

GUSTAVO SOUZA LIMA BITTENCOURT DE SOUZA

**EFEITO DA IMPREGNAÇÃO PROLONGADA DOS CAVACOS NO
RENDIMENTO E BRANQUEABILIDADE DA POLPA KRAFT DE EUCALITO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S729e
2016
Souza, Gustavo Souza Lima Bittencourt de, 1985-
Efeito da impregnação prolongada dos cavacos no
rendimento e branqueabilidade da polpa kraft de eucalipto /
Gustavo Souza Lima Bittencourt de Souza. – Viçosa, MG, 2016.
xi, 62f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Jorge Luiz Colodette.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.46-51.

1. Polpa da madeira - Branqueamento. 2. Polpa da madeira
- Rendimento. 3. Eucalipto. 4. Celulose. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-graduação em Tecnologia de Celulose e Papel. II. Título.

CDD 22. ed. 634.986117

GUSTAVO SOUZA LIMA BITTENCOURT DE SOUZA

**EFEITO DA IMPREGNAÇÃO PROLONGADA DOS CAVACOS NO
RENDIMENTO E BRANQUEABILIDADE DA POLPA KRAFT DE EUCALITO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada: 18 de fevereiro de 2016

Diego Pierre de Almeida

Fernando José Borges Gomes
Coorientador

Prof. Jorge Luiz Colodette
Orientador

AGRADECIMENTOS

Aos meus filhos, João Pedro e Lucas, por me darem todos os dias mais força para sempre conseguir o melhor.

À minha esposa Tatiane pelo carinho e apoio em mais uma jornada.

Aos meus pais, Cláudio e Dora, e meus irmãos, Frederico e Grasielle, pela força e incentivo.

À Thainara pelo apoio e ajuda.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Laboratório de Celulose e Papel.

Ao professor Jorge Luiz Colodette pela oportunidade, incentivo e apoio nestes anos de trabalho juntos e como orientador.

Ao Bittencourt, Ciro, Tião, Carlinhos, Fernando, Alessandro e Diego pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao grande mestre José Lívio Gomide (*in memoriam*) pelos ensinamentos, sábias palavras e apoio.

A toda equipe da Análise Elementar e Energética.

E a todos os estudantes, funcionários e professores que de alguma forma contribuíram para essa conquista.

BIOGRAFIA

Gustavo Souza Lima Bittencourt de Souza, filho de Cláudio Bittencourt de Souza e Maria Auxiliadora de Souza, nasceu em 02 de março de 1985, na cidade de Viçosa, Minas Gerais.

Concluiu o estudo fundamental e o ensino médio no Colégio Equipe.

Em 2003, iniciou seu trabalho no Laboratório de Celulose e Papel, através da Sociedade de Investigações Florestais.

No ano de 2005, ingressou no curso de Administração pela Faculdade de Viçosa, graduando-se em 2009.

Em, 2011, ingressou na Universidade Federal de Viçosa através de concurso público realizado em 2009, como assistente de laboratório.

Ingressou no Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel na Universidade Federal de Viçosa em 2014 sendo, o mesmo concluído em 2016.

ÍNDICE

LISTA DE ABREVIACOES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. <i>Eucalyptus urograndis</i>	3
2.2. Qualidade da Madeira	3
2.3. Anatomia da madeira	3
2.4. Composição química da madeira	4
2.4.1. Celulose	5
2.4.2. Lignina	5
2.4.3. Hemiceluloses	6
2.4.4. Extrativos	6
2.4.5. Minerais	6
2.5. Polpação da madeira	7
2.5.1. Polpação kraft convencional	7
2.5.2. Cozimento com impregnação prolongada	8
2.6. Deslignificação com Oxigênio	8
2.7. Branqueamento	9
2.7.1. Branqueamento com dióxido de cloro D e D _{Hot}	10
2.7.2. Extração alcalina com peróxido de hidrogênio	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1 Material	11
3.2. Métodos	12
3.2.1. Análises químicas dos cavacos de Eucalipto	12
3.2.2 Análises físicas do Eucalipto	12
3.3. Processo de Polpação	13
3.3.1. Processo de Polpação Convencional	14
3.3.2. Processo de Polpação com Impregnação Prolongada	15

3.3.3. Parâmetros determinados no licor negro	15
3.4. Branqueamento	16
3.4.1. Pré-branqueamento das polpas de eucalipto	17
3.4.2. Branqueamento com Dióxido de Cloro (D_{HT})	17
3.4.3. Extração alcalina com Peróxido de Hidrogênio (EP)	17
3.4.4. Branqueamento com Dióxido de Cloro (D_{final})	18
3.4.5. Parâmetros do branqueamento	18
3.4.6. Procedimentos Analíticos do branqueamento	19
3.4.7 Cálculo do ganho de alvura, eficiência e seletividade da deslignificação com oxigênio.....	19
3.5. Refino e formação de folhas	20
3.6. Testes físico-mecânicos e óticos	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
4.1. Caracterização do <i>Eucalyptus urograndis</i>	22
4.2. Polpação	25
4.3. Análise dos Licores Negros da Polpação	27
4.4. Deslignificação com oxigênio.....	29
4.5. Branqueamento	31
4.6. Cálculo do rendimento da polpação por TOC	34
4.7. Propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas.....	36
4.7.1. Refinabilidade	36
4.7.2. Índice de Arrebentamento.....	37
4.7.3. Índice de Rasgo	38
4.7.4. Índice de tração	39
4.7.5. Resistencia a passagem de ar.....	40
4.7.6. Volume Específico Aparente.....	40
4.7.7. Energia absorvida em regime de tração	41
4.7.8. Módulo de Elasticidade.....	42
4.7.9. Opacidade	42
4.7.10. Coeficiente de dispersão de luz.....	43
5. CONCLUSÕES	44
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
APÊNDICES	52

LISTA DE ABREVIações, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

°SR – Grau Schopper Riegler
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEr – Álcali efetivo residual
EIC – Extended impregnation cooking
AOX – Halogênios orgânicos adsorvíveis
D – Estágio do branqueamento de dioxidação
D_{Hot} – Estágio do branqueamento de dioxidação a quente
DQO – Demanda bioquímica de oxigênio
O – Deslignificação com oxigênio
(EP) – Extração alcalina com peróxido de hidrogênio
OX – Halogênios orgânicos adsorvíveis na polpa celulósica
SCAN – Scandinavian pulp, paper and board testing committee
Pré-O₂ – Deslignificação com oxigênio
TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry
MJ/Kg – Megajoule por quilograma
g/L – gramas por litro
a.s. – absolutamente seco
L/Kg – litros por quilograma
PCS – Poder calorífico superior
PCI – Poder calorífico inferior
mg/Kg – miligramas por quilograma
Kg/m³ – quilogramas por metro cúbico
dm³/Kg – densímetro cúbico por quilograma
mmol/Kg – milimols por quilograma
ppm – partes por milhão
Kg/Tas – quilogramas por tonelada absolutamente seco
TOC – carbono orgânico total

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros utilizados para análises químicas da madeira	12
Tabela 2: Parâmetros utilizados para análises físicas da madeira	13
Tabela 3: Análises realizadas nas polpas resultantes dos cozimentos.....	14
Tabela 4: Condições dos cozimentos convencionais	14
Tabela 5: Condições das duas etapas para o processo de polpação com impregnação prolongada.....	15
Tabela 6: Procedimentos analíticos realizados nos licores negros.....	16
Tabela 7: Parâmetros dos estágios de Pré-O ₂ e do branqueamento.....	18
Tabela 8: Análises realizadas nas polpas e efluentes do branqueamento	19
Tabela 9: Análises realizadas nas polpas branqueadas para refino, formação de folhas, testes físicos e óticos.....	22
Tabela 10: Resultados médios das análises químicas e físicas do eucalipto	24
Tabela 11: Resultados da polpação Convencional e Impregnação Prolongada	27
Tabela 12: Resultados das análises químicas e físicas dos licores negros.....	28
Tabela 13: Resultados do número kappa, alvura, viscosidade e HexA das polpas marrom e Pré-O ₂	29
Tabela 14: Relação entre rendimento da polpação dos processos CC e EIC e teor de carbono orgânico total dos licores negros dos cozimentos	35
Tabela 15: Equações para cálculos da correlação entre rendimento observado (RO%) na polpação, carbono orgânico total (TOC%), sólidos orgânicos (SO%), sólidos totais (ST%) dos licores negros da polpação CC e EIC.	35
Tabela 16: Rendimento observado (RO%), carbono orgânico total (TOC%), Sólidos Orgânicos (SO%), Sólidos Totais (ST%) dos licores negros da polpação CC e EIC e correlação entre RO <i>versus</i> TOC, RO <i>versus</i> SO e RO <i>versus</i> ST.	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Eficiência da Pré-O ₂ nas polpas celulósicas em relação aos Kappas dos processos CC e EIC.	30
Figura 2: Ganho de alvura das polpas celulósica obtidas na Pré-O ₂ em relação aos Kappas dos processos CC e EIC.	30
Figura 3: Seletividade das polpas celulósicas obtidas na Pré-O ₂ em relação aos Kappas dos processos CC e EIC.	31
Figura 4: Branqueabilidade das polpas celulósicas obtidas pelo processo de polpação CC e EIC e branqueadas pela sequencia D(EP)D para uma alvura 90%ISO.	32
Figura 5: Cloro Ativo Total das polpas celulósicas obtidas pelo processo de polpação CC e EIC e branqueadas pela sequencia D(EP)D para uma alvura 90%ISO.	32
Figura 6: Número de cor posterior das polpas celulósicas obtidas pelo processo de polpação CC e EIC e branqueadas pela sequencia D(EP)D para uma alvura 90%ISO.	33
Figura 7: Viscosidade das polpas celulósicas obtidas pelo processo de polpação CC e EIC e branqueadas pela sequência D(EP)D para uma alvura 90%ISO. ...	34
Figura 8: Consumo de Energia (Wh) das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	37
Figura 9: Grau Schopper Riegler das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	37
Figura 10: Índice de Arrebetamento das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	38
Figura 11: Índice de rasgo das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	39
Figura 12: Índice de tração das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	39
Figura 13: Resistencia a passagem de ar das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	40

Figura 14: Volume Específico Aparente das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	41
Figura 15: Energia absorvida das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	41
Figura 16: Módulo de Elasticidade das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	42
Figura 17: Opacidade das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	43
Figura 18: Coeficiente de dispersão de luz das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.	43

RESUMO

SOUZA, Gustavo Souza Lima Bittencourt de. M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Efeito da impregnação prolongada dos cavacos no rendimento e branqueabilidade da polpa kraft de eucalipto.** Orientador: Jorge Luiz Colodette. Coorientador: Fernando José Borges Gomes.

A madeira de eucalipto tem se tornado uma das principais matérias primas para a produção de polpa celulósica, principalmente na América do Sul. Apesar de sua alta produtividade florestal, os custos de produção da madeira de eucalipto tem apresentado tendências de aumento nos últimos anos. A madeira representa em algumas unidades fabris produtoras de polpa celulósica valores superiores a 50% dos custos de produção. Esse fato aponta para a necessidade de se investigar alternativas de processos que melhorem a sua processabilidade. O presente estudo teve como objetivo principal avaliar a influência da tecnologia de impregnação prolongada no cozimento kraft e o seu impacto na branqueabilidade da polpa. Foi utilizada uma mistura de madeiras provenientes do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (*Eucalyptus urograndis*) coletadas aos sete anos de idade. Nesse estudo foram realizados caracterização química e física da amostra de madeira utilizada. O processo kraft foi utilizado como referência. Pelos processos kraft convencional e impregnação prolongada, foram obtidas polpas celulósicas de números kappa 15, 19, 23 e 27 as quais foram branqueadas pela sequência OD(DP)D para uma alvura de 90% ISO. Os principais resultados obtidos pelo desenvolvimento desse estudo foram: (1) a qualidade da madeira de *Eucalyptus urograndis* usada neste trabalho apresentou composição química e densidade básica (528 kg/dm^3) compatível com clones de eucaliptos comerciais segundo dados da literatura; (2) o processo de polpação com impregnação prolongada teve melhores resultados para o rendimento depurado, em geral, 1% acima em relação à polpação convencional; (3) a impregnação prolongada apresentou melhores branqueabilidades quando comparada a polpação kraft convencional; (4) as polpas obtidas pelo processo de polpação com impregnação prolongada apresentaram melhores estabilidades de alvura; (5) o teor de carbono orgânico total, sólidos orgânicos e totais apresentaram forte correlação com o rendimento depurado da polpação.

ABSTRACT

SOUZA, Gustavo Souza Lima Bittencourt de. M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2016. **Effect of prolonged impregnation chip in yield and bleachability eucalyptus kraft pulp**. Adviser: Jorge Luiz Colodette. Coadviser: Fernando José Borges Gomes.

The eucalyptus is becoming the most important raw material for pulp production, mainly in South America. In spite of its high forest productivity, the cost of eucalypt wood has grown largely in the last year. In some pulp mills the wood represents values higher than 50% of the overall cost composition of pulp production. This fact indicates the demand to investigate alternative processes to improve its processability into pulp. This study aimed to evaluate the influence of prolonged impregnation kraft cooking technology and its impact on pulp bleachability. It was used a mix of the hybrid of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (*Eucalyptus urograndis*) harvested at 7 years old. In this study were carried out chemical and physical characterization of the wood sample used. The Kraft process was used as a reference. By the processes kraft conventional and prolonged impregnation kraft cooking were obtained pulps at kappa number 15, 19, 23 and 27. The pulps were bleached by the sequence OD(DP)D aiming brightness of 90% ISO. The main findings of this work were: (1) the wood quality of the *Eucalyptus urograndis* used presented chemical composition and basic density (528 kg/dm^3) similar to the commercial eucalypt clones according to the literature; (2) the prolonged impregnation kraft cooking showed a better screened yield, in general 1% higher than the conventional cooking; (3) the prolonged impregnation kraft cooking showed a higher bleachability when compared to the conventional cooking; (4) the pulps obtained from prolonged impregnation kraft cooking showed higher brightness stability than the conventional cooking; (5) the contents of organic carbon, organic solids and total solids showed a high correlation with the pulping screened yield.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de celulose e papel exerce uma função de destaque no cenário econômico do Brasil, por exemplo, as exportações do setor no ano de 2013 foram da ordem de 6,7 bilhões de dólares, o que gerou um saldo comercial positivo de 4,7 bilhões de dólares, tendo ainda o setor pago em impostos no mesmo período cerca de 3,5 bilhões de reais. Sendo ainda atribuído ao setor a geração de 130 mil empregos diretos (indústria 79 mil, florestas 51 mil) e 640 mil empregos indiretos segundo dados da Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA, 2014).

A indústria de celulose e papel no Brasil possui uma distribuição geográfica bastante homogênea, possuindo um total de 220 empresas com atividade em 540 municípios, localizada em 18 estados da federação. As indústrias de Celulose e Papel apresentam como característica uma alta competitividade em escala global e sempre direcionam as suas características produtivas de acordo com as necessidades e exigências do mercado.

Na busca pela otimização da produção, e para se consolidarem no mercado, as empresas do setor de celulose e papel desenvolvem novas técnicas para chegar a esse feito, visando melhoria na produção, custo de produção e preocupações com questões sociais e ambientais e principalmente pelo aumento da competitividade entre as empresas que buscam por um produto final perfeito, com a finalidade desejada.

O processo de polpação Kraft é o método dominante de produção de polpa celulósica em todo mundo. Empregando uma combinação de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio a altas temperaturas.

Esse processo tem vantagens em relação aos demais devido à grande flexibilidade com relação às espécies de biomassa lignocelulósica, sendo utilizada para madeira e não madeiras. Os ciclos de cozimento são mais curtos, a polpa pode ser branqueada a altos níveis de alvura, pode ser usada para diferentes espécies de madeiras, produção de polpa de alta resistência e eficiência na recuperação dos reagentes (GOMIDE e GOMES, 2015).

Desde o desenvolvimento do processo Kraft, diversas modificações vêm sendo implementadas de forma a melhorar sua eficiência, em termos de

rendimento, propriedades da polpa e implantações de sequencias de branqueamento (VASCONCELOS, 2005).

Um dos processos modificados e que tem como base para o esse estudo proposto, é o cozimento com impregnação prolongada (EIC), que tem como conceito um maior tempo na impregnação dos cavacos no digestor durante o cozimento com temperatura mais baixa buscando melhorias nas polpas, assim como redução de rejeitos, consumo menor de reagentes no branqueamento e qualidade das fibras.

Dessa forma esse estudo buscou estudar em nível de laboratório as eficiências que podem trazer o cozimento Kraft modificado em relação ao convencional, desde a etapa de polpação, passando pelo branqueamento através da sequência OD*(EP)D e os testes físicos das polpas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. *Eucalyptus urograndis*

De acordo com Oliveira et al.(1999), o gênero *Eucalyptus* é representado por árvores com alta taxa de crescimento, plasticidade, forma retilínea do fuste, desrama natural e madeira com variações nas propriedades tecnológicas, adaptadas às mais variadas condições de uso.

Originado no Brasil, o *Eucalyptus urograndis* é um híbrido formado no cruzamento do *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Tendo sua primeira plantação no estado do Espírito Santo em 1979, mas foi na década de 1990 que essa espécie impulsionou o ritmo de crescimento florestal, bem como a qualidade mais homogênea das florestas plantadas (LOPES, 2008).

2.2. Qualidade da Madeira

A madeira, assim como outros materiais lignocelulósicos, têm em sua composição majoritariamente celulose, hemiceluloses e lignina, na proporção aproximada de 40 a 50%, 20 a 30% e 25 a 30% respectivamente, variando em função do tipo de material (COLODETTE et. al, 2015). Dependendo da utilização a que se deseja empregar a madeira, outras características devem ser levadas em consideração como a morfologias de suas fibras, densidade, produtividade florestal. Pode-se dizer que a soma de todas as características e propriedades da madeira que afetam o rendimento em produtos finais e sua adequação para as aplicações pretendidas estão relacionados com a qualidade da madeira. (AMBIENTE BRASIL, 2009).

Segundo Kikuti et al. (1996), a madeira de melhor qualidade é aquela que apresenta menor quantidade de defeitos, os quais lhes são intrínsecos (genéticos) ou resultantes do processo de corte, transporte, desdobro e/ou secagem da madeira.

2.3. Anatomia da madeira

García (1995) afirma que o estudo da anatomia da madeira não apenas interessa na identificação das espécies, mas possibilita estabelecer possíveis

relações com as características gerais da madeira, resistência mecânica, trabalhabilidade e permeabilidade.

Os elementos de vaso, fibras, parênquima axial e radial compõem a estrutura anatômica da madeira dos eucaliptos, com variações dentro e entre diferentes grupos de espécies.

De acordo com Oliveira (1997), a relação entre o volume ocupado pelos vasos, fibras (espessura da parede) e parênquimas são fatores importantes nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de diferentes espécies de eucaliptos. Ainda segundo Oliveira (1997), informou que a porcentagem de fibras no eucalipto é de 65%, a de vasos 17%, a de células parenquimáticas 18% e que os tecidos fibrosos ocupam de 30 a 70% do volume, sendo mais abundantes nas madeiras de alta massa específica. Desta forma, o estudo do lenho sob o aspecto microscópico deve considerar características como o comprimento, o diâmetro e a espessura das paredes celulares.

2.4. Composição química da madeira

Pode-se dizer que a composição química da madeira é caracterizada pela presença de componentes majoritários (celulose, hemiceluloses e lignina) e de outros componentes vitais para a vida da planta, mas presentes em menor proporção (extrativos, minerais, pectinas, etc.) (COLODETTE et al, 2014).

Os principais constituintes químicos presentes na madeira tem sua proporção variada entre classes, gêneros e espécies de plantas.

De acordo com Santos (2000), o conhecimento da composição química da matéria-prima destinada à produção de celulose é de grande valia. Os teores de lignina e extrativos são considerados características químicas fundamentais, uma vez que os dados fornecerão condições para que se estabeleçam os parâmetros do processo de polpação, como o consumo de reagentes, rendimento em celulose, quantidade de sólidos gerados no licor negro e o potencial de produção industrial.

Basicamente a madeira é uma substância orgânica composta na maior parte de carbono, hidrogênio e oxigênio. A variação desses elementos mais a parte inorgânica estão relacionadas com a parte analisada e idade da madeira (COLODETTE et al, 2005).

2.4.1. Celulose

A celulose, principal componente da parede celular, é um polissacarídeo linear constituído de unidades anidro pirano glicose com ligações glicosídicas do tipo $\beta(1-4)$, com alto grau de polimerização. Sob o ponto de vista técnico o termo "celulose" compreende o resíduo fibroso proveniente da deslignificação parcial ou total da matéria-prima vegetal empregada. É o principal constituinte da polpa, determinando a maioria das propriedades do papel. Ela exerce influência na resistência da fibra individual e nas ligações entre as fibras e, associada com as hemiceluloses, determina as características da polpa celulósica, em termos de rendimento e de resistência (GOMES, 2007).

2.4.2. Lignina

Ligninas são substâncias complexas, macromoléculas tridimensionais de origem fenilpropanóica, encontradas na maioria das plantas superiores em maior concentração na lamela média do que nas subcamadas da parede secundária dos traqueídeos, vasos, fibras, etc., tendo função adesiva entre fibras, o que confere dureza e rigidez à parede celular. Enquadram-se entre as substâncias naturais mais abundantes da face da terra, ocupando cerca de 30% dos carbonos da biosfera (FENGEL e WEGENER, apud ABREU e OERTEL, 1999).

Considerada indesejável para a produção de polpa celulósica, os processos de cozimento e branqueamento visam remover a maior parte possível da lignina, causando menor dano possível nas fibras. Entretanto, a existência de um residual ótimo de lignina na polpa não branqueada concorre para que a fibra se torne mais rígida, o que resulta em polpa celulósica com boas propriedades de resistência (KIYOHARA e REDKO, 1997; RODRIGUES et al., 1997).

Por outro lado, madeiras com alto teor de lignina, normalmente, exigem maior carga de produtos químicos para a sua deslignificação, o que de acordo com Alencar (2002), implica numa maior degradação dos carboidratos e dissolução dos polissacarídeos de baixo peso molecular, causando redução no rendimento, queda de viscosidade da polpa e resistência física, além de gerar também maior quantidade de sólidos para queima na caldeira. Uma pequena

redução no teor de lignina teria importante impacto no rendimento, custos de processamento e impactos ambientais.

2.4.3. Hemiceluloses

São polissacarídeos e diferem da celulose por serem polímeros ramificados e de cadeia com menor grau de polimerização. O termo pentosana é aplicado às hemiceluloses cujas unidades monoméricas têm apenas 5 carbonos. São polissacarídeos não celulósicos presentes na madeira e consistem, principalmente, de xilanas e arabinanas. As xilanas são as principais hemiceluloses das folhosas.

Sabe-se que as hemiceluloses são constituintes desejáveis na polpação, pois contribuem para o rendimento e apresentam efeitos benéficos na ligação interfibras e na resistência da polpa celulósica. Em virtude de suas qualidades desejáveis, a maior parte dos processos de obtenção de polpa celulósica procura remover o mínimo possível de hemiceluloses (GOMES, 2007). A esse respeito, Almeida et al. (2000) descreve que as hemiceluloses facilitam também a refinação das fibras e na interação de produtos químicos adicionados no processo de fabricação do papel.

2.4.4. Extrativos

Componentes da madeira não pertencentes às paredes celulares, também chamados de não estruturais, de baixos ou médios pesos moleculares, extraíveis em água e ou, solventes orgânicos neutros.

Os extrativos exercem papel importante na utilização da madeira, pois influenciam nas propriedades físicas (GOMIDE; COLODETTE, 2007). Influenciam também, na fabricação de pasta celulósica, como redução no rendimento, aumento no consumo de reagentes (ALMEIDA et al., 1997)

2.4.5. Minerais

Assim como os extrativos, os inorgânicos também são considerados constituintes estranhos da parede celular das fibras e estão representados pelo

teor de cinzas de cada madeira. Os inorgânicos na madeira são geralmente constituídos pelos íons cálcio, manganês, ferro, magnésio, cobre, alumínio, potássio, sódio e, normalmente, são encontrados na forma de silicatos, carbonatos, fosfatos e sulfatos (Costa et al., 1997).

A presença dos metais de transição como ferro, cobre e manganês na madeira e que estarão presentes também na polpa, prejudicando o seu branqueamento, principalmente quando este é efetuado com peróxidos, resultando na decomposição do peróxido e dando origem a intermediário radiculares que podem vir a degradar a celulose (COLODETTE et al, 2014).

2.5. Polpação da madeira

2.5.1. Polpação kraft convencional

A madeira é uma matéria-prima formada de fibras em múltiplas camadas, ligadas entre si por forças interfibrilares e pela lignina que age como ligante (PINHO; CAHEN, 1998). O processo de produção de celulose é designado genericamente de polpação, cujo termo é utilizado para descrever os vários processos de redução da madeira para componentes fibrosos. O objetivo da polpação química é degradar e dissolver a lignina, deixando a maior parte da celulose e das hemiceluloses intacta nas fibras (SMOOK, 1990).

De acordo com Vasconcelos (2005), para separação dessas fibras, é necessário que a madeira passe por um processo de polpação que tem como objetivo principal a individualização das fibras, que é conseguido através da dissolução da lignina presente, principalmente na lamela média das madeiras, a qual é responsável pela união das fibras.

A característica básica do processo é o aquecimento dos cavacos de madeira em um vaso de pressão, o digestor, com licor de cozimento constituído, principalmente, de uma solução aquosa de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio. A razão entre a quantidade de madeira e licor, bem como a concentração de licor, a umidade dos cavacos e outras variáveis, são cuidadosamente controladas (SMOOK, 1990).

2.5.2. Cozimento com impregnação prolongada

Desde o desenvolvimento do processo convencional, diversas modificações são testadas buscando melhorar a eficiência da polpação, tanto em termos de rendimento como de propriedades da polpa obtida. Nos últimos anos as principais modificações do processo kraft tem sido direcionadas no sentido de aumentar o rendimento e a intensidade de deslignificação para viabilizar a implantação de sequencias de branqueamento mais eficientes como forma de reduzir o impacto ambiental (SILVA JÚNIOR; McDONOUGH,2002).

Conhecido como EIC (Extended Impregnation Cooking), principal motivo para utilizar o cozimento modificado com uma impregnação prolongada na fase da polpação é conseguir reduzir o teor de rejeito e melhorias nos processos seguintes a polpação.

O papel da impregnação é garantir melhor penetração do licor de cozimento nas fibras. Alguns fatores importantes afetam a impregnação, como qualidade e tamanho dos cavacos, temperatura da impregnação, relação licor/madeira e o tempo de impregnação. Quanto maior for o cavaco mais tempo levará a impregnação (INALBON et al, 1992).

Inalbon et al. (2009) demonstrou utilizando madeira de *Eucalyptus grandis* com espessura de 4,4milímetros levaria cerca de 15 a 20 min para o álcali atingir o núcleo do cavaco, e 45 a 60min para alcançar total deslignificação do cavaco com concentração de hidróxido de 0,5 mol/L à temperatura de 110°C. Se a temperatura fosse diminuída para 100°C, demoraria cerca de 10 min a mais.

As vantagens que podem conseguir com a impregnação prolongada é a recirculação do licor negro para a impregnação, maior lixiviação dos constituintes indesejáveis da madeira durante a impregnação.

Um processo de impregnação à temperatura mais baixa melhora a uniformidade da polpa e reduz a quantidade de rejeito (Karlström, 2009).

2.6. Deslignificação com Oxigênio

A deslignificação com oxigênio é considerada uma continuação da polpação. Considerada no branqueamento como um processo de pré-

branqueamento, pois é um estágio que tem ação mais deslignificante do que alvejante (GOMES, 2010).

Conhecida como Pré-O₂, o estágio de deslignificação com oxigênio foi desenvolvido para diminuir os impactos ambientais causados pelos efluentes da planta de branqueamento, especialmente os relacionados aos compostos organoclorados (SIXTA et al., 2006).

O desempenho da pré-O₂, em termos de redução do número kappa e preservação dos carboidratos, depende da qualidade da madeira, das condições do processo de polpação e das variáveis de processo empregadas na produção (SALVADOR et al., 2001).

As principais vantagens da Pré-O₂ são o aumento da qualidade do efluente e a redução dos custos dos reagentes químicos de branqueamento. Suas principais desvantagens são o aumento da demanda sobre o sistema de recuperação química da fábrica, a limitada seletividade e o alto custo de capital para instalação (McDONOUCH, 1996).

2.7. Branqueamento

O processo de branqueamento de polpa celulósica tem por objetivo remover ou transformar os grupos cromóforos da polpa, de modo que o produto final atinja uma desejada alvura.

Além de aumentar a alvura, o branqueamento causa a estabilidade da alvura da polpa pela remoção de lignina, de ácidos hexenurônicos e de outros produtos cromóforos e leucocromóforos oxidáveis (EIRAS et al, 2009).

Para fazer o branqueamento da polpa celulósica processam-se vários estágios. Os primeiros têm a função de eliminar ou dissolver ligninas residuais e outros compostos indesejáveis e nos estágios finais tem a função de promover o alvejamento da polpa aos níveis de alvura desejados (DENCE et al., 1998).

O branqueamento ECF (livre do cloro elementar) surge como alternativa para atender as legislações ambientais restritivas quanto à minimização dos níveis de AOX dos efluentes de branqueamento das indústrias de celulose (COLODETTE, 2014)

2.7.1. Branqueamento com dióxido de cloro D e D_{Hot}

Para reduzir a carga de poluente no primeiro estágio do branqueamento, foi feita a substituição do cloro por dióxido de cloro a fim de reduzir a carga poluente do efluente do branqueamento ao meio ambiente. A redução da carga poluente é caracterizada pela diminuição da emissão de cor, acidez, teor de cloretos, sólidos suspensos, DQO, DBO, TOC, toxidez e mutagenicidade do efluente (CROON e STEN, 1968; KUTNEY e MACAS, 1984 e AXEGARD, 1986).

É o agente alvejante mais indicado para ataque à lignina residual, pois reage muito lentamente com carboidratos (DENCE e REEVE, 1996).

O dióxido de cloro é uma espécie eletrolítica que ataca, predominantemente, os anéis aromáticos com grupos de hidroxílicos fenólicos livres. Inicialmente buscou-se reduzir as perdas de resistência da polpa causadas pelo cloro e aumentar a seletividade do processo. Sua dosagem industrial é designada conforme o número kappa da polpa a ser branqueada, sendo definido como o percentual de cloro ativo por estar dividido pelo número kappa da polpa (COLODETTE, 2014).

2.7.2. Extração alcalina com peróxido de hidrogênio

O uso do peróxido de hidrogênio no branqueamento de polpas kraft, vem crescendo nos últimos anos, com objetivo de reduzir o uso de compostos clorados no processo de branqueamento sem que ocorra perda dos níveis de alvura já atingidos.

Pode ser utilizado em várias áreas industriais, como no tratamento de efluentes para remoção de cor, no controle biológico de circuitos de água, no beneficiamento e branqueamento de fibras têxteis e, particularmente, no branqueamento de polpa celulósica. (PERÓXIDOS DO BRASIL, 2016)

O peróxido de hidrogênio reage com a lignina em meio ácido e alcalino. No meio ácido o cátion hidroxônio (HO⁺) é a espécie ativa do branqueamento. Este cátion quando gerado em maiores quantidades requer condições de extrema acidez, já que o peróxido de hidrogênio é um ácido fraco. Por isso é pouco utilizado em meio ácido para branqueamento de polpa celulósica (SUNDAMAN, 1988).

Para as condições alcalinas, onde o uso é maior, o peróxido de hidrogênio reage com o íon hidroxila (HO^-) para formar o ânion perhidroxila (HOO^-) (COLODETTE et al. 2015). Esse ânion é um nucleófilo forte e responsável, principalmente, pelo efeito alvejante no branqueamento com peróxido em condições alcalinas (SUSS et al., 1996).

Durante o branqueamento com peróxido em meio alcalino ocorrem reações com a lignina, que leva ao ganho da alvura da polpa e a decomposição do peróxido em água, oxigênio e ânion hidróxido (HO^-), afetando a qualidade da polpa (COLODETTE et al. 2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Todo o trabalho foi realizado no Laboratório de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa em Viçosa, Minas Gerais. A matéria-prima utilizada foi uma mistura de madeiras compostas pelo híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (*Eucalyptus urograndis*).

A madeira de *Eucalyptus urograndis* foi transformada em cavacos produzidos em picador laboratorial e posteriormente classificados e selecionados de acordo com norma Scan 40:94, removendo partes finas e grandes através da peneiração e observando visualmente a aparência e dimensão para os experimentos.

Os cavacos antes de serem armazenados em sacos plásticos para não sofrerem nenhuma avaria de fatores externos e internos foram secos ao ar em padiolas de alumínio e ao abrigo do sol, para que a umidade fique em torno dos 20% evitando que deteriore.

Antes dos cozimentos que são a base do trabalho, os cavacos foram moídos para realizar a caracterização química e física do eucalipto para obter referências do material.

3.2. Métodos

3.2.1. Análises químicas dos cavacos de Eucalipto

Uma pequena fração dos cavacos secos em temperatura ambiente foi processada em moinho laboratorial *Wiley*, transformados em serragens e depois classificados e peneirados em peneiras de 40 e 60 meshes de acordo com a norma TAPPI T257 cm-85 e climatizadas em sala com controle interno de umidade (50%) e temperatura (23°C). Foi determinado o teor de umidade da serragem, conforme norma TAPPI T264 om-88, antes de prosseguir com as análises.

A partir dessa amostra de serragem foi realizada a extração etanol/tolueno 1:2 de acordo com método TAPPI T264 cm-97 para realizar algumas das seguintes análises.

Teor de extrativos totais, lignina solúvel, insolúvel e total, cinzas, sílica, metais através do espectrofotômetro de absorção atômica, AAnalyst 200 da Perkin Elmer e análise elementar utilizando o equipamento TruSpec CHN Micro e dos módulos TruSpec Oxygen Add-On e TruSpec S, todos da marca LECO. Todos os experimentos foram realizados em duplicatas

Tabela 1: Parâmetros utilizados para análises químicas da madeira

Parâmetros	Procedimentos
Análise elementar*	TAPPI Test T266 om-94
Teor de extrativos totais	TAPPI T 264 cm-97
Teor de lignina insolúvel em ácido	GOLDSCHIMID (1971)
Teor de lignina solúvel em ácido	GOMIDE e DEMUNER (1986)
Teor de cinzas	TAPPI 211 om 85
Teor de sílica	TAPPI 211 om 85
Metais**	TAPPI T266 om-88

*Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio, Enxofre e Oxigênio.

** Cálcio, Cobre, Ferro, Magnésio, Manganês, Potássio e Sódio.

3.2.2 Análises físicas do Eucalipto

Outra parte da serragem foi utilizada para análise de poder calorífico (superior e inferior) de acordo com a norma ABNT NBR 8633/84, através da bomba calorimétrica adiabática modelo 6300 da PARR. Obtendo primeiro o

poder calorífico superior (PCS) em MJ/Kg e com a análise de Hidrogênio foi descontado no resultado do PCS para o cálculo do poder calorífico inferior (PCI).

Uma pequena parte de cavaco foi utilizada para a análise de densidade básica de acordo com a norma TAPPI T-258, onde uma porção da amostra colocada em rede de nylon foi submergida em água dentro de uma autoclave pressurizada por bomba de vácuo até que os cavacos fiquem saturados com a água e afundem na mesma. Posteriormente, os cavacos foram pesados em balança semi-analítica e através do peso feito pelo deslocamento da água obteve-se o cálculo da densidade.

Tabela 2: Parâmetros utilizados para análises físicas da madeira

Parâmetros	Procedimentos
Densidade básica	TAPPI T258
Poder calorífico Superior e Inferior	ABNT NBR 8633/84

3.3. Processo de Polpação

A madeira de eucalipto passou por dois processos de polpação, o kraft convencional e o cozimento com impregnação prolongada, onde esses processos consistem em separar ou individualizar as fibras através desses processos químicos, removendo e degradando a camada de lignina.

Foi avaliada a estratégia de polpação buscando obter polpas marrons com número Kappa fixados em 15, 19, 23 e 27 e álcali efetivo residual (AER) do licor negro na faixa de 6-8g/L.

Ambos os ensaios foram realizados em digestor rotacional da marca Regmed, dotada de quatro células de aço inox, com capacidade de 2 litros cada uma, aquecimento elétrico provida de manômetro, válvulas de segurança e de descarga. O uso das células individuais possibilitou a execução simultânea do cozimento de quatro amostras de 250 gramas de cavacos absolutamente secos (a.s.), em cada célula.

Assim que finalizado os cozimentos, o material deslignificado é descarregado em caixas de alumínio contendo no seu fundo uma tela de malha metálica de 400 *mesh*, onde foi submetido a uma lavagem com água à temperatura ambiente. Em seguida a polpa é depurada para caso houver rejeitos, os mesmos são separados em Becker de vidro e levado à estufa a

105°C±3 para retirar a umidade e determinar seu peso seco contabilizando no rendimento total produzido de polpa marrom.

A polpa após lavagem, desfibramento e depuração foi desaguada em uma centrífuga a uma consistência de aproximadamente 35% e armazenada em saco de polietileno.

A Tabela 3 apresenta as análises realizadas nas polpas resultantes dos cozimentos dos dois processos.

Tabela 3: Análises realizadas nas polpas resultantes dos cozimentos

Parâmetros	Procedimentos
Alvura	TAPPI T452 om-99
Número kappa	TAPPI T236 cm-85
Teor de ácidos hexenurônicos	TAPPI T282-pm-07
Viscosidade	TAPPI T230 cm-89

3.3.1. Processo de Polpação Convencional

Chamado neste trabalho de CC (cozimento convencional), foi realizado com o objetivo de obter resultados comparativos ao processo de polpação com impregnação. Na Tabela 4 estão descritas as condições do cozimento:

Tabela 4: Condições dos cozimentos convencionais

Parâmetros	Condições
Álcali efetivo, %	*Variável
Sulfidez, %	30
Relação Licor-madeira, L/Kg	4/1
Massa de cavacos, g a.s.	250
Tempo até temperatura, minutos	70
Tempo à temperatura, minutos	*Variável
Temperatura do cozimento, °C	165

* Carga de álcali e tempo à temperatura variáveis para atingir números kappa (15, 19, 23 e 27) e AEr pré-estabelecidos neste estudo.

Após atingir o número kappa desejado, foram analisados os licores coletados no final de cada cozimento, procedimentos detalhados no item 3.3.3.

3.3.2. Processo de Polpação com Impregnação Prolongada

O cozimento com impregnação prolongada ocorreu em duas etapas. Primeiro a fase de impregnação a 105°C durante 90 minutos, com relação licor/madeira em 6:1. Após o fim da impregnação uma fração do licor negro gerado foi extraído e acrescentado mais licor branco (NaOH + Na₂S) equivalente para a relação licor/madeira fique em 3:1. A segunda etapa do cozimento foi realizada com temperatura à 145°C variando o tempo e o AE conforme necessidade para chegar ao Kappa e AEr desejável. As condições utilizadas nas duas etapas do processo de polpação com impregnação prolongada estão descritas na Tabela 5:

Tabela 5: Condições das duas etapas para o processo de polpação com impregnação prolongada.

Fases	Parâmetros	Condições
Impregnação	Álcali efetivo, %	12
	Sulfidez, %	30
	Relação Licor-madeira, L/Kg	6/1
	Massa de cavacos, g a.s.	250
	Tempo até temperatura, minutos	40
	Tempo à temperatura, minutos	90
	Temperatura de impregnação, °C	105
Cozimento	Álcali efetivo, %	*Variável
	Sulfidez, %	30
	Relação Licor-madeira, L/Kg	3/1
	Massa de cavacos, g a.s.	250
	Tempo até temperatura, minutos	19
	Tempo à temperatura, minutos	*Variável
	Temperatura do cozimento, °C	145

* Carga de álcali e tempo à temperatura variáveis para atingir números kappa desejáveis deste estudo.

3.3.3. Parâmetros determinados no licor negro

Ao final de cada cozimento, tanto no convencional quanto na impregnação prolongada, uma parte do licor negro foi recolhido utilizando uma tela de 400 *mesh* para filtrar e evitar que fibras da madeira passem para o frasco

de polietileno de 50 mL utilizado para armazenar o líquido, podendo afetar no prosseguimento das análises. Posteriormente com o licor negro já resfriado foi feito a análise de pH e Álcali Efetivo Residual.

Outra parte do licor teve o seu teor de sólidos dissolvidos analisados por gravimetria, secos em estufa a $105^{\circ}\text{C}\pm 3$ e os teores de matéria orgânica e inorgânica presentes no material.

Foi realizada como base seca a constituição elementar (CHNSO) no equipamento TruSpec Micro CHN da Leco com Add On módulo O e módulo S e dos metais Na e K através do espectrofotômetro de absorção atômica, AAAnalyst 200 da Perkin Elmer para fechamento de balanço da análise química. Foi feito também a análise do teor de carbono orgânico total (TOC) no analisador TOC V-CPN da Shimadzu para fim comparativo do rendimento dos cozimentos e foi realizado o poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) para análise da eficiência energética através da bomba calorimétrica adiabática modelo 6300 da PARR. Na Tabela 6, estão descritos os procedimentos analíticos realizados nos licores negros.

Tabela 6: Procedimentos analíticos realizados nos licores negros

Parâmetros	Procedimentos
Análise elementar*	TAPPI Test T266 om-94
Metais**	TAPPI T266 om-88
pH do licor	TAPPI T285 cm-85
Poder calorífico superior e inferior	ABNT NBR 8633/84
Teor de Carbono Orgânico Total	SCAN-CM 45:00
Teor de matéria inorgânica	TAPPI T285 cm-85
Teor de matéria orgânica	TAPPI T285 cm-85
Teor de sólidos	TAPPI T285 cm-85

*Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio, Enxofre e Oxigênio.

** Sódio e potássio.

3.4. Branqueamento

Para a avaliação da branqueabilidade das polpas celulósicas obtidas na nesse estudo, foi utilizada a sequência de branqueamento $\text{OD}_{\text{HT}}(\text{EP})\text{D}$, para uma alvura 90% ISO (Tabela 7). Abaixo seguem as metodologias empregadas para o processo de branqueamento.

3.4.1. Pré-branqueamento das polpas de eucalipto

A etapa de pré-deslignificação com oxigênio, Pré-O₂, é realizada em um reator/misturador Mark V, fabricado pela Quantum Technologies, com amostras equivalentes a 250 g a.s. (absolutamente seca) de polpa. A polpa é aquecida no reator e fica em agitação constante. As cargas pré-estabelecidas de NaOH são injetadas elevando-se a pressão de reação com O₂ até o valor desejado. No final do processo de reação, extraídas amostras do licor residual, para análises de pH. Após esta etapa a polpa foi lavada com o equivalente a 9 m³ de água destilada, para simular a lavagem industrial.

As condições do estágio de deslignificação com oxigênio foram as mesmas para as oito amostras de polpa marrom produzidas neste trabalho. Tais condições estão apresentadas na Tabela 7.

3.4.2. Branqueamento com Dióxido de Cloro (D_{HT})

O branqueamento com dióxido de cloro foi efetuado em sacos de polietileno com amostras de 240 gramas de polpa absolutamente seca, nas condições apresentadas na Tabela 7. O licor de branqueamento, contendo ClO₂, H₂O e H₂SO₄, foi adicionado à polpa em temperatura ambiente. Após mistura manual em sacos de polietileno, o material foi colocado em um banho de vapor controlado por termostato, onde foi mantido pelo tempo preestabelecido.

Terminada a reação, foram extraídas amostras de licor residual para análises pertinentes e a polpa foi então lavada com água destilada, numa proporção de 9m³ de água por tonelada de polpa.

3.4.3. Extração alcalina com Peróxido de Hidrogênio (EP)

Etapa realizada com 240g de polpa absolutamente seca, efetuada em sacos de polietileno nas condições apresentadas na Tabela 7. Foi adicionado NaOH, H₂O₂ e H₂O. Após mistura manual em sacos de polietileno, o material foi colocado em um banho de vapor termo estatizado, onde permaneceu por 120 minutos. A polpa foi então lavada com água destilada equivalente a 9m³

/tonelada de polpa no final da reação e feita análise de pH na amostra de licor residual extraída.

3.4.4. Branqueamento com Dióxido de Cloro (D_{final})

Nesta etapa, a reação de branqueamento foi efetuada com dióxido de cloro em sacos de polietileno com amostras de 195g de polpa, absolutamente seca, nas condições apresentada na Tabela 7. À polpa foi adicionado o licor de cozimento contendo ClO_2 e H_2O , e posteriormente foi aquecido em banho de vapor a $80^\circ C$ durante 120 minutos. O requerimento de ClO_2 para controle do pH foi determinado em estudo prévio, com miniamostras de polpa (amostras de 5 gramas). A polpa foi então lavada com água destilada equivalente a $9m^3$ /tonelada de polpa no final da reação e foi extraída amostra do licor residual para análise de pH.

3.4.5. Parâmetros do branqueamento

Os parâmetros utilizados em cada estágio do branqueamento foram iguais para as polpas do processo convencional quanto para o processo com impregnação prolongada (Tabela 7).

Tabela 7: Parâmetros dos estágios de Pré-O₂ e do branqueamento

Parâmetros	Estágios			
	O	D _{HT}	(EP)	D
Consistência, %	12	12	12	12
Temperatura, °C	105	90	80	80
Tempo, min	90	120	120	120
Pressão, KPa	700	-	-	-
NaOH, %	2,2	-	1,0	-
H ₂ SO ₄	-	0,7	-	-
O ₂ , %	2,0	-	-	-
ClO ₂ , %	-	FK=0,26	-	*FK= 0,4;07;1;0
H ₂ O ₂	-	-	0,5	-

*Dosagem de ClO_2 variável conforme resultado atingido sem estrapolar alvura 90% ISO para cada polpa.

3.4.6. Procedimentos Analíticos do branqueamento

As polpas e os licores residuais do branqueamento foram analisados seguindo os procedimentos analíticos conforme descrito na Tabela 8.

Tabela 8: Análises realizadas nas polpas e efluentes do branqueamento

Parâmetros	Procedimentos
Alvura	TAPPI T452 om-99
Número de permanganato	CPPA G-17H
Número kappa	TAPPI T236 cm-85
Reversão de alvura	TAPPI UM200 (4h, 105°C, 0%UR, após acondicionamento das folhas por 4h em sala climatizada)
Teor de ácidos hexenurônicos	TAPPI T282-pm-07
Viscosidade	TAPPI T230 cm-89

3.4.7 Cálculo do ganho de alvura, eficiência e seletividade da deslignificação com oxigênio.

Os valores de ganho de alvura, eficiência de deslignificação e seletividade foram determinados através das Equações 1,2 e 3, respectivamente.

$$GA(\%) = Af - Ai$$

Onde:

GA = ganho de alvura, %ISO;

Ai = alvura inicial, %ISO; e

Af = alvura final, %ISO

$$E(\%) = \frac{(Ki - Kf)}{Ki} * 100$$

Onde:

E = eficiência de deslignificação, %

Ki = número Kappa inicial; e

Kf = número Kappa final

$$S = \frac{\Delta K}{\Delta V}$$

Onde:

S = seletividade;

ΔK = unidade removidas do número Kappa; e

ΔV = unidades removidas da viscosidade

3.5. Refino e formação de folhas

As polpas branqueadas a 90% ISO foram refinadas em moinho PFI. Foi pesada uma amostra de 30g de polpa a.s. e posteriormente essa amostra foi desagregada em desagregador.

Após ficar 5 minutos no desagregador, a polpa foi transferida para um recipiente que contém no seu fundo uma tela para fazer a drenagem utilizando uma bomba de vácuo.

A polpa foi retirada do recipiente e pesada até consistência de 10%, levada ao PFI e distribuída uniformemente na parede lateral do estator até a mesma ser totalmente coberta. Os números de revoluções utilizados variaram até alcançar um grau de resistência da polpa à drenagem, ou seja, o °SR (Schopper Riegler).

Depois de reinada, a polpa passou pelo desagregador por dois minutos e em seguida levado para um balde e adicionada água destilada até completar 15litros e levada para um homogeneizador.

Uma alíquota de 1000mL foi retirada e manteve-se a temperatura de 20°C para determinação do °SR de acordo com a norma TAPPI T248 cm-85).

Posteriormente foi determinada a consistência da suspensão de fibras presentes no homogeneizador de acordo com a norma TAPPI 205 om-81 para saber o volume necessário para confecção das folhas com gramatura de 60g/m² ou 1,2g.

Utilizou-se o formador de folhas para a formação de 11 folhas, cada uma com o mesmo volume da suspensão acrescido de água para distribuir uniformemente as fibras e depois foi feito o desaguamento. Retiraram-se com cuidado as fibras da tela utilizando folhas absorventes.

Depois do processo de formação das folhas, as mesmas, foram empilhadas e colocadas com uma chapa de inox e levadas para a prensa permanecendo por 5 minutos sobre pressão constante. Depois deste tempo trocaram-se as folhas absorventes e manteve por mais 2 minutos na prensa. Finalizado o tempo, as folhas absorventes foram retiradas, ficando apenas a folha com as fibras na chapa de inox, essas foram colocadas em um arco para secagem em sala climatizada durante 24 horas.

Após o período de secagem as folhas foram removidas do arco e das chapas de inox, e permaneceram penduradas num varal e mantidas na sala climatizada por tempo suficiente para a climatização, à temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de 50%.

3.6. Testes físico-mecânicos e óticos

Dentre as 11 folhas formadas, apenas as 5 melhores foram selecionadas, verificou se possuíam falhas na formação, espaços vazios, presença de impurezas.

Foram feitos primeiros os testes não destrutivos: gramatura, resistência à passagem do ar, espessuras e propriedades óticas.

Para determinação da gramatura, pesou-se as 5 folhas selecionadas e dividiu o valor por 5 e pela área da folha (0,0201 m²). O resultado foi expresso em g/m² de papel.

A resistência à passagem de ar foi realizada colocando a folha no porosímetro de Gurley, onde é medido o tempo necessário para 100cm³ de ar passar por uma área do papel.

A espessura foi determinada em aparelho analógico, unidade expressa em micrômetros, e medida para cada folha em 3 pontos diferentes e calculado a média das leituras, depois, foi feito a média das leituras das 5 folhas.

Os testes óticos foram realizados com duas folhas formadas com água destilada. Utilizou-se o equipamento Data Color 2000 para as leituras de dispersão de luz e opacidade.

Depois de feito os processos não destrutivos, as amostras foram preparadas para os testes destrutivos. Para cada folha foi retirada uma tira central para a realização dos testes de tração. As duas bordas foram utilizadas para o teste de rasgo e arrebentamento.

O índice de arrebentamento foi realizado no equipamento Mullen, onde uma força perpendicular em uma área do papel foi aplicada até causar o estouro.

O teste de rasgo foi realizado as quatro folhas ao mesmo tempo, dimensionada para uma largura de 62mm. Este teste foi feito no equipamento Elmendorf, totalizando 5 testes no grupo de folhas.

A parte central das folhas foi levada para o equipamento Instron modelo 4204. Cada amostra é colocada esticada nas garras do equipamento e é informado para o equipamento através do software específico a espessura e a gramatura média das folhas para o cálculo final. O equipamento traciona a amostra até ocorrer a ruptura. Para cada leitura obteve os resultados para índice de tração (N.m/g), alongamento (%), energia de deformação e o módulo de elasticidade (MN.m/Kg). Todos estes testes estão de acordo com a norma Tappi T494 om-88.

Tabela 9: Análises realizadas nas polpas branqueadas para refino, formação de folhas, testes físicos e óticos.

Parâmetros	Procedimentos
Grau de Schopper Riegler	TAPPI T248 cm-85
Formação das folhas	TAPPI T205 om-81
Gramatura	TAPPI T410 om-93
Espessura de folhas de papéis	TAPPI T411 om-97
Testes físicos de papéis	TAPPI T220 sp-96
Opacidade e coeficiente de dispersão de luz	TAPPI T519 om-96
Resistencia à passagem de ar	TAPPI T536 om-96
Resistencia ao rasgo	TAPPI T414 om-98
Resistencia à tração	TAPPI T494 om-98
Resistencia ao arrebentamento	TAPPI T403 om-97

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização do *Eucalyptus urograndis*

A relação entre a composição química da madeira e sua processabilidade tem sido bastante estudada no caso da utilização da mesma para a produção de polpa celulósica. Rowell (1990) refere que só conhecendo as características dos componentes da madeira e do papel que cada um exerce nas suas propriedades, é possível dar à madeira a utilização mais conveniente explorando todo o seu potencial. A Tabela 10 apresenta todas as características químicas e físicas estudadas neste trabalho para a amostra de eucalipto.

A madeira é basicamente uma substância orgânica composta na sua maioria por carbono, hidrogênio e oxigênio. Estudos feitos por Colodette et al. (2005), demonstram que para análise elementar, C, H, N, O, da madeira ficam

na média respectivamente em 48,4%, 6,1%, 0,21%, 45,0%. Os teores de cinzas (0,21%) e sílica (0,07%), tiveram valores próximos encontrado por Freddo et al. (1999) e Colodette et al (2005). Também em estudos realizado por Pascoal Neto et al. (2004 e 2005), para híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, encontrou-se teores de extrativos e lignina total nos valores de 1,9% e 27,9% respectivamente, bem próximos ao deste estudo.

O conteúdo de minerais (ou metais) presentes na madeira é prejudicial para a sua utilização na indústria de celulose e papel, uma vez que causam problemas na polpa, tais como sujidade, corrosão e depósitos em equipamentos (FREDDO et al 1999). O conteúdo de minerais encontrados nesse trabalho foi da ordem de 0,21% de sua composição. De acordo com Colodette et al. (2005), estes valores estão dentro da faixa esperada para clones de eucalipto tidos como ideias para a produção de polpa celulósica.

Assim como o conteúdo de minerais da madeira, o seu conteúdo de extrativos também é indesejável para a produção de polpa celulósica. Estes componentes dificultam a operacionalidade da fábrica devido a incrustações, reações de saponificações que geram espumas nos sistemas, incrustações em equipamentos e tubulações (SARTO et al. 2010). Ainda vale destacar que podem ocorrer depósitos desses componentes sobre a polpa celulósica, formando o que se denomina de “*pitch*”, o que é indesejável, pois promove decréscimo da qualidade da polpa e necessidade do uso de compostos anti-*pitch* na mesma (SILVERIO 2008). Na Tabela 10 são apresentados os resultados de extrativos a partir da extração em solventes isolados. Compostos da madeira extraíveis em diclorometano e acetona são em geral oriundos de ceras, gorduras, resinas, fitoesteróis e de hidrocarbonetos não voláteis. Porém, vale destacar que a acetona é mais polar e miscível em água que o diclorometano, por isso, a quantidade compostos extraíveis em acetona, pode ser maior que os valores encontrados para diclorometano.

No que diz respeito ao conteúdo de lignina, é desejável que este seja o menor possível para a produção de polpa celulósica (GOMES 2010). Quanto ao conteúdo de lignina observado no mix de madeiras avaliado nesse estudo, observou-se conteúdos de lignina solúvel (24,5%) e insolúvel (4,5%) dentro da faixa considerada como aceitável para a adoção de clones visando-se a produção de polpa celulósica (COLODETTE et al. 2010). O poder calorífico é a

quantidade de calor liberada pela combustão completa da unidade de massa (ou volume) do combustível (QUIRINO, 2005). Essa quantidade de calor depende da composição da biomassa. O poder calorífico superior (PCS) ocorre quando a combustão se efetua a volume constante e a água formada na combustão é condensada, já o poder calorífico inferior (PCI) é resultante da combustão sob pressão constante, ao ar livre, sem a condensação da água formada e desse modo, seu valor é menor que a PCS (SANTOS, 2012). Estudos feitos por Carvalho (2003) chegou ao PCS para o *Eucalyptus urograndis* no valor de 18,9 MJ/Kg, valor próximo alcançado neste trabalho, 19,3 MJ/Kg.

A densidade básica é um parâmetro de importância na produção de polpa celulósica, pois a mesma está relacionada às propriedades físicas, mecânicas e anatômicas da madeira. De acordo com Queiroz et al. (2004), uma avaliação adequada da densidade básica fornece indicações precisas sobre a impregnação dos cavacos e rendimento do processo, associada as características de qualidade e de resistências físico-mecânicas da polpa. Gomes (2013) obteve resultados de densidade próximos ao deste trabalho, 518 Kg/m³ para madeira de *Eucalyptus urograndis*.

Tabela 10: Resultados médios das análises químicas e físicas do eucalipto

Parâmetros	Amostra
	<i>Eucalyptus urograndis</i>
Carbono, %	51,5
Hidrogênio, %	5,3
Nitrogênio, %	0,1
Enxofre, %	2,3
Oxigênio, %	40,6
Cinzas, %	0,21
Sílica, %	0,07
Cálcio, mg/Kg	281,3
Cobre, mg/Kg	2,4
Ferro, mg/Kg	11,2
Magnésio, mg/Kg	106,2
Manganês, mg/Kg	10,6
Sódio, mg/Kg	580,3
Potássio, mg/Kg	375,0
Extrativos em acetona, %	1,3
Extrativos em DCM, %	0,5
Lignina Solúvel, %	24,5
Lignina Insolúvel, %	4,5
Lignina Total, %	29,0
PCS, MJ/Kg	19,3
PCI, MJ/Kg	18,2
Densidade, Kg/m ³	528

4.2. Polpação

A conversão da madeira em polpa celulósica por processos alcalinos pode ser influenciada por diversos parâmetros do processo, como, por exemplo, carga de álcali e sua distribuição, uso de aditivos, tais como surfactantes (GOMIDE et al, 1999). Atualmente, o processo Kraft é o processo mais utilizado para converter biomassas lignocelulósicas em polpa celulósica (GULLICHSEN 2009). Há muitas variações e diferentes tecnologias sendo utilizadas no processo Kraft com o intuito de aumentar a sua eficiência e seletividade (KIKUT, 2005).

Um dos parâmetros de grande importância para se alcançar esses ganhos é a homogeneidade das reações que ocorrem dentro do digestor. Por isso, tecnologias vêm sendo investigadas para aumentar a eficiência da etapa de impregnação, a fim de que ao iniciar as reações o licor de cozimento esteja uniformemente distribuído na biomassa. Para esse estudo, foram produzidas 8 amostras de polpa marrom, sendo 4 resultantes do cozimento convencional e 4 resultantes do cozimento com impregnação prolongada os quais foram produzidas para os números Kappa 15,19, 23 e 27 (Tabela 11).

Para uma comparação efetiva das tecnologias de polpação, estudos tem demonstrado que os processos devem ser comparados a um mesmo número kappa, e também em uma mesma faixa de álcali efetivo residual, uma vez que este afeta a precipitação de carboidratos e lignina no processo (FOELKEL, 2009).

Nesse estudo, além do número kappa o AEr também foi fixado. Para atingir essas restrições do processo se fez necessário o uso de diferentes valores de carga alcalina e de fator H (Tabela 11). No que diz respeito aos processos tecnológicos estudados, foi possível observar que o fator H, utilizado no cozimento com impregnação é inferior ao utilizado no processo convencional. Este é um parâmetro de interesse para a produção de polpa celulósica, pois esta relação interfere na qualidade e rendimento da polpa produzida, ou seja, deve-se buscar fator H menor possível sem que comprometa as propriedades da polpa durante a deslignificação (GOMIDE et al. 2007). Outros autores também conseguiram obter a redução do fator H em seus estudos ao comparar a polpação convencional com a modificada, por exemplo, Vasconcelos (2005)

obteve redução de 35% do fator H para o processo de polpação modificado SuperBatch™ comparado ao convencional.

Outro parâmetro de grande importância para as indústrias produtoras de polpa celulósica é o rendimento do processo. O rendimento é determinado pela relação percentual do peso de polpa celulósica obtida em relação ao volume de madeira utilizado. Este pode ser analisado em termos de rendimento depurado (contempla somente fibras individualizadas), ou em termos de rendimento total (inclui fibras individualizadas e rejeitos). Para indústrias que utilizam baixo número kappa (menor que 50), o rendimento a ser considerado é o rendimento depurado, pois os rejeitos terão de ser descartados ou reprocessados no digestor (GOMIDE et al. 2007).

A análise dos rendimentos das polpas obtidas pelos dois processos avaliados nesse estudo mostrou que o processo convencional apresentou maiores valores de rendimento total para o Kappa 27, isto devido ao maior teor de rejeitos dessas polpas. Porém, quando se faz a análise em termos de rendimento depurado, o processo EIC mostrou as melhores performances, sendo que não foram observados teores de rejeitos no processo. Esses resultados podem ser atribuídos às características do cozimento com impregnação prolongada, o qual permanece por um maior período de tempo em cozimento, e com temperaturas mais suaves se comparado com o cozimento convencional, resultando assim em baixo teor de rejeito após a depuração. Ainda no que diz respeito aos processos de polpação, os valores de rendimentos depurados encontrados nesse estudo estão dentro da faixa esperada para o processo kraft (GOMIDE et al. 2005).

Quanto ao pH dos licores, este deve ser monitorado em todo o processo, pois este afeta a precipitação da lignina sobre a polpa celulósica (ALMEIDA 2010). Nesse estudo, os valores observados de pH estão na faixa de 12,8 a 13,2 para os processos convencional e EIC (Tabela 11). Segundo Gomes et al. (2001), em condições normais de cozimento, a lignina precipita-se a partir de pH 11,0 sendo mais pronunciado a partir de pH 9,5.

Tabela 11: Resultados da polpação Convencional e Impregnação Prolongada

Condições Kappa	Tempo à temp., Min.	Fator H	AE, c/ NaO H % *	AE, c/ NaO H %	Kappa	Rendimentos, %			Licor Negro	
						Depurado	Rejeitos	Total	pH	AEr , g/L
CC										
15	89	793	-	18	14,9	51,5	0,0	51,5	13,2	6,5
19	47	521	-	17	19,1	52,5	0,5	53,0	13,2	7,3
23	34	374	-	17	22,8	53,0	1,1	54,1	13,2	8,2
27	30	322	-	16	27,3	53,6	1,5	55,1	13,2	7,1
EIC										
15	390	683	12	8,5	15,2	52,5	0,0	52,5	12,9	7,6
19	240	422	12	7,0	19,2	53,5	0,0	53,5	12,8	6,4
23	200	353	12	6,5	22,7	54,0	0,0	54,0	12,8	6,1
27	172	304	12	6,5	26,8	54,5	0,0	54,5	12,8	6,7

4.3. Análise dos Licores Negros da Polpação

Uma das razões para o sucesso do processo Kraft, o qual é o processo dominante para a produção de polpa celulósica em todo o mundo, é o ciclo de recuperação química, que promove a recuperação de químicos utilizados (NaOH e Na₂S), bem como a cogeração de energia para o processo (SMOOK, 1994). O licor negro é um subproduto resultante do processo de conversão da madeira em polpa celulósica, contendo parte orgânica e inorgânica desta que foram solubilizadas no licor. O teor de sólidos traz uma referência a quantidade de matéria que será destinada à caldeira de recuperação. A queima da fração orgânica presente no licor é responsável pela geração da energia. De acordo com WEHR (1991), as causas da geração de sólidos são os cavacos muito finos, baixos rendimentos e elevado consumo de reagentes químicos para o cozimento na forma de álcali. O estudo do licor negro é também importante, pois permite obter características do cozimento que podem promover alterações na carga alcalina e no fator H, para então obter o grau de deslignificação necessário para garantir uma polpa celulósica de qualidade (Costa, 2011).

A Tabela 12 apresenta os resultados das análises químicas e físicas dos licores do cozimento convencional (CC) e do cozimento com impregnação prolongada (EIC). Observa-se que o poder calorífico dos licores oriundos dos cozimentos com impregnação tiveram valores maiores, isso ocorreu devido a maior presença de matéria orgânica no licor, que também pode ser visto pelo aumento na quantidade de carbono e diminuição da quantidade de sódio ou

seja, menor teor de matéria inorgânica. Ainda no que diz respeito ao conteúdo de matéria orgânica encontrado no processo EIC, pode se inferir que houve aumento do conteúdo de lignina e diminuição do conteúdo de carboidratos, o que favoreceu o poder calorífico do mesmo (CARDOSO, 2006). Esse fato pode ser comprovado pelo maior rendimento depurado do processo EIC (Tabela 11), o que implica em menor degradação dos carboidratos. Cardoso et al (2006) obteve em seus resultados valores próximos para licores kappa 17 de madeiras de eucalipto de folhosas. A relação material orgânico/inorgânico citada na literatura ficou um pouco acima deste estudo, variando entre 1,5% e 2,5%.

Quimicamente o licor negro é uma mistura de elementos químicos (C, H, N, S, O, Na, K e Cl) os quais são apresentados na Tabela 12. Potássio e cloreto são particularmente importantes no processo, pois estes estão relacionados com processo de impregnação (CARDOSO, 2006). Os valores de potássio e cloreto observados estão próximos entre os processos, exceto para o conteúdo de cloreto do tratamento CC kappa 15, o qual apresentou o menor valor de cloreto. Os conteúdos de H, N, S, O e Na apresentam valores próximos entre os processos.

Tabela 12: Resultados das análises químicas e físicas dos licores negros

Parâmetros	CC				EIC			
	15	19	23	27	15	19	23	27
Carbono, %	39,0	39,3	39,2	40,2	42,2	42,1	42,2	42,3
Hidrogênio, %	3,7	3,7	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0	4,0
Nitrogênio, %	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
Enxofre, %	5,3	5,0	4,9	4,9	4,4	4,5	4,3	4,1
Oxigênio, %	32,8	32,6	32,8	32,3	31,2	31,5	31,5	31,3
Sódio, %	17,9	17,6	17,5	16,9	16,2	16,1	16,4	16,2
Potássio, %	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	0,9	0,8	1,1
Cloreto, %	0,3	0,8	0,7	0,6	0,9	0,7	0,7	0,8
Orgânicos, %	52,9	55,7	56,0	58,4	56,9	57,7	58,3	59,3
Inorgânicos, %	47,1	44,3	44,0	41,6	43,1	42,3	41,7	40,7
Sólidos Totais, %	16,0	15,2	15,0	14,4	16,2	15,6	15,2	15,0
PCS, MJ/Kg	15,4	15,5	15,8	16,1	16,7	16,6	16,6	16,7
PCI, MJ/Kg	14,6	14,8	15,0	15,3	15,9	15,7	15,8	15,8

Queiroz et al. (2004) alcançou valores de sólidos totais de 14,6 e 15,1 %, resultados próximos encontrados neste trabalho para kappa semelhante, com

clones de *E. urograndis* aplicando diferentes cargas de álcali no cozimento kraft para obterem polpas com número kappa 18.

4.4. Deslignificação com oxigênio

As polpas celulósicas obtidas pelos dois processos de polpação foram submetidas a deslignificação com oxigênio (Pre-O₂). Na Tabela 13 são apresentados os resultados da Pre-O₂. A avaliação do desempenho da Pre-O₂ foi avaliado em função da eficiência e ganho de alvura (Figuras 1 e 2).

Foi observado que a eficiência da Pre-O₂ decresceu com o aumento do número kappa. Esse fato pode ser atribuído ao decréscimo de grupos fenóis livres na lignina. A eficiência da deslignificação e ganho de alvura das polpas obtidas pelo processo CC mostrou tendências de ser superior às polpas obtidas pelo processo EIC. Esse resultado pode ser explicado pelo menor conteúdo de HexA nas polpas obtidas pelo processo CC. Tem sido descrito na literatura que polpas celulósicas com menor conteúdo de HexA tendem a apresentar melhor performance na deslignificação com oxigênio (COLODETTE et al 2015). Esse fato pode ser atribuído ao fato de que apenas pequenas quantidades de HexA são removidos durante a Pre-O₂ (Tabela 13). Os ácidos hexenurônicos (HexA) são produtos da conversão do ácido 4-O-meiglicurônico presente nas xilanas da madeira, durante a polpação kraft (GOMES, 2009), e o fato da Pré-O₂ não possuir como característica a remoção de HexAs, tem sido documentada na literatura (COLODETTE et al 2015).

Tabela 13: Resultados do número kappa, alvura, viscosidade e HexA das polpas marrom e Pré-O₂

Polpas	Número Kappa		Alvura, %ISO		Viscosidade, dm ³ /Kg		HexA, mmol/Kg	
	Polpa Marrom	Pré-O ₂	Polpa Marrom	Pré-O ₂	Polpa Marrom	Pré-O ₂	Polpa Marrom	Pré-O ₂
15	14,9	8,6	34,8	53,3	1159	728	71,8	71,5
19	19,1	10,6	33,4	53,0	1210	918	70,5	70,0
23	22,8	13,0	32,9	45,4	1334	977	68,3	67,3
27	27,3	16,3	32,0	39,4	1342	1060	64,6	63,8
EIC								
15	15,2	9,0	37,9	53,1	1204	766	82,6	81,2
19	19,2	11,4	37,0	52,4	1243	884	82,3	81,9
23	22,7	13,4	35,2	49,8	1345	925	75,3	74,8
27	26,8	16,6	34,4	41,9	1360	1050	70,5	70,1

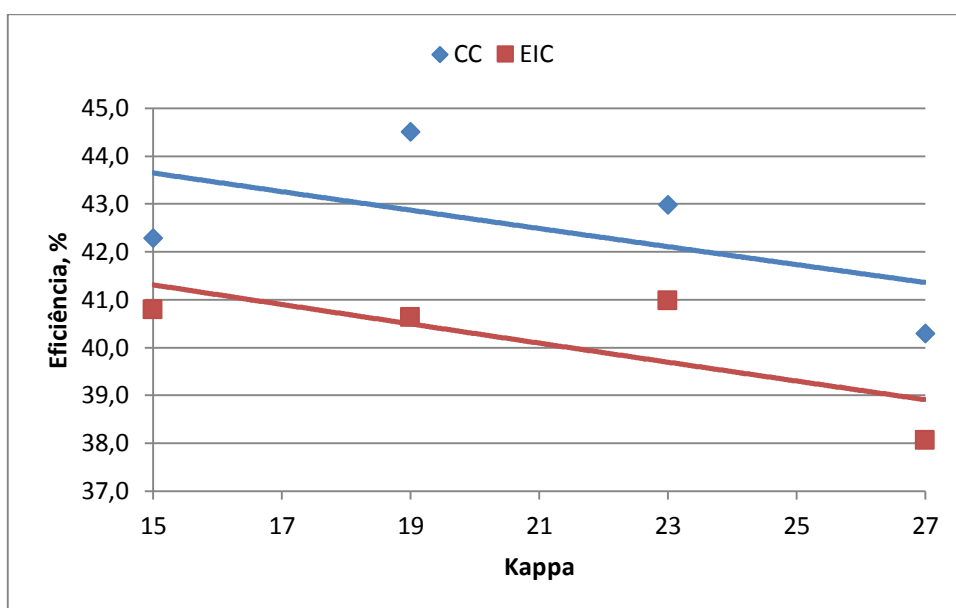


Figura 1: Eficiência da Pré-O₂ nas polpas celulósicas em relação aos Kappas dos processos CC e EIC.

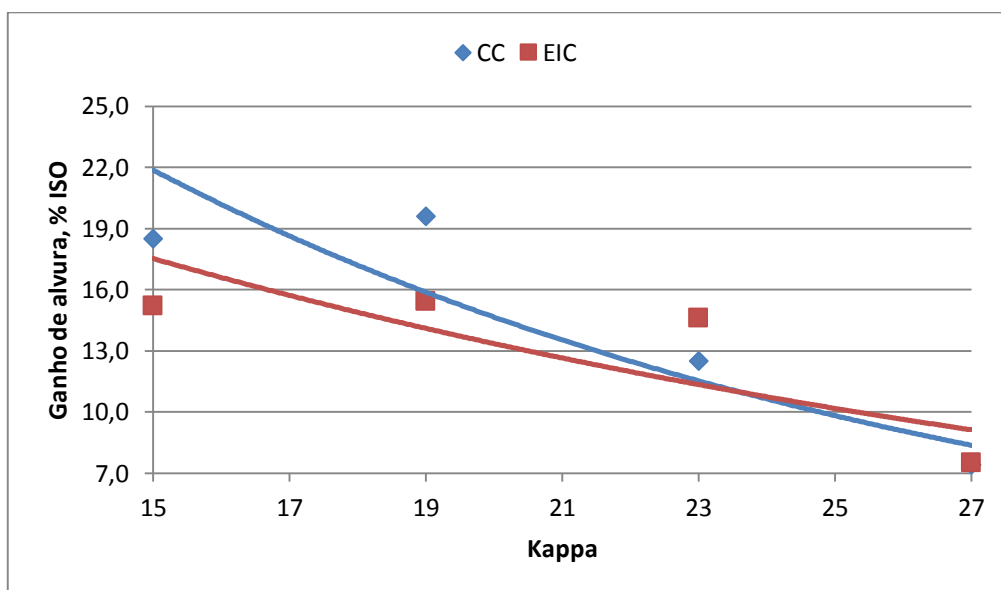


Figura 2: Ganho de alvura das polpas celulósicas obtidas na Pré-O₂ em relação aos Kappas dos processos CC e EIC.

Outro parâmetro importante é a seletividade do processo, que correlaciona remoção de kappa *versus* a perda de viscosidade (Figura 3). Devido a maior remoção de lignina nas polpas celulósicas obtidas pelo processo CC, essas também apresentaram tendências de apresentar melhores seletividades.

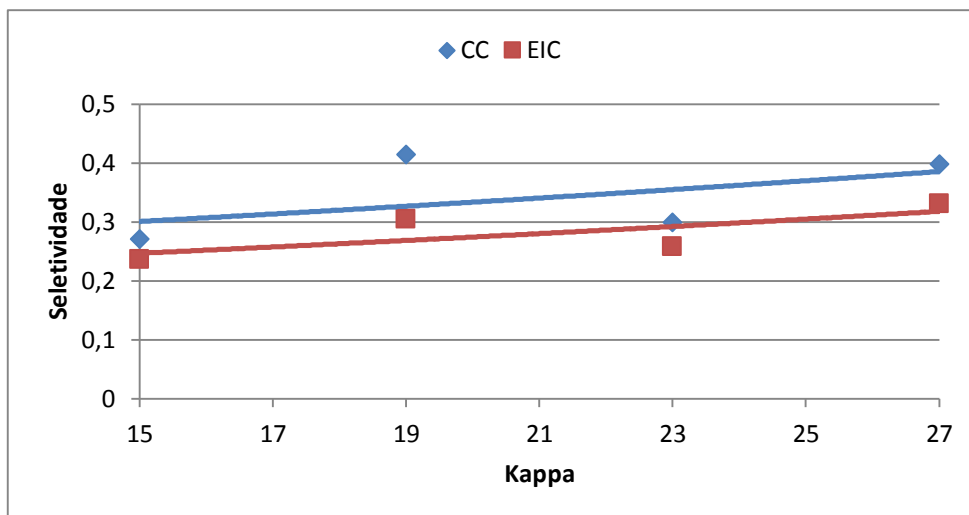


Figura 3: Seletividade das polpas celulósicas obtidas na Pré-O₂ em relação aos Kappas dos processos CC e EIC.

4.5. Branqueamento

Nesse estudo, as polpas obtidas pelos processos CC e EIC foram branqueadas por meio da sequência OD_{HT}(EP)D para uma alvura ISO 90% conforme descrito na metodologia. Para a análise da performance dos processos avaliados em relação ao branqueamento, foi realizado a mensuração de branqueabilidade das polpas (Figura 4), a qual pode ser definida como a relação entre a remoção de kappa *versus* o consumo de cloro ativo total (CAT) para alcançar a alvura desejada (Figura 5). O consumo de CAT foi mensurado de acordo com a equação 4, onde os fatores 2,63 e 2,09 são oriundos da conversão de ClO₂ e H₂O₂ em Cl₂ baseados em seus equivalentes de oxidação.

$$\text{CAT} = [(\text{ClO}_2 \times 2,63) + (\text{H}_2\text{O}_2 \times 2,09)]$$

Onde:

CAT = consumo de cloro ativo total

ClO₂ = carga total de dióxido de cloro gasto nas etapas do branqueamento

H₂O₂ = carga total de peróxido de hidrogênio gasto nas etapas do branqueamento.

Foi possível observar que as polpas celulósicas obtidas pelo processo EIC mostraram tendências de menores consumos de CAT e melhores branqueabilidades quando comparadas às polpas obtidas pelo processo CC,

para todos os níveis de número kappa avaliados. Esse resultado pode ser atribuído ao maior conteúdo de HexA dessas polpas, os quais são contabilizados no conteúdo de número kappa, e tendem a ser removidos grandemente no estágio D_{Ht} , sem impactar a demanda de ClO_2 desse estágio (RABELO et al, 2009).

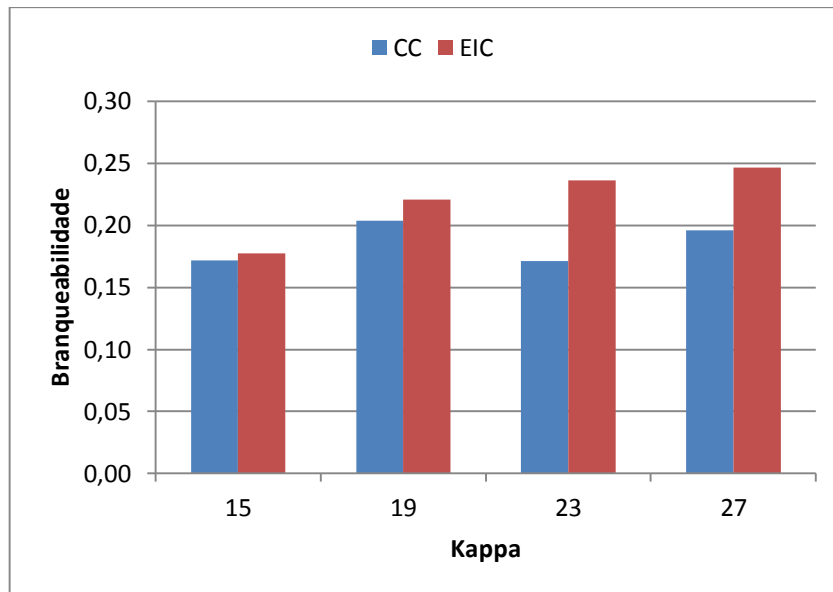


Figura 4: Branqueabilidade das polpas celulósicas obtidas pelo processo de polpação CC e EIC e branqueadas pela sequencia D(EP)D para uma alvura 90%ISO.

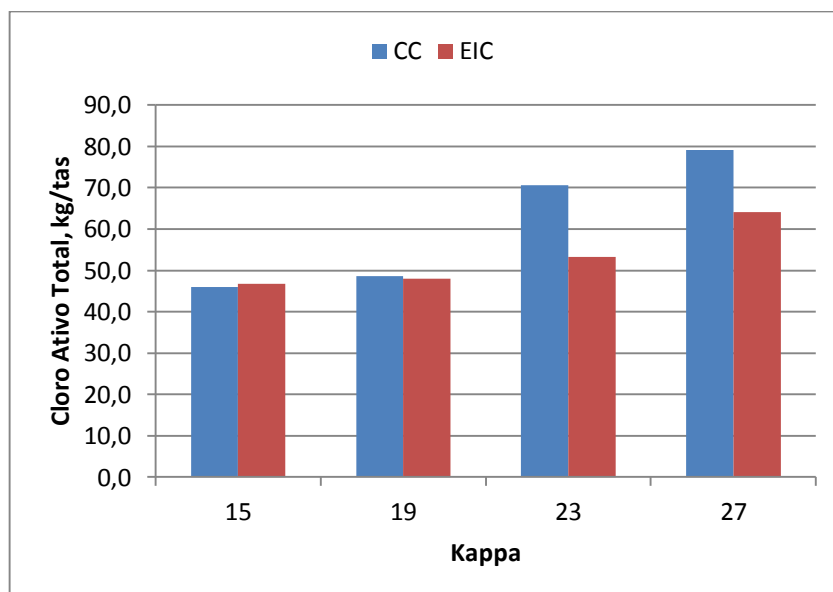


Figura 5: Cloro Ativo Total das polpas celulósicas obtidas pelo processo de polpação CC e EIC e branqueadas pela sequencia D(EP)D para uma alvura 90%ISO.

Outro parâmetro relevante para a indústria de celulose e papel é a estabilidade de alvura. Nesse estudo, a estabilidade de alvura foi mensurada em termos do número de cor posterior, conforme descrito na metodologia (Figura 6). Foi possível observar que as polpas obtidas pelo processo EIC mostraram tendências em apresentar melhores estabilidades de alvura, reflexo de sua melhor branqueabilidade.

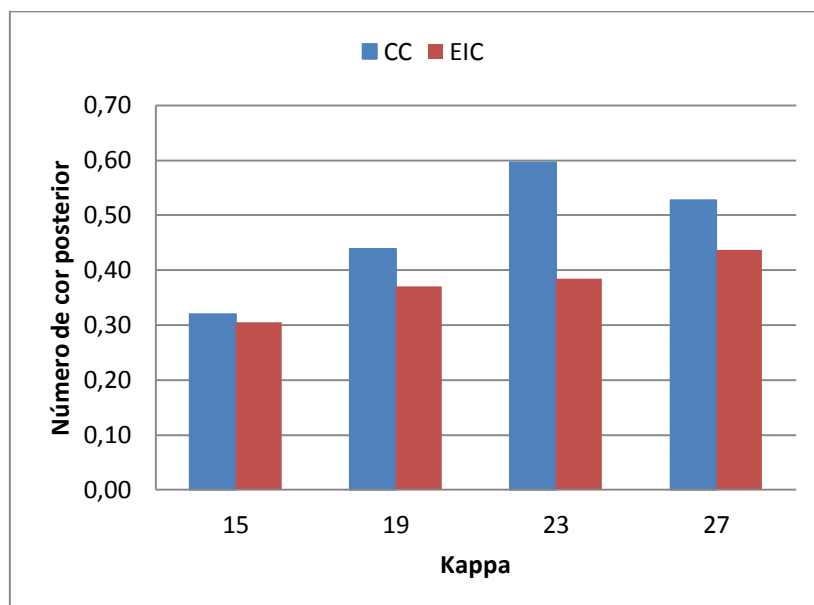


Figura 6: Número de cor posterior das polpas celulósicas obtidas pelo processo de polpação CC e EIC e branqueadas pela sequencia D(EP)D para uma alvura 90%ISO.

A Figura 7 mostra os resultados de viscosidade da polpa celulósica branqueada a 90% ISO de alvura. A viscosidade é uma forma indireta de mensurar o grau de degradação das cadeias de carboidratos, sendo que quanto maior o valor de viscosidade, maior tende a ser o tamanho médio das cadeias de carboidratos presentes na polpa (ALENCAR, 2002). Foi possível observar que as polpas obtidas pelo processo CC apresentaram tendências de maiores valores de viscosidade, exceto para as polpas obtidas em kappa 15. Essa tendência pode estar relacionada à maior preservação de hemiceluloses no processo EIC, o que colaborou para o incremento de rendimento da polpação, mas reduz os valores de viscosidade, uma vez que as hemiceluloses possuem menor grau de polimerização que a celulose (GOMES e ALVES. 2015).

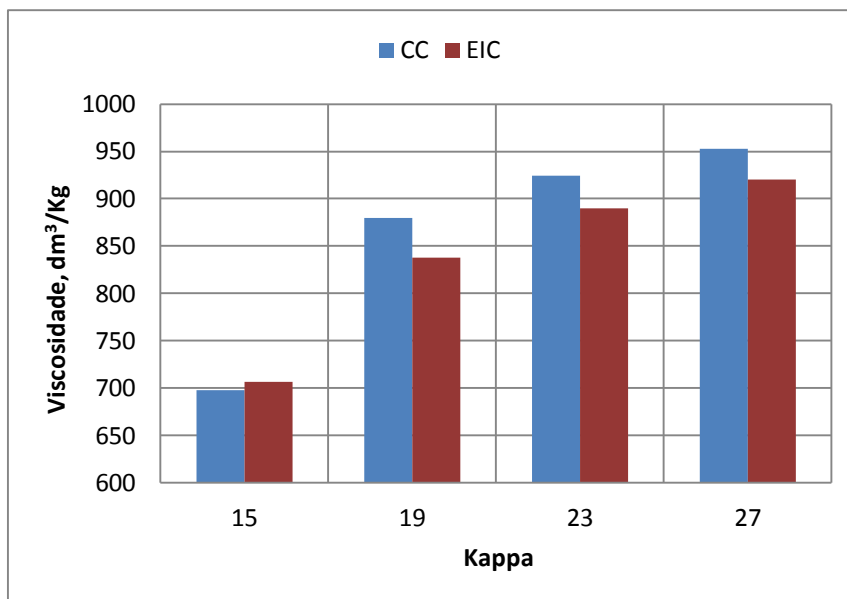


Figura 7: Viscosidade das polpas celulósicas obtidas pelo processo de polpação CC e EIC e branqueadas pela sequência D(EP)D para uma alvura 90%ISO.

4.6. Cálculo do rendimento da polpação por TOC

Como já mencionado anteriormente, um dos parâmetros de grande relevância para a indústria de polpa celulósica é o rendimento do processo. Em estudos de laboratório, o rendimento é mensurado de forma fácil por gravimetria. Contudo, em uma planta industrial medir o rendimento do processo não é uma tarefa fácil, tendo em vista os volumes de polpa celulósica que são produzidos diariamente.

No intuito de auxiliar na predição do rendimento do processo, esse estudo visou correlacionar parâmetros de fácil mensuração do licor negro oriundo da polpação com o rendimento gravimétrico medido em laboratório. Os parâmetros medidos no licor negro para investigação da correlação com o rendimento do processo foram: (1) o teor carbono orgânico total; (2) teor de sólidos orgânicos; e (3) teor de sólidos totais. Estes parâmetros foram escolhidos por se correlacionarem diretamente com o material solubilizado da madeira no licor de cozimento, os quais são reconhecidos por se correlacionarem com o rendimento do processo de polpação (CARREÑO, 2011 e GOMES, 2012).

Observou-se que nos processos CC e EIC, os teores de carbono orgânico total (TOC) e sólidos totais no licor negro decresceram e o teor de sólidos orgânicos no licor negro elevou à medida que o rendimento depurado aumentou (Tabela 14). Esse resultado pode ser atribuído a menor solubilização dos

componentes da madeira durante a etapa de polpação (CARREÑO, 2011). Quanto a viabilidade de estimação dos rendimento pelos parâmetros avaliados, foi possível observar pela correlação dos dados que os três métodos propostos se correlacionam com rendimento depurado do processo de polpação (TABELA 15). Vale ainda destacar que o TOC apresentou os mais altos valores de correlação, indicando ser uma variável de importância para monitorar o rendimento fabril de uma indústria de polpa celulósica.

Tabela 14: Relação entre rendimento da polpação dos processos CC e EIC e teor de carbono orgânico total dos licores negros dos cozimentos

Condições Kappa	Rendimento Total, %	TOC, Kg/Tas	Sólidos orgânicos, %	Sólidos totais, %
CC				
15	51,5	149,6	52,9	16,0
18	53,0	134,9	55,7	15,2
23	54,1	130,4	56,6	15,0
27	55,1	122,5	58,4	14,4
IEC				
15	52,5	116,3	56,9	16,2
19	53,5	113,3	57,7	15,6
23	54,0	106,1	58,3	15,2
27	54,5	103,9	59,3	15,0

Tabela 15: Equações para cálculos da correlação entre rendimento observado (RO%) na polpação, carbono orgânico total (TOC%), sólidos orgânicos (SO%), sólidos totais (ST%) dos licores negros da polpação CC e EIC.

Correlação	Processos			
	CC		EIC	
	Equação	R ²	Equação	R ²
RO versus TOC	$y = -0,134x + 71,426$	0,9767	$y = 0,1389x + 68,889$	0,9950
RO versus SO	$y = 0,6667x + 16,158$	0,9812	$y = 0,8225x + 5,8803$	0,9494
RO versus ST	$y = -2,3015x + 88,293$	0,9708	$y = -1,6071x + 78,536$	0,9918

Na Tabela 16 são apresentados os resultados entre o rendimento depurado observado nesse estudo, e o rendimento estimado, o qual foi obtido

através das equações obtidas pelo estudo de correlação (Tabela 15). Pode-se observar que os resultados ficaram próximos entre os métodos realizados.

Tabela 16: Rendimento observado (RO%), carbono orgânico total (TOC%), Sólidos Orgânicos (SO%), Sólidos Totais (ST%) dos licores negros da polpação CC e EIC e correlação entre RO versus TOC, RO versus SO e RO versus ST.

Processo	Kappa	RO, %	Rendimento esperado		
			TOC, %	SO, %	ST, %
CC	15	51,5	51,4	51,4	51,5
	19	53,0	53,3	53,3	53,3
	23	54,1	54,0	53,9	53,8
	27	55,1	55,0	55,1	55,2
EIC	15	52,5	52,7	52,7	52,5
	19	53,5	53,2	53,3	53,5
	23	54,0	54,2	53,8	54,1
	27	54,5	54,5	54,7	54,4

4.7. Propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas

As propriedades físico-mecânicas foram avaliadas para as polpas K19CC, K19EIC e K23EIC, todas branqueadas pela sequência D(EP)D para uma alvura 90%ISO, as duas primeiras por apresentarem melhor resultado de CAT e a terceira para ter mais um ponto de referência. Para discussão dos dados serão apresentados gráficos das propriedades realizadas em relação a quatro níveis de refino previamente estabelecidos de acordo com a metodologia proposta (0, 500, 1500 e 3000 revoluções).

4.7.1. Refinabilidade

O parâmetro de refinabilidade pode ser definido como sendo a energia (MW.h) necessária para se alcançar um determinado grau de resistência da polpa à drenagem. De acordo com MOREIRA (2007), o refino é um processo que consome grande quantidade de energia, sendo um parâmetro importante na composição do custo de fabricação de papéis que necessitam ser refinados.

Foi possível observar pelos resultados de consumo de energia e grau Schopper Riegler (°SR) em relação à intensidade de refinamento para as polpas

avaliadas que não houve tendências de variações da refinabilidade das polpas oriundas dos tratamentos aos quais elas foram submetidas (Figuras 8 e 9).

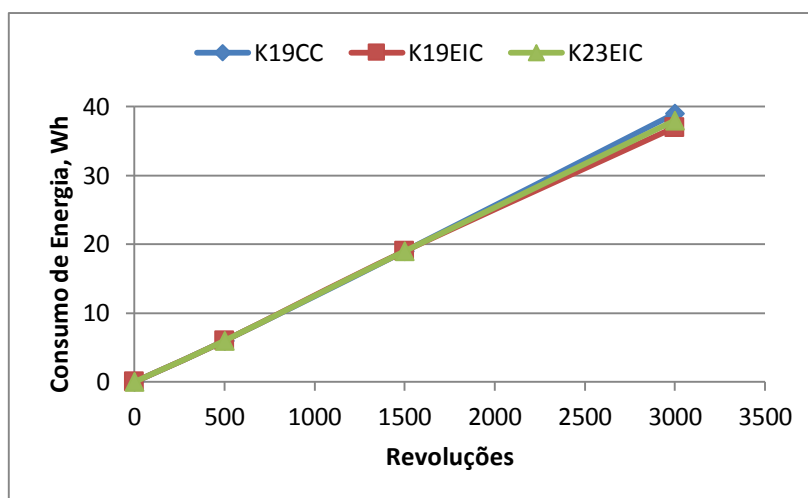


Figura 8: Consumo de Energia (Wh) das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.

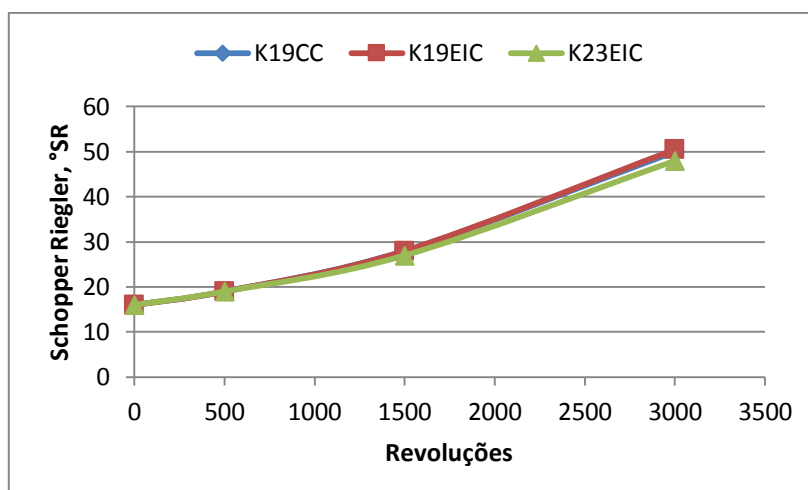


Figura 9: Grau Schopper Riegler das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.

4.7.2. Índice de Arrebentamento

O índice de arrebentamento ou estouro é definido como a força necessária para promover o arrebentamento de uma folha de papel, ao se aplicar uma pressão uniformemente crescente por um diafragma elástico de área circular igual a 962mm² (TAPPI T403 om-97). O teste é realizado em um equipamento tipo Mullen e está altamente relacionado com a resistência à

tração. Ele é influenciado, em maior intensidade, pelo número de ligações interfibras e pelas forças dessas ligações (MOREIRA, 2007)

Na Figura 10 são apresentados os dados do índice de arrebetamento em função da intensidade de refino. Foi possível observar que houve uma tendência de aumento no índice de arrebetamento para a amostra K19EIC quando submetida a uma intensidade de refino de 3000 revoluções em relação às outras duas amostras avaliadas.

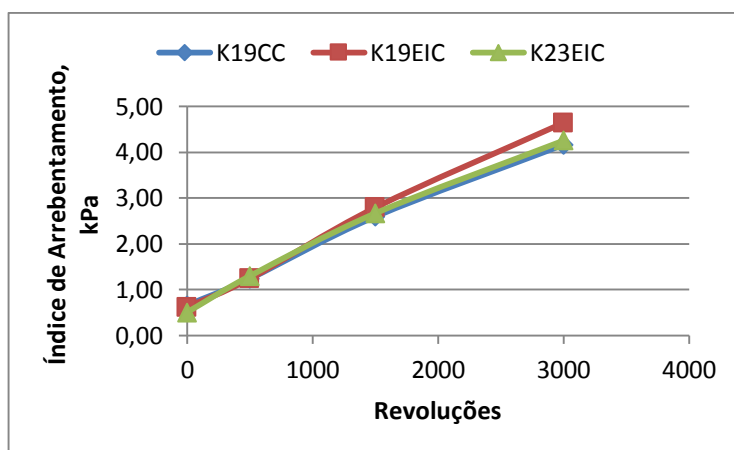


Figura 10: Índice de Arrebetamento das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.

4.7.3. Índice de Rasgo

Por definição, a resistência ao rasgo, é o trabalho executado por um pêndulo, necessário para rasgar um conjunto de folhas, após realizar um corte inicial nas amostras, de comprimento específico TAPPI T414 om-98. O índice de rasgo é o resultado da divisão da força média necessária para rasgar uma folha, por sua gramatura. É influenciado, principalmente, pela resistência intrínseca, pelo comprimento, pela espessura de parede das fibras e pelas ligações interfibras (GOMES, 2010).

No que tange o índice de rasgo das polpas avaliadas, observou-se que a amostra K19CC mostrou uma tendência em apresentar maiores valores para este parâmetro (Figura 11). Este comportamento pode ser atribuído à influência da viscosidade da polpa celulósica, o qual é considerado por alguns autores como sendo um parâmetro relevante para resistência ao rasgo (CARNEIRO et al., 1995).

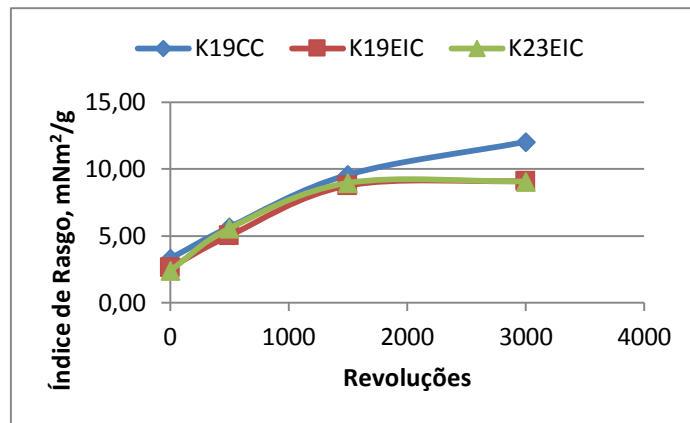


Figura 11: Índice de rasgo das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.

4.7.4. Índice de tração

O índice de tração é o resultado da força necessária para causar a ruptura da amostra em relação à sua gramatura. Bastante favorecido pelas ligações interfibrilares ocorridas durante a formação do papel, pela fibrilação externa e pelo colapso da fibra. A resistência à tração está relacionada com a durabilidade e utilidade do papel, por exemplo, no caso de papéis de impressão, a resistência à tração indica a probabilidade de ruptura quando são sujeitos à tensão exercida durante o processo de impressão (D'ALMEIDA, 1988).

Os dados obtidos (Figura12) demonstram que também houve diferença no comportamento para a amostra K19EIC em relação as outras polpas avaliadas.

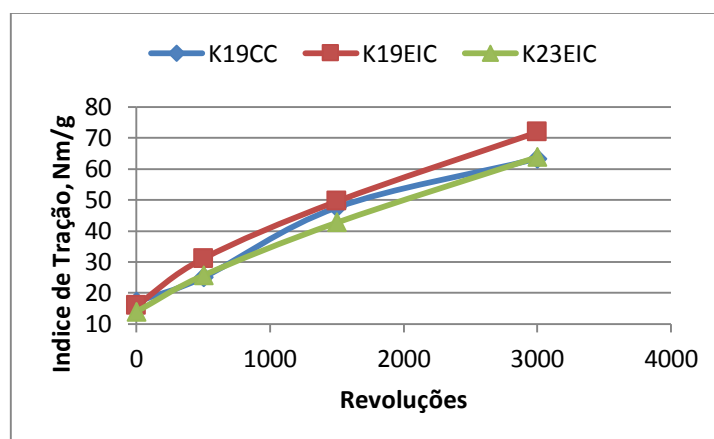


Figura 12: Índice de tração das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.

4.7.5. Resistencia a passagem de ar

É o valor de resistência que a folha de papel oferece à passagem de dado volume de gás ou vapor, sendo que um papel mais poroso apresenta menor resistência à passagem de ar. A permanência ao ar é recíproca da resistência à passagem de ar, e pode ser usada para estimar a permanência do papel a outros fluidos. Também é usada indiretamente para estimar a penetração de tintas de impressão no papel (D'ALMEIDA, 1988).

Os resultados obtidos nesse estudo (Figura 13) demonstram que houve uma tendência de aumento da resistência à passagem de ar para as amostras avaliadas. Uma possível explicação desse resultado seria a composição química das polpas que apresentou variação quanto aos conteúdos de ácidos hexenurônicos (Apêndice D). Tem sido reportada na literatura que o conteúdo de ácidos hexenurônicos se relaciona com a melhoria de propriedades da polpa celulósica, tais como a resistência a passagem de ar. Os resultados obtidos nesse estudo corroboram com essa teoria, uma vez que a elevação do conteúdo desses compostos parece ter afetado positivamente a propriedade de resistência à passagem de ar.

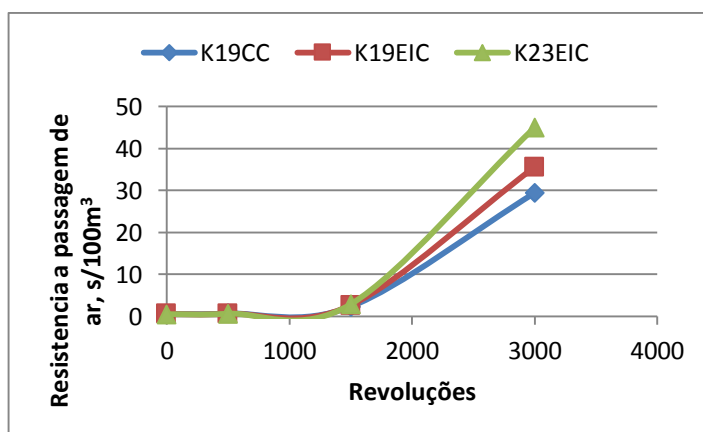


Figura 13: Resistencia a passagem de ar das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino

4.7.6. Volume Específico Aparente

O volume específico, denominado aparente por incluir os espaços do papel preenchidos por ar, é o volume em centímetros cúbicos de um grama de papel. É considerada uma das mais importantes propriedades do papel, influenciando as propriedades físicas e óticas, exceto a gramatura, sendo

afetada pelo grau de ligações das fibras, presença de materiais não fibrosos que preenchem os espaços vazios e a calandragem (D' Almeida, 1988).

O refino promove a redução do volume específico aparente (*bulk*). Isto se deve à maior ligação entre fibras refinadas formando uma rede mais compacta, o que resulta em menor volume e, conseqüentemente, maior peso específico. Para esse trabalho, observou-se uma mesma tendência de comportamento entre as amostras avaliadas, exceto para a amostra K19CC não submetida às revoluções do moinho PFI (Figura 14).

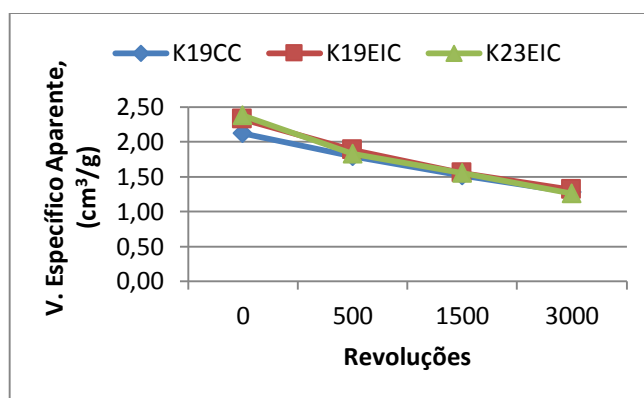


Figura 14: Volume Específico Aparente das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.

4.7.7. Energia absorvida em regime de tração

A energia absorvida em regime de tração (T.E.A.) está associada à morfologia das fibras e sua conformabilidade na formação do papel. Para a amostra K19EIC houve uma tendência de maior TEA em relação às outras amostras.

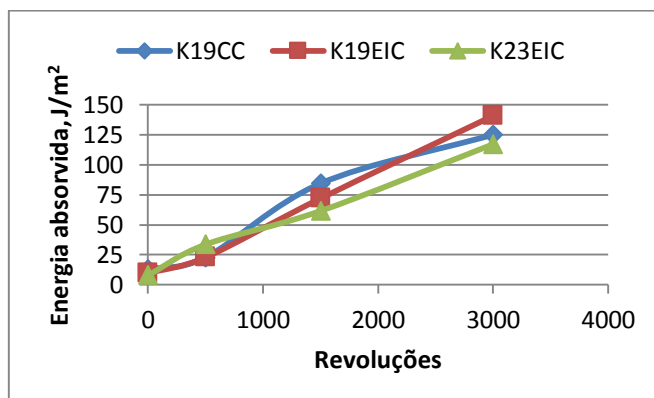


Figura 15: Energia absorvida das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.

4.7.8. Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade (MOE) expressa a habilidade do corpo-de-prova em resistir a deformações em função das tensões aplicadas. Maiores valores de módulo de elasticidade específico indicam a capacidade do material em absorver força sem, contudo, sofrer deformações substanciais, o que expressa o seu potencial de rigidez.

Os principais fatores que influenciam o módulo de elasticidade do papel, além do número de ligações, é a rigidez das fibras que, no papel formado, elevam o módulo de elasticidade. Fibras mais rígidas alongam menos e, portanto, resistem mais às deformações durante a aplicação de uma força. Já um grande número de ligações possibilita que o papel absorva mais energia antes de sofrer plasticidade.

Como mostrado na figura 16, não houve variação significativa para as amostras de mesmo Kappa, porém com o aumento do Kappa, ocorreu o aumento do MOE, o que pode estar associado com valores maiores da viscosidade.

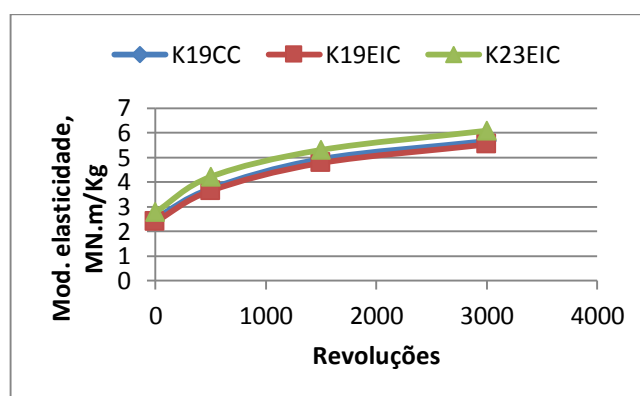


Figura 16: Módulo de Elasticidade das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.

4.7.9. Opacidade

A opacidade está relacionada com a quantidade de luz transmitida através do papel, com objetivo de avaliar até que ponto o papel deixará reconhecer, através de uma folha, o que está escrito na folha subjacente ou no verso da própria folha (KUMAR et al., 2014).

A opacidade decresce com o refino, pois quanto maior a área de interfaces ar-fibra, mais refração o feixe luminoso apresenta ao penetrar no

papel. A refração causa a dispersão de luz, o que dificulta a passagem da luz através o papel. O refino permite melhor arranjo do material fibroso, diminuindo assim a área de interface ar-fibra. Os resultados obtidos indicam (Figura 17), que as polpas apresentaram a mesma tendência de comportamento.

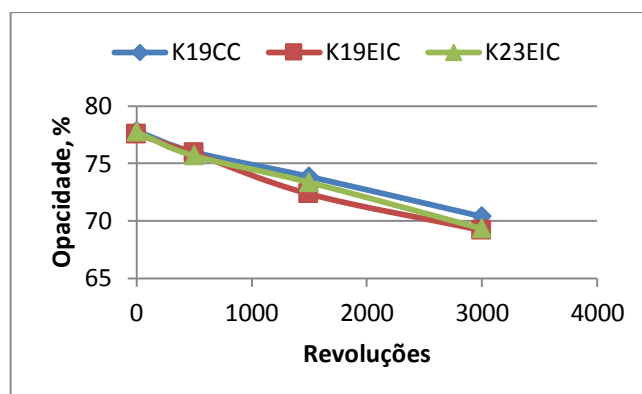


Figura 17: Opacidade das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.

4.7.10. Coeficiente de dispersão de luz

O coeficiente de dispersão de luz depende da estrutura do papel, por isso o comportamento das propriedades ópticas é alterado (KUMAR et al., 2014).

Os resultados obtidos nesse estudo para o coeficiente de dispersão de luz para as amostras avaliadas indicou não haver diferenças de comportamento desse parâmetro (Figura 18), tanto para a polpa convencional quanto para as polpas com impregnação prolongada, as curvas praticamente apresentaram as mesmas tendências.

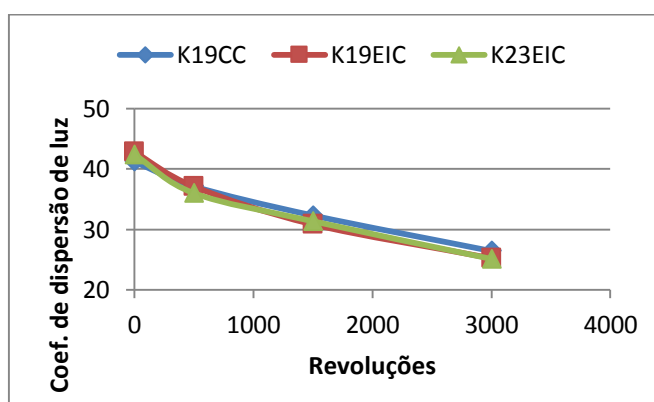


Figura 18: Coeficiente de dispersão de luz das polpas branqueadas para alvura 90%ISO em relação ao número de revoluções no refino.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho é possível fazer as seguintes conclusões:

- A madeira de *Eucalyptus urograndis* utilizada neste trabalho apresentou características físicas e químicas semelhantes a clones de eucalipto utilizados comercialmente;
- O processo de polpação EIC obteve rendimento depurado 1% em média superior em relação ao processo CC;
- O fator H requerido para o processo de polpação com impregnação prolongada em todos os Kappa foi inferior ao processo convencional;
- A polpação EIC não apresentou teores de rejeito;
- O poder calorífico dos licores do processo EIC foram maiores do que o processo CC;
- Maior eficiência da Pré-O₂ para o processo CC, devido menor quantidade de HexAs nas polpas;
- As polpas obtidas pelo processo EIC tiveram melhores resultados para a branqueabilidade e menor consumo de cloro ativo total para todos os níveis de número kappa avaliados;
- Em relação a estabilidade de alvura, as polpas obtidas pelo processo EIC demonstraram melhores resultados;
- Os cálculos do rendimento ficaram próximos, tendo melhor correlação o rendimento total com o TOC.
- Em comparação com os refinamentos não houve variação no °SR e consumo de energia para as amostras K19CC, K19EIC e K23EIC.
- As amostras com impregnação apresentaram melhores resultados para os índices de tração, arrebentamento, T.E.A e M.O.E, enquanto a amostra K19CC por ter viscosidade maior teve resultado mais elevado para o teste de rasgo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, G. S. B. **Estudo da qualidade da madeira para produção de celulose relacionada à precocidade na seleção de híbrido *E. grandis* x *E. urophylla***. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 145p. 2002.

ALMEIDA, Diego Pierre de M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2010. **Infuencia do grau de deslignificação na produção de polpa Kraft branqueada de eucalipto**. Orientador: José Lívio Gomide. Co-orientadores: Jorge Luiz Colodette e Rubens Chaves de Oliveira.

ASSOCIAÇÃO DOS FABRICANTES DE CELULOSE E PAPEL – BRACELPA. Disponível em: <http://www.bracelpa.com.br>. Acesso em: 12 dez. 2015.

CARNEIRO, C. J. G.; WEHR, T. R.; MANFREDI, V. **Efeito da viscosidade nas propriedades físico-mecânicas de polpas branqueadas**. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 28, 1995, São Paulo. Anais... São Paulo: ABTCP, 1995, p.227-234.

CARREÑO, S. H. M, Universidade Federal de Viçosa, dezembro, 2011. **Efeito do polissulfeto em produção de celulose kraft de *Pinus radiata* e mistura de *Eucalyptus Globulus* e *Eucalyptus Nitens***. Orientador: José Lívio Gomide. Coorientadores: Adair José regazzi e Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1. 1039 p.

CARDOSO, M.; OLIVEIRA, E. D.; PASSOS, M. L. **Licor negro de eucalipto kraft proveniente de indústrias brasileiras: características químicas, físicas e seu processamento na unidade de recuperação**. O PAPEL, maio 2006, p.55-70.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. **Technical Report #0018-2005. Laboratório de Celulose e Papel**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 2005. 224 p.

COLODETTE, J. L. **Notas de aula da disciplina ENF 809 –Tecnologia do branqueamento de Celulose**. Universidade Federal de Viçosa, 2014.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, D. M. Composição química de materiais lignocelulósicos. IN: COLODETTE, J. L., GOMES, F. J. B. **Branqueamento de Polpa Celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado**. Ed. UFV, Viçosa, Minas Gerais, 2015, p.31-58.

COLODETTE, J. L.; MARTINO, D. C. Deslignificação com oxigênio. IN: COLODETTE, J. L., GOMES, F. J. B. **Branqueamento de Polpa Celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado**. Ed. UFV, Viçosa, Minas Gerais, 2015, p.267-312.

COLODETTE, J. L.; JUNIOR, D. L.; MARTINO, D. C. Branqueamento com peróxido de hidrogênio. IN: COLODETTE, J. L., GOMES, F. J. B. **Branqueamento de Polpa Celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado**. Ed. UFV, Viçosa, Minas Gerais, 2015, p.479-506.

CORREIA, F. M. **Deslignificação com oxigênio**. 2002. Monografia (Tecnologia de Celulose e Papel – *Lato sensu*) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

COSTA, J.A. **Qualidade da madeira de Eucalyptus urograndis, plantado no Distrito Federal, para produção de celulose kraft**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-153/2011, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86p.

D`ALMEIDA, M. L. O. **Composição química dos materiais lignocelulósicos**. In: Celulose e Papel – Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica. São Paulo: IPT, v.1. 1988, p.45-106.

DENCE, C. W.; REEVE, D. W. **Pulp bleaching: principles and practice**. Atlanta: Tappi Press. 1996. 800p.

EIRAS, K. M. M.; COLODETTE, J. L.; SILVA, V. L. **The role of bound chlorine in the brightness reversion of bleached hardwood kraft pulp**. Quím. Nova, v. 32, n. 1, p. 51-515, 2009.

FOELKEL, C. **O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor kraft de cozimento.** Eucalyptus Online Book. Capítulo 15. 97 pp. (2009).

FREDDO, A.; FOELKEL, C.E.B; FRIZZO, S. M. B.; SILVA, M. C.M.: **Elementos minerais em madeiras de Eucaliptos e Acácia Negra e suas influências na indústria de celulose kraft branqueada.** Ciência Florestal, 9(1): 193-209, 1999.

GOMES, C. M; MOKFIENSKI, A.; MOUNTEER, A.; COLODETTE, J. L. **Can lignina precipitate during kraft pulping and washing?** In: ISWPC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD AND PULPING CHEMISTRY, 11... Nice, 2001. Proceedings... France: Nice, p.337-340, 2001.

GOMES, F.A. **Avaliação dos processos kraft convencional e Lo-Solids para madeira de *Pinus taeda*.** Piracicaba, 2009, 99p.: II.

GOMES, F. J. B. **Aperfeiçoamento do branqueamento de polpa kraft da mistura de madeira de *Pinus ssp.* e *Eucalyptus spp.* pela sequência OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP.** Tese (Mestrado em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2010.

GOMES, F. J. B., D.Sc., **Estudos de caracterização e desconstrução de biomassas de eucalipto e capim elefante para aplicações em biorrefinarias integradas à indústria de celulose.** Orientador: Jorge Luiz Colodette. Coorientadores: José Lívio Gomide e Rubens Chaves de Oliveira, Universidade Federal de Viçosa, Dezembro, 2013.

GOMES, F. J. B.; ALVES, E. F. Propriedades físicas. IN: COLODETTE, J. L., GOMES, F. J. B. **Branqueamento de Polpa Celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado.** Ed. UFV, Viçosa, Minas Gerais, 2015, p.721-734.

GOMIDE, J. L. **Monitoramento da remoção dos constituintes da madeira de *Eucalyptus* e do consumo de reagentes em processo kraft contínuo modificado.** In: Congresso Anual de Celulose e Papel, 1999, São Paulo.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. **Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração**

de clones de Eucalyptus do Brasil. Rev. Árvore, Viçosa, v.29, n.1, p.129-137, 2005.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. **Qualidade da madeira.** In: BOREM, A. (Ed) Biotecnologia florestal. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, p.25-54, 2007.

GOMIDE, J.L.; FANTUZZI NETO, H.; LEITE, H.G. **Estratégia de análise da qualidade da madeira de Eucalyptus sp. para a produção de celulose.** Revista Árvore, ano/vol. 28, nº 003, Sociedade de Investigações Florestais, Viçosa, Brasil, pp. 443-450, 2004.

GULLICHSEN, J., KOLEHMANINEN, H. and SUNDQVIST, H. **On the no uniformity of the kraft cook,** Paperi Puu, 486-490, 1992.

INALBON, M. C., MUSSATI, M. C. and ZANUTTINI, M. A. (2009): **Experimental and theoretical analysis of the alkali impregnation of eucalyptus wood,** Ind. Eng. Chem. Res.48(10), 4791–4795.

JUNIOR, F. G. S. **Efeito do ritmo de produção sobre a eficiência de processos modificados de polpação para *Eucalyptus grandis* e *Populus tremuloides*.** Universidade de São Paulo, Piracicaba, abril, 2005.

KARLSTRÖM, K. (2009): **Extended impregnation kraft cooking of softwood: effects on reject, yield, pulping uniformity and physical properties,** Lic. Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.

KIKUT, P.; FIER, I. S.N.; CALORI, J. V. **Produção de madeiras de reflorestamento de alta qualidade.** Revista da madeira, v.5, n.30, p.8-13, 1996.

KUMAR, A.; SINGH. S. P.; SINGH, A. K. **Preparation and characterization of cellulose nanofibers from bleached pulp using a mechanical treatment method.** Tappi Journal, v. 13, n. 5, p. 25-31, 2014.

LOPES, J. L. W. **Qualidade de mudas clonais do híbrido de Eucalyptus grandis vs. Eucalyptus urophylla, submetidas a diferentes regimes hídricos.** Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 171p. 2008.

McDONOUGH, T. J. **Oxygen delignification.** In: DENCE, C.W; REEVE, D.W. (Ed.). **Pulp bleaching: principles and practices.** Atlanta: Tappi Press, 1996.

McDONOUGH, T. J. **Kraft pulp yield basics**. In: Breaking the pulp yield barrier symposium. Atlanta: Tappi Press, 1998.

MOREIRA, E. **Efeito da lixiviação ácida de cavacos de eucalipto no processo Kraft**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2006.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 429p. 1997.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C., SIMÕES, J. W.; FILHO, T. M. **Caracterização da madeira de sete espécies e eucaliptos para a construção civil: 1- avaliações dendrométricas das árvores**. Scientia Forestalis, Piracicaba-SP, n.56, p.113-124, 1999.

PALMEIRAS, L. P. S. **Quantificação de metanol celulósico obtido a partir de licor negro de processos kraft de polpação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 71f. 2010.

PASCOAL NETO, C.; SILVESTRE, A. J. D.; EVTUGUIN, D. et al. **Bulk and surface composition of ECF bleached hardwood kraft pulp fibres**. Nordic Pulp & Paper Research Journal, v. 19, n. 4, p. 513-520, 2004.

PASCOAL NETO, C.; EVTUGUIN, D., PINTO, P.C.R. et al. **Chemistry of plantation Eucalyptus: Specificities and influence on wood and fibre processing**. In: ISWFPC, 13., Auckland. Anais... Auckland: NZ, 2005. P. 431-438.

PERÓXIDOS DO BRASIL. 2016. **Aplicações, Celulose e Papel, Branqueamento de Polpa e Aparas**. Disponível em: <http://www.peroxidos.com.br/pt/aplicacoes/celulose-e-papel/index.html>>. Acesso em: 10 Janeiro 2016.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. **Influência da Densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. Revista Árvore, v.28, n. 6, p. 901-909, 2004.

QUIRINO, W. F. et al. **Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos**. Revista da Madeira, n. 89, abril 2005, p. 100-106.

RABELO, M. S.; SILVA, V. L.; BARROS, D. P., COLODETTE, J. L.; SACON, V. M.; SILVA, M. R.; **Branqueamento de polpa celulósica kraft de eucalipto com peróxido ácido ativado por molibdênio**. Quím. Nova, v. 32, n. 5, p. 1095-1098, 2009.

ROWELL, R.M. (1990): **Material science of lignocellulosics**. In: Proceedings, Materials Research Society Symposium. Ed: Caulfield, D.F.; Passaretti, J.D.; Sobczynski, S.F. Materials Research Society Vol. 197: 3-9.

SALVADOR, E.; COLODETTE, JL; GOMIDE, JL; OLIVEIRA, RC **Effect oxygen delignification in the physico-mechanical properties of kraft pulps**. The Paper, p. 75-95, 2001.

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 2012. Dissertação (Mestrado em ciências, programa: recursos florestais –USP). Piracicaba. 2012.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 160f. 2002.

SILVERIO, F. C. **Caracterização de extrativos de madeira de eucalyptus e depósitos de pitch envolvidos na fabricação de celulose e papel**. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 157p. 2008.

SMOOK, G. A. **Manual para técnicos de pulpa y papel**. Vancouver: A. Wilde, 397p. 1990.

SMOOK, G. A. **Handbook for pulp & paper technologists**. Vancouver: A. Wide, 419p. 1994.

SIXTA, H; SUSS, H-U.; POTTHAST, A., SCHWANNINGER, M.; KROTSCHKECK, A. W. Pulp bleaching. In: SIXTA, H. (Ed). **Handbook of pulp**. Weinheim; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, v. 2, p. 609-932.

SUNDMAN, G. I. J. **Molybdenum and tungsten – catalyzed reactions of acid hydrogen peroxide with kraft lignin model compounds and enzymatically liberated kraft lignin**. 1988. Tese (Doutorado). Colloge Environmental Science and Engineering. University of New York. Syracuse, 1988.

TAPPI, 2001. **Technical Association of the Pulp and Paper Industry**. Tappi Press, Atlanta.

VASCONCELOS, F.F.R. **Avaliação do processo SuperBatch™ de polpação para *Pinus taeda***. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 105p. 2005.

WEHR, T. R. **Variações nas características da madeira de *Eucalyptus grandis* HILL Ex Maiden e suas influencias na qualidade de cavacos em cozimentos Kraft**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 84f. 1991.

APÉNDICES

APÊNDICE A

Tabela 1A: Dados experimentais para o *Eucalyptus urograndis*

Amostra	Análise Elementar, %							Ca	Cu	Fe	Mg	Mn	Na	K
	C	H	N	S	O	Cinzas	Sílica							
A	51,5	5,3	0,1	2,4	40,5	0,22	0,08	279,5	2,6	11,7	103,4	11,2	588,8	365,0
B	51,4	5,3	0,1	2,2	40,6	0,20	0,06	286,7	2,2	10,7	109,0	10,0	571,8	385,0
Média	51,5	5,3	0,1	2,3	40,6	0,21	0,07	281,3	2,4	11,2	106,2	10,6	580,3	375,0

Tabela 2A: Dados experimentais para o *Eucalyptus urograndis* (continuação)....

Amostra	Extrato Acetona, %	Extrato DCM, %	Densidade básica, Kg/m ³	Lignina Klason, %			PCS, MJ/Kg	PCI, MJ/Kg
				Insolúvel	Solúvel	Total		
A	1,2	0,5	522	24,5	4,5	28,9	19,3	18,2
B	1,4	0,4	534	24,5	4,5	29,0	19,3	18,2
Média	1,3	0,5	528	24,5	4,5	29,0	19,3	18,2

APÊNDICE B

Tabela 1B: Resultados dos cozimentos Kraft convencionais da madeira de *Eucalyptus urograndis*

Condições Kappa	Tempo à temp. de 165°C, Min	Fator H	AE, c/ NaOH %	Kappa	Rendimentos, %			Licor Negro	
					Depurado	Rejeitos	Total	pH	AEr, g/L
15CC	89	793	18,0	15,0	51,8	0,0	51,8	13,2	6,4
	89	793	18,0	14,8	51,2	0,0	51,2	13,2	6,5
Média	89	793	18,0	14,9	51,5	0,0	51,5	13,2	6,5
19CC	47	521	17,0	19,0	52,2	0,4	52,6	13,2	7,2
	47	521	17,0	19,1	52,7	0,6	53,3	13,2	7,4
Média	47	521	17,0	19,1	52,5	0,5	53,0	13,2	7,3
23CC	34	374	17,0	22,9	53,3	1,3	54,6	13,2	8,2
	34	374	17,0	22,7	52,7	0,8	53,5	13,2	8,2
Média	34	374	17,0	22,8	53,0	1,1	54,1	13,2	8,2
27CC	30	322	16,0	27,1	53,8	1,3	55,1	13,2	7,0
	30	322	16,0	27,5	53,4	1,6	55,0	13,2	7,1
Média	30	322	16,0	27,3	53,6	1,5	55,1	13,2	7,1

Tabela 2B: Cozimentos Kraft com impregnação prolongada da madeira de *Eucalyptus urograndis*

Condições Kappa	Impregnação				Polpação								
	Tempo à temp. de 105°C, Min	AE, c/ NaOH	Licor Negro		AE, c/ NaOH	Tempo à temp. de 145°C, Min	Fator H	Kappa	Rendimento			Licor Negro	
			pH	AEr, g/L					Depurado	Rejeitos	Total	pH	AEr, g/L
15EIC	90	12,0	6,2	8,5	12,9	390	683	15,0	52,6	0,0	52,6	12,9	7,6
	90	12,0	6,2	8,5	12,9	390	683	15,4	52,4	0,0	52,4	12,9	7,6
Média	90	12,0	6,2	8,5	12,9	390	683	15,2	52,5	0,0	52,5	12,9	7,6
19EIC	90	12,0	12,8	6,1	7,0	240	422	18,9	53,6	0,0	53,6	12,8	6,6
	90	12,0	12,8	6,2	7,0	240	422	19,3	53,4	0,0	53,4	12,8	6,2
Média	90	12,0	12,8	6,2	7,0	240	422	19,1	53,5	0,0	53,5	12,8	6,4
23EIC	90	12,0	12,8	6,0	6,5	200	353	22,8	53,9	0,0	53,9	12,8	6,0
	90	12,0	12,8	6,3	6,5	200	353	22,6	54,0	0,0	54,0	12,8	6,1
Média	90	12,0	12,8	6,2	6,5	200	353	22,7	54,0	0,0	54,0	12,8	6,1
27EIC	90	12,0	12,8	6,0	6,5	172	304	26,8	54,3	0,0	54,3	12,8	6,5
	90	12,0	12,8	6,2	6,5	172	304	26,7	54,6	0,0	54,6	12,8	6,9
Média	90	12,0	12,8	6,1	6,5	172	304	26,8	54,5	0,0	54,5	12,8	6,7

APÊNDICE C

Tabela 1C: Resultados das análises químicas e físicas dos licores negros da polpação dos processos convencional e impregnação prolongada

Parâmetros Análises	CC				EIC			
	15	19	23	27	15	19	23	27
Carbono, %	38,9	39,3	39,0	40,2	42,1	42,0	42,2	42,3
	39,0	39,2	39,4	40,2	42,2	42,2	42,2	42,2
Média	39,0	39,3	39,2	40,2	42,2	42,1	42,2	42,3
Hidrogênio, %	3,7	3,7	3,7	3,7	3,9	4,0	3,9	4,0
	3,7	3,7	3,8	4,0	3,9	4,0	4,0	4,0
Média	3,7	3,7	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0	4,0
Nitrogênio, %	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
Média	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
Enxofre, %	5,3	4,8	4,8	4,7	4,4	4,5	4,3	4,0
	5,2	5,2	4,9	5,0	4,4	4,4	4,3	4,1
Média	5,3	5,0	4,9	4,9	4,4	4,5	4,3	4,1
Oxigênio, %	32,7	32,6	32,6	32,3	30,9	31,5	31,5	31,4
	32,9	32,6	32,9	32,3	31,3	31,5	31,4	31,1
Média	32,8	32,6	32,8	32,3	31,2	31,5	31,5	31,3
Sódio, %	17,9	17,5	17,5	16,8	16,2	16,1	16,4	16,2
	17,9	17,6	17,5	16,9	16,2	16,1	16,3	16,2
Média	17,9	17,6	17,5	16,9	16,2	16,1	16,4	16,2
Potássio, %	0,9	0,7	1,0	1,0	1,1	0,9	0,8	1,0
	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	0,8	0,8	1,1
Média	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	0,9	0,8	1,1
Cloreto, %	0,3	0,8	0,7	0,5	0,9	0,7	0,7	0,8
	0,3	0,8	0,7	0,6	0,9	0,6	0,7	0,8
Média	0,3	0,8	0,7	0,6	0,9	0,7	0,7	0,8

Tabela 2C: Resultados das análises químicas e físicas dos licores negros da polpação dos processos convencional e impregnação prolongada (continuação)...

Parâmetros Análises	CC				EIC			
	15	19	23	27	15	19	23	27
Orgânicos	52,4	55,5	56,0	58,0	56,9	57,5	58,3	59,3
	53,4	55,9	56,0	58,8	56,9	57,8	58,3	59,2
Média	52,9	55,7	56,0	58,4	56,9	57,7	58,3	59,3
Inorgânicos, %	47,6	44,5	44,0	42,0	43,1	42,5	41,7	40,7
	46,6	44,1	44,0	41,2	43,1	42,2	41,7	40,7
Média	47,1	44,3	44,0	41,6	43,1	42,3	41,7	40,7
Sólidos Totais, %	16,9	15,0	14,7	14,4	16,2	15,5	15,2	14,8
	16,0	15,4	15,3	14,4	16,1	15,7	15,2	15,1
Média	16,0	15,2	15,0	14,4	16,2	15,6	15,2	15,0
PCS, MJ/Kg	15,5	15,5	15,7	16,1	16,7	16,6	16,5	16,7
	15,3	15,5	15,8	16,1	16,7	16,6	16,6	16,7
Média	15,4	15,5	15,8	16,1	16,7	16,6	16,6	16,7
PCI, MJ/Kg	14,7	14,8	15,0	15,3	15,9	15,6	15,8	15,8
	14,5	14,8	15,0	15,3	15,9	15,7	15,8	15,8
Média	14,6	14,8	15,0	15,3	15,9	15,7	15,8	15,8
TOC, Kg/Tas	14,6	14,8	15,0	15,3	16,0	15,5	15,8	15,9
	14,5	14,8	14,9	15,3	15,8	15,8	15,7	15,7
Média	14,6	14,8	15,0	15,3	15,9	15,7	15,8	15,8

APÊNDICE D

Tabela 1D: Resultados da sequência OD_{HT}(EP)D para as polpas celulósicas K15CC e K19CC

Condições e Resultados	K15CC				K19CC			
	O	D*	(EP)	D	O	D*	(EP)	D ₁
Consistência, %	12	12	12	12	12	12	12	12
Temperatura, °C	105	90	80	80	105	90	80	80
Tempo, min	90	120	120	120	90	120	120	120
Pressão, kPa	700	-	-	-	700	-	-	-
O ₂ , kg/odt	20,0	-	-	-	20,0	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	8,5	-	5,0	-	10,5	-	4,0
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	5,0	-	-	-	5,0	-
NaOH, kg/odt	22,0	-	10,0	-	22,0	-	10,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	7,0	-	-	-	7,0	-	-
Fator Kappa	-	0,26	-	-	-	0,26	-	-
Final pH	11,9	3,2	11,3	4,9	10,9	3,1	11,2	4,9
¹ Alvura, % ISO	53,3	-	85,3	90,5	53,0	-	83,8	90,2
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	88,0	-	-	-	87,0
³ Reversão % ISO	-	-	-	2,8	-	-	-	3,5
Kappa	8,6	-	2,3	-	10,6	-	1,9	-
Número Permanganato	-	-	-	0,7	-	-	-	0,7
Viscosidade, mPa.s	728	-	711	698	918	-	901	880
HexAs, mmol/kg de polpa	71,5	-	-	10,1	70,0	-	-	9,7

Tabela 2D: Resultados da sequência OD_{HT}(EP)D para as polpas celulósicas K23CC e K27CC

Condições e Resultados	K23CC				K27CC			
	O	D*	(EP)	D	O	D*	(EP)	D ₁
Consistência, %	12	12	12	12	12	12	12	12
Temperatura, °C	105	90	80	80	105	90	80	80
Tempo, min	90	120	120	120	90	120	120	120
Pressão, kPa	700	-	-	-	700	-	-	-
O ₂ , kg/odt	20,0	-	-	-	20,0	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	12,9	-	10,0	-	16,1	-	8,0
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	5,0	-	-	-	5,0	-
NaOH, kg/odt	22,0	-	10,0	-	22,0	-	10,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	7,0	-	-	-	7,0	-	-
Fator Kappa	-	0,26	-	-	-	0,26	-	-
Final pH	10,6	2,9	12,0	4,6	11,6	2,7	11,4	4,7
¹ Alvura, % ISO	45,4	-	77,3	90,1	39,4	-	73,9	90,4
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	86,0	-	-	-	86,2
³ Reversão % ISO	-	-	-	4,6	-	-	-	4,2
Kappa	13,0	-	2,2	-	16,3	-	2,2	-
Número Permanganato	-	-	-	0,9	-	-	-	0,8
Viscosidade, mPa.s	977	-	957	924	1060	-	972	953
HexAs, mmol/kg de polpa	67,3	-	-	7,9	63,8	-	-	7,7

Tabela 3D: Resultados da sequência OD_{HT}(EP)D para as polpas celulósicas K15EIC e K19EIC

Condições e Resultados	K15EIC				K19EIC			
	O	D*	(EP)	D	O	D*	(EP)	D ₁
Consistência, %	12	12	12	12	12	12	12	12
Temperatura, °C	105	90	80	80	105	90	80	80
Tempo, min	90	120	120	120	90	120	120	120
Pressão, kPa	700	-	-	-	700	-	-	-
O ₂ , kg/odt	20,0	-	-	-	20,0	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	9,8	-	4,0	-	11,3	-	3,0
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	5,0	-	-	-	5,0	-
NaOH, kg/odt	22,0	-	10,0	-	22,0	-	10,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	7,0	-	-	-	7,0	-	-
Fator Kappa	-	0,26	-	-	-	0,26	-	-
Final pH	11,2	3,1	11,3	5,0	10,7	3,0	11,5	5,1
¹ Alvura, % ISO	53,1	-	85,4	90,5	52,4	-	85,1	90,7
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	87,9	-	-	-	87,8
³ Reversão % ISO	-	-	-	2,9	-	-	-	3,2
Kappa	9,0	-	1,8	-	11,4	-	1,7	-
Número Permanganato	-	-	-	0,7	-	-	-	0,8
Viscosidade, mPa.s	766	-	721	707	884	-	841	838
HexAs, mmol/kg de polpa	81,2	-	-	9,9	81,9	-	-	9,3

Tabela 4D: Resultados da sequência OD_{HT}(EP)D para as polpas celulósicas K23EIC e K27EIC

Condições e Resultados	K23EIC				K27EIC			
	O	D*	(EP)	D	O	D*	(EP)	D ₁
Consistência, %	12	12	12	12	12	12	12	12
Temperatura, °C	105	90	80	80	105	90	80	80
Tempo, min	90	120	120	120	90	120	120	120
Pressão, kPa	700	-	-	-	700	-	-	-
O ₂ , kg/odt	20,0	-	-	-	20,0	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	12,3	-	4,0	-	16,4	-	4,0
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	5,0	-	-	-	5,0	-
NaOH, kg/odt	22,0	-	10,0	-	22,0	-	10,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	7,0	-	-	-	7,0	-	-
Fator Kappa	-	0,26	-	-	-	0,26	-	-
Final pH	10,2	3,2	11,7	4,9	11,7	2,9	11,9	4,9
¹ Alvura, % ISO	49,8	-	81,0	90,0	41,9	-	76,1	89,9
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	87,2	-	-	-	86,8
³ Reversão % ISO	-	-	-	3,1	-	-	-	3,4
Kappa	13,4	-	1,9	-	16,6	-	1,8	-
Número Permanganato	-	-	-	0,8	-	-	-	0,8
Viscosidade, mPa.s	925	-	904	890	1050	-	944	92
HexAs, mmol/kg de polpa	74,8	-	-	7,2	70,1	-	-	7,0

APÊNDICE E

Tabela E1: Resultados dos testes físico-mecânicos das polpas branqueadas K19CC, K19EIC e K23EIC com alvura 90% ISO.

Amostra	Revolução	Consumo energia, Wh	°SR	Espes-sura µm	Peso Esp. Aparente Kg/m³	Vol. Esp. Aparente cm³/g	T.E.A, J/m²	M.O.E, MNm/K g	Índice Tração , N.m/g	Índice Arreb., kPa.m²/g	Índice Rasgo, mN.m²/g	Alonga-mento %	Opaci-dade %	Coef. Disp. Luz, m²/kg	Resist. P. Ar, s/100cm³
K19CC	0	-	16	141	472,41	2,12	12,78	2,54	17,09	0,66	3,30	1,53	77,83	41,19	0,55
	500	6	19	119	559,92	1,79	22,84	3,74	25,02	1,24	5,65	1,85	76,00	37,12	0,69
	1500	19	28	101	658,61	1,52	84,4	4,94	47,58	2,60	9,56	3,61	73,86	32,31	2,33
	3000	39	50	85	780,94	1,28	125,01	5,67	63,34	4,16	12,02	4,09	70,38	26,44	29,41
K19EIC	0	-	16	140	429,79	2,33	9,74	2,39	15,89	0,62	2,62	1,21	77,55	42,78	0,52
	500	6	19	123	532,44	1,88	22,94	3,65	31,07	1,24	5,01	2,03	75,89	37,10	0,63
	1500	19	28	101	644,75	1,55	71,96	4,78	49,54	2,79	8,75	2,96	72,35	30,84	2,65
	3000	37	50	86	761,74	1,31	140,73	5,53	71,84	4,64	9,10	3,81	69,18	25,24	35,58
K23EIC	0	-	16	155	420,19	2,38	7,94	2,78	13,94	0,51	2,40	1,38	77,73	42,36	0,51
	500	6	19	119	547,73	1,83	33,57	4,22	25,63	1,30	5,55	2,02	75,67	36,00	0,64
	1500	19	27	105	643,71	1,55	61,52	5,31	42,69	2,67	8,95	3,22	73,36	31,36	2,90
	3000	38	48	85	792,94	1,26	117,06	6,09	63,83	4,26	9,07	4,46	69,33	25,13	45,00

NOTA: Revoluções= n° de revoluções do refinador, T.E.A.= Energia absorvida em regime de tração, °SR = Schopper Riegler; M.O.E.= Módulo de Elasticidade Específico.