



HIZA NAYRA DE ASSIS MOURA

**IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES CLONES DE
EUCALIPTO NA PRODUÇÃO DE CELULOSE**

HIZA NAYRA DE ASSIS MOURA

**IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES CLONES DE
EUCALIPTO NA PRODUÇÃO DE CELULOSE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Pereira Rodrigues

São Luís
2021

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

ASSIS MOURA, HIZA NAYRA DE.

IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES CLONES DE EUCALIPTO
NA PRODUÇÃO DE CELULOSE / HIZA NAYRA DE ASSIS MOURA. - 2021.
63 f.

Orientador(a): JOSE ROBERTO PEREIRA RODRIGUES.
Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do
Maranhão, SÃO LUÍS, 2021.

1. CELULOSE. 2. COZIMENTO. 3. MADEIRA. 4. PRODUÇÃO.
5. QUALIDADE. I. PEREIRA RODRIGUES, JOSE ROBERTO. II.
Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSE ROBERTO PEREIRA RODRIGUES
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Eng.^a JULIANA VERA SILVA
Avaliador – SUZANO S/A

Prof. Dr. FABIO ALEJANDRO CARVAJAL FLOREZ
Avaliador – COEQ/CCET/UFMA

20 de dezembro de 2021

DADOS CURRICULARES

Hiza Nayra de Assis Moura

NASCIMENTO	22/12/1998 – IMPERATRIZ / MA
FILIAÇÃO	Zélia Lopes de Assis Moura Antonio Marinho de Moura
2016/2021	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e aos meus amigos que sempre me incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a mim por não ter desistido.

Aos meus pais Zélia Lopes de Assis e Antonio Marinho de Moura, por terem sido meus pilares.

Aos meus colegas, que sempre estiveram presentes comigo ao longo desta caminhada nos momentos bons e ruins. Em especial, aos meus amigos Diego, Dianderson, Luciana, Dyogo, Ana Clara, Larissa, Eduarda, Danilo e Augusta.

À Eng.^a Juliana Vera Silva, pela orientação neste trabalho e durante o início da minha jornada profissional, obrigada pelo incentivo e todo apoio.

Ao Prof. Dr, José Roberto P. Rodrigues, pela orientação e auxílio.

A minha gestora Ana Beatriz Ribeiro, pela ajuda para a realização do trabalho e por todos os conhecimentos que me foram repassados.

Ao analista Marcos Felipe, pelo apoio no laboratório e por todos os conhecimentos transmitidos sobre cozimento da madeira de eucalipto.

“A melhor maneira de prever o futuro é criá-lo”.

Peter Drucker

MOURA, Hiza Nayra de Assis. **Impacto Da Utilização De Diferentes Clones de Eucalipto Na Produção De Celulose**. 2021. 63f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

RESUMO

A produção de celulose está diretamente ligada à qualidade da madeira consumida no início do processo produtivo. Dessa forma, no presente trabalho, estudaram-se as características físicas e químicas de diferentes materiais genéticos da madeira do tipo *eucalyptus* e como essas características dos clones podem afetar a etapa de polpação química por meio da formação de mixes de consumo variando-se a proporção de material genético na entrada do processo. Na metodologia, primeiramente os clones tiveram sua composição química caracterizada em laboratório por meio das normas TAPPI e ABNT, em seguida, os mixes de consumo foram montados com base na variabilidade da densidade básica a fim de seguirem para a etapa de cozimento, onde foram realizados nove cozimentos sendo três para cada mix de consumo, para a montagem da curva de estimativa de rejeito, rendimento depurado e demanda alcalina, variou-se a carga alcalina do licor de cozimento em 19%, 18%, e 20%. Diante disso, os resultados de caracterização da madeira mostraram que o mix 3 apresentou a melhor composição química para a produção de celulose com a maior média de teor de holocelulose igual a 71,70%, menor média de teor de extrativo igual a 1,63% e a menor média de teor de lignina igual a 26,71%. Os resultados do cozimento, onde foi fixado um número Kappa igual a 17,5 para o cálculo de estimativa das curvas, demonstraram que o mix 3 obteve o melhor valor de rendimento depurado igual a 52,70% e a menor demanda de carga alcalina igual a 20,85%, seguido do mix 1 com rendimento 50,50% e a carga alcalina de 22,41%. Isso pode ser explicado pela composição química do mix e pela variabilidade da densidade básica pelo método da distribuição Gaussiana utilizado no fator U. Desse modo, nota-se a importância do conhecimento em relação à composição da madeira na produção de celulose, sendo o estudo fundamental para a lucratividade e competitividade de uma planta química, servindo de base para a formação do cadenciamento florestal que fornece sinergia entre a florestal e a fábrica.

Palavras-chave: produção. celulose. qualidade. cozimento. madeira.

MOURA, H. N. A. **Impact of Using Different Eucalyptus Clones on Cellulose Production.** 2021. 63f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

ABSTRACT

Pulp production is directly linked to the quality of the wood consumed at the beginning of the production process. Thus, in the present work we studied the physical characteristics and components of different genetic materials of eucalyptus wood and how these characteristics of the clones can affect the chemical pulping step through the formation of consumption mixtures varying the proportion of genetic material at the input of the process. In the methodology, primary clones have their chemical composition characterized in the laboratory by means of TAPPI and ABNT standards, then the consumption mixes were assembled based on the variability of the basic density to proceed to a cooking step, where nine were carried out. cooking, three for each consumption mix, to build the tailings estimate curve, refined yield and alkaline demand, the alkaline charge of the cooking liquor was varied by 19%, 18%, and 20%. Therefore, the results of the wood characterization show that mix 3 presented the best chemical composition to produce cellulose, with the highest average holocellulose content equal to 71.70%, lowest average extractive content equal to 1,63% and the lowest average lignin content equal to 26.71%. The cooking results, where a Kappa number equal to 17.5 was fixed to calculate the estimate of the curves, demonstrate that the mix 3 obtained the best value of purified yield equal to 52.70% and the lowest request an alkaline load equal to 20.85%, followed by mix 1 with a 50.50% yield and an alkaline load of 22.41%, this can be explained by the chemical composition of the mix and the variability of the basic density by the distribution method Gaussian used in the U factor. Thus, the importance of knowledge in relation to the composition of wood in the production of pulp is noted, the study being fundamental for profitability and excluding a chemical plant, serving as a basis for the formation of synergy forestry cadence between the forest and the factory.

Keywords: production. cellulose. quality. cooking. wood.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Molécula de celulose.....	05
Figura 2 -	Ciclo simplificado do processo Kraft.....	08
Figura 3 -	Esquema da transformação da madeira no processo.....	11
Figura 4 -	Fluxograma do ciclo de recuperação Kraft.....	14
Figura 5 -	Proporção de clones por mix de consumo.....	18
Figura 6 -	Rampa de temperatura do cozimento.....	20
Figura 7 -	Entrada de cavacos no vaso de cozimento.....	21
Figura 8 -	Adição de licor e lacre do digestor.....	22
Figura 9 -	Descarga do licor preto.....	22
Figura 10 -	Desagregador de celulose.....	23
Figura 11 -	Depuração e lavagem por centrifugação da polpa.....	24
Figura 12 -	Despartilhador de polpa.....	24
Figura 13 -	Fluxograma da etapa de cozimento.....	25
Figura 14 -	Estados da madeira na etapa de cozimento.....	25
Figura 15 -	Média da composição da madeira por mix de consumo.....	29
Figura 16 -	Curva mix 1 de rejeito (%) vs número Kappa.....	32
Figura 17 -	Curva mix 1 de rendimento depurado (%) vs número Kappa.....	33
Figura 18 -	Curva mix 1 de carga alcalina (%) vs número Kappa.....	33
Figura 19 -	Curva mix 2 de rejeito (%) vs número Kappa.....	34
Figura 20 -	Curva mix 2 de rendimento depurado (%) vs número Kappa.....	35
Figura 21 -	Curva mix 2 de carga alcalina (%) vs número Kappa.....	35
Figura 22 -	Curva mix 3 de rejeito (%) vs número Kappa.....	36
Figura 23 -	Curva mix 3 de rendimento depurado (%) vs número Kappa.....	37
Figura 24 -	Curva mix 3 de carga alcalina (%) vs número Kappa.....	38
Figura 25 -	Comparativo mixes de consumo: rendimento depurado (%) x NK.....	40
Figura 26 -	Comparativo mixes de consumo: carga alcalina (%) x NK.....	41
Figura 27 -	Comparativo mixes de consumo: rejeito (%) x NK.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Distribuição dos componentes principais da madeira.....	04
Tabela 2 -	Caracterização da madeira: mix de consumo 1.....	27
Tabela 3 -	Caracterização da madeira: mix de consumo 2.....	27
Tabela 4 -	Caracterização da madeira: mix de consumo 3.....	28
Tabela 5 -	CV da densidade básica e Fator U.....	29
Tabela 6 -	Faixa de Fator U.....	30
Tabela 7 -	Parâmetros do licor de cozimento.....	31
Tabela 8 -	Parâmetros da etapa de polpação química: mix de consumo 1.....	31
Tabela 9 -	Parâmetros da etapa de polpação química: mix de consumo 2.....	34
Tabela 10 -	Parâmetros da etapa de polpação química: mix de consumo 3.....	36
Tabela 11 -	Compilado das variáveis após a polpação química.....	39

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Carga alcalina
CV	Coefficiente de variação
DB	Densidade básica
NK	Número Kappa
RD	Rendimento depurado
TAPPI	Technical Association of The Pulp and Paper Industry
TPC	Tempo Pós Corte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	01
2	OBJETIVOS.....	03
2.1	OBJETIVOS GERAIS.....	03
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	03
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
3.1	QUÍMICA DA MADEIRA.....	04
3.1.1	Celulose.....	04
3.1.2	Hemicelulose.....	05
3.1.3	Lignina.....	05
3.1.4	Extrativos.....	06
3.2	MELHORAMENTO GENÉTICO DA MADEIRA.....	06
3.3	PROCESSO KRAFT.....	07
3.3.1	Preparo da madeira.....	09
3.3.2	Cozimento.....	09
3.3.3	Depuração e Lavagem.....	11
3.3.4	Deslignificação.....	12
3.3.5	Branqueamento.....	12
3.3.6	Recuperação.....	13
3.4	VARIÁVEIS DO PROCESSO KRAFT.....	14
3.4.1	Densidade Básica.....	14
3.4.2	Licor do cozimento.....	15
3.4.3	Umidade.....	15
3.4.4	Temperatura.....	16
3.4.5	Número Kappa.....	16
4	METODOLOGIA.....	18
4.1	SELEÇÃO DOS MIX DE CONSUMO.....	18
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA.....	19
4.3	COZIMENTO.....	20
4.4	CARACTERIZAÇÃO PÓS-COZIMENTO.....	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS CLONES.....	27

5.2	COZIMENTO.....	30
5.2.1	Mix de consumo 1.....	31
5.2.2	Mix de consumo 2.....	33
5.2.3	Mix de consumo 3.....	36
5.2.4	Comparativo.....	38
6	CONCLUSÃO.....	43
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

O processo de produção de celulose sofre influência direta da qualidade da madeira utilizada, onde os principais parâmetros para a estabilidade do processo industrial são a uniformidade entre a densidade básica, teores de celulose, lignina e extrativos os quais influenciam diretamente no rendimento da polpa (DEMUNER, 2011).

Em busca da melhoria contínua, a indústria de celulose vem se modernizando ao longo dos últimos anos, empregando novas tecnologias para aumentar sua eficiência de produção e o Brasil apresenta uma série de fatores que influenciam em seu destaque como um dos maiores produtores de celulose do mundo, entre eles destaca-se o plantio da madeira eucalipto com o desenvolvimento da silvicultura no país e instalação de indústrias modernas ao longo do território (LEONARDI, 2010)

Dessa forma, o avanço tecnológico florestal, principalmente a partir dos anos 90, permitiu o desenvolvimento do processo aumentando a competitividade das empresas do setor e assegurando menores custos de produção (LEONARDI, 2010).

A madeira proveniente do *eucalyptus* apresenta, preferencialmente, bom desenvolvimento em climas frios. No entanto, com a realização de estudos ligados ao melhoramento genético, tornou-se possível o cultivo desta espécie em outras posições geográficas com clima não favorável ao seu crescimento. Assim, as tecnologias empregadas proporcionaram o surgimento de diferentes materiais genéticos da mesma espécie, mas com características de qualidade divergentes (SANTAROSA, 2014). Segundo Foelkel (2017), a madeira é a matéria-prima para a produção de celulose que representa mais da metade dos custos de produção. Diante disso, torna-se necessário o consumo de uma matéria-prima com características uniformes para que não haja impactos negativos na linha de produção.

A densidade básica é um parâmetro essencial para a predição do comportamento da madeira no processo já que sua determinação se trata de um processo simples e é capaz de exprimir ótimos vínculos com as propriedades da polpa a ser obtida (OLIVETTI NETO, 2002). Ademais, a influência desta propriedade em toda a cadeia produtiva está diretamente ligada aos impactos que esta pode causar no processo uma vez que a madeira com densidade básica superior demanda maior tempo de cozimento, ocasionando degradação da fibra celulósica em madeiras que apresentam densidade inferior devido à baixa quantidade de massa por volume (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989).

Diante disso, os parâmetros de variabilidade da madeira impactam diretamente a

produção onde as características físicas e químicas da matéria-prima são indicadores de sua qualidade, onde a uniformidade de consumo por meio de um alinhamento estratégico no abastecimento, auxilia no controle das variáveis de processo como tempo de cozimento, demanda de químicos e consumo específico da madeira (MOKFIENSK *et al.*, 2008).

Segundo Neto (2012), o estudo da caracterização completa dos clones para a seleção da matéria-prima que tem como destino o processo, pode acarretar custos dispendiosos de milhares de dólares, fazendo com que seja inviável a sua realização. Dessa forma, uma alternativa é a realização de análises que fornecem condições para a execução do cadenciamento de madeira, proporcionando um retorno positivo financeiro através da relação de sinergia entre a floresta e a fábrica.

A uniformidade das características da madeira acarreta o aumento da qualidade do produto acabado, gerando maior satisfação para o cliente final e diminuindo o número de possíveis reclamações, evitando assim, custos adicionais e transtornos para o suporte técnico. Logo, o trabalho apresenta como objetivo avaliar o impacto da utilização de diferentes clones de eucalipto com características e composição distintas no processo de polpação química da madeira para a produção de celulose.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar cozimentos laboratoriais para avaliar os impactos da utilização de diferentes materiais genéticos de eucalipto para a produção de celulose.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterização das propriedades físicas dos clones e composição química;
- Montagem de diferentes mixes de consumo, variando a proporção de cada clone;
- Realizar cozimentos dos mixes de consumo em laboratório por meio da utilização de um vaso pressurizado;
- Analisar a composição química dos mixes de consumo e sua influência na etapa de polpação química;
- Avaliar os principais parâmetros da etapa de cozimento como o número Kappa, rendimento, teor de rejeito e demanda de carga alcalina.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 QUÍMICA DA MADEIRA

Segundo Foelkel (1997), como apresentado na tabela 1, a madeira apresenta em sua constituição quatro componentes majoritários: celulose, hemicelulose, lignina e extrativos.

Tabela 1 – Distribuição dos componentes principais da madeira

Componentes	Distribuição na madeira (%)
Celulose	45 ± 2
Hemicelulose	30 ± 5
Lignina	20 ± 4
Extrativos	3 ± 2

Fonte: adaptado Foelkel (1997).

Ainda segundo Foelkel (1997), é de suma importância o conhecimento em relação à composição da madeira utilizada no processo de produção de celulose, pois tal matéria-prima afeta diretamente diversos parâmetros das operações unitárias envolvidas, como consumo de químicos que deve ser minimizado para diminuir os custos, e rendimento que, ao ser melhorado, melhora a relação entre a quantidade de polpa gerada por madeira processada. Dessa forma, a realização de estudos sobre a qualidade da madeira é indispensável quando se deseja obter um produto com melhores propriedades e um processo estável, e com alta lucratividade.

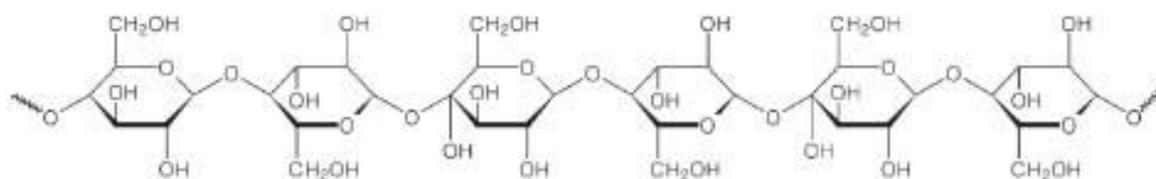
Nesse viés, Gomes (2002) afirmou que a caracterização da composição química da madeira influencia na visibilidade da capacidade de cozimento e branqueamento de uma determinada polpa.

3.1.1 Celulose

A celulose é um polímero com aproximadamente 10.000 a 25.000 monossacarídeos em sua cadeia central, possui estrutura bem organizada e cristalina, é unida por ligações glicosídicas, em que sua cadeia tem característica linear e apresenta boa resistência em contato com reagentes. Como visto na tabela 1, a celulose se trata do maior constituinte da madeira, representando 45% ± 2% de composição, onde sempre está associada aos demais componentes que são a lignina e a hemicelulose (FOELKEL, 1977).

O algodão apresenta pureza de aproximadamente 99,8% de celulose em sua composição, por isso apresenta a cor branca com alto índice de alvura. Além do algodão, é possível encontrar celulose em todos os vegetais, sendo um dos compostos mais abundantes do planeta. O rendimento da celulose é diretamente proporcional à qualidade da madeira e a sua composição química e física, características como espessura e comprimento da fibra influenciam no parâmetro (NICHOLS, 1971).

Figura 1 – Molécula de celulose



Fonte: Gallo (2014).

Como pode ser observado na figura 1, a molécula de celulose apresenta unidades de açúcar conhecidas como β -D-anidroglicopiranosose, onde o polissacarídeo linear forma uma estrutura organizada devido às ligações glicosídicas entre os carbonos, formando uma estrutura cristalina (D' ALMEIDA, 1998)

3.1.2 Hemicelulose

Assim como a celulose, a hemicelulose está presente nos tecidos vegetais. No entanto, ao contrário da celulose, a hemicelulose apresenta baixo peso molecular e estrutura desorganizada ou amorfa com cadeias curtas. A composição da hemicelulose varia de acordo com as combinações dos monossacarídeos, sendo os principais: Glucose, D-xilose, D-manose, D-galactose, L-arabinose, ácido D-glucurônico, ácido 4-O-metil-glucurônico, L-ramnose e L-frutose, além de diversos açúcares neutros metilados. (FOELKEL, 1977).

3.1.3 Lignina

O principal objetivo do processo de produção de celulose é a remoção da lignina da polpa celulósica por meio do rompimento entre suas ligações fenilpropanóides, que impacta diretamente no rendimento e na diminuição do consumo de químicos na etapa de cozimento da madeira (ANTUNES, 2009).

A lignina é um polímero com alto peso molecular amorfo, com ligações aromáticas e instáveis. Dessa forma, este componente é o responsável pela cor escura da madeira, além de que pode ser encontrado unido com as hemiceluloses na parede celular dos vegetais e na lamela média deles. O papel da lignina é conferir resistência e rigidez à madeira, logo este componente reveste a celulose para exercer tal função (FOELKEL, 1977).

3.1.4 Extrativos

Os extrativos geram uma série de obstáculos no processo de produção da celulose, pois geralmente causam incrustações nos equipamentos, diminuindo a eficiência de troca térmica, e provocando corrosão e sujidades no produto final conhecidas nas indústrias de celulose como “pitch”, que são pintas de diferentes colorações nas folhas de celulose seca e branqueada (FOELKEL, 1977).

Para a mitigação dos impactos gerados pelos extrativos da madeira, são adicionados agentes para o controle desses óleos vegetais ao longo do processo, como a adição de silicatos, como talco, que visam dissolvê-los e removê-los por meio do processo de lavagem. Os extrativos se concentram na região das cascas, frutos, sementes e folhas. Para a realização de análise da quantificação desse constituinte, pode ser utilizado uma série de solventes como o tolueno, diclorometano e acetona que é a mais utilizada devido ao seu menor impacto em relação à insalubridade para o analista que realiza o manuseio (SMOOK, 1997).

Os extrativos podem ser classificados de acordo com a sua função na madeira. Os madeirais de reserva são os ácidos graxos, gorduras e óleo. Já, os materiais que exercem a função de proteção são os ácidos resinosos, fenóis e ceras. Ainda se tem os hormônios vegetais, que são o fitosterol, sitosterol (FOELKEL, 1977).

3.2 MELHORAMENTO GENÉTICO DA MADEIRA

Em termos de produção, nos anos 70 a produtividade de madeira era de cerca de 15 m³/ha/ano, mas ao longo dos anos, já em 2010, passou para 45 m³/ha/ano. Isso pode ser explicado pelo desenvolvimento tecnológico na produção de clones que são modificados e ao passar do tempo vão influenciando positivamente nos ganhos ligados à produtividade e lucratividade do setor de celulose (GOMIDE, 2010).

A idade de corte é um fator primordial para um melhor rendimento da madeira. Quanto mais nova a madeira menor será a densidade básica da mesma e maior será seu teor de extrativos. Dessa forma, o melhoramento genético no Brasil ainda apresenta um caminho que pode ser otimizado para a obtenção de clones cada vez melhores, auxiliando na melhora das propriedades químicas da madeira e no aumento do rendimento da matéria-prima por meio de uma boa correlação entre as características tecnológicas e polpa celulósica gerada (ALENCAR, 2002).

Dessa forma, observa-se a importância do melhoramento genético para o segmento de celulose, pois a formação de clones interfere diretamente nas características desejáveis de produção, aumentando o rendimento e a lucratividade do setor. Entre as principais características da madeira que são estudadas para realizar o melhoramento, estão os teores de holocelulose, lignina, pentosanas, extrativos, cinzas e a densidade básica (ALENCAR, 2002).

3.3 PROCESSO KRAFT

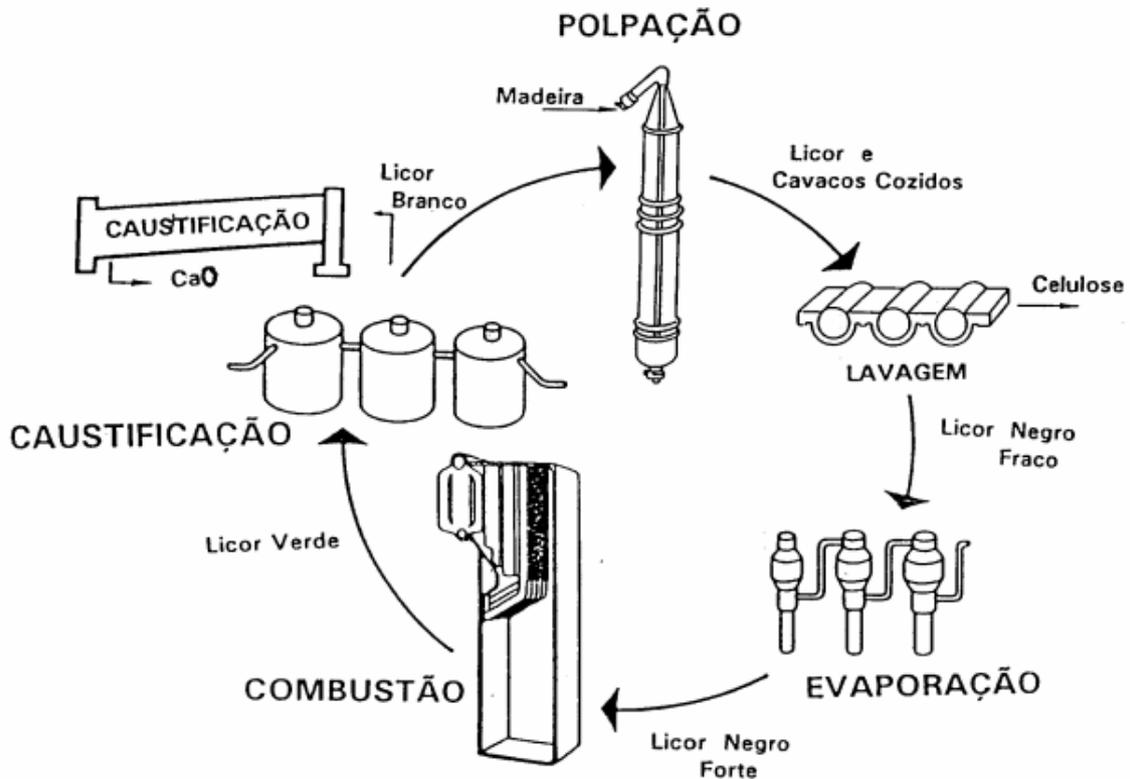
O processo Kraft foi criado por Dahl em 1879 e hoje em dia é o mais utilizado do mundo para a obtenção de celulose. Inicialmente, Dahl utilizou o sulfato de sódio como substituinte do carbonato de sódio que anos mais tarde foi reduzido a sulfeto de sódio. Em seguida, o criador do processo Kraft percebeu que a utilização do sulfeto acelerava a quebra das ligações fenilpropanóides da lignina na etapa de polpação da madeira, com isso as fibras de celulose eram mais preservadas conferindo maior resistência ao produto final obtido (SILVA; MCDONOUCH, 2001).

Segundo Grace (1989), o processo Kraft pode ser simplificado por meio das unidades de polpação também conhecido como cozimento da polpa e unidade de recuperação química como observado na figura 2.

A deslignificação estendida ficou conhecida pelo estudo entre química e fundamentos de cinética da reação, contribuindo para a otimização do processo de deslignificação e aumento da resistência da polpa, melhorando assim o rendimento da reação (COURCHENE, 1998).

Um dos fatores que influenciam diretamente a cinética de uma reação é a temperatura. Dessa forma, a temperatura de operação, que é um dos parâmetros de estudo da deslignificação estendida, deve ser baixa e com perfil uniforme ao longo do processo. Outro parâmetro estudado foi a carga alcalina que deve ser menor no início da polpação e constante durante todo o cozimento (COURCHENE, 1998).

Figura 2 – Ciclo simplificado do processo Kraft



Fonte: Grace (1989).

O processo Kraft apresenta uma série de vantagens como a obtenção de alta resistência da polpa celulósica, pode ser aplicado para todas as espécies de madeira existentes, é capaz de alcançar altos níveis de alvura no produto acabado e apresenta um eficiente sistema de recuperação dos reagentes reduzindo o consumo de químicos ao longo do processo (COURCHENE, 1998).

No entanto, mesmo sendo o processo mais competitivo e utilizado, ainda há diversos pontos que podem ser melhorados e que estão sendo pesquisados aos longos dos anos. Dessa forma, entre as desvantagens desse processo estão a emissão de compostos de enxofre na atmosfera conhecidos como compostos sulforosos odoríferos (TRS), alto custo de investimento para a aplicação e baixo rendimento na etapa de polpação, o que provoca uma elevação no custo da etapa de branqueamento (TEDER; AXEGARD, 1995).

O número Kappa (NK) é um importante parâmetro a ser acompanhado ao longo do processo, sendo diretamente proporcional à quantidade de lignina residual na polpa celulósica. A redução do número Kappa implica na redução do consumo de químicos da etapa de

branqueamento da polpa. No entanto, número Kappa muito baixo pode gerar a degradação da fibra de celulose e diminuir o rendimento (COLODETTE *et al.*, 2001).

3.3.1 Preparo da madeira

A etapa do preparo da madeira que chega à fábrica é de suma importância para a obtenção de um processo de cozimento uniforme com altos rendimentos, nessa etapa ocorre a formação dos cavacos por meio do processamento das toras que inclui os processos de lavagem e picagem.

A etapa de lavagem das toras auxilia no processo de remoção da areia que vem do campo junto a madeira, os silicatos quando em abundância no processo causam desgaste nos equipamentos elevando os custos com manutenção e também saem no produto acabado como sujidade (DEL GRANDE, 2004).

As dimensões dos cavacos formados na etapa de picagem devem seguir um padrão com baixa variação para uma impregnação homogênea e eficaz dos químicos na madeira, assim as reações de deslignificação serão mais eficientes demandando menor consumo de químicos e agredindo menos a fibra celulósica e, conseqüentemente, aumentando o rendimento da polpa depurada (WEHR; BARRICHELLO, 1992).

Os cavacos com dimensões acima do padrão são conhecidos como *oversize* e aqueles que apresentam comprimento e espessura abaixo da especificação são conhecidos como finos, ambos causam problemas para o cozimento e por isso são redirecionados para serem reprocessados novamente ou queimados na caldeira de biomassa para a geração de energia (DE CASTRO, 2009).

Segundo Wehr e Barrichello (1992), as espessuras entre 2 e 6 mm apresentam resultados melhores para a produção. Os cavacos que seguem o padrão são chamados de “aceite” onde são direcionados para a pilha de cavacos para entrarem no digestor, posteriormente, por meio de correias transportadoras (DEL GRANDE, 2004).

3.3.2 Cozimento

A impregnação dos cavacos com licor branco, utilizando baixas temperatura é realizada antes da etapa de cozimento para garantir a uniformidade e fornecer melhores condições na

etapa de polpação. Após a etapa de impregnação, tem-se a etapa de cozimento que pode ser dividida em três fases: inicial, principal e final (FOELKEL, 2009).

Na fase inicial, tem-se o aquecimento do material com temperaturas que variam entre 120 °C e 140 °C, ocorrendo a remoção de grupos etilas de parte das hemiceluloses, mas ainda com pouca deslignificação.

Em seguida, tem-se a fase principal que opera com temperaturas superiores a 150 °C onde ocorrem a degradação das ligações fenilpropanóides da lignina, dissolução e remoção dela, formando o licor negro. Por fim, há a fase final da polpação que é mais curta para evitar a degradação dos carboidratos. Nesta fase, há perda de rendimento e qualidade, por isso sua temperatura de operação é mais baixa quando comparada com as demais fases citadas, variando entre 90°C e 100°C (FOELKEL, 2009).

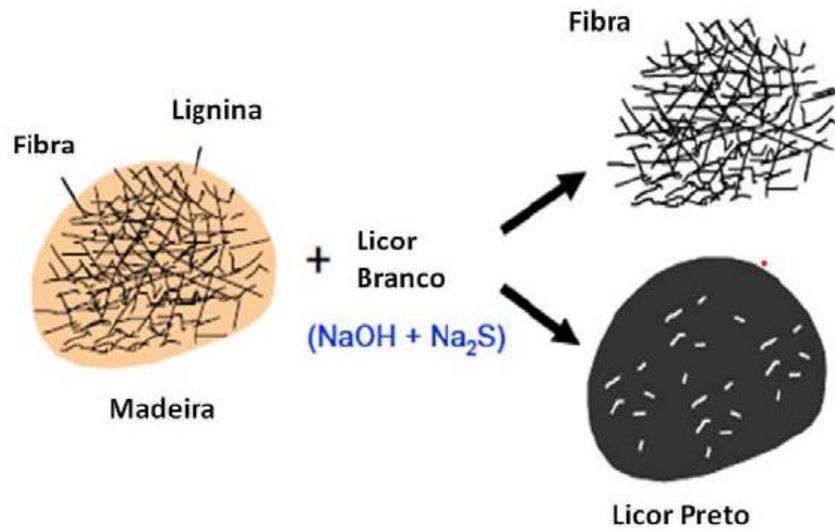
Na parte inferior do vaso ocorre o resfriamento por meio da injeção de água reutilizada de outras etapas do processo. Feito o cozimento, os cavacos são retirados de forma uniforme do digestor e encaminhados para a etapa de depuração e lavagem para a remoção da lignina solúvel e outros componentes indesejados como palitos não cozidos (MARINS, 2012).

Alguns parâmetros de acompanhamento de processo são de suma importância para o controle da operação unitária de polpação e para a otimização desta etapa. Diante disso, a sulfidez é uma grande aliada na preservação das fibras de celulose e este parâmetro deve ser o mais alto possível, principalmente, no início da polpação e no começo da sua fase principal (HERSCHMILLER, 1998).

Nesse viés, sabe-se que um dos fatores que influenciam na cinética da reação é a concentração dos reagentes utilizados em um determinado sistema. Dessa forma, a carga alcalina pode ser definida como a quantidade de álcali aplicado no cozimento da madeira (GOMIDE, 1979), em que a CA deve ser monitorada devido aos seus impactos, pois, quando muito alta, gera aumento da velocidade da reação de deslignificação, baixando o número Kappa. No entanto, tal diminuição do NK pode gerar quedas bruscas nas propriedades mecânicas e no rendimento da polpa, devido ao aumento da degradação das fibras de celulose (CARVALHO, 1999).

Na figura 3, tem-se o esquema dos componentes da etapa de cozimento, em que é possível observar a madeira contendo a lignina e fibra de celulose, onde é adicionado o licor branco para realizar a separação entre esses dois componentes. Por fim, tem-se o licor preto rico em matéria orgânica e a fibra de celulose segregada da lignina.

Figura 3 – Esquema da transformação da madeira no processo



Fonte: Tran e Vakillainen (2007, p. 1).

3.3.3 Depuração e Lavagem

O principal objetivo da etapa de depuração é a remoção de impurezas da polpa. Após a etapa de polpação, ainda é possível encontrar cavacos que não foram totalmente cozidos, palitos e outros tipos de impurezas sólidas como areia e cascas.

A etapa de lavagem é responsável por retirar os componentes indesejáveis que se encontram no estado líquido como o licor negro (IPT, 1988). Dessa forma, a lavagem da polpa desempenha a função de recuperação de químicos, aumentando a rentabilidade dos alcalinos do processo de produção de celulose, para que estes retornem para o processo por meio do tratamento no setor de utilidades da fábrica. Diante disso, recupera-se carbonatos, hidróxidos e sulfatos utilizados durante a etapa de cozimento e que apresentam custo de produção elevado (ROGERS, 1996).

O aproveitamento dos químicos auxilia na geração de vapor e energia que contribuem para o funcionamento de uma planta química de celulose, pois a realização das etapas de lavagem da polpa realiza o aumento do poder calorífico do material dissolvido. Além disso, a demanda de químicos para o processo de branqueamento é reduzida quando a eficiência de lavagem aumenta (TRINDADE, 2003).

O consumo elevado de químicos ataca as fibras de celulose e degradam os carboidratos, gerando diminuição da resistência mecânica e reduzindo as propriedades químicas da polpa.

Com isso, a lavagem auxilia na preservação das fibras e no aumento da alvura da polpa final por meio da remoção da lignina proveniente do licor negro após a etapa de cozimento (TRINDADE, 2003).

Em suma, o processo de lavagem apresenta ligação direta com os custos de produção de uma indústria de celulose, pois afeta diretamente o consumo de químicos envolvidos no processo, a remoção dos materiais inorgânicos provenientes do licor de cozimento e materiais orgânicos provenientes da madeira são cruciais para o aumento da geração de energia e aumento da alvura da polpa (MONKFIENSKI, 2003).

3.3.4 Deslignificação

A deslignificação também é conhecida como pré-branqueamento em que seu principal objetivo é continuar a remoção de lignina por meio do rompimento das ligações fenilpropanóides, auxiliando na redução da lignina insolúvel. Dessa forma, esta operação possibilita a redução do consumo de químicos na etapa de branqueamento, assim diminuindo os custos de produção (GOMES, 2009).

A etapa faz uso do gás oxigênio (O_2) e licor branco oxidado, sendo também conhecida como Pré- O_2 que é impregnado na polpa marrom para a redução dos organoclorados que oferecem riscos ao meio ambiente. Diante disso, devido à ligação iônica na formação dos compostos de cloro, estes apresentam instabilidade, podendo ser liberados na atmosfera causando os problemas ambientais, além disso, podem gerar problemas também na etapa de recuperação e utilidades para o tratamento de efluentes do processo (SIXTA *et al.*, 2006).

3.3.5 Branqueamento

O branqueamento apresenta o objetivo de aumentar a alvura e brancura da polpa por meio de reações de oxidação dos cromóforos. Dessa forma, quando realizada em estágios, há o aumento de remoção de lignina residual devido à alternância dos compostos químicos com ação oxidante que podem ser ácidos ou alcalinos (CARVALHO, 1999).

De acordo com Favaro (2015), a porcentagem de solubilização da lignina no processo de polpação da madeira varia entre 90% e 95% e o remanescente aparece na forma marrom na polpa após o cozimento. Por muito tempo, houve problema com a emissão de químicos com

cloro ativo na etapa de branqueamento que acabavam contribuindo para a degradação da camada de ozônio e gerando diversos outros problemas ambientais.

Atualmente, a principal metodologia empregada nas fábricas modernas de celulose é a produção ECF (*Elemental Chlorine Free*), ou seja, livre de cloro elementar. Ademais, tal metodologia proporciona estabilidade na resistência e alvura da polpa, bem como, no seu rendimento (FAVORO, 2015).

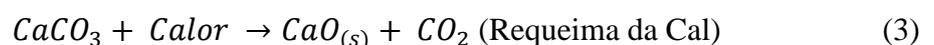
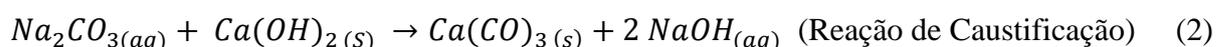
3.3.6 Recuperação

Segundo Velasquez (2000) que é citado por Veras (2018), o ciclo de recuperação química em uma planta produtora de celulose pode ser dividido entre as etapas de evaporação, queima na caldeira e caustificação. Dessa forma, sem o ciclo de recuperação não seria possível a reutilização de químicos do processo e geração de energia, logo, é de extrema importância para o processo produtivo desde o aspecto ambiental até o econômico.

O licor branco é responsável pela dissolução dos compostos orgânicos da madeira e este apresenta em sua composição soda + sulfeto de sódio que são compostos inorgânicos de custo elevados para o processo. A unidade de recuperação busca reduzir as perdas dos compostos inorgânicos realizando o tratamento do licor negro proveniente do término da etapa de polpação (SANTOS, 2007).

O licor negro com alta concentração de água é direcionado para a etapa de evaporação para que haja o aumento da concentração por meio da passagem em evaporadores de múltiplo efeito, em seguida, é direcionado para a caldeira a fim de realizar a queima da matéria orgânica, gerando energia para a fábrica e o excedente de energia pode ser vendido para auxiliar na matriz energética populacional (SANTOS, 2007).

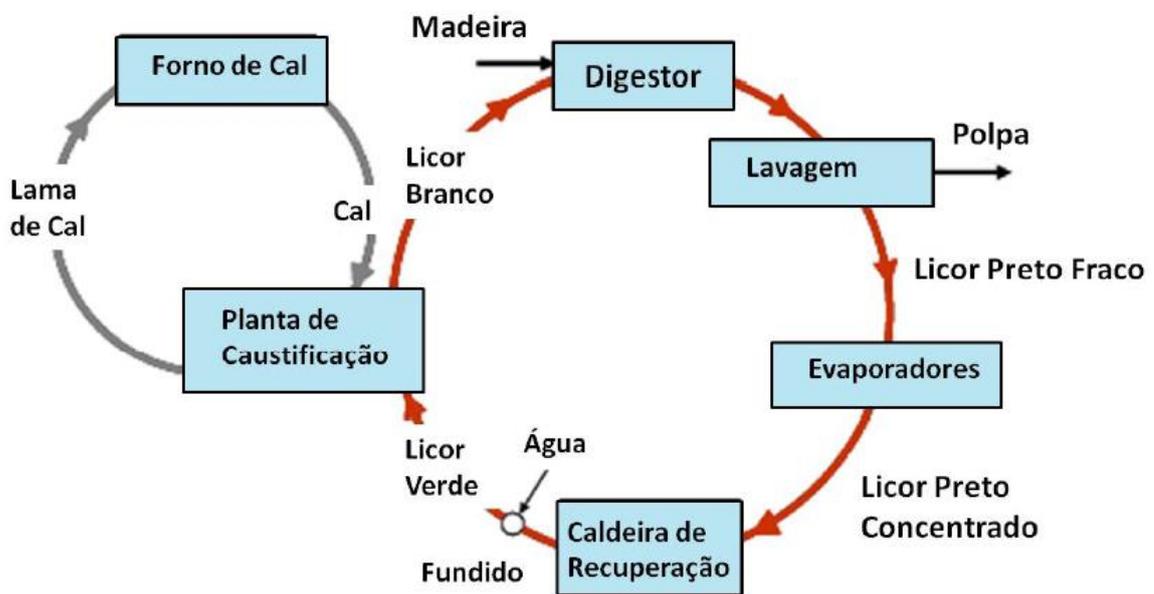
Segundo Menezes (2005), tem-se as reações da operação de caustificação do licor negro a partir das equações (1), (2) e (3):



A queima na caldeira gera o *smelt* que é um subproduto da combustão, é posteriormente diluído em licor branco fraco, originando o licor verde que é constituído basicamente de

carbonato de sódio e sulfato de sódio. Em seguida, ocorre o processo de caustificação para a transformação do licor verde em licor branco para a reutilização dos compostos inorgânicos na etapa de cozimento. A etapa de caustificação ocorre por meio da utilização do forno de cal cuja principal função é realizar a recuperação do óxido de cálcio através da queima da lama de cal que é constituída de carbonato de cálcio. (VELASQUEZ, 2000). Na figura 4 é apresentado o ciclo de recuperação do processo.

Figura 4 – Fluxograma do ciclo de recuperação Kraft



Fonte: Tran e Vakillainen (2007, p. 1)

3.4 VARIÁVEIS DO PROCESSO KRAFT

3.4.1 Densidade Básica

A densidade básica, segundo Kollmann (1959), pode ser definida como a relação entre a massa seca dividida pelo volume de uma amostra saturada, este parâmetro varia de acordo com o material genético da espécie *eucalyptus* e da origem da madeira utilizada.

O parâmetro apresenta relação direta com o rendimento da polpa celulósica depurada e com os custos de produção, pois quanto maior for a densidade do material, menor será o número de toras que serão processadas devido ao aumento de volume de madeira, causando a redução de custos com matéria-prima (SHIMOYAMA, 1990).

Em contrapartida, o aumento da densidade básica acaba elevando os custos com reagentes químicos utilizados ao longo do processo para a remoção da lignina devido à elevação de dificuldade para as etapas de impregnação e deslignificação. Ademais, ocorre também a geração de mais rejeitos, diminuindo o rendimento da polpa. Além disso, madeiras com densidade básica alta causam problemas na etapa de picagem das toras para a conversão em cavacos, aumentando os custos com manutenção no pátio de madeiras (SHIMOYAMA, 1990).

A madeira processada em uma fábrica de processo contínuo apresenta variação de origem e materiais genéticos. Diante disso, é de suma importância que a densidade básica dos mixes de consumo tenham baixa variação para a obtenção de uma polpação química uniforme e visibilidade da dosagem de carga alcalina correta, diminuindo o teor de rejeitos, devido à redução de palitos não cozidos por madeiras com DB alta e polpa com fibras degradadas com madeiras de DB baixa (SHIMOYAMA, 1990).

3.4.2 Licor de cozimento

O licor de cozimento é conhecido também como licor branco, seus principais constituintes são o hidróxido de sódio conhecido como soda cáustica e o sulfeto de sódio. A função da soda é realizar a dissolução da lignina e a do sulfeto é proteger as fibras de celulose, sendo o teor de sulfeto no licor definido como o teor de sulfidez do processo (GOMIDE, 1979).

O licor branco apresenta compostos que sofrem dissociação formando íons que participam ativamente das reações de deslignificação que são o Na^+ , OH^- , S^{2-} também conhecidos como álcali efetivo. Já o álcali total leva em consideração a quantidade de carbonato de cálcio contido no licor, sendo ele também conhecido como álcali total titulável (GOMIDE, 1979).

Segundo Moraes (2011), a atividade do licor é a relação entre o álcali ativo e o total. Ainda afirma, que quanto maior for a sulfidez do licor menor será a degradação da fibra de celulose e hemicelulose da polpa. No entanto, a utilização desses químicos da polpação, principalmente, os compostos derivados do sulfeto geram forte odor ao meio ambiente, sendo necessária a realização do tratamento desses gases no ciclo de recuperação química.

O parâmetro do tempo de cozimento e quantidade de licor a ser adicionada, assim como, a sulfidez e teor de soda dependem do número Kappa que se pretende atingir com base em até quanto de lignina residual é tolerável na capacidade do processo (CARVALHO, 1999).

3.4.3 Umidade

Segundo Kollmann (1959), a definição de umidade é baseada na quantidade de água por massa de uma amostra. O controle da umidade da madeira para o processo Kraft é de suma importância, pois cavacos com altos teores de umidade aumentam o consumo de reagentes químicos uma vez que a água diminui a concentração dos produtos, causando problemas na obtenção da celulose (DUENAS, 1997).

Em outro viés, cavacos muito secos também geram problemas na etapa de impregnação e deslignificação, aumentando a quantidade de rejeitos. O teor de umidade depende de uma série de fatores como o tempo pós corte (TPC) até a madeira entrar no processo, por isso é necessário controlar o TPC da madeira, pois ele impactará diretamente na dosagem de álcali, número Kappa e outras variáveis (KOCUREK, 1992).

3.4.4 Temperatura

O principal objetivo do processo de produção de celulose é a remoção da lignina por meio da utilização de químicos e temperatura. No entanto, a temperatura deve ser controlada para não degradar as fibras dos carboidratos e acabar interferindo negativamente nas propriedades físico mecânicas da polpa e, conseqüentemente, acarretar a redução da qualidade do material (GRACE T. M. 1989, Smook 2002).

Segundo OLM (1979), a cinética da reação de deslignificação pode ser definida pela equação (4), onde L é definido como a concentração de lignina e T é a temperatura.

$$\frac{dL}{dt} = 36.2 \sqrt{T e^{\left(-\frac{4807.69}{T}\right)}} L \quad (4)$$

O gradiente de temperatura ao longo da etapa de deslignificação se dá por meio de uma difusão controlada, iniciando em temperaturas abaixo de 140 °C e aumentando ao longo do tempo.

O aumento da temperatura é diretamente proporcional ao avanço das reações de quebra das ligações fenilpropanóides que geram a dissolução da lignina, assim, estabilizar o gradiente de temperatura é fundamental para a cinética da etapa de deslignificação (GRACE T, 1989; SMOOK, 2002).

3.4.5 Número Kappa

O número Kappa é diretamente proporcional à quantidade de lignina residual da polpa, por isso é um importante parâmetro para a obtenção da quantidade de lignina remanescente da polpação química. Em laboratório, a análise do número Kappa é feita por meio da titulação com permanganato de potássio e pode ser calculado pela equação (6) em conjunto com a equação (5) que são apresentadas a seguir (TAPPI, 2000).

$$p = \frac{f(b-a)N}{0.1} \quad (5)$$

$$Kappa = \frac{p f}{w} \quad (6)$$

Onde f é o fator de correção e w é o peso da amostra da polpa, p é calculado pela subtração entre a quantidade de tiosulfato consumida na determinação do branco (b) pela quantidade de tiosulfato consumido pela amostra (a) multiplicado pela normalização do tiosulfato (N) (TAPPI, 2000).

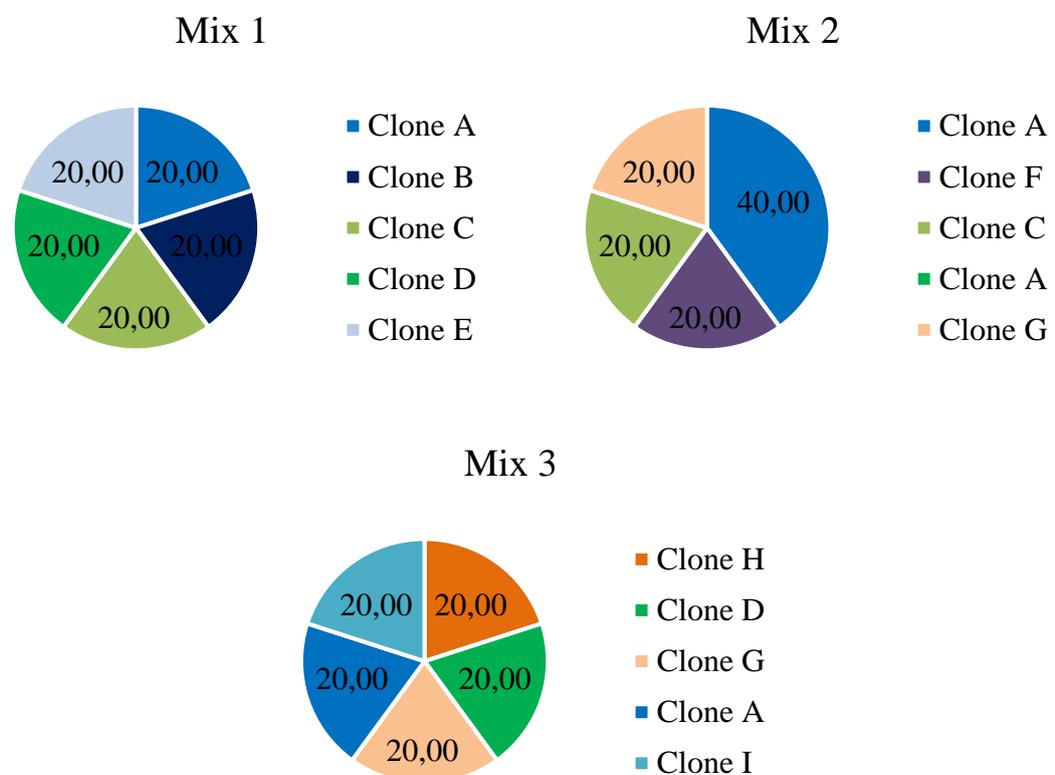
4 METODOLOGIA

4.1 SELEÇÃO DOS MIX DE CONSUMO

Neste trabalho foram utilizados diferentes materiais genéticos para a obtenção de mix de consumo com variabilidade na composição química da madeira (extrativos, lignina, metais e holocelulose) e em outros parâmetros determinantes para o processo produtivo como teor de umidade da madeira e densidade básica.

Dessa forma, a figura 5 mostra a proporção de cada clone utilizado. Além disso, para a obtenção das curvas de cozimento, variou-se a porcentagem de carga alcalina em três valores fixos de 18%, 19% e 22% para se encontrar o comportamento dos clones em cada mix de consumo e realizar o comparativo que resultaria em melhores condições para a polpação química da madeira a fim de gerar maior rentabilidade nas etapas de branqueamento e de resultar em um produto com melhores propriedades físico mecânicas.

Figura 5 – Proporção de clones por mix de consumo



Fonte: Próprio Autor (2021).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Inicialmente, foi feita a caracterização da madeira a fim de conhecer as propriedades que influenciavam diretamente a etapa de cozimento. Dessa forma, primeiramente, os cavacos foram serrados com o auxílio de um moinho da marca Marconi e, em seguida, realizou-se a classificação granulométrica da serragem por meio de um conjunto de peneiras.

O teor seco da serragem foi obtido mediante a pesagem de 4 g de serragem em um pesa filtro previamente tarado. Colocou-se o material na estufa a 105 ± 3 °C por cerca de 4 horas e ao final pesou-se a massa seca. O teor seco foi determinado conforme a equação (6).

$$TS (\%) = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (6)$$

onde M_1 = Massa de amostra úmida e M_2 = Massa de amostra seca

Dessa forma, para a obtenção da densidade aparente foi utilizado um equipamento que mede a disposição da madeira em seu interior, simulando o volume de preenchimento no digestor, considerando a massa e o ar entre a madeira, conforme a norma ABNT NBR 14984. Já, a densidade básica foi obtida por meio do peso seco dos cavacos, em seguida, realizou-se a imersão em água com auxílio de uma autoclave para o preenchimento da água na madeira. Por fim, pesou-se o material úmido e obteve-se a densidade básica por meio da conversão da densidade da água pela quantidade deslocada na coluna, conforme a norma ABNT NBR 11941, Tappi T258 om-94.

Os extrativos contidos nos materiais genéticos trabalhados, foram obtidos por meio de um sistema de extração onde foram utilizados a serragem e a acetona como solvente. O teor de extrativos foi calculado a partir da equação (7).

$$\text{Teor de Extrativos } (\%) = \frac{M_3 - M_1}{M_2} \times 100 \quad (7)$$

onde M_1 = Tara do balão, M_2 = Massa seca da amostra e M_3 = Balão com extrativos

Para a obtenção do teor de lignina, adicionou-se ácido sulfúrico 72% em um tubo de ensaio contendo determinada quantidade de serragem, mantido em banho termostático a 30 ± 2 °C por 1 hora. Para a obtenção da lignina insolúvel, realizou-se a filtração do material com um sistema Milipori com membrana filtrante de microfibras de vidro, sendo o teor de lignina insolúvel calculada de acordo com a equação (8) conforme a NBR 7989:2010 (ABNT, 2010).

$$\text{Lignina Insolúvel (\%)} = \frac{M_3 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (8)$$

onde M_1 = Massa seca de serragem, M_2 = Massa da membrana com pesa filtro e M_3 = Massa da membrana com pesa filtro contendo a amostra seca.

A lignina solúvel foi obtida com a utilização da equação (9). O filtrado no sistema de filtração Milipori foi diluído e teve sua absorbância lida em um espectrofotômetro no comprimento de onda de 215 nm e 280 nm.

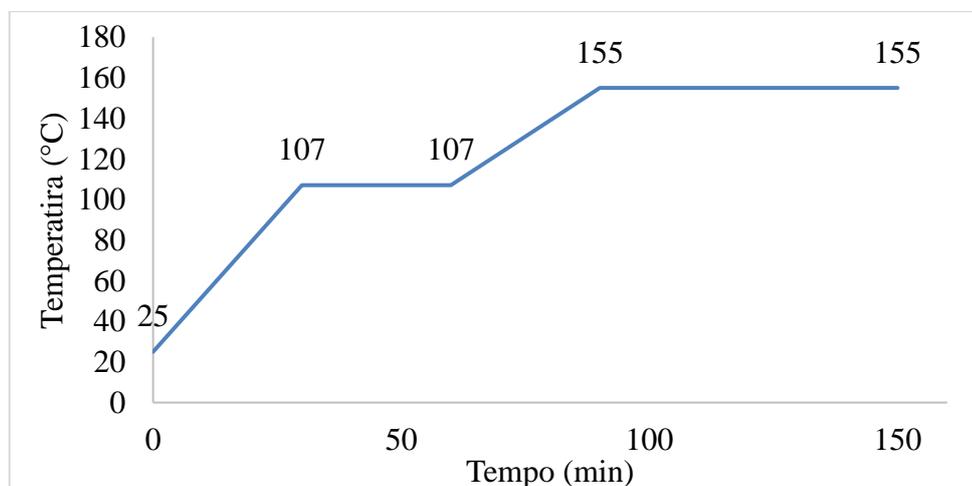
$$\text{Lignina Sóluvel (\%)} = \frac{(4,53 \times A_{215}) - A_{280}}{300 \times M} \times 100 \quad (9)$$

onde A_{215} representa a absorbância do filtrado em 215 nm, A_{280} significa a absorbância do filtrado em 280 nm e M é igual a massa seca da serragem

4.3 COZIMENTO

Após a etapa de caracterização da madeira, iniciou-se o cozimento da matéria-prima com a utilização dos diferentes mix de consumo de acordo com o ponto 4.1 para avaliar os impactos que a madeira pode trazer para as principais variáveis da etapa de polpação química. Utilizou-se licor branco contendo hidróxido de sódio e sulfeto de sódio onde a sulfidez adotada no licor de cozimento foi de 25%, sendo a proporção licor madeira de 4:1.

Figura 6 – Rampa de temperatura do cozimento



Fonte: Próprio Autor (2021).

Na operação do vaso que simula o funcionamento do digestor em uma fábrica de celulose, a rampa de temperatura adotada nos cozimentos é fornecida na figura 6. Dessa forma, observa-se que, primeiramente, há uma rampa de 25 °C a 107 °C por meia hora e a estabilização em 107 °C por mais 30 minutos. Em seguida, tem-se outra rampa de 107 °C até 155 °C por meia hora e mais um momento de estabilização de 30 minutos, totalizando um tempo de cozimento de 240 minutos.

Primeiramente, os cavacos foram transferidos para o cesto e este foi direcionado para o interior do vaso mantendo-se a tubulação de saída do licor de cozimento no centro do cesto, a entrada dos cavacos é indicada na figura 7. O equipamento utilizado para a realização do cozimento é da marca *Technological Solutions Integrated* do modelo 2 e série 02.07/13 apresenta tensão de 220 V com frequência de 50/60 Hz.

Em seguida, feita a entrada da madeira, realiza-se a inserção do licor de cozimento com a sulfidez em 25%, conforme indicado na figura 8. Dessa forma, foi realizada a medição do licor branco com o auxílio de uma proveta para atender a proporção licor madeira 4:1, sendo, posteriormente, colocado no interior do digestor para a realização do cozimento. Feito isso, ligou-se a bomba de circulação do licor no painel e fechou-se a tampa do vaso para dar início à operação do vaso.

Figura 7 – Entrada de cavacos no vaso de cozimento



Fonte: Próprio Autor (2021).

Após 240 minutos de cozimento, de acordo com a rampa de temperatura utilizada expressa na figura 6, desligou-se a bomba de circulação de licor para a realização da despressurização do vaso de cozimento e os cavacos de dentro do digestor foram retirados.

Figura 8 – Adição de licor e lacre do digestor



Fonte: Próprio Autor (2021).

O licor preto proveniente do cozimento, também chamado de LP 15, foi descarregado por meio da abertura da válvula de descarga com uma mangueira de engate rápido, conforme indicado na figura 9. Dessa forma, realizada a descarga do licor negro rico em matéria orgânica sobretudo lignina, retirou-se uma amostra do material para a realizações de análises de álcali efetivo, pH e determinação de álcali residual conforme SCAN N2 (SCAN, 1988).

Figura 9 – Descarga do licor preto



Fonte: Próprio Autor (2021).

Feita a despressurização do vaso, realizou-se a abertura da tampa e retirou-se o cesto contendo os cavacos cozidos. Em seguida, iniciou-se o processo de lavagem na qual os cavacos ficaram por volta de 8 horas em água corrente desmineralizada com vazão baixa para a retirada do acúmulo de licor preto da polpa. A polpa lavada no cesto, com a remoção do excesso de

licor, foi, posteriormente, direcionada para o desagregador de celulose por 3 minutos, o equipamento utilizado era da marca Tecnolab com modelo TEC301 e série 15.001 com tensão de funcionamento de 220 V, na figura 10 observa-se que o equipamento conta com hélices que ajudam a descompactar a polpa, auxiliando no processo de depuração.

Figura 10 – Desagregador de celulose



Fonte: Próprio Autor (2021).

Subsequentemente, a polpa desagregada segue para a etapa de depuração com um sistema acoplado a um sistema de lavagem. Para essa finalidade, foram utilizados dois equipamentos simultaneamente para a realização das duas operações unitárias, o depurador e uma centrífuga com filtro onde havia uma bomba para auxiliar no processo.

O material retido na tela do depurador é pesado e classificado como rejeito, entre os materiais estão palitos que não foram cozidos e outras impurezas que são inerentes ao processo produtivo. O material que passa pela peneira é classificado como aceite, com isso, o aceite tem como destino a centrífuga, passando pelo sistema de lavagem.

Na centrífuga existe um cesto para reter as fibras de celulose que passaram pelo teor de aceite na etapa de depuração.

O depurador utilizado é da marca Marconi com tela de *mesh* 0,2. Na figura 11, observa-se a mangueira acoplada a uma centrífuga para a realização da lavagem conforme foi descrito.

A centrífuga utilizada é da marca KRR, a capacidade do motor é de 1,6 kW e a rotação de 2000 rpm com tensão de 220 V e frequência de 50 Hz.

A polpa depurada foi direcionada para balança para a obtenção do peso para a realização dos cálculos de rendimento, o rejeito que foi alcançado na etapa de depuração tem como destino a estufa para a realização do cálculo do teor de rejeito do cozimento.

Figura 11 – Depuração e lavagem por centrifugação da polpa



Fonte: Próprio Autor (2021).

Em seguida, a polpa marrom depurada e lavada seguiu para o processo de despartilhamento por meio de um equipamento apresentado na figura 12 da Marca Marcor que realiza a separação da polpa compactada em pedaços menores para a realização da caracterização do material obtido.

Figura 12 – Despartilhador de polpa



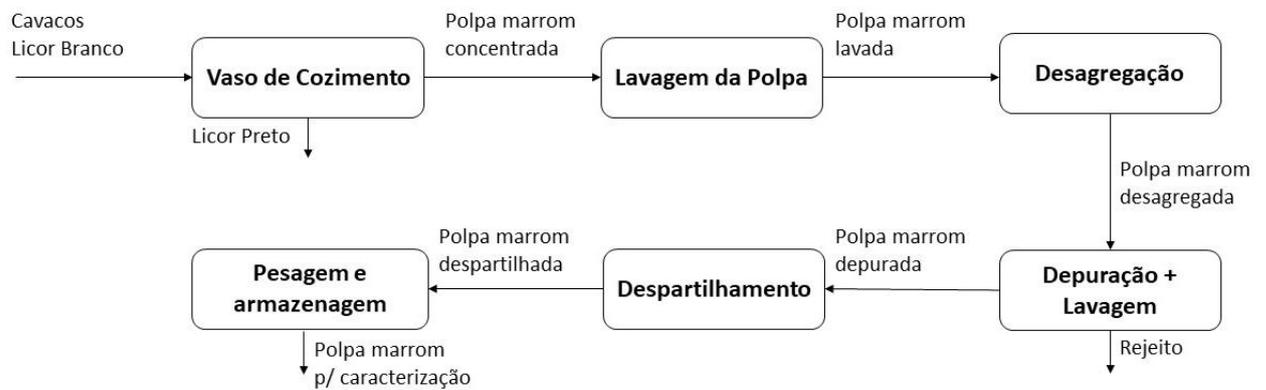
Fonte: Próprio Autor (2021).

Na figura 13, observa-se um fluxograma do processo de polpação química da madeira *Eucalyptus* para a obtenção da polpa marrom dos diferentes mix de consumo. O processo pode ser dividido em seis operações, sendo que a primeira é o cozimento no vaso pressurizado com a adição do licor de cozimento dentro dos parâmetros de sulfidez e cavacos caracterizados

previamente.

Em suma, feito o cozimento foi realizada a lavagem da polpa em água corrente para a remoção do excesso de licor negro do material, posteriormente, realizou-se a desagregação da polpa, onde o material seguiu para a depuração acompanhada de uma centrífuga que também realizou mais uma etapa de lavagem, na depuração foi possível a obtenção da porcentagem de rejeito devido à retenção de material na peneira do depurador.

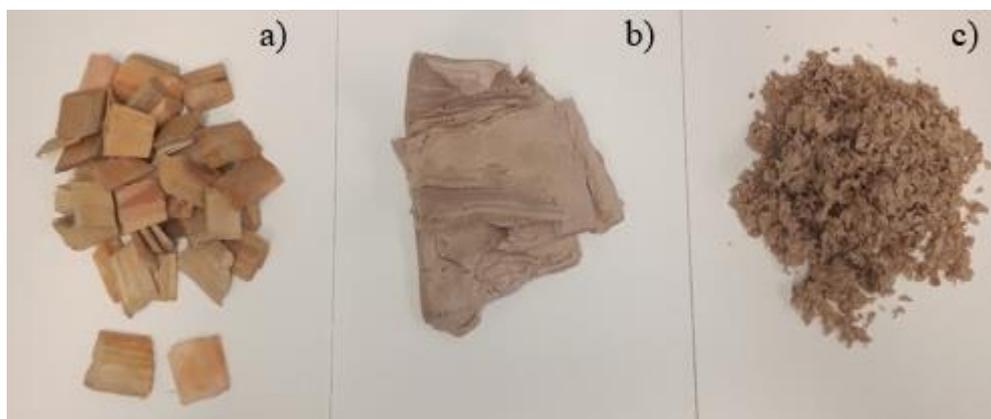
Figura 13 – Fluxograma da etapa de cozimento



Fonte: Próprio Autor (2021).

Dessa forma, a polpa marrom depurada compactada seguiu para a etapa de despartilhamento onde foi pesada e armazenada em sacos para, logo após, passar pela etapa de caracterização.

Figura 14 – Estados da madeira na etapa de cozimento



Fonte: Próprio Autor (2021).

Por fim, com o objetivo de ilustrar os principais estados da madeira durante o processo descrito no tópico em questão, tem-se a figura 14 que traz o início, meio e fim da etapa de polpação química da madeira com a matéria-prima picada chamada de cavacos na entrada do vaso (a), a polpa marrom após a etapa de depuração e lavagem (b) e a polpa marrom depurada, lavada e despartilhada para a etapa de caracterização pós cozimento (c).

4.4 CARACTERIZAÇÃO PÓS COZIMENTO

A caracterização da polpa marrom despartilhada é importante para a obtenção de parâmetros que medem a eficiência do cozimento. Dessa forma, realizada a desagregação da polpa e, posteriormente, a depuração com lavagem simultânea, obteve-se o rejeito que é o material retido na peneira 0,2 *mesh* e direcionou-se o material para a secagem em estufa a 105 ± 2 °C por 8 horas. O teor de rejeito foi obtido pela equação (10) por meio da razão entre as massas secas em estufa do rejeito (C) e dos cavacos (B).

$$TR (\%) = \frac{C}{B} \times 100 \quad (10)$$

O rendimento do depurador foi obtido conforme a equação (11), onde existe a relação entre a massa úmida da polpa depurada (A), multiplicando-a pelo teor seco da polpa (TS) que foi obtido após a etapa de secagem e foi dividido pela massa seca dos cavacos (B).

$$RD (\%) = \frac{A \times TS}{B \times 100} \quad (11)$$

O rendimento total apresentado na equação (12), foi obtido pela soma do rendimento depurado (RD) com o teor de rejeito (TR)

$$RT (\%) = RD + TR \quad (12)$$

A viscosidade da polpa, que é um importante parâmetro para a medição da degradação das fibras de celulose, foi obtida por meio do equipamento Viscomat (TAPPI T230 om-08). O Número Kappa, que mede o teor de lignina residual na polpa, foi determinado através de titulação potenciométrica automática (TAPPI T236 om-06).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CLONES

Na etapa de montagem dos mixes de consumo, foram utilizados 9 clones com características de composição química diferentes, conforme as tabelas 1, 2 e 3. A caracterização da madeira foi realizada conforme o tópico 4.2.

Tabela 2 – Caracterização da madeira: mix de consumo 1

Clones Mix 1	Teor de Umidade	Densidade Aparente	Densidade Básica	Extrativos	Lignina Solúvel	Lignina Insolúvel	Holocelulose
A	8,56	219,41	535,25	0,75	19,74	2,40	77,15
B	10,57	215,93	540,00	2,22	25,54	4,10	68,10
C	7,75	219,88	519,44	3,75	25,28	3,18	67,79
D	8,73	209,75	521,91	1,93	22,81	4,70	70,58
E	6,38	216,20	500,99	2,14	25,28	3,90	68,67

Fonte: Próprio Autor (2021).

O mix de consumo 1 apresentou a menor média de teor de holocelulose igual a 69,86% e a maior média no teor de extrativos 2,21%. A obtenção de tais resultados para o mix 1 pode ser explicado pela presença do clone C, sendo que o seu teor de extrativos foi igual a 3,75%. O clone C apresenta dificuldade de adaptação ao clima da região, assim, segundo D' Almeida (1988), as condições do clima e do solo de cultivo influenciam na composição química da madeira.

Tabela 3 – Caracterização da madeira: mix de consumo 2

Clones Mix 2	Teor de Umidade	Densidade Aparente	Densidade Básica	Extrativos	Lignina Solúvel	Lignina Insolúvel	Holocelulose
A	8,56	219,41	535,25	0,75	19,74	2,40	77,15
F	18,43	189,54	518,93	3,20	24,24	5,60	66,88
C	7,75	219,88	521,09	3,75	25,28	3,18	67,79
A	8,34	200,61	510,31	1,70	24,84	6,20	67,31
G	11,25	199,13	499,66	1,65	25,05	3,20	70,15

Fonte: Próprio Autor (2021).

O mix de consumo 2 apresentava em sua composição quatro materiais genéticos, em que o clone A usado foi proveniente de duas unidades de plantio distintas. Com isso, observa-se na tabela 3 que para um mesmo clone pode haver variações nos parâmetros de caracterização

da madeira devido à diferença de região na qual o material foi plantado. Segundo Silva (2011), as condições edafoclimáticas que são referentes ao clima e ao solo em que a madeira é cultivada, apresentam influência direta na composição dos tecidos vegetais e podem gerar aumento ou diminuição na eficiência dos nutrientes que desejam ser extraídos.

O teor de extrativos e o teor de lignina solúvel no clone A chegou a ser duas vezes maior, podendo ser explicado pela alteração de local de plantio. Ademais, a média do teor de lignina insolúvel foi menor no mix de consumo 2, sendo um resultado positivo para a redução de *pitch* no processo produtivo.

Tabela 4 – Caracterização da madeira: mix de consumo 3

Nome fictício	Teor de Umidade	Densidade Aparente	Densidade Básica	Extrativos	Lignina Solúvel	Lignina Insolúvel	Holocelulose
Clone H	11,05	237,46	607,96	0,65	20,52	3,70	75,18
Clone D	9,78	197,22	489,09	1,64	22,98	4,00	71,43
Clone G	11,25	199,13	499,66	1,65	25,05	3,20	70,15
Clone A	8,34	200,61	510,31	1,70	24,84	6,20	67,31
Clone I	14,27	165,05	432,70	2,51	19,64	3,40	74,41

Fonte: Próprio Autor (2021).

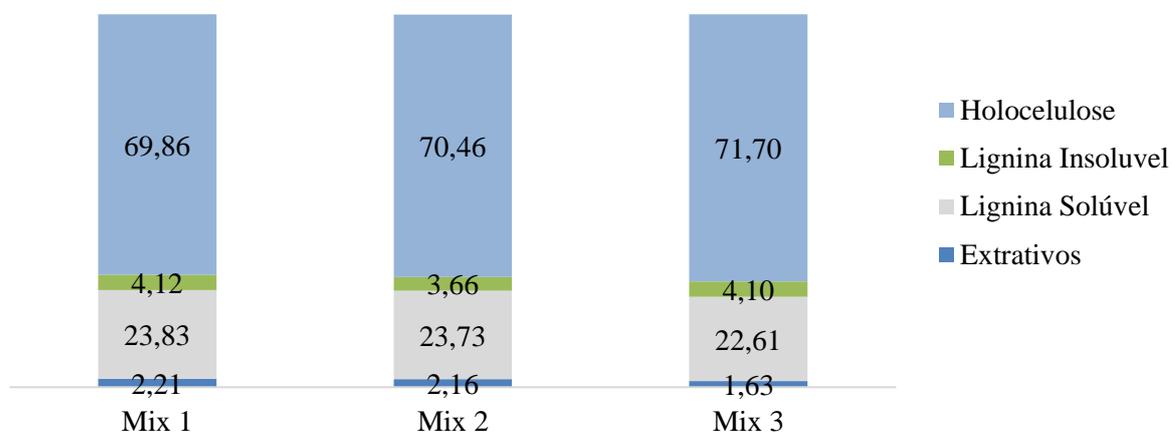
Na composição do mix de consumo 3, foram utilizados cinco materiais genéticos, a tabela 4 apresenta os resultados da caracterização onde nota-se que o mix 3 apresentou a maior média de teor de holocelulose igual a 71,70% e menor média de teor de extrativos 1,63%, ambos resultados favoráveis para a obtenção de uma polpa com maior qualidade.

Quanto maior o teor de celulose do material, maior será a tendência da obtenção de bons valores de rendimento depurado e quanto menor o teor de extrativos na madeira, menor será a demanda alcalina, auxiliando na redução de consumo de químicos e aumentando o lucro e competitividade do processo produtivo.

Nesse viés, observa-se a importância do conhecimento acerca da composição química da madeira, pois os dados fornecem subsídio para a definição dos parâmetros de processo que serão aplicados durante a polpação química (PENALBER, 1983 E WEHR, 1991).

O consumo de químicos requerido, o grau de rendimento da celulose depurado e a relação de sólidos e polpa gerados no licor negro podem ser correlacionados com a matéria-prima utilizada no processo, sendo necessária a uniformidade das características da madeira para a obtenção de um cozimento rentável (PENALBER, 1983 E WEHR, 1991).

Figura 15 – Média da composição da madeira por mix de consumo



Fonte: Próprio Autor (2021).

Na figura 15, observa-se a descrição detalhada da composição química da madeira por mix de consumo onde o mix 3 apresentou melhor composição para o processo de produção de celulose devido à alta média do teor de holocelulose e baixa em relação ao teor de extrativos.

Tabela 5 – CV da densidade básica e Fator U

Parâmetros	Mix 1	Mix 2	Mix 3
Média	523,52	517,92	507,94
Desvio Padrão	13,68	11,82	56,74
CV	0,0261	0,0229	0,1117
Fator U	0,5	2	0,5

Fonte: Próprio Autor (2021).

Segundo Demuner (2011), uma das propriedades físicas mais importantes para o processo produtivo de obtenção de celulose é a densidade básica, isso se deve a correlação deste parâmetro no rendimento do processo. Dessa forma, Barrichelo e Brito (1979) afirmam que madeiras com altos valores de densidade básica apresentam a etapa de polpação mais agressiva devido à alta demanda de químicos, fazendo com que o rendimento seja reduzido.

Nesse viés, o coeficiente de variação se trata de uma medida estatística que fornece a análise da variação de um conjunto de dados em relação à média. Na tabela 5, observa-se a variação da densidade básica para cada mix de consumo, onde o mix 3 apresentou maior variação de 0,11 seguido do mix 2 com variação de 0,02. No entanto, o fator U é um parâmetro referente à distribuição Gaussiana do conjunto de dados do consumo de madeira por faixa de

densidade básica. Na tabela 1, foi observado que os melhores mix de consumo com variabilidade mais baixa foram o mix 1 e 3 com fator U igual a 0,5.

Tabela 6 – Faixa de Fator U

Faixa de fator U	Classificação	Mix de Consumo
0 a 0,25	Ótimo	-
0,25 a 0,50	Bom	Mix 3 e Mix 1
0,50 a 0,75	Regular	-
0,75 a 1,50	Ruim	-
1,50 a 2,00	Péssimo	Mix 2

Fonte: Próprio Autor (2021).

Na tabela 6, foi possível notar que os mix 1 e 3 apresentaram uma boa classificação com baixa variabilidade. Em outra via, o mix 2 apresentou a pior classificação em relação aos extremos da variabilidade da densidade básica, podendo gerar impactos negativos para a obtenção de celulose.

5.2 COZIMENTO

Nesta etapa foram realizados nove cozimentos no total, sendo três cozimentos para cada mix de consumo referente à montagem das curvas de rendimento, rejeito e demanda alcalina para cada combinação de materiais genéticos avaliados, variando-se a carga alcalina e gerando números Kappa na faixa de 16 a 22, conforme pode ser visualizado nas tabelas 8, 9 e 10.

O processo de cozimento ocorreu em batelada com a adição manual do material e retirada após o término da rampa de temperatura apresentada na figura 6. Segundo Sydrak (1995), citado por Silva (2015), vasos de cozimento que operam de forma contínua apresentam longos tempos de residência, difícil controle devido a não linearidade do processo real e dispõem de difíceis pontos de medição devido à alta pressão e temperatura de operação.

O gradiente de temperatura para a operação do vaso é de extrema importância para o processo de polpação e tem ligação direta com os resultados de rendimento da polpa. De acordo com Pimenta (2006), é necessário assegurar que não haja picos de temperatura no interior do vaso. Além disso, é necessário garantir a distribuição uniforme de álcali, fazendo a manutenção do químico para que o seu perfil seja uniforme durante a polpação. Para a realização da circulação de álcali, foi utilizada uma bomba acoplada ao vaso.

Tabela 7 – Parâmetros do licor de cozimento

ID amostra	Licor Branco			
	CA (%)	Álcali ativo (g)	Concentração (g/l)	Volume (ml)
Mix 1 - Cozimento 1	22,00	156,46	132,00	843,67
Mix 1 - Cozimento 2	19,00	152,28	114,00	748,62
Mix 1 - Cozimento 3	18,00	156,20	108,00	691,42
Mix 2 - Cozimento 1	22,00	156,54	132,00	843,23
Mix 2 - Cozimento 3	18,00	156,54	108,00	689,92
Mix 2 - Cozimento 4	20,00	151,99	120,00	789,53
Mix 3 - Cozimento 1	22,00	154,90	132,00	852,16
Mix 3 - Cozimento 2	19,00	153,53	114,00	742,53
Mix 3 - Cozimento 3	18,00	153,53	108,00	703,44

Fonte: Próprio Autor (2021).

Na tabela 7, tem-se os parâmetros adotados do licor branco, também conhecido por licor de cozimento que, como padronização na carga alcalina, para cada cozimento foi necessária a demanda de álcali ativo indicada na tabela. Além disso, para obedecer a relação licor/madeira de 4:1, foram utilizados os volumes de licor indicados na tabela. Segundo Cardoso (2009), a carga alcalina pode ser definida como a quantidade de NaOH e Na₂S conforme o percentual de matéria-prima em contato com o licor, sendo uma variável importante para a realização da remoção da lignina da madeira com o número Kappa responsável por indicar o nível de separação da lignina das fibras de celulose durante a polpa química.

5.2.1 Mix de consumo 1

O maior teor de rejeito encontrado (0,72%) foi no cozimento 3, conforme a tabela 8, onde aplicou-se a maior carga alcalina (22%), gerando o mais baixo teor de álcali residual (2,33%). Tais valores foram condizentes com a literatura, pois, segundo Coledette (2001), polpas com alta carga alcalina apresentam valores de rendimento reduzidos e altos teores de rejeito, devido ao cozimento agressivo que influencia na degradação das fibras de celulose.

Em outra via, Coledette (2001) afirma em seu trabalho que o álcali residual alto interfere negativamente na branqueabilidade da polpa, fazendo com que a demanda de químicos nos estágios seja mais alta o que leva ao aumento dos custos de produção. Com isso, álcalis residuais mais baixos favorecem os parâmetros de cozimento como rendimento e número Kappa e álcalis residuais altos favorecem a etapa de branqueamento.

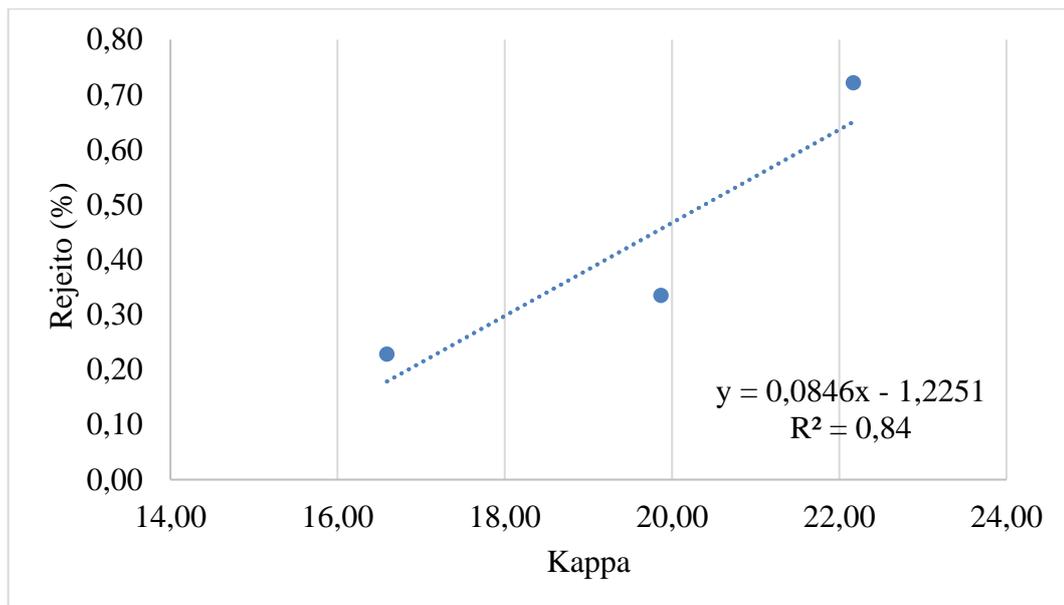
Tabela 8 – Parâmetros da etapa de polpação química: mix de consumo 1

Mix 1	Kappa	Viscosidade	Rejeito (%)	Rendimento Depurado (%)	Álcali residual (g/l)
Cozimento 1	16,59	1030,00	0,23	50,09	7,18
Cozimento 2	19,87	1167,00	0,34	51,53	3,76
Cozimento 3	22,17	884,50	0,72	51,41	2,33
\bar{x}	19,54	1027,17	0,43	51,01	4,42

Fonte: Próprio Autor (2021).

Por meio dos dados presentes na tabela 8, foi possível obter a curva de rejeito em relação ao número Kappa expressa na figura 16. Por meio da curva obtida, é possível fazer a estimativa do teor de rejeito para o mix 1 em relação a uma determinada quantidade de lignina residual presente em que a variável y da curva indica o teor de rejeito e a variável x representa o NK.

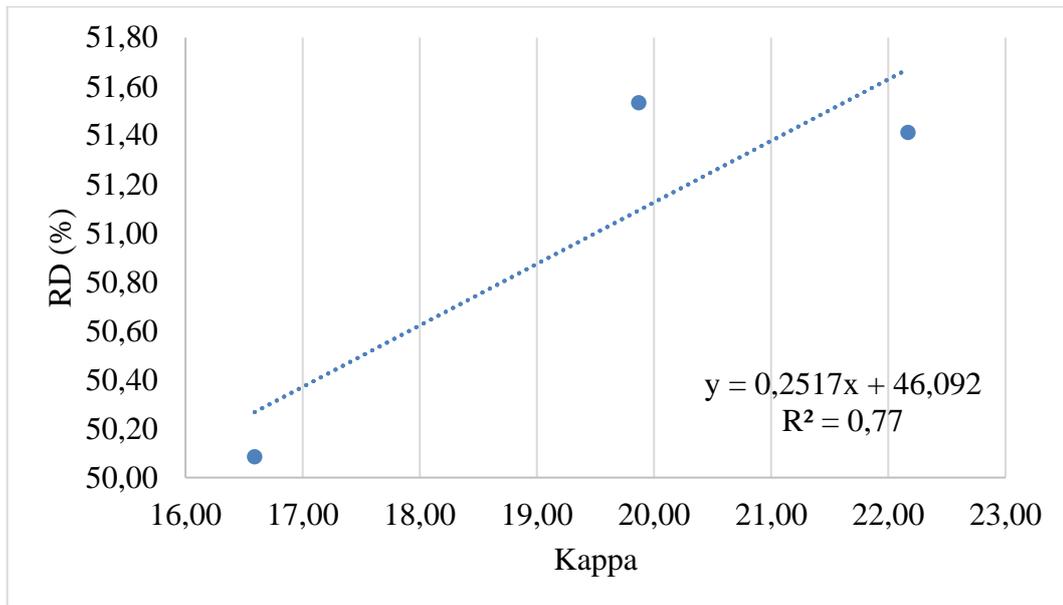
Figura 16 – Curva mix 1 de rejeito (%) vs número Kappa



Fonte: Próprio Autor (2021).

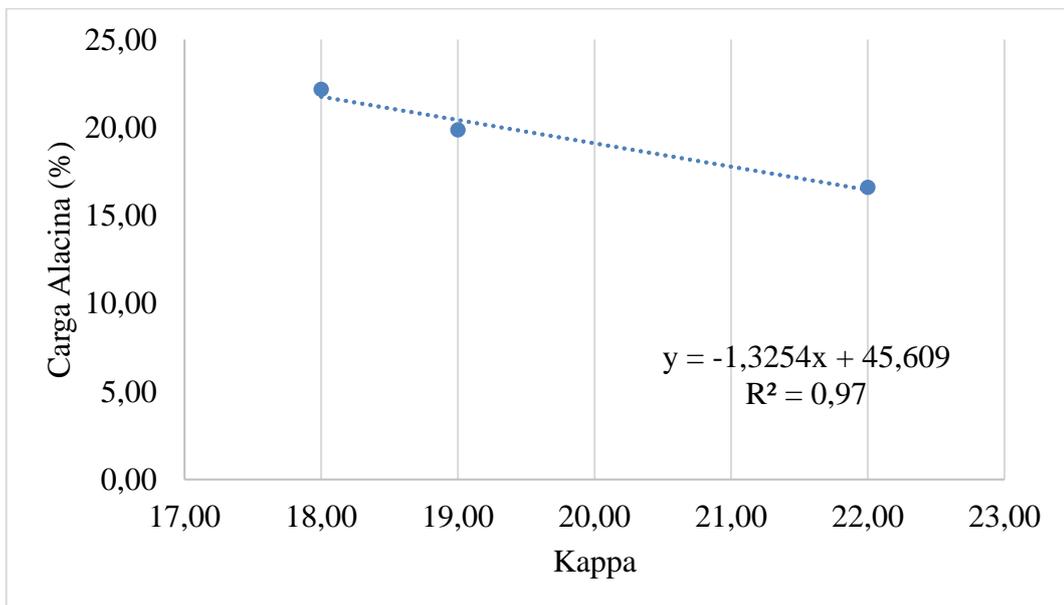
Na figura 17, pode-se observar a curva de rendimento por quantidade de lignina residual. Tal curva é capaz de viabilizar a predição do teor de rendimento ao fixar um NK desejado para o processo, sendo que a variável y representa o rendimento depurado e a variável x é o número Kappa, além de que o coeficiente R^2 da curva foi igual a 0,77.

Figura 17 – Curva mix 1 de rendimento depurado (%) vs número kappa



Fonte: Próprio Autor (2021).

Figura 18 – Curva mix 1 de carga alcalina (%) vs número Kappa



Fonte: Próprio Autor (2021).

A figura 18 mostra a curva da carga alcalina pela quantidade de lignina residual presente na polpa, sendo que a variável y representa a CA e a variável x é o NK, além de que o ajuste de dados representado pelo coeficiente R^2 foi igual a 0,97.

5.2.2 Mix de consumo 2

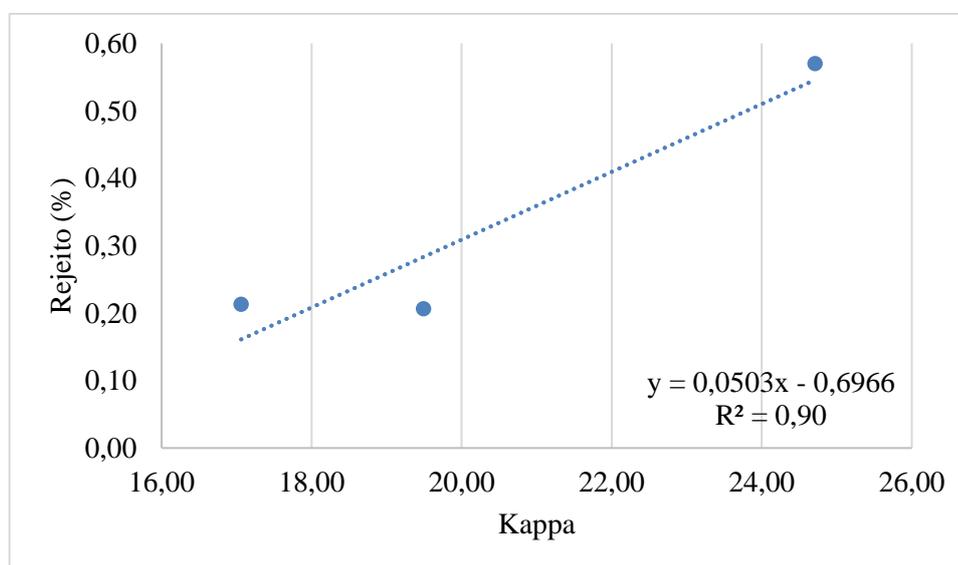
Na tabela 9, são notados os parâmetros do cozimento do mix 2, observando que os maiores valores de viscosidade geraram os menores teores de rejeito. Assim, tem-se a viscosidade como um importante parâmetro de medição do nível de degradação das fibras em que o nível de degradação é diretamente proporcional ao decréscimo do parâmetro (CASEY, 1960). Nesse viés, Schur e Lewis (1960) que foram citados por Casey (1960), verificaram em seus estudos que quanto maior o grau de polimerização da celulose, maior será a viscosidade.

Tabela 9 – Parâmetros da etapa de polpação química: mix de consumo 2

Mix 2	Kappa	Viscosidade	Rejeito (%)	Rendimento Depurado (%)	Álcali residual (g/l)
Cozimento 1	17,06	988,20	0,21	49,74	7,65
Cozimento 3	24,71	947,00	0,57	50,64	2,33
Cozimento 4	19,49	1086,00	0,21	49,87	4,06
\bar{x}	20,42	1007,07	0,33	50,08	4,68

Fonte: Próprio Autor (2021).

Figura 19 – Curva mix 2 de rejeito (%) vs número Kappa

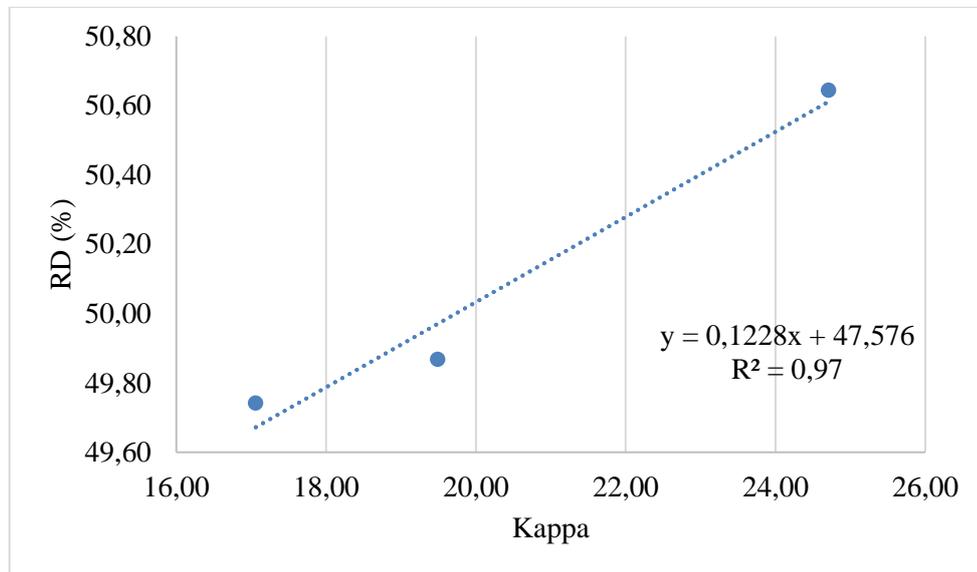


Fonte: Próprio Autor (2021).

Na figura 19, é apresentada a curva de estimativa do teor de rejeito em relação ao teor de lignina residual para o mix 2, onde a variável y é o teor de rejeito e a variável x representa o número Kappa, o ajuste dos dados por meio do coeficiente R^2 foi igual a 0,89. Na figura 20, pode-se observar a curva de estimativa do rendimento depurado e o teor de lignina residual

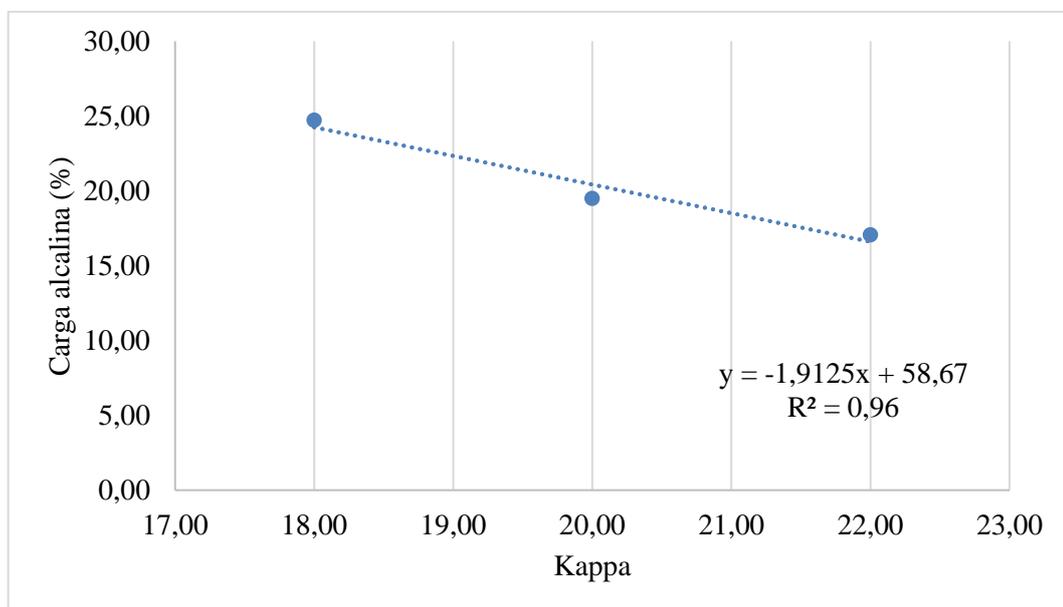
para o mix 2, onde a variável y representa o rendimento depurado e x é o NK, o coeficiente R^2 da curva foi igual a 0,96.

Figura 20 – Curva mix 2 de rendimento depurado (%) vs número Kappa



Fonte: Próprio Autor (2021).

Figura 21 – Curva mix 2 de carga alcalina (%) vs número Kappa



Fonte: Próprio Autor (2021).

A curva da demanda de carga alcalina pelo teor de lignina residual para o mix 2 é expressa na figura 21, onde o coeficiente R^2 foi igual a 0,96. As variáveis da curva são y que representa a carga alcalina e x que é o número Kappa a ser adotado para a estimativa.

5.2.3 Mix de consumo 3

O mix de consumo 3 apresentou as melhores características na composição química dos clones utilizados para sua formação. Com isso, na tabela 10, observa-se o reflexo dos resultados obtidos na caracterização em relação aos principais parâmetros da etapa de polpação química da madeira.

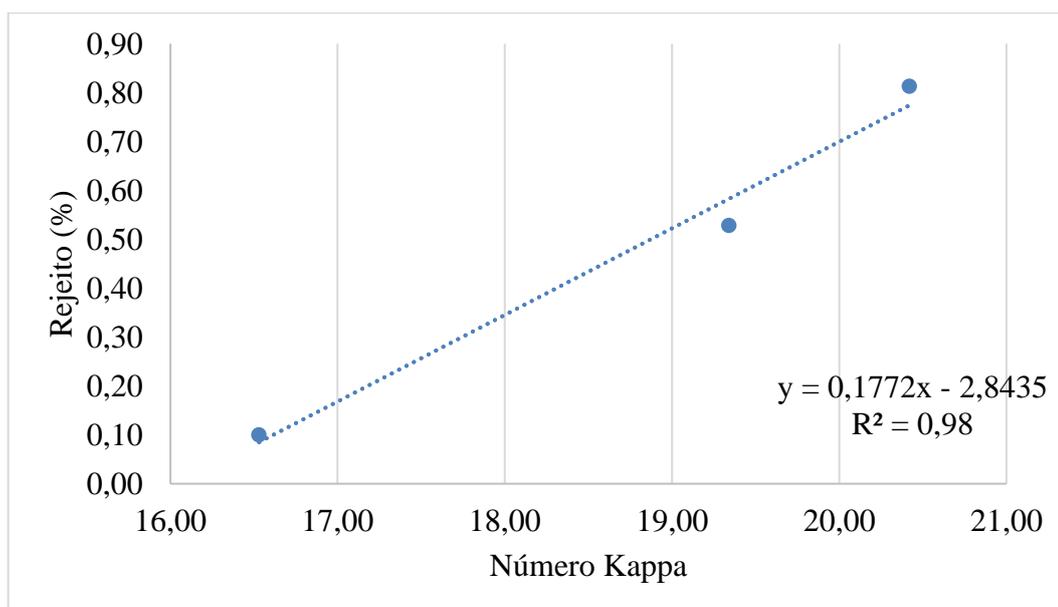
Tabela 10 – Parâmetros da etapa de polpação química: mix de consumo 3

Mix 3	Kappa	Viscosidade	Rejeito (%)	Rendimento Depurado (%)	Álcali residual (g/l)
Cozimento 1	16,53	1001,00	0,10	52,75	7,94
Cozimento 2	19,34	1162,00	0,53	52,64	3,06
Cozimento 3	20,42	1171,00	0,81	52,49	1,80
\bar{x}	18,76	1111,33	0,48	52,62	4,27

Fonte: Próprio Autor (2021).

Dessa forma, os valores de viscosidade do mix 3 indicam baixa degradação das fibras durante a etapa de cozimento, se refletindo nos valores de rendimento depurado. No cozimento 3 do mix, a taxa de rejeito foi maior, porém o valor de rendimento ainda se manteve próximo aos demais cozimentos.

Figura 22 – Curva mix 3 de rejeito (%) vs número Kappa



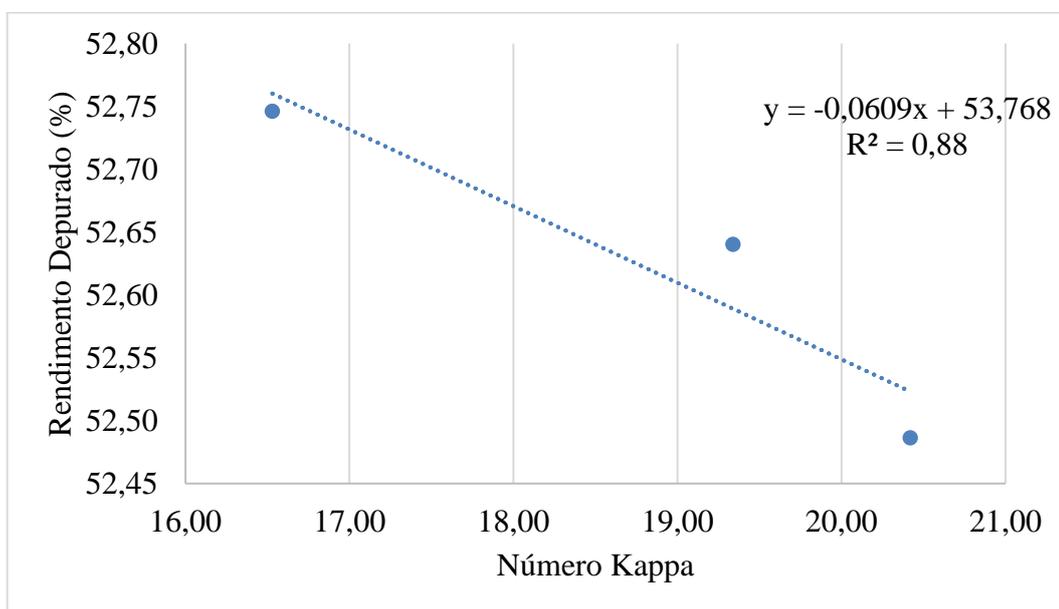
Fonte: Próprio Autor (2021).

Conforme indicado na tabela 10, quando se compara o NK entre os três cozimentos realizados, o maior número Kappa obtido foi no cozimento 3, indicando que o teor de lignina residual neste foi maior e implicou no valor do teor de rejeito. Segundo Weding (2012), quando ocorre a dissolução da lignina das fibras de celulose, algumas fibras podem não estar ainda cozidas, gerando os rejeitos. O teor de rejeitos apresenta ligação com o grau de deslignificação, mas este sofre interferência de outros fatores aplicados na polpação Kraft (BOSQUÊ JR. *et al.*, 2015).

A curva de estimativa do teor de rejeito em relação ao teor de lignina residual para o mix 3 é apresentada na figura 22 em que a variável y representa o teor de rejeito e a variável x trata-se do número Kappa, além de que o ajuste de dados da curva foi de 0,98 pelo coeficiente R^2 .

Na figura 23, encontra-se a curva de estimativa do rendimento depurado pelo teor de lignina residual para o mix 3 em que a variável y representa o rendimento depurado e x se refere ao número Kappa, assim, o coeficiente de ajuste aos dados R^2 foi igual a 0,88.

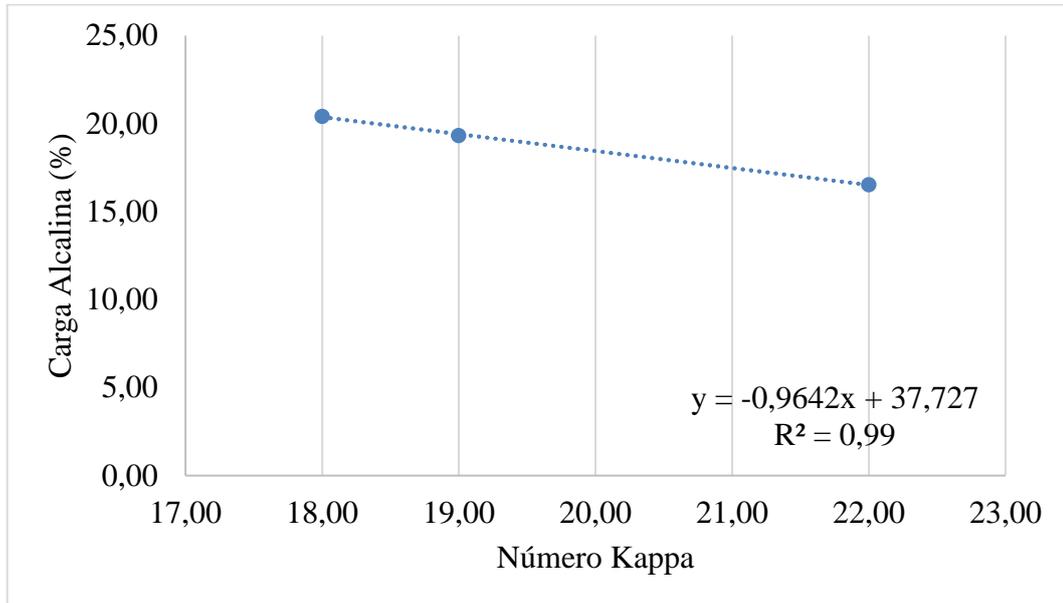
Figura 23 – Curva mix 3 de rendimento depurado (%) vs número Kappa



Fonte: Próprio Autor (2021).

A curva da demanda de carga alcalina é apresentada na figura 24 onde tem-se a reta em relação à quantidade de lignina residual gerada nos três cozimentos do mix. A curva apresentou bom ajuste dos dados com R^2 igual a 0,99, além de que a variável y da equação da reta representou a carga alcalina e a variável x indicou o número Kappa.

Figura 24 – Curva mix 3 de carga alcalina (%) vs número Kappa



Fonte: Próprio Autor (2021).

5.2.4 Comparativo

Nesta seção, é observado o comparativo entre as curvas formadas para cada mix de consumo e os resultados obtidos por meio da utilização das curvas de cozimento construídas. Por meio disso, para a obtenção dos valores apresentados na tabela 10, foram utilizadas as equações das curvas de cozimento e fixou-se o número Kappa em 17,5. Nesse viés, esse valor foi empregado para o NK, pois, Correia (2019), em seu trabalho sobre conceitos e aplicações na indústria de celulose, afirmou que, em um levantamento realizado em 2018, a faixa deste parâmetro nas fábricas do Brasil varia entre 14,5 e 18,5.

A tabela 10 apresentou o compilado das variáveis obtidas por meio da utilização das curvas de cozimento montadas a partir da variação da carga alcalina.

Dessa forma, obteve-se as seguintes equações para o mix 1:

$$R^2 = 0,8354 \quad \text{rejeito (\%)} = 0,0846 NK - 1,2251 \quad (10)$$

$$R^2 = 0,7716 \quad RD (\%) = 0,2517 NK + 46,092 \quad (11)$$

$$R^2 = 0,9680 \quad CA (\%) = -1,3254x + 45,609 \quad (12)$$

Equações das curvas de cozimento para o mix 2:

$$R^2 = 0,8937 \quad \text{rejeito (\%)} = 0,0503 NK - 0,6966 \quad (13)$$

$$R^2 = 0,9656 \quad RD (\%) = 0,1228 NK + 47,576 \quad (14)$$

$$R^2 = 0,9575 \quad CA (\%) = -1,9125 NK + 58,67 \quad (15)$$

Equações das curvas de cozimento para o mix 3:

$$R^2 = 0,9817 \quad \text{rejeito (\%)} = 0,1772 NK - 2,8435 \quad (16)$$

$$R^2 = 0,8775 \quad RD (\%) = -0,0609 NK + 53,768 \quad (17)$$

$$R^2 = 0,9991 \quad CA (\%) = -0,9642 NK + 37,727 \quad (18)$$

Tabela 11 – Compilado das variáveis após a polpação química

Mix	Rendimento Depurado (%)	Rejeito (%)	CA (%)	Fator U	CV DB
Mix 1	50,50	0,26	22,41	0,5	0,0261
Mix 2	50,08	0,19	24,39	2	0,0229
Mix 3	52,70	0,26	20,85	0,5	0,1117

Fonte: Próprio Autor (2021).

O mix 3 apresentou resultados melhores para as principais variáveis do processo de polpação química, a menor média no teor de extrativos (1,63%) de sua composição foi capaz de explicar a menor demanda de carga alcalina em 20,85%, auxiliando nos custos de produção, além de que a presença do clone H diminuiu a média de extrativos do mix.

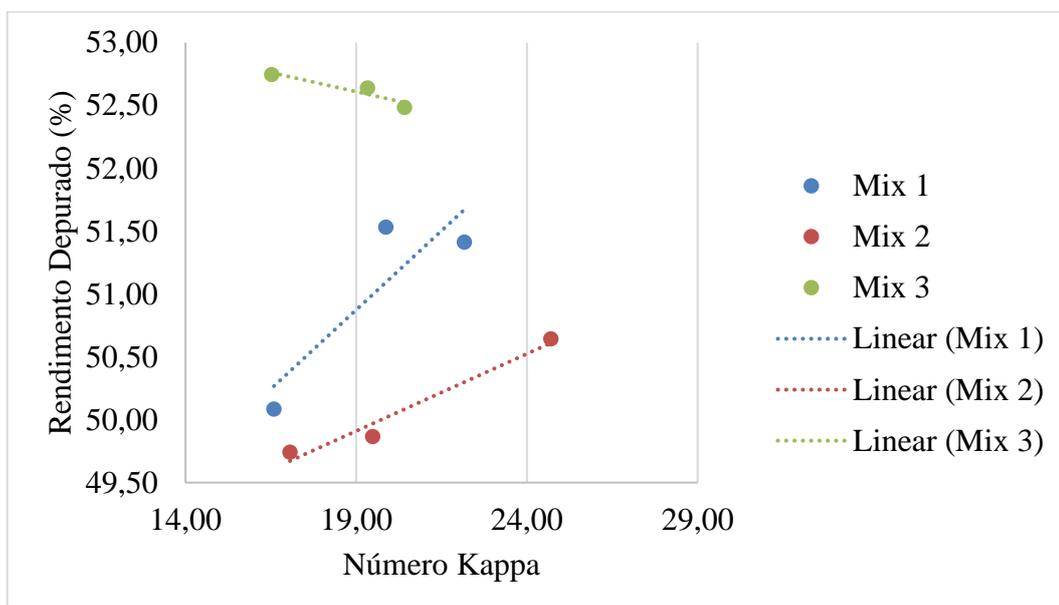
Nesse viés, Almeida et. al. (2000) afirmou em seu trabalho sobre dissolução dos constituintes da madeira no processo Kraft que o teor de extrativos e de lignina existente na matéria-prima foi diretamente relacionado à demanda alcalina onde a composição da madeira direcionou o potencial de favorabilidade das variáveis de controle para a produção de celulose.

Além disso, o mix 3 apresentou os maiores teores de rendimento depurado com média de 52,70% para um NK de 17,5, o que pode explicar a sua média de composição de holocelulose ter sofrido influência do clone H em sua distribuição com teor de holocelulose mais alto em relação à média (71,70%).

Na figura 25, nota-se que a curva de rendimento do mix de consumo 3 está acima das curvas dos mixes 1 e 2. Dessa forma, é válido ressaltar que a composição genética do mix de consumo 3 favoreceu a obtenção de valores maiores de rendimento depurado.

Segundo Mokfienski (2008), em seu trabalho sobre a importância do teor de celulose na madeira para o rendimento da polpa que afirmou que os parâmetros de rendimento e teor de celulose foram diretamente proporcionais por meio da correlação entre as duas variáveis. Dessa forma, segundo o autor citado, quanto maior é o teor de carboidratos totais na madeira, maiores serão os valores de rendimento.

Figura 25 – Comparativo mixes de consumo: rendimento depurado (%) x NK



Fonte: Próprio Autor (2021).

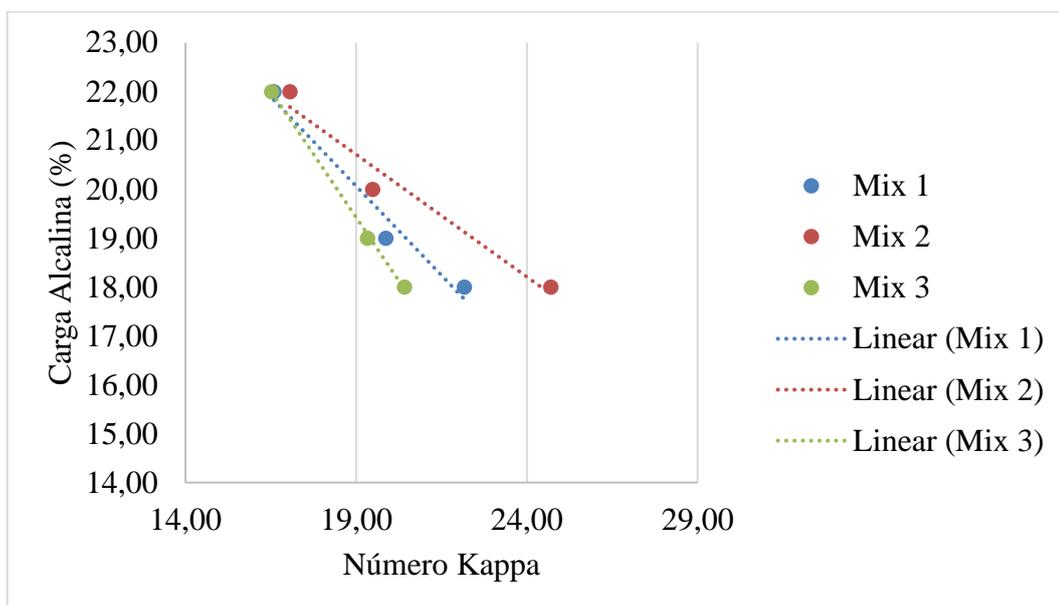
A estimativa de rendimento depurado para os mixes 1, 2 e 3 podem ser encontradas por meio das equações 11, 14 e 17, respectivamente. Diante disso, fixando um número Kappa desejado, é possível saber o quanto de rendimento seria obtido para um determinado teor de lignina residual. Ademais, a previsão destes resultados é de suma importância no âmbito industrial para evitar gargalos que geram perda de produtividade. O rendimento da polpa é uma das principais características para determinar os custos de produção da celulose (FONSECA et al., 1996).

O rendimento está diretamente ligado a qualidade da matéria-prima utilizada, pois apresenta correlação com a estrutura anatômica e química do eucalipto. Além da composição dos clones, outros fatores podem influenciar na variável como a demanda de carga alcalina, produção em massa do digestor e a relação sólido/polpa (GOMIDE; COLODETTE, 2007).

Com base na figura 26, observa-se o decréscimo do número Kappa em relação ao aumento da carga alcalina, logo as variáveis são inversamente proporcionais. O mix 3 apresentou menor demanda de carga alcalina, seguido do mix 1 e 2, respectivamente, o que é justificado por Ek *et al.* (2001), pois relata que a presença de altas concentrações de carga alcalina pode gerar diminuição no rendimento do processo.

No entanto, a concentração abaixo do adequado pode gerar a formação de palitos não cozidos, diminuindo também o rendimento. O autor ainda afirmou que a CA ajuda na diminuição dos ácidos hexenurônicos na polpa.

Figura 26 – Comparativo mixes de consumo: carga alcalina (%) x NK



Fonte: Próprio Autor (2021).

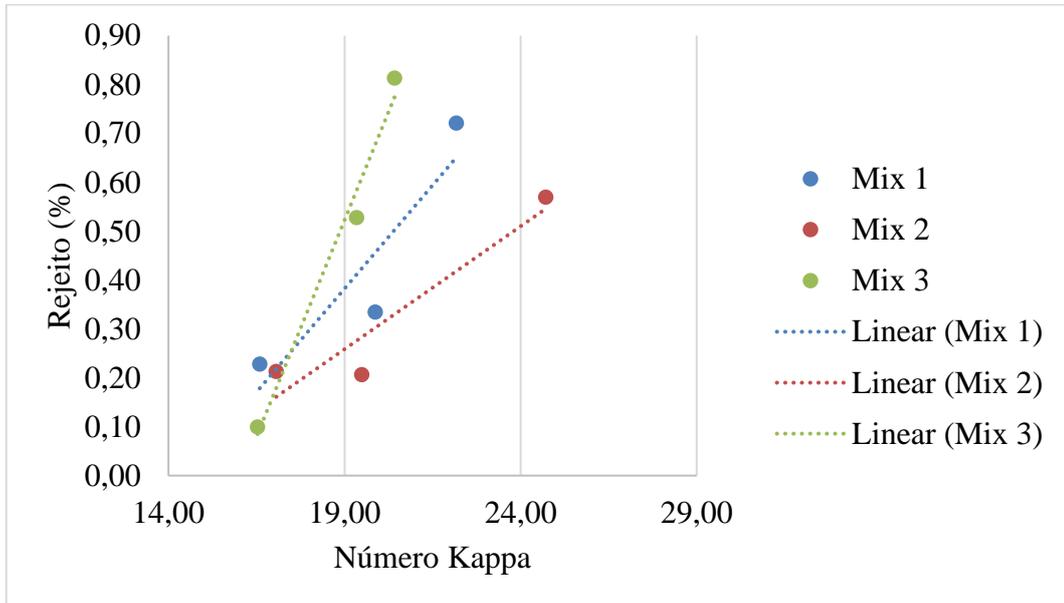
Os ácidos hexenurônicos apresentam sítios ativos que podem fazer ligações com metais, gerando o aumento do teor de cinzas e insolúveis do produto acabado (VOURINEN et al., 1996; HENRICSON, 1997). Além disso, a presença desses complexos na polpa gera cromóforos que são empecilhos, pois não reagem com o oxigênio utilizado na deslignificação e com o H_2O_2 utilizado nas etapas de branqueamento (DEVENYNS e CHAUVEHEID, 1997).

O teor de extrativos no mix 3 pode ter interferido positivamente na redução da carga alcalina, diminuindo também os custos de produção caso o mix de consumo 3 estivesse em um processo de fábrica, devido à redução do consumo de químicos.

Dessa forma, Carvalho et. al. (1998) afirmou em seu trabalho que o teor de extrativos é diretamente proporcional à demanda de carga alcalina do processo. Por meio disso, o mix 3 apresentaria menor tendência para a formação de *pitch* que são depósitos de extrativos que se aglomeram no processo, gerando incrustações, entupimento em equipamentos, telas e feltros.

A figura 27 apresenta as curvas do teor de rejeito para cada mix de consumo onde foi observado que o mix 2 apresentou menor incidência de rejeitos em relação aos mixes 1 e 3. Diante disso, tem-se que o teor de rejeitos está ligado ao número Kappa, sendo os dois parâmetros diretamente proporcionais, pois quanto maior for o número Kappa almejado, maior será a geração de rejeito (FOELKEL, 2007).

Figura 27 – Comparativo mixes de consumo: rejeito (%) x NK



Fonte: Próprio Autor (2021).

Segundo Foelkel (2007), em seu trabalho sobre resíduos sólidos industriais, os teores de rejeito entre 0,4% e 1% é a faixa do parâmetro para vasos de cozimento modernos, onde, por meio da figura 27, percebe-se que os valores obtidos se aproximam da faixa dos digestores modernos. Além disso, o autor afirma que o aumento do teor de rejeitos apresenta impactos diretos nos custos de produção, uma vez que há perda de madeira, álcali ativo, licor preto e energia utilizada para o processo.

6 CONCLUSÃO

O mix 3 apresentou melhores resultados para as principais variáveis do processo de polpação química. Notou-se que para um número Kappa igual a 17,5 o rendimento do mix 3 foi o maior, sendo igual a 52,7%. Além disso, o mix 3 apresentou a menor demanda de carga alcalina, igual a 20,85%. Os resultados podem ser correlacionados com a composição química do mix de consumo e o fator de variabilidade da densidade básica.

Ademais, percebe-se a importância da composição química dos clones para a montagem dos mix de consumo, onde o melhor teor de extrativos foi obtido no mix de consumo 3 e a quantidade de extrativos na madeira apresenta ligação com a demanda alcalina para o processo de cozimento. Diante disso, observou-se que quanto menor o teor de extrativos, menor será o consumo de químicos. Além disso, o mix 3 com maior teor de polissacarídeos totais, obteve o melhor rendimento depurado, onde encontrou-se na literatura que o teor de holocelulose da madeira apresenta relação com o teor de rendimento.

O coeficiente de variação da densidade básica não exerceu forte influência nas variáveis após a polpação química. Dessa forma, o mix 3 apresentou o maior CV e apresentou os melhores parâmetros para o cozimento da polpa. No entanto, sob a ótica do Fator U que é uma medida de variabilidade adotada na empresa onde foi realizado o estudo, que leva em consideração a distribuição Gaussiana dos dados, o mix 1 e 3 que tinham o menor valor de variabilidade, foram os que obtiveram os melhores parâmetros na etapa de cozimento. Em outra ótica, o mix 2 que apresentava um fator U igual a 2 com classificação péssima, obteve valores inferiores para rendimento e alta demanda de carga alcalina.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, G. S. B.; BARRICHELO, L. E. G.; SILVA JÚNIOR, F. G. **Qualidade da madeira de híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* e seleção precoce.** In.: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 35. São Paulo: ABTCP, 2002.
- ALMEIDA, J. M.; GOMIDE, J. L.; SILVA, D. J. **Dissolução dos constituintes da madeira de eucalipto ao longo dos processos kraft contínuo convencional e aditivado.** Revista arvore, v 24, n 2, p. 215-222, 2000.
- ANTUNES, F. S. **Avaliação da qualidade da madeira das espécies *Acacia crassicarpa*, *Acacia mangium*, *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus globulus* e *Populus tremuloides*.** 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- CARVALHO, M. V. S. **Efeito das Variáveis de Cozimento nas Características Químicas de Pastas Kraft de *Eucalyptus globulus*.** 270f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 1999.
- COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; JUNIOR, D. L.; PEDRAZZI, C. **Effect of pulp delignification degree on fiber line performance and bleaching effluent load.** BioResources. v. 2, n. 2, p. 223- 234, 2007.
- CORREIA, F. M.; D’ANGELO, J. V. H.; SILVA, J. R. F. G. **Revisitando número kappa: conceitos e aplicações na indústria de celulose.** O papel, vol. 80, num. 07, pp. 77 - 89 - JUL 2019.
- COURCHENE, C. E. **The tried, the true and the new ñ getting more pulp from chips ñ modifications to the kraft process for increased yield.** In: BREAKING THE PULP YIELD BARRIER SYMPOSIUM, 1998, Atlanta. Proceedings. Atlanta: TAPPI, 1998, p. 11-20.
- D’ALMEIDA, M. L. O. **Composição química dos materiais lignocelulósicos. Tecnologia de fabricação de pasta celulósica.** São Paulo: SENAI; IPT, 1998. v. 1, cap.3, p. 45-106.
- DE CASTRO, H. F. **Papel e Celulose.** Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de Lorena – EEL, 2009.
- DEL GRANDE, M. H. **Racionalização do uso de água na indústria de celulose: o caso Bahia pulp.** 156 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2004.

DEMUNER, W. P. **Predição do impacto da madeira em fábrica Kraft de eucalipto**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

DEVENYNS, J.; CHAUVEHEID, E. **Uronic acids and metals**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD AND PULPING CHEMISTRY, 9., 1997, Montreal. Proceedings... Montreal: CPPA, 1997.

DIAS O. A., SIMONELLI G. **Qualidade Da Madeira Para A Produção De Celulose E Papel**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17; p. 2013.

DUEÑAS, R. **Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel**. 1nd. ed. [S.l.]: Universidad de Guadalajara, 1997.

FAVARO, J. S. C. **Estudos de Polpação Kraft, Branqueamento e Refino de Eucalyptus grandis X Eucalyptus urophylla**. 2015. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais Lignocelulósicos) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

FOELKEL, C. **O Processo de Impregnação dos Cavacos de Madeira de Eucalipto pelo Licor Kraft de Cozimento**. Associação Brasileira de Técnicas de Celulose e Papel. 2009.

FOELKEL, C. **Resíduos sólidos industriais da produção de celulose Kraft de eucalipto**. Parte 01: resíduos orgânicos fibrosos. Eucalyptus Online Book. Capítulo 05. 78 pp., 2007.

FOELKEL, C. E. B. **Qualidade da madeira: teoria**. 5. ed. Belo Oriente: [s.n.], 1977.

GALLO, C. R. M. **Curso básico sobre fabricação de papel Tissue**. Apostila ABCTP, 2014.

FONSECA, S. M.; OLIVEIRA, R. C.; SILVEIRA, P. N. **Seleção da árvore industrial: procedimentos, riscos, custos e benefícios**. Revista Árvore, v. 20, n. 1, p. 69-85, 1996.

GOMES, D. F. F. **Estudo da qualidade da madeira de clones de “Eucalyptus” cultivados no Brasil; produção de polpa kraft de qualidade**. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

GOMES, F. A. **Avaliação dos processos kraft convencional e Lo-Solids® para madeira de Pinus taeda I**. 99 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ-USP, Piracicaba, 2009.

GOMIDE J.L.; COLODETTE, J. O. R. S. C. **Os Clones de Excelência de Eucalyptus no Brasil para Produção de Celulose.** Congresso anual de celulose e papel ABTCP, n. 39, 2006.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. **Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado.** O papel, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. **Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose Kraft.** Revista Árvore, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 339-344, mar. /abr. 2010.

GRACE, T. M. **Alkaline Pulping, in Pulp and paper manufacture.** 3. Ed. vol 5. TAPPI/CPA, Atlanta.

HERSCHMILLER, D.W. **Kraft cooking with split sulfidity ñ a way to break the yield barrier.** In: BREAKING THE PULP YIELD BARRIER SYMPOSIUM, 1998, Atlanta. Proceedings... Ö Atlanta: TAPPI, 1998, p. 11-20.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. **Celulose e papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica.** 2. ed. São Paulo: Departamento de Divulgação do IPT, 1988. 1 v.

ISO 638: 1978 - **Polpas - Determinação do teor de matéria seca.**

KOCUREK, M. **Mill Control and Control Systems: Quality Testing, Environmental, Corrosion, Electrical Systems.** 2nd ed. ed. [S.l.]: Tappi Pr, 1992.

KOLLMANN, F. **Tecnologia de la madera y sus aplicaciones.** 1nd. ed. [S.l.]: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera, 1959.

LEITE, F. P. **Efeito de fatores de produção vegetal na produtividade e na qualidade da madeira para a produção de polpa celulósica branqueada de eucalipto.** 2006. Monografia de final de curso de Tecnologia de Celulose e Papel, 2006.

LEONARDI, L. **O futuro e a competitividade do setor.** O Papel, São Paulo, ano 71, n. 9, p. 4-5, set. 2010.

MARANESI, G. L. **Influência de variáveis do processo de produção industrial na qualidade da polpa Kraft de eucalipto.** 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MOKFIENSKI, A. Fundamentos de Lavagem de polpa. **2º Encontro de Operadores de Sistema de Lavagem e Branqueamento Universidade Federal de Viçosa – Viçosa MG, ABTCP 2003.**

MOKFIENSKI, Alfredo *et al.* **A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto.** Revista Ciência Florestal, Santa Maria, ano 18, n. 3, p. 401-413, jul./set. 2008.

NICHOLS, J. W. P. **The effect of environment on wood characteristics.** Silva e Genetica, Frankfurt, v.20, n.3, 1971.

OLIVETTI NETO, A. **Qualidade de Cavacos de Eucalipto para Obtenção de Celulose Kraft.** In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EN CELULOSA Y PAPEL, 2., 2002, Campinas. Anais... Campinas: Unicamp, 2002. 1 CD-Rom.

PIMENTA, L. R. **Comportamento dos componentes químicos da madeira de eucalipto na polpação Lo-Solids.** Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 2006.

ROGERS, J.; FUNO, P.; NERY, J. **A lavagem da polpa.** O Papel, São Paulo, Brasil, Vol. 57, No. 3, 1996, pp. 30 –38.

SANTAROSA, E.; PENTEADO JUNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. dos R. **Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda.** Brasília, DF: Embrapa, 2014.

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

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. **Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal.** Série Técnica IPEF, Piracicaba, v. 6, n. 20, p.1-22, ago.1989.

SIDRAK, Y. **Model based optimization of Kamyr digester operation.** Tappi Journal, vol. 78, n. 3, 1995.

SILVA, J. R. F. G.; MCDONOUGH, T. J. **Polpação Lo Solids de eucalipto: Efeito do ritmo de produção.** In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 34., 2001, São Paulo. Anais. São Paulo: ABTCP, 2001. p. 69-81.

SILVA, P. H. M. **Impactos das doses e do parcelamento da fertilização na produtividade, lixiviação e ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto.** Piracicaba. 2011. 116 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SIXTA, H; SUSS, H-U.; POTTHAST, A., SCHWANNINGER, M.; KROTSCHKE, A. W. **Handbook of pulp.** Weinheim: Wiley-VCH, 2006.

SMOOK, G.A., **Handbook for pulp & paper technologists.** Vancouver: Angus Wilde, 1997. 419 p.

TAPPI, T280 pm-99 standard (2000) **Acetone extractives of wood and pulp.** Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI Press, USA, 2000.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. **Tappi Standard Methods.** Atlanta: TAPPI, 2011.

TEDER, A.; AXEGARD P. **Recent development in pulping and bleaching chemistry and technology.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD AND PULPING CHEMISTRY, 8., 1995, Helsinki. Proceedings Ö Helsinki: n.i., 1995. vol I, p. 37-55.

TRINDADE, H. de S. **A importância da lavagem da polpa nos estágios de branqueamento.** 2003. 62p. Dissertação (Pós-graduação Lato Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

VELÁSQUEZ, S. M. S. G. **Cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética do Brasil.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. p.191.

VUORINEN, T.; TELEMAN, A.; FAGERSTROM, P.; BUCHERT, J.; TENKANEN, M. **Hidrólise seletiva de grupos de ácido hexenurônicos e sua aplicação nos branqueamentos ECF e TCF de polpa kraft.** Proc. 1996 Intl. Pulp Bleaching Conf., Tappi Press, vol. 1, pp. 43-51, 1996.

WEHR, T. F. A. **Variações nas características da madeira de E. grandis Hill ex maiden e suas influências na qualidade de cavacos em cozimento kraft.** Piracicaba, 1991. 84p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.