou muito próximos a zero indicam inexistência de correlação estatística. Este coeficiente é sensível às assimetrias na distribuição e à presença de *outliers* (valores atípicos), com isto necessita que os dados provenham de duas populações com distribuições normais de dados. (Stanton, 2001; Filho, D; Júnior, J., 2009).

$$r = \frac{1}{n-1}\sum\left(\frac{x_i-\bar{X}}{s_x}\right)\left(\frac{y_i-\bar{Y}}{s_y}\right) \quad (1)$$

2.3.3 Correlação de Spearman

O coeficiente de correlação de Spearman é uma medida de associação não paramétrica entre duas variáveis quantitativas. Ele é calculado usando a fórmula do coeficiente de correlação de Pearson, mas com as ordens das variáveis em vez dos valores originais. Segue a mesma escala de avaliação de Pearson, com o valor do coeficiente variando de -1 a 1, bem como a mesma interpretação frente aos valores calculados. É robusto a violações de suposições de normalidade e à presença de *outliers*, possibilitando análise de conjuntos de dados que não apresentam distribuições normais (Sousa, 2019).

2.3.4 Regressão linear múltipla

A regressão linear múltipla é uma técnica de análise de dados que estima a relação entre uma variável dependente com mais de uma variável independente, usando uma equação linear

(Maia, 2017). A adequação do modelo pode ser avaliada pelo método dos mínimos quadrados, que consiste em encontrar os valores de a e b que minimizam a soma dos quadrados dos resíduos,mediante o uso do coeficiente de determinação (R^2), que representa uma medida de adequação do modelo de regressão aos dados. O método informa sobre uma proporção da variabilidade da variável de resposta que é explicada pelo modelo e pelos resíduos que são as diferenças entre os valores observados de y e os valores ajustados do modelo. Há um bom ajuste quando o modelo não apresenta grandes resíduos e padrão na distribuição dos dados (Martins, 2019).

3 Metodologia

A análise proposta neste trabalho foi aplicada a uma indústria de produção de celulose branqueada situada em Guaíba, Rio Grande do Sul, utilizando dados de processo e de amostragens das etapas de processo de produção de cavacos e de celulose de janeiro de 2021 a junho de 2023, a metodologia foi dividida em quatro etapas: identificação e caracterização das variáveis, levantamento de dados históricos, tratamento de dados e aplicação de técnicas estatísticas de correlação.

3.1 Identificação e caracterização das variáveis

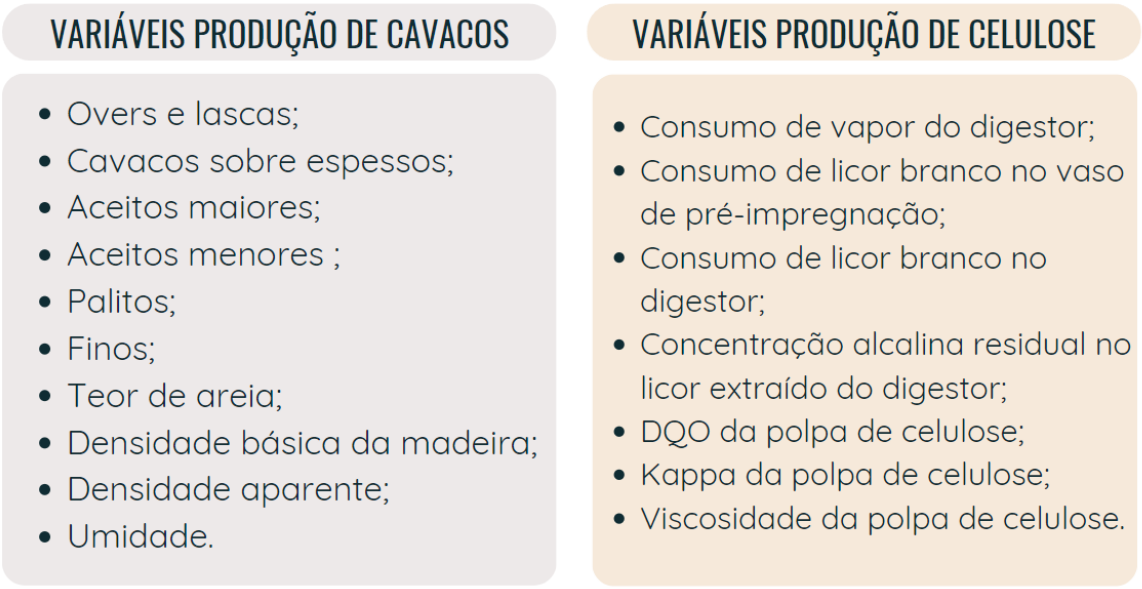
A primeira etapa do estudo envolveu a identificação e caracterização de todas as variáveis dos processos de produção de cavacos e de celulose através de pesquisas bibliográfica e levantamento *in loco* dos problemas e dos impactos que as variáveis de processo apresentam. Este procedimento objetiva identificar e compreender o comportamento de cada variável da produção de cavacos para analisar e determinar quais delas potencialmente causam impactos no processo de produção de celulose.

Com isto foram determinadas as seguintes variáveis da produção de cavacos para análise: densidade aparente dos cavacos, densidade básica da madeira, percentual de umidade dos cavacos, teor de areia (gramas por tonelada de cavacos), lascas ou overs (cavacos acima de 45 mm de comprimento), cavacos sobre espessos (acima de 8 mm de espessura), cavacos aceitos maiores (cavacos entre 45 e 13 mm de comprimento), cavacos aceitos menores (cavacos entre 13 e 07 mm de comprimento), palitos (03 mm de espessura) e finos (resíduo final de amostra, menor que 03 mm de espessura), variáveis as quais descrevem a qualidade dos cavacos produzidos e possuem grande potencial de impactar o desempenho da produção de celulose.

No tocante às variáveis de processo que representam bom rendimento da etapa de

cozimento são a concentração de alcalina residual do licor extraído do digestor que representa o bom aproveitamento do licor de cozimento; DQO da polpa de celulose, a qual indica sujidade da polpa pós cozimento; viscosidade da polpa de celulose, que reflete a degradação da fibra de celulose; número kappa da polpa de celulose que é um indicativo de rendimento do processo pela representação da quantidade de lignina aderida à fibra posterior a etapa de cozimento; consumo de vapor; consumo de licor de cozimento, representa a quantidade de licor utilizada, sendo avaliada no vaso de pré impregnação e no digestor. Ambas as variáveis são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Macro sequenciamento de produção de cavacos e celulose

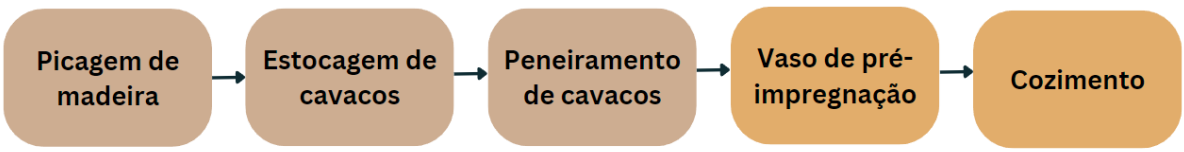


Fonte: O autor (2023).

3.2 Levantamento de dados históricos

A indústria de produção de celulose onde o estudo foi desenvolvido produz celulose branqueada ECF (*elementar chlorine free*) de fibras curtas a partir de madeiras de eucaliptos de espécies variadas, tendo a celulose como seu produto principal. O sequenciamento macro de processo avaliado é apresentado na Figura 3. Os dados foram coletados de bancos de registros de processo e de planilhas de registro de resultados de amostras.

Figura 3 – Macro sequenciamento de produção de cavacos e celulose



Fonte: O autor (2023).

3.3 Tratamento dos dados

A etapa subsequente envolveu o tratamento dos dados, tanto oriundos de registros de processos como por registros de amostragens. Os dados brutos foram organizados em valores médios mensais e esses dados foram compilados e registrados em uma planilha eletrônica. Além disso, durante esse processo, avaliou-se a distribuição normal dos dados, também conhecida como distribuição Gaussiana, muito importante para a inferência estatística, representando a proximidade dos dados com a média. É um passo crítico para orientar a escolha de modelos estatísticos adequados, com auxílio dos cálculos do desvio padrão dos dados e o coeficiente de variação.

3.4 Aplicação de técnicas estatísticas de correlação

Com os dados organizados, foram aplicadas técnicas estatísticas de correlação, crucial para avaliar a relação entre variáveis em uma análise de dados. Dois métodos foram utilizados para calcular e avaliar as correlações, sendo o método de Pearson e o método de Spearman, ambos com suas aplicações específicas, são escolhidos com base nos dados e nos objetivos da análise. Na sequência, para as variáveis que apresentaram correlações foram aplicadas regressões lineares múltiplas. Para as análises, a significância foi estabelecida em 5%, o que implica que há um risco de 5% de se chegar à conclusão de que existe uma diferença quando, na realidade, não há diferença substancial. Os procedimentos de valor-p para a correlação de Pearson e a correlação de Spearman são resilientes em relação a desvios da normalidade. Os valores-p são tipicamente precisos quando o tamanho da amostra (n) é maior ou igual a 25, independentemente do tamanho da população da amostra.

O método de Pearson é apropriado quando se presume uma relação linear entre as variáveis e quando os dados têm uma distribuição normal. A escala de avaliação adotada para o coeficiente: |0,1| à |0,3| indica correlação fraca, |0,4| à |0,6| indica correlação moderada, |0,7| à |0,9| indica uma correlação forte. O método de Spearman foi aplicado para os dados que não atendem aos pressupostos de normalidade, é uma escolha robusta para dados que não seguem uma distribuição normal, utilizando a mesma avaliação de coeficientes aplicado ao coeficiente de Pearson.

Pela natureza dos dados trabalhados, ambas técnicas foram aplicadas, de acordo com a distribuição dos dados de cada variável analisada, com isto, um cruzamento de informações é aplicável, validando melhor os resultados obtidos. Os softwares Excel, versão 2310, e Jamovi,

versão 2.3.28.0, foram as ferramentas utilizadas para a realização das análises estatísticas.

Através da matriz de correlação, as variáveis do processamento de cavacos que apresentaram correlação com as de produção de celulose foram submetidas a técnica de regressão linear para avaliar a significância da relação apresentada. Cada variável da produção de celulose, tratada como variável dependente, foi submetida a regressão linear com as variáveis da produção de cavacos, covariáveis, que apresentaram respectivamente correlação com essas variáveis.

4 Resultados e discussão

Com as técnicas estatísticas aplicadas é possível obter diversas avaliações sobre o comportamento e influência das variáveis, neste tópico são discutidas as correlações e suas significâncias para cada variável trabalhada da produção de cavacos com as variáveis do cozimento, a significância dos dados considerada para as análises é de 5%. A Tabela 1 apresenta o teste de normalidade dos dados, o qual foi balizador para a determinação do coeficiente de correlação para cada variável, onde os dados que apresentam $p < 0,05$ foram avaliados na matriz pelo coeficiente de Spearman, os demais que apresentam distribuição normal foram avaliados pelo coeficiente de Pearson. No Apêndice A são apresentados gráficos que auxiliaram na visualização e determinação da distribuição dos dados trabalhos.

Tabela 1 – Análise descritiva das variáveis de produção de cavacos e de celulose

				TESTE DE NORMALIDADE	
	Média	**Desvio-padrão**	**Variância**	**W**	**p**
Densidade Aparente, kg/m³	168	4	13	0.929	0.057
Densidade Básica, kg/m³	513	5	28	0.973	0.669
Umidade, %	42	3	12	0.970	0.572
Teor de areia, g/t	35	11	112	0.896	0.009
Overs, %	0,28986	0,20575	0,04233	0.933	0.073
Sobre espessos, %	2	0,54242	0,29422	0.927	0.053
Aceitos maiores, %	77	2	2	0.913	0.024
Aceitos menores, %	16	1	2	0.931	0.064
Palitos, %	4	0,40612	0,16493	0.970	0.575
Finos, %	0,71125	0,07778	0,00605	0.959	0.330
Concentração alcalina do licor extraído do digestor, g_{NaOH}/L	23	1	2	0.959	0.322
DQO da polpa de celulose	947	84	7.021	0.954	0.256
Viscosidade da polpa de celulose, dm³/kg	1.297	37	1.338	0.940	0.109
Kappa da polpa de celulose - digestor	17	0,2449	0,05998	0.944	0.136
Consumo de vapor digestor, m³/h	52	8	69	0.937	0.091
Consumo de licor branco – Digestor, m³/h	307	28	786	0.870	0.002
Consumo de licor branco - Vaso de pré-impregnação de cavacos, m³/h	110	9	80	0.957	0.302
p< 0,05 Não apresenta distribuição normal					

Fonte: O autor (2023).

A matriz de correlações gerada através da aplicação de técnicas de Pearson e Spearman é apresentada na Tabela 2, onde valores de coeficientes $p<0,05$ indicam a existência de uma correlação significante entre o cruzamento das variáveis. Com a identificação das correlações, os coeficientes de Pearson e Spearman foram avaliados e indicam a força da correlação.

Tabela 2 – Matriz de correlação de variáveis da produção de cavacos frente variáveis da produção de celulose.

		DQO	Concentração alcalina de licor extraído	Viscosidade	Kappa digestor	Vapor digestor	Consumo de licor branco digestor	Consumo de licor branco vaso de pré-impregnação
Overs	R de Pearson	-0.050	-0.119	-0.443	-0.003	0.288	0.282	0.612
	p-value	0.802	0.547	0.018	0.987	0.137	0.146	< .001
	ρ de Spearman	-0.053	-0.078	-0.317	-0.060	0.242	0.167	0.528
	p-value	0.790	0.691	0.100	0.762	0.214	0.395	0.004
Sobre espessos	R de Pearson	0.018	0.195	0.054	-0.096	0.259	0.411	0.185
	p-value	0.929	0.320	0.784	0.626	0.183	0.030	0.346
	ρ de Spearman	0.049	0.071	0.030	-0.103	0.271	0.427	0.251
	p-value	0.804	0.720	0.879	0.601	0.163	0.023	0.198
Aceitos maiores	R de Pearson	0.290	-0.301	-0.295	0.076	-0.432	-0.325	0.246
	p-value	0.134	0.120	0.127	0.701	0.022	0.091	0.208
	ρ de Spearman	0.255	-0.347	-0.247	0.030	-0.392	-0.368	0.350
	p-value	0.190	0.070	0.204	0.881	0.039	0.054	0.068
Aceitos menores	R de Pearson	-0.331	0.216	0.253	-0.058	0.362	0.203	-0.306
	p-value	0.085	0.269	0.194	0.770	0.059	0.301	0.113
	ρ de Spearman	-0.332	0.245	0.174	-0.022	0.328	0.241	-0.384
	p-value	0.084	0.209	0.377	0.910	0.088	0.216	0.044
Palitos	R de Pearson	0.095	0.151	0.068	0.120	-0.079	-0.103	-0.087
	p-value	0.632	0.444	0.730	0.543	0.689	0.602	0.660
	ρ de Spearman	0.090	0.180	0.046	0.193	-0.090	-0.389	-0.127
	p-value	0.649	0.360	0.817	0.325	0.649	0.327	0.519
Finos	R de Pearson	0.015	-0.306	0.529	-0.298	0.082	0.114	-0.213
	p-value	0.940	0.113	0.004	0.123	0.680	0.564	0.276
	ρ de Spearman	0.092	-0.217	0.553	-0.281	0.090	0.077	-0.204
	p-value	0.643	0.267	0.002	0.147	0.650	0.695	0.297
Teor de areia	R de Pearson	-0.424	0.247	0.139	-0.387	0.494	0.148	-0.231
	p-value	0.025	0.205	0.479	0.042	0.008	0.453	0.237
	ρ de Spearman	-0.361	0.409	0.226	-0.364	0.383	0.173	-0.274
	p-value	0.059	0.031	0.247	0.057	0.044	0.379	0.158
Umidade	R de Pearson	-0.259	0.269	-0.028	0.014	0.193	-0.097	-0.359
	p-value	0.183	0.167	0.887	0.942	0.326	0.624	0.061
	ρ de Spearman	-0.220	0.338	-0.035	0.016	0.161	-0.023	-0.328
	p-value	0.262	0.079	0.860	0.936	0.413	0.908	0.088
Densidade Básica	R de Pearson	-0.409	0.039	0.547	0.099	0.300	0.374	-0.378
	p-value	0.031	0.842	0.003	0.617	0.120	0.050	0.047
	ρ de Spearman	-0.407	-0.086	0.449	0.079	0.309	0.467	-0.488
	p-value	0.032	0.662	0.016	0.690	0.110	0.012	0.008
Densidade Aparente	R de Pearson	-0.289	0.122	0.529	-0.416	0.364	0.332	-0.234
	p-value	0.136	0.537	0.004	0.028	0.057	0.084	0.231
	ρ de Spearman	-0.310	0.082	0.500	-0.467	0.326	0.369	-0.244
	p-value	0.109	0.678	0.007	0.012	0.090	0.053	0.211

Fonte: O autor (2023).

As correlações envolvendo o consumo de vapor e de licor de cozimento no digestor, não apresentaram pressupostos necessários na avaliação pela regressão linear, nestes casos, a significância das correlações é inconclusiva. Pela complexidade dos dados coletados e o tratamento destes, alguns conjuntos de dados não apresentam normalidade de distribuição, o que contribui para o não cumprimento de pressupostos necessários para aplicação de técnicas de regressão linear. Para análise de regressão, foram considerados os dados de R^2 ajustado dos modelos multivariados como representação do ajuste do modelo gerado e o teste F para verificar a significância do modelo são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de R^2 ajustado e teste F para a regressão linear das variáveis de produção de celulose.

Variáveis de produção de celulose	R^2 ajustado	Teste F	
		F	p-valor
DQO da polpa de celulose	**0,378**	**9,19**	**0,001**
Concentração alcalina no licor de extraído do digestor	0,020	1,55	0,224
Viscosidade da polpa de celulose	**0,575**	**10,10**	**< ,001**
Kappa da polpa de celulose	0,172	3,80	0,036
Consumo de licor branco no vaso de pré-impregnação	**0,392**	**6,17**	**0,003**
Vazão de vapor consumido no digestor	0,155	5,04	0,004

Fonte: O autor (2023).

Os preditores e coeficientes para cada variável do processo de produção de celulose, bem como o teste de Tukey, com 5% de significância, foi considerado para avaliação da significância das variáveis preditoras frente as variáveis da produção de celulose analisadas, sendo estes parâmetros apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de coeficientes dos preditores para variáveis de produção de celulose e teste t de Tukey 5%.

Variáveis de produção de celulose	Preditores	Coeficientes	t	p-valor
DQO da polpa de celulose	**Densidade Básica, kg/m³**	**-7,99**	**-3,28**	**0,003**
	Teor de areia %	**-40717,70**	**-3,34**	**0,003**
Concentração alcalina no licor de extraído do digestor	Teor de areia %	292,30	1,25	0,224
Viscosidade da polpa de celulose	**Finos**	**189,98**	**3,10**	**0,005**
	Densidade Básica, kg/m³	**1,34**	**1,31**	**0,204**
	Densidade Aparente, kg/m³	**3,50**	**2,48**	**0,021**
	Overs	**-54,97**	**-2,30**	**0,031**
Kappa da polpa de celulose	Teor de areia %	-606,28	-1,40	0,173
	Densidade Aparente, kg/m³	-0,02	-1,72	0,099
Consumo de licor branco no vaso de pré-impregnação	**Overs**	**22814,00**	**3189,00**	**0,004**
	Aceitos menores	**-1084,00**	**-1142,00**	**0,265**
	Densidade Básica, kg/m³	**-0,25900**	**-0,93**	**0,362**
Vazão de vapor consumido no digestor	Aceitos maiores	-1,92	-2,16	0,004

Fonte: O autor (2023).

4.1 Overs e lascas

Os cavacos com tamanhos acima da especificação (overs e lascas) apresentam estatisticamente uma correlação inversamente proporcional com a viscosidade da polpa de celulose e diretamente proporcional com o consumo de licor branco adicionado no vaso de pré impregnação.

Os overs impactam com elevada significância o consumo de licor do vaso de pré impregnação do processo de produção de celulose, a análise de regressão frente a este parâmetro representa que 37,5% do volume de licor de cozimento consumido na etapa de pré-impregnação dos cavacos é determinado pelo percentual de overs no processo. O impacto da redução da viscosidade da polpa de celulose é um parâmetro também afetado por uma maior quantidade de overs no cozimento, sendo estatisticamente significativo pela análise de regressão, uma explicação plausível é que a necessidade de um maior consumo de licor de cozimento ocasionada pelos overs, promove uma maior degradação das fibras, impactando negativamente na viscosidade.

Com isto, torna-se relevante a observação deste parâmetro de qualidade dos cavacos, buscando formas eficientes de reduzir a quantidade de cavacos grandes no processo, podendo

serem observadas com atenção as etapas de picagem, de onde provém a geração dos overs, seja por ajustes de equipamentos e/ou por exceder volumes de picagem da vida útil de facas e consumíveis, e a etapa de peneiramento a qual deve ser eficiente na seleção dos cavacos bem como em etapas de “repicagem” dos cavacos maiores.

No tocando as lascas que são classificadas principalmente por comprimento, Foelkel (2009) evidencia que esta dimensão é a mais importante para a penetração do licor nos cavacos, pela configuração de corte dos picadores, cavacos mais compridos apresentam maiores espessuras. O reflexo negativo na impregnação impacta a necessidade de maior consumo de licor no digestor, cavacos maiores demandam mais tempo para serem impregnados e para compensar aumenta se a carga alcalina. A geração de lascas está muito ligada a eficiência de corte dos picadores. A avaliação da variação deste parâmetro é uma medida direta da qualidade do cavaco produzido e aponta necessidades de ajuste dos equipamentos e/ou substituição de consumíveis, ações que mitigam a geração das lascas apresentando melhor rendimento de picagem e menor consumo de licor de cozimento. (Foelkel, 2009).

4.2 Cavacos sobre espessos

Os cavacos sobre espessos, apresentam correlação diretamente proporcional com o consumo de licor de cozimento do digestor, porém não apresentam distribuição normal dos resíduos para avaliação da regressão linear, impossibilitando determinar estatisticamente qualquer inferência sobre a correlação indicada pelo coeficiente de Sperman.

A correlação é relevante e corrobora com estudos de Andrade et al (2010), os quais indicam que no processo kraft o consumo alcalino e o teor de rejeitos são proporcionais à espessura dos cavacos, e por conseguinte outras propriedades da polpa celulósica são impactadas, outro ponto salientado é a redução do tempo de cozimento quando são utilizados cavacos de menores espessuras (Andrade et al, 2010).

4.3 Aceitos maiores e menores

Os cavacos aceitos maiores, apresentam uma correlação inversamente proporcional com o volume de vapor consumido no digestor, significa que uma maior quantidade de cavacos classificados como aceitos maiores diminui o consumo de vapor no digestor, sendo significativo pela análise de regressão linear, representando 15,5% do vapor utilizado na etapa de cozimento. Os aceitos menores apresentaram uma correlação inversamente proporcional com o consumo

de licor de cozimento do vaso de pré impregnação, porém através da regressão linear a correlação não é estatisticamente significativa.

Estatisticamente é positiva a correlação entre aceitos maiores e o consumo de vapor, havendo uma redução da necessidade deste insumo na etapa de cozimento podendo ser explicada por uma melhor impregnação de licor de cozimento nos cavacos deste tamanho. Foelkel (2009) afirma que os cavacos de qualidade são essenciais para o processo de polpação kraft, principalmente nas etapas de impregnação onde a penetração e difusão do licor são favorecidas pela melhor distribuição e área superficial dos cavacos, o que reduz consumos do licor e melhora a eficiência energética. Com isto, é posta a importância da atenção e busca por maiores percentuais de cavacos de boa qualidade que culmina com a discussão proposta sobre a importância da melhoria da eficiência na impregnação de licor nos cavacos. Foelkel ainda argumenta que picadores e repicadores mais qualificados, capazes de produzir cavacos com micro-fissuras e micro-fraturas, podem melhorar a qualidade da polpa produzida (Foelkel, 2009).

4.4 Palitos

O percentual de palitos apresenta uma correlação moderada com a vazão de licor de cozimento consumido no digestor. Os parâmetros quando analisados por regressão linear não apresentam distribuição normal dos resíduos tornando inconclusiva a significância da correlação.

É esperado tecnicamente um maior consumo de licor pela presença de palitos, o que contrapõe a correlação encontrada, pois de acordo com as observações de Smook (2002), a presença de palitos e finos exerce um impacto significativo na eficiência do processo de polpação, diminuindo o rendimento do processo, ao mesmo tempo em que reduzem a resistência das fibras de polpa por uma maior quantidade de licor de cozimento do processo. Além disso, a presença de palitos e finos pode resultar em problemas de obstrução nas peneiras de extração de licor utilizadas no sistema de polpação, o que prejudica ainda mais a eficácia do processo, uma vez que obstruções nas peneiras podem levar a interrupções no fluxo, desbalanços de processo e, portanto, à diminuição da produtividade. Foelkel (2009) complementa apontando o desejo da não produção de palitos e serragem, por resultarem em consumos maior de químicos e degradação mecânica desses componentes. (Foelkel, 2009; Smook, 2002).

4.5 Finos

O percentual de finos apresenta correlação diretamente proporcional com a viscosidade da polpa. Pela análise de regressão o parâmetro é significante e representa aproximadamente 25% da pressuposição desta variável por regressão linear.

Esta correlação estatística se apresenta curiosa, não sendo esperada pelo envolvimento desses parâmetros, no caso, que haja uma melhora na qualidade da polpa a ser composta por um aumento percentual de finos, para tal correlação, novos estudos são necessários, visando melhor desvendar esta correlação estatística e verificar se uma certa quantidade de serragem apresenta benefícios significativos para o processo. A literatura através de Foelkel (2009), apresenta que a produção de cavacos de dimensões muito reduzidas gera desafios significativos na indústria de celulose, gerando serragem, que é suscetível à ação do licor alcalino e danifica as fibras da madeira, fato que apresenta a serragem como um componente negativo ao processo. A serragem também consome mais licor alcalino e se degrada mais facilmente no digestor, o que prejudica o rendimento na conversão em celulose, gerando uma maior quantidade de rejeito (Foelkel, 2009).

4.6 Teor de areia

O teor de areia dos cavacos apresenta correlação diretamente proporcional com a concentração alcalina do licor de extração do digestor e no vapor consumido no digestor e inversamente proporcionais a DQO e ao kappa do digestor.

O teor de areia quando analisado frente a concentração de alcalina no licor extraído do digestor, apresenta uma correlação moderada, porém ao analisar a regressão linear destes parâmetros, há pouca significância, influenciando em menos de 2% na composição deste parâmetro. Frente a correlação com DQO a análise de regressão, aponta significância estatística, sendo que o teor de areia representa 15% da composição do parâmetro, um valor maior de DQO da polpa promove um maior consumo de químicos em etapas de branqueamento, para Caux et al (2011), uma variação de DQO promove variação direta no consumo de dióxido de cloro, que é o principal agente branqueador aplicado na tecnologia de produção ECF. David (2004) disserta sobre a utilização do parâmetro DQO para avaliar eficiência de lavagem. Há uma etapa de lavagem no fundo do digestor, com isto a DQO pode ser interpretada como sujidade da polpa, pode ser prejudicada pela presença de areia e outras impurezas. E existe pouca literatura e estudos sobre a relação do teor de areia na produção de celulose, mas Foelkel (2008) sintetiza

o impacto da areia no processo como agente abrasivo, gerando desgaste em equipamentos.

Na correlação teor de areia – vapor há uma correlação que não pode ser averiguada por regressão devido ao não cumprimento de pressupostos de normalidade dos resíduos. A literatura não traz abordagens de possível relação entre areia e vapor no processamento de celulose, podendo se tornar um tópico de estudo. A análise de regressão, para a correlação teor de areia-kappa, não apresenta significância estatística, sendo indício da não relevância do teor de areia no comportamento do kappa.

4.7 Densidade básica

A densidade básica da madeira apresenta correlações diretamente proporcionais com a viscosidade e licor no digestor, também pela análise do coeficiente de Pearson há correlação inversamente proporcional desta variável com DQO e a licor branco no vaso de pré impregnação.

Através de regressão linear entre os parâmetros, a correlação densidade básica e DQO se mostrou significativa para determinação de 15% deste parâmetro. Pela grandeza dos dados trabalhados, há o indício de que cavacos oriundos de madeiras com densidade básica maior, próxima de 520 kg/m³ contribuem estatisticamente para uma redução da DQO da polpa de celulose. Fato este que está atrelado a um bom rendimento da polpação, com isto há menor geração de rejeitos. Outras avaliações e estudos podem ser realizadas para avaliar a melhor faixa de densidade que gera uma melhor performance frete à DQO, visto o potencial benefício pela redução de consumo de químicos nos processos de branqueamento citadas no tópico anterior.

As análises de densidade básica frente à viscosidade, o consumo de licor no vaso de pré impregnação e no digestor, avaliadas pela regressão linear, não apresentam os pressupostos para avaliação, tornando inconclusiva a significância da correlação apontada pelo método de Pearson. Gomide et al (2005) aponta que nem sempre é possível identificar e comprovar as correlações da densidade básica com demais variáveis devido à complexidade deste parâmetro, o qual reúne diversas características da madeira, corrobora os estudos de Mokfienski et al. (2003), onde para diversas espécies de eucaliptos as correlações encontradas não foram muito claras entre o consumo de licor alcalino e a densidade básica, de mesma forma Stein (2010) em seu estudo não identificou relações significativas ou com boa definição. Com isto, para uma tentativa de avaliação destas correlações, outros estudos e metodologias devem ser aplicados,

devido à complexidade da variável densidade. Ainda em seu estudo, Mokfienski et al. (2003) demonstra que madeiras de menor densidade tiveram melhor performance quanto ao rendimento da etapa de cozimento (Gomide et al, 2005; Mokfienski et al, 2003; Stein, 2010).

4.8 Densidade aparente

A variável densidade aparente apresenta correlações diretamente proporcionais com a viscosidade e inversamente proporcional com o kappa do digestor.

A análise da regressão linear aponta que há estatisticamente significância entre a densidade aparente e a viscosidade, o que concorda com os estudos desenvolvidos por Stein (2010), que ressalta a relação da densidade aparente com a densidade básica e a dimensão dos cavacos além da necessidade de ajuste no consumo de licor de cozimento devido à variação de densidade aparente, apesar da relação densidade aparente-kappa não ter se demonstrado significativa estatisticamente, Stein ainda salienta a atenção no ajuste da carga alcalina, onde após um limiar de 20%, expressa como NaOH, não há mais alteração no número kappa, passando a resultar em redução de rendimento e viscosidade da polpa Stein (2010).

4.9 Umidade

As variáveis umidade/secura não apresentaram correlações significantes com as variáveis do processo de cozimento, a concentração de álcali na extração inferior do digestor não apresenta nenhuma correlação importante com as variáveis de produção de cavacos, com isto, estatisticamente pelos métodos aplicados, a umidade dos cavacos não influencia nos parâmetros de cozimento analisados neste trabalho, outros estudos e avaliações podem ser conduzidos para identificação da influência deste parâmetro. Foelkel (2009) descreve que penetração do licor em cavacos de madeira é afetada pela umidade dos cavacos e pelo ar retido em seu interior. Cavacos mais secos facilitam a penetração, mas retêm mais ar, criando contrapressão. À medida que o licor penetra, a contrapressão aumenta, diminuindo a velocidade. Quando a diferença de pressão se anula, é necessário aumentar a pressão externa ou remover o ar interno para continuar. Cavacos úmidos permitem uma penetração mais lenta inicialmente, mas contêm menos ar, reduzindo a contrapressão. A madeira verde favorece a difusão dos íons do licor. O ar interno é a principal barreira para a impregnação. Portanto, cavacos mais úmidos com menos ar são preferíveis, mesmo com penetração inicial mais lenta.

5 Conclusão

Em síntese, as técnicas estatísticas lineares aplicadas revelaram diversas correlações significativas entre as variáveis relacionadas à produção de cavacos e celulose. Estas associações destacam interpretações relevantes e proporcionam insights valiosos sobre a influência de variáveis representativas da qualidade dos cavacos diante de fatores operacionais essenciais na produção de celulose. Essas correlações oferecem uma base sólida para futuros estudos visando a otimização das variáveis discutidas neste trabalho.

Nessa perspectiva, a análise das variáveis relacionadas à qualidade dos cavacos de madeira no processo de produção de celulose revela diversas correlações importantes. Os cavacos overs e lascas impactam significativamente o aumento do consumo de licor no vaso pré-impregnação e potencializam a redução da viscosidade da polpa. Os cavacos sobre espessos estão diretamente ligados ao consumo de licor no digestor, exigindo mais tempo para impregnação e maior carga alcalina. A eficiência dos picadores e repicadores é crucial para produzir cavacos de alta qualidade. Os cavacos aceitos maiores contribuem para a economia de vapor no digestor, enquanto os aceitos menores não apresentaram correlação significativa com o consumo de licor na pré-impregnação. A presença de palitos e finos apresentaram correlações diferentes do esperado frente aos comportamentos apresentados e discutidos na literatura, onde outras abordagens devem ser aplicadas para uma melhor discussão da significância e impacto destas variáveis na produção de celulose. O teor de areia nos cavacos e a densidade básica influenciam diferentemente a DQO da polpa. A densidade aparente tem correlações com a viscosidade. Por fim, a umidade dos cavacos não mostrou correlações significativas com as variáveis de cozimento analisadas neste estudo, bem como a variável kappa da produção de celulose, não sofreu influência das variáveis de produção de cavacos.

Com as técnicas aplicadas, as principais correlações que se mostraram significativas estatisticamente com o consumo de licor branco, viscosidade e DQO da polpa celulósica foram variáveis de granulometria e de teor de areia dos cavacos, fatores importantes de controle para um melhor rendimento da produção de celulose. Os resultados obtidos salientam a importância de novos estudos e investigações para identificar pontos de otimização do processo, visando a redução da geração de overs, a diminuição do teor de areia no processo, além de obter uma melhor compreensão do impacto das variáveis frente à DQO da polpa, tornando possível a redução do consumo de químicos e melhor eficiência do processamento de celulose.

Referências

AFONSO, A. R. E.; FOLTIN, J. P. **A Substituição da Análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO) pela de Carbono Orgânico Total (TOC) e Elaboração de um Fator (K) para Conversão dos Resultados das Técnicas em Efluentes Industriais.** Revista Brasileira de Processos Químicos, v. 4, n. 1, p. 26–50, 1 jul. 2023.

ALVES, É. D. et al. **Estudo do processo de obtenção celulose Kraft com ênfase no forno de cal**. Revista Liberato, v. 16, n. 26, p. 205–218, 18 dez. 2015.

ANDRADE, J. O. M. et al. **Estudos sobre a influência da espessura dos cavacos de eucalipto sobre a qualidade da celulose Kraft correspondente.** O papel, v.39, n. 10, 2010.

CAUX, L. S. et al. **Estudo da viabilidade do parâmetro viscosidade como determinante para a qualidade da fibra de celulose**. 2019. Disponível em: <https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2009_Variabilidade+Viscosidade.pdf>. Acesso em: 12 set. 2023.

CORREIA, A. et al. **Revisitando número kappa: conceitos e aplicações na indústria de celulose.** O Papel**,** v. 80, n. 07, p. 77–89, 2019.

CORREIA, P. R. M.; FERREIRA, M. M. C. **Reconhecimento de padrões por métodos não supervisionados: explorando procedimentos quimiométricos para tratamento de dados analíticos.** Química Nova, v. 30, n. 2, p. 481–487, abr. 2007.

CRUZ, V. et al. **Determinação do teor de lignina total em amostras do processo de extração da lignina do licor negro**. ABTCP, São Paulo, Brasil, 2019. Disponível em: <https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2019_Determinazao+Lignina.pdf>. Acesso em: 12 ago 2023.

D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e Papel: Tecnologia de fabricação de pasta celulósica.** 1988. SENAI, 2ª edição.

DOS SANTOS; D. G. **INFLUÊNCIA DA DQO DO CONDENSADO DA EVAPORAÇÃO NA BRANQUEABILIDADE DA CELULOSE**. 2013. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/5946/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 12 set. 2023.

FILHO, D. B. F.; JÚNIOR, J. A. S. **Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson.** Política hoje, v. 18, n. 1, 2009.

FOELKEL, C. et al. **Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas.** IPEF n. 2, p.65-74, 1971.

FOELKEL, C. **Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose e papel de eucalipto.** Eucalyptus Newsletter, 2008. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT13_Residuos02.pdf. Acesso em: 12 ago 2023.

FOELKEL, C. **O Processo de Impregnação dos Cavacos de Madeira de Eucalipto pelo Licor Kraft de Cozimento**. Eucalyptus Newsletter, 2008. Disponível em: <https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT15_ImpregnacaoCavacos.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2023.

FOELKEL, C. **Qualidade da madeira de eucalipto.** Eucalyptus Newsletter, n. 41, 2015.

FOELKEL, C. **Madeiras para uso celulósico/papeleiro.** Eucalyptus Online Book & Newsletter, n. 84, 2020.

GOMIDE, J. L. et al. **Technological characterization of the new generation of eucalyptus clones in brazil for kraft pulp production**. R. Árvore, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/yWNJDwNhk3NSzbvqNWdymgc/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 outubro 2023.

HORA, A. B.; MELO, L. **Panoramas setoriais papel e celulose**. 2015. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7201/1/Papel%20e%20celulose_P.pdf>.

Ibá. Disponível em: <https://www.iba.org>.

JARDIM, J. et al. **Avaliação da qualidade e desempenho de clones de eucalipto na produção de celulose**. O Papel, v. 78, n. 11, p. 122–129, 2017.

MAIA, A. G. **Econometria: conceitos e aplicações.** Cap. 6, 2017.

MARTINS, G. M. E. **Regressão linear simples.** Rev. Ciência Elementais, v. 7, 2019.

MIOT, H. A. **Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais.** Jornal Vascular Brasileiro, v. 16, n. 2, p. 88–91, jun. 2017.

MOKFIENSKI, A. et al. **A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto.** Ciência Florestal, v. 18, n. 3, p. 401–413, 30 set. 2008.

PORTAL CELULOSE. **Brasil lidera produção e exportação de celulose mundial**. Disponível em: <https://portalcelulose.com.br/brasil-lidera-producao-e-exportacao-de-celulose-mundial/>. Acesso em: 26 ago. 2023.

PRUNZEL, J. et al. **Modelos de regressão linear múltipla aplicados à avaliação de terrenos urbanos - caso do município de Itaqui-RS.** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 22, n. 4, p. 651–664, dez. 2016.

RODRIGUES, C. et al. **Materiais lignocelulósicos como matéria-prima para a obtenção de biomoléculas de valor comercial,** p. 283 -314. Biotecnologia Aplicada à Agro&Indústria - Vol. 4. São Paulo, 2017.

SILVESTRE, A. L. **Análise de Dados e Estatística Descritiva**. Escolar Editora, 2007.

SMOOK, G. A. **Characteristics of wood and wood pulp fibers.** Handbook for Pulp & paper technologists. 3rd, p. 10-19, ed. Vancouver 2002.

SOUSA, Á. **Coeficiente de Correlação de Pearson e Coeficiente de correlação de Spearman. O que medem e em que situações devem ser utilizados?** Correio dos Açores, 2019. Disponível em: <https://repositorio.uac.pt/bitstream/10400.3/5365/1/Sousa_CA_21%20Mar%C3%A7o%202019.pdf>. Acesso em: 19 setembro de 2023.

SOPRANI, C. **Impacto da qualidade dos cavacos gerados na Fibria unidade Aracruz no processo de polpação kraft**. O Papel v. 77, n. 7, p. 72–77, 2016.

STANTON, J. M. **Galton, Pearson, and the peas: A brief history of linear regression for statistics instructors.** Journal of statistical education, 2001.

STEIN, F.R. **Modelagem de produção industrial de celulose kraft com modelos aditivos generalizados e redes neurais.** Minas Gerais, 2010.

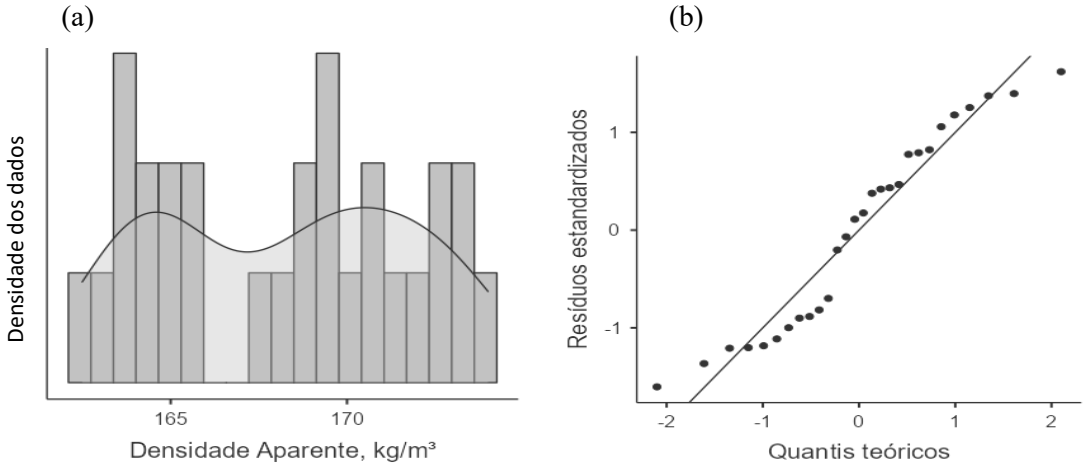
SUESS, H. U. **Pulping Bleaching Today**. Berlin, 2010.

TEIXEIRA, M. B. D. et al. **O Papel: Uma Breve Revisão Histórica, Descrição da Tecnologia Industrial de Produção e Experimentos para Obtenção de Folhas Artesanais**. Revista Virtual de Química, v. 9, n. 3, p. 1364–1380, 2017.

Apêndice A – Gráficos de distribuição das variáveis de produção de cavacos e de celulose

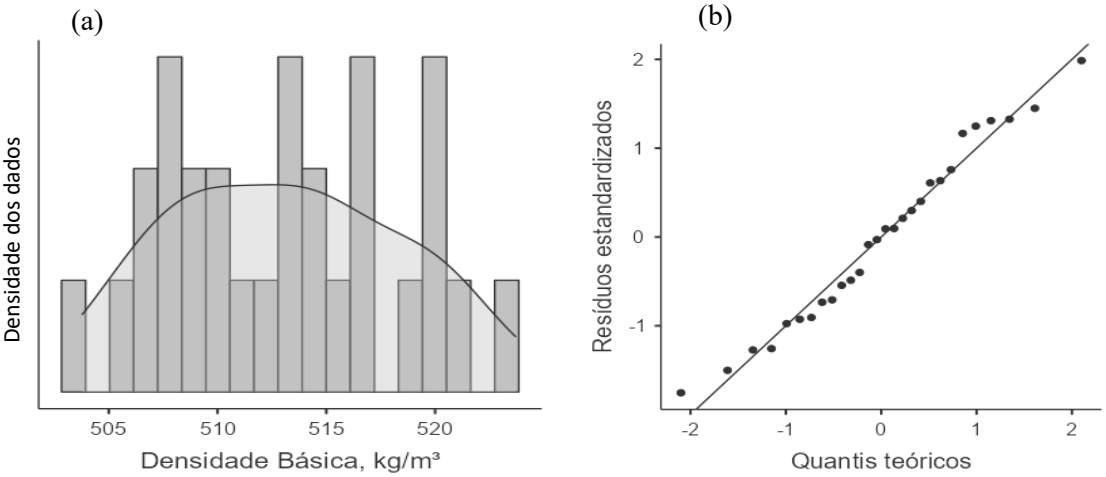
Para avaliação da normalidade dos dados coletados, gráficos de distribuição do tipo histograma e de quantil-quantil foram auxiliares para visualização e avaliação da distribuição dos dados coletados, os quais são apresentados para cada conjunto de dados das respectivas variáveis apresentadas e trabalhadas neste artigo.

Figura 2 – Distribuição dos dados de densidade aparente, (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



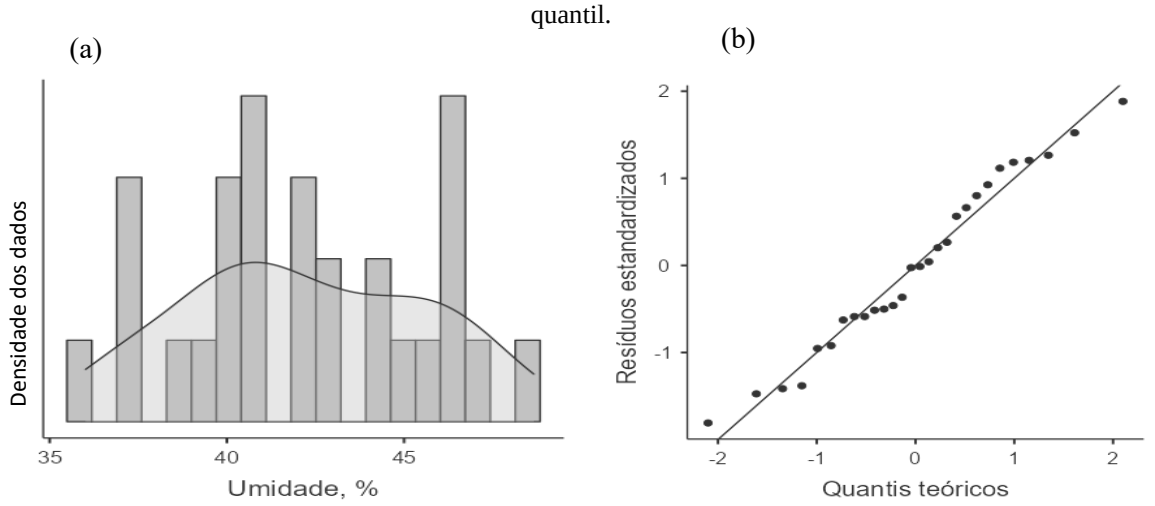
Fonte: O autor, 2023.

Figura 3 – Distribuição dos dados de densidade básica, em kg/m³, (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



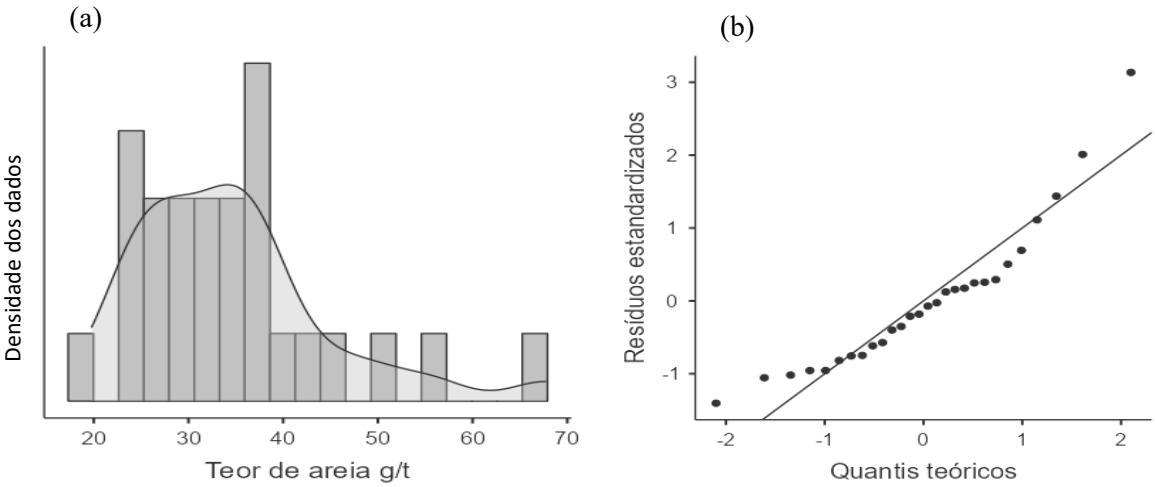
Fonte: O autor, 2023.

Figura 4 – Distribuição dos dados de umidade, em percentual. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



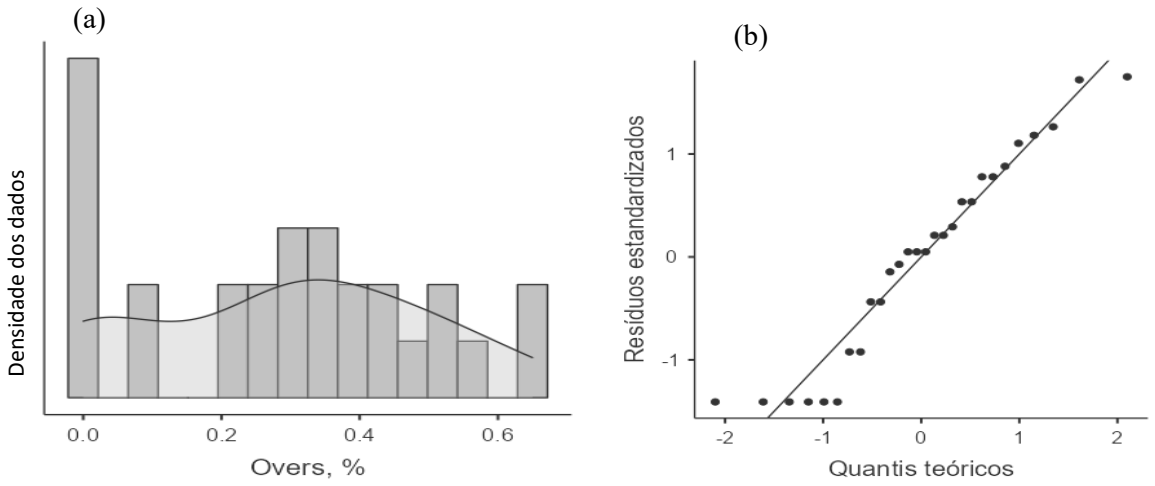
Fonte: O autor, 2023.

Figura 5 – Distribuição dos dados de teor de areia, em g/t de cavacos. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



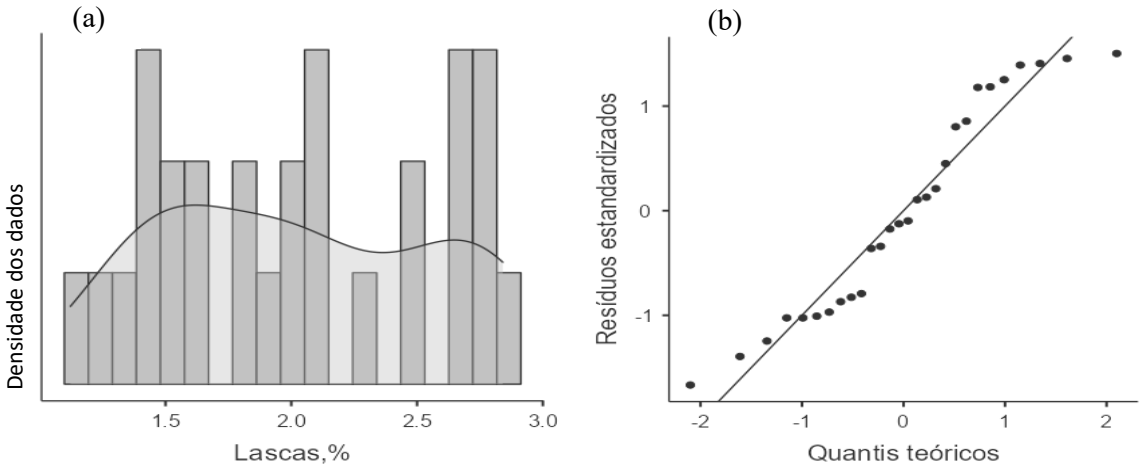
Fonte: O autor, 2023.

Figura 6 – Distribuição dos dados de overs, em percentual. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



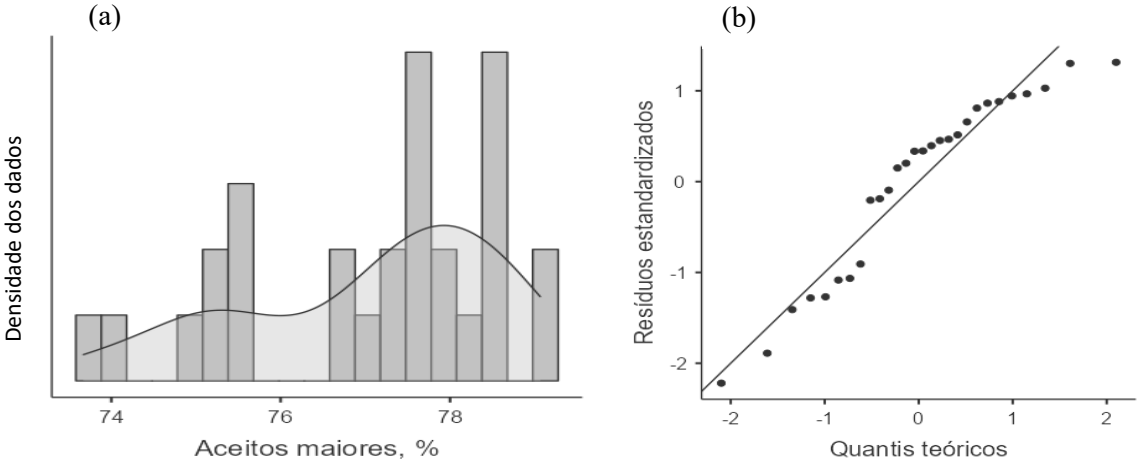
Fonte: O autor, 2023.

Figura 7 – Distribuição dos dados de lascas, em percentual. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



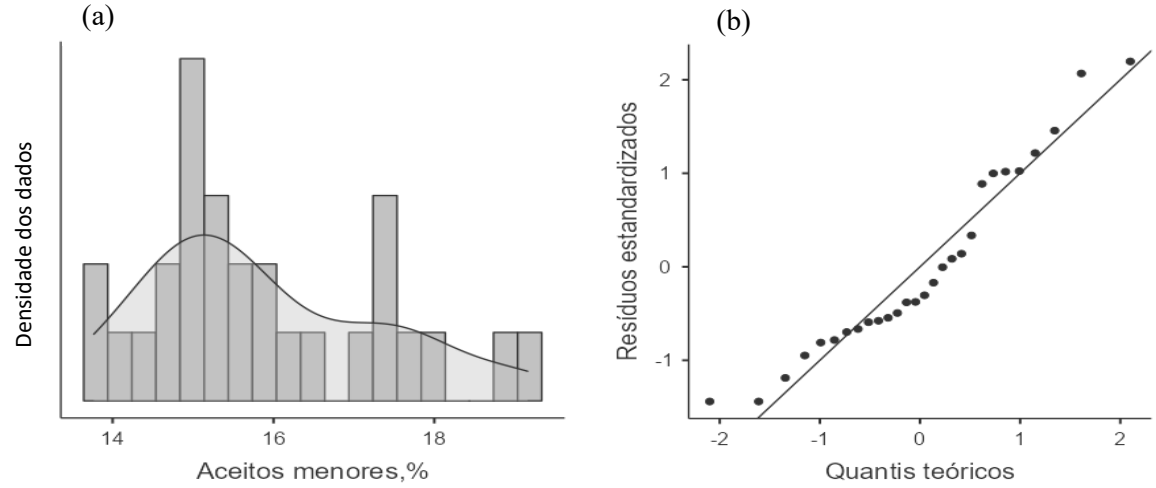
Fonte: O autor, 2023.

Figura 8 – Distribuição dos dados de cavacos aceitos maiores, em percentual. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



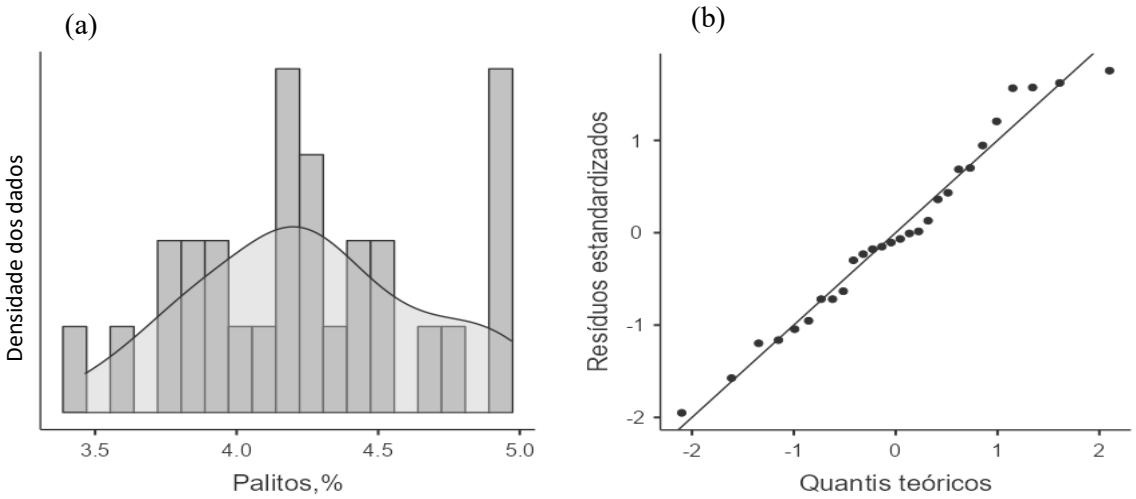
Fonte: O autor, 2023.

Figura 9 – Distribuição dos dados de cavacos aceitos menores, em percentual. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



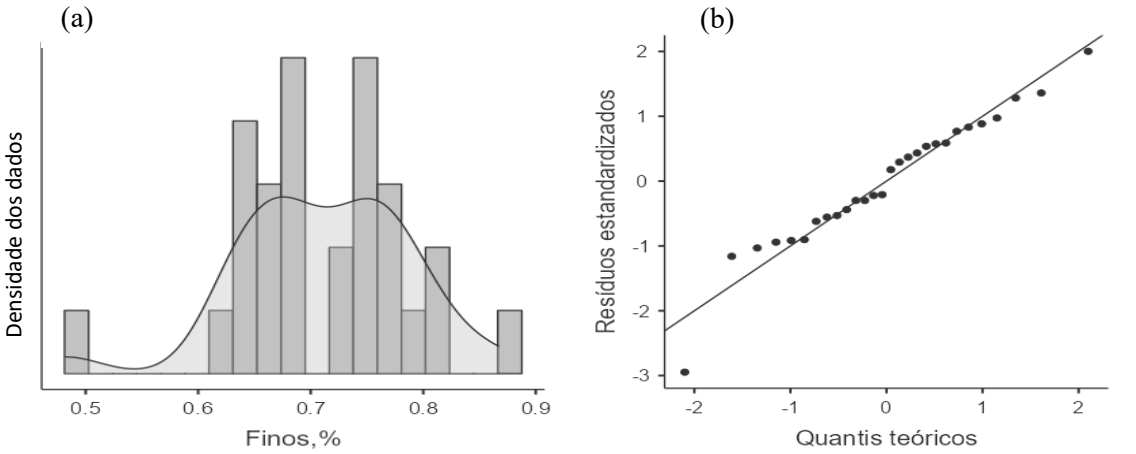
Fonte: O autor, 2023.

Figura 10 – Distribuição dos dados de palitos, em percentual. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



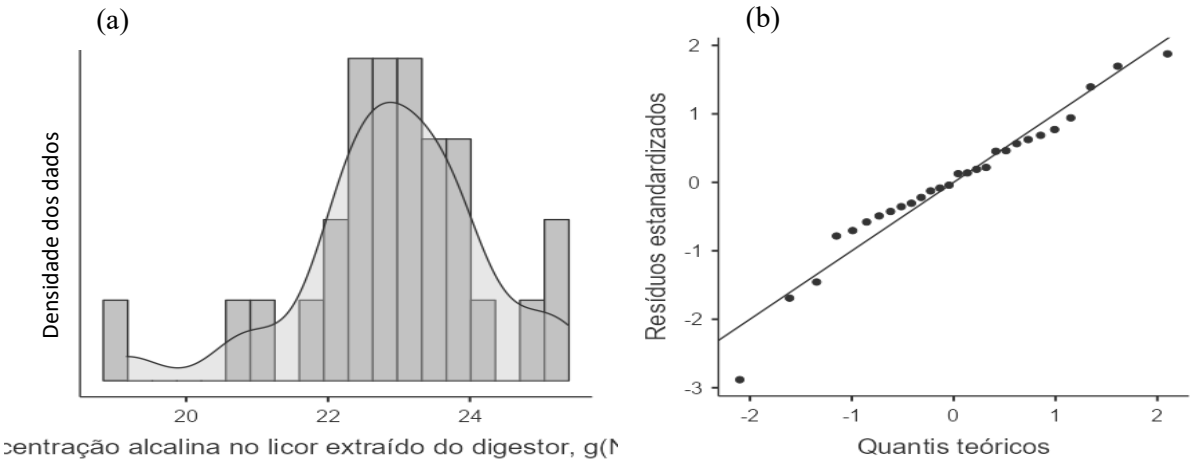
Fonte: O autor, 2023.

Figura 11 – Distribuição dos dados de finos (serragem), em percentual. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



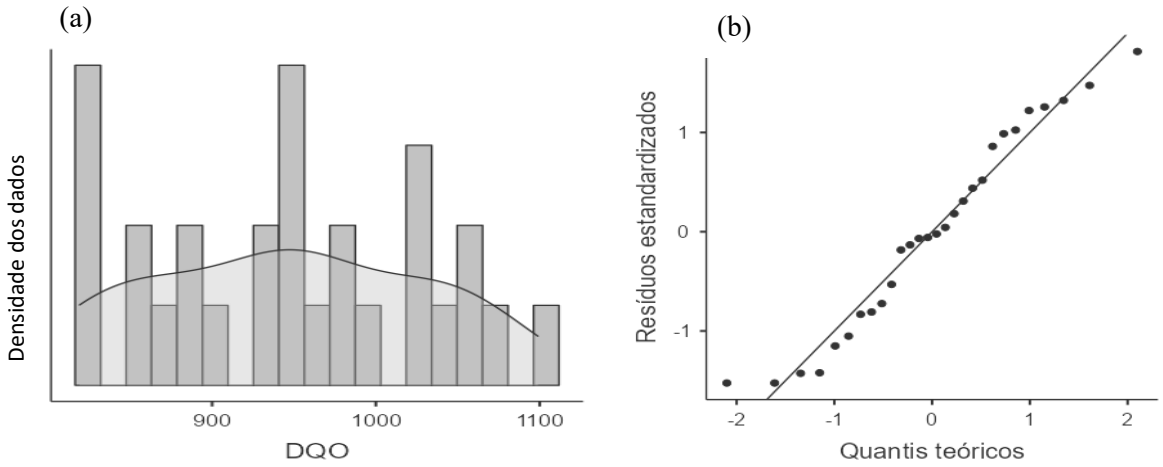
Fonte: O autor, 2023.

Figura 12 – Distribuição dos dados de concentração alcalina no licor extraído do digestor, em $g_{(NaOH)}/L$. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



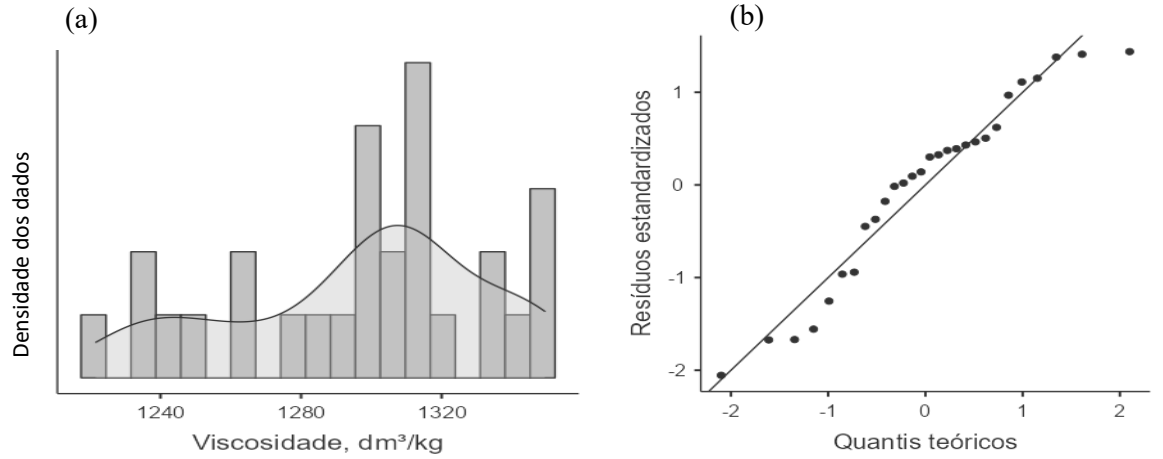
Fonte: O autor, 2023.

Figura 13 – Distribuição dos dados de DQO da polpa de celulose após cozimento, adimensional. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



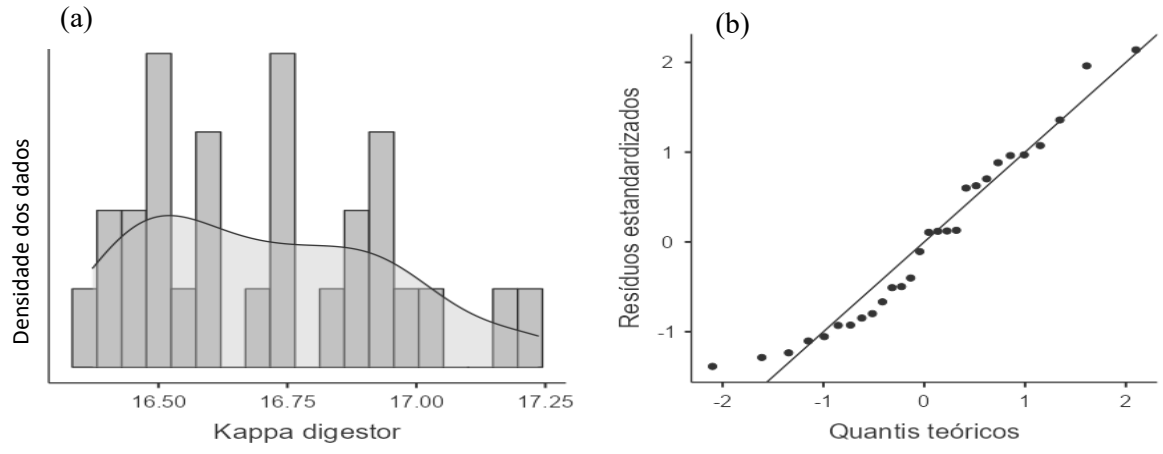
Fonte: O autor, 2023.

Figura 14 – Distribuição dos dados de viscosidade da polpa após cozimento, em dm³/kg. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



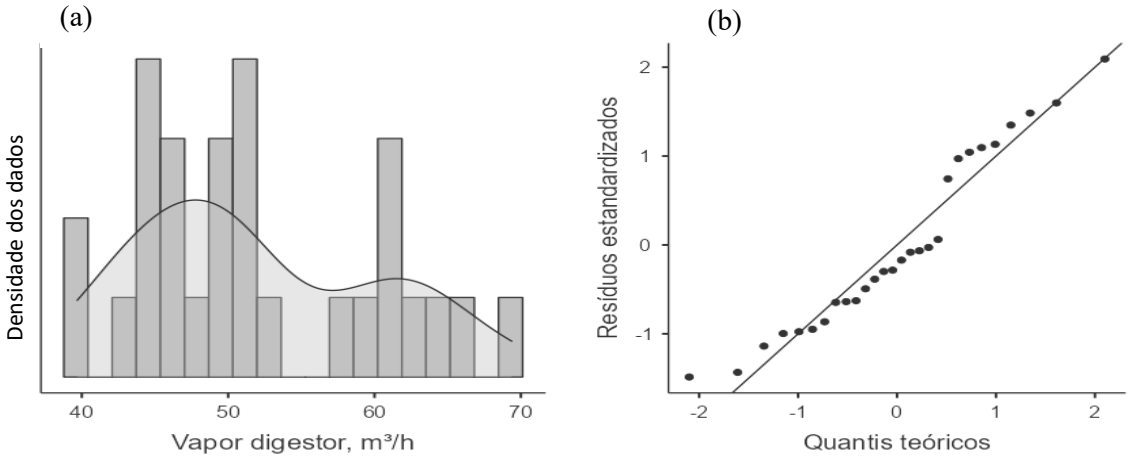
Fonte: O autor, 2023.

Figura 15 – Distribuição dos dados de kappa, adimensional. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



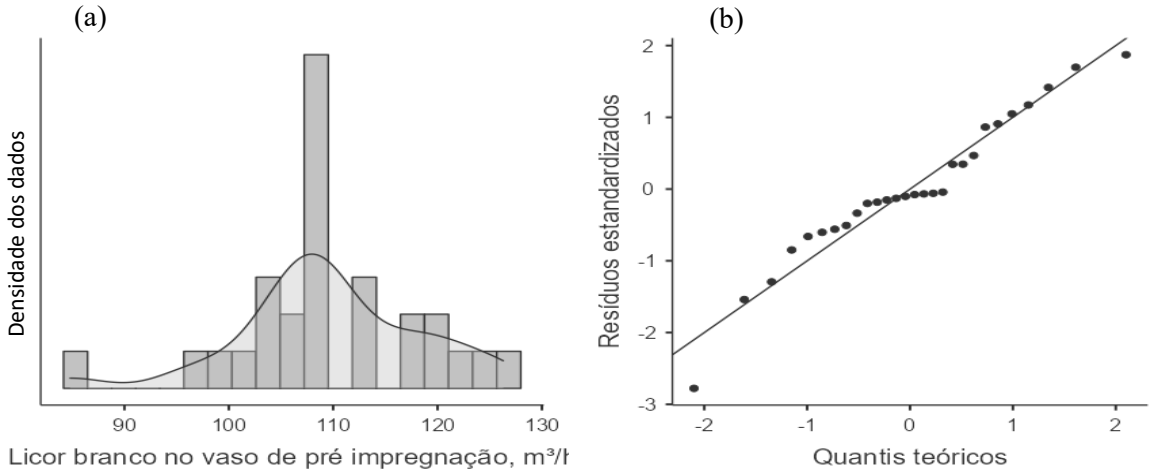
Fonte: O autor, 2023.

Figura 16 – Distribuição dos dados de consumo de vapor no digestor, em m³/h. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



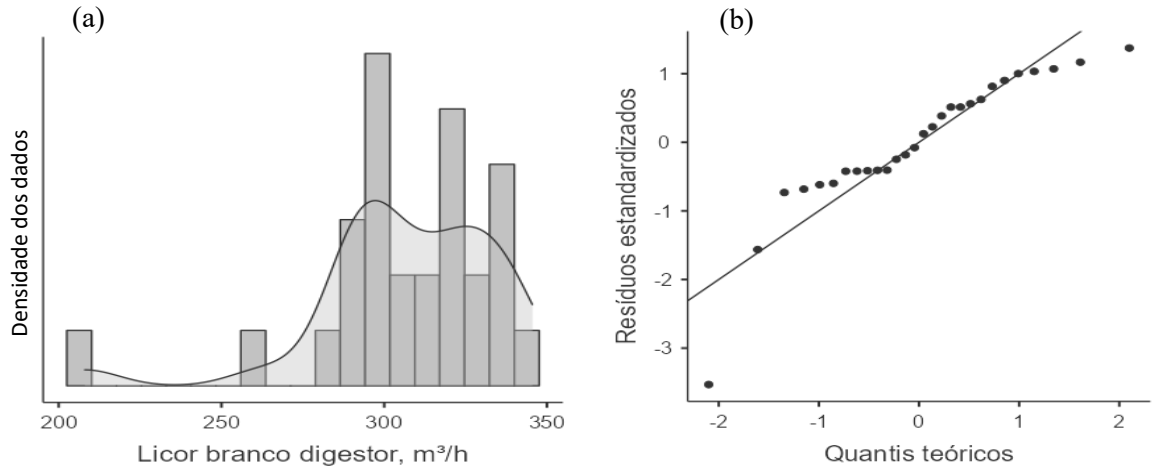
Fonte: O autor, 2023.

Figura 17 – Distribuição dos dados de vazão de licor branco no vaso de pré impregnação, em m³/h. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 18 – Distribuição dos dados de vazão de licor branco no digestor, em m³/h. (a) histograma dos dados, (b) gráfico quantil-quantil.



Fonte: O autor, 2023.