

MARCELA FREITAS ANDRADE

**ESTUDO COMPARATIVO DA BRANQUEABILIDADE DE POLPAS KRAFT
DE *Pinus radiata* E DE UMA MISTURA DE *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus
nitens***

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
2010

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

A553e
2010

Andrade, Marcela Freitas, 1986-

Estudo comparativo da branqueabilidade de polpas kraft de *Pinus radiata* e de uma mistura de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* / Marcela Freitas Andrade. – Viçosa, MG, 2010.

xv, 105f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Jorge Luiz Colodette.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 55-59.

1. Branqueamento. 2. Polpa de madeira - Branqueamento.
 3. Indústria de celulose. 4. Desenvolvimento sustentável.
 5. Polpação alcalina por sulfato. 6. Eucalipto.
 7. *Pinus radiata*. 8. *Eucalyptus globulus*.
 9. *Eucalyptus nitens*. I. Universidade Federal de Viçosa.
- II. Título.

CDO adapt. CDD 634.986

MARCELA FREITAS ANDRADE

**ESTUDO COMPARATIVO DA BRANQUEABILIDADE DE POLPAS KRAFT
DE *Pinus radiata* E DE UMA MISTURA DE *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus
nitens***

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: 23 de fevereiro de 2010.

Prof. José Lívio Gomide
(Co-orientador)

Prof. Rubens Chaves de Oliveira
(Co-orientador)

Prof. Jorge Luiz Colodette
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar o meu caminho e minhas escolhas.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela excelente qualidade de ensino prestado.

Ao meu orientador, professor Dr. Jorge Luiz Colodette, pela oportunidade, pelo incentivo, pela amizade e principalmente, pelos ensinamentos que muito contribuíram e contribuirão para o meu crescimento profissional.

Aos professores conselheiros Dr. Rubens Chaves de Oliveira e Dr. José Lívio Gomide, pelos ensinamentos e incentivo durante o curso e o desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários e amigos do Laboratório de Celulose e Papel, pelo apoio e pela atenção no desenvolvimento deste trabalho de tese.

Aos amigos de curso do Laboratório de Celulose e Papel.

Aos meus pais, Sãozinha e Tatão, pelo amor, exemplo, incentivo e por sempre acreditarem em mim e que tudo daria certo.

Ao Rafael, pelo amor, apoio, paciência, por estar sempre ao meu lado e fazer parte dessa trajetória.

À minha família, em especial à tia Noêmia, tia Rita e tia Zélia pelo carinho e pela torcida.

Às minhas queridas amigas de Viçosa pelo carinho, amizade e pelas “farras”.

Enfim, agradeço a todos que acreditaram e torceram por mim!

BIOGRAFIA

Marcela Freitas Andrade, nasceu em 03 de junho de 1986, em Viçosa, Minas Gerais.

Em 2003, concluiu o 2º grau no Colégio Equipe, em Viçosa, Minas Gerais.

Em 2004, iniciou o curso de Engenharia Florestal, na Universidade Federal de Viçosa, sendo o mesmo concluído em julho de 2008.

Em Agosto de 2008, iniciou o curso de pós-graduação no nível de Mestrado Profissionalizante em Tecnologia de Celulose e Papel, na Universidade Federal de Viçosa, sendo o mesmo concluído em Fevereiro de 2010.

ÍNDICE

LISTA DE QUADROS.....	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. EFEITO DA MADEIRA	3
2.2. BRANQUEAMENTO COM DIÓXIDO DE CLORO (ClO_2).....	4
2.3. BRANQUEAMENTO COM PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO (H_2O_2)	6
2.4. REVERSÃO DE ALVURA	9
2.5. PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA POLPA CELULÓSICA.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. MATERIAL	13
3.2. MÉTODOS	14
3.2.1. Condições gerais de branqueamento.....	14
3.2.2. Deslignificação com dióxido de cloro - D_0	15
3.2.3. Extração alcalina com oxigênio e peróxido pressurizado - (EPO)	16
3.2.4. Branqueamento com dióxido de cloro - D_1 e D_2	16
3.2.5. Efeito do grau de lavagem (DQO) da polpa de Pinho	17
3.2.6. Custo dos reagentes de branqueamento	17

3.2.7. Procedimentos analíticos	17
3.2.8. Testes físicos-mecânicos das polpas	18
3.2.9. Análises estatísticas	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1. EFEITO DO GRAU DE LAVAGEM (DQO) DA POLPA DE PINHO.....	21
4.2. APERFEIÇOAMENTO DAS VARIÁVEIS DE CADA ESTÁGIO DO BRANQUEAMENTO.....	22
4.2.1. Aperfeiçoamento do estágio D ₀	22
4.2.1.1. Efeito do fator kappa.....	22
4.2.1.2. Efeito do pH.....	25
4.2.1.3. Condições aperfeiçoadas para o estágio D ₀	27
4.2.2. Aperfeiçoamento do estágio (EPO)	28
4.2.2.1. Efeito da temperatura	28
4.2.2.2. Efeito da dosagem de peróxido de hidrogênio.....	30
4.2.2.3. Efeito da dosagem de oxigênio no estágio (EPO) para polpa de Eucalipto	32
4.2.2.4. Condições aperfeiçoadas para o estágio (EPO)	34
4.2.3. Aperfeiçoamento do estágio D ₁ e D ₂	35
4.2.3.1. Condições aperfeiçoadas para o estágio D ₁ e D ₂	36
4.3. BRANQUEAMENTO PELA SEQUÊNCIA APERFEIÇOADA	38
4.4. PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DAS POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO PRODUZIDAS EM CONDIÇÕES APERFEIÇOADAS E DE REFERÊNCIA.....	41
4.4.1. Índice de Tração.....	42
4.4.2. Índice de Arrebatamento.....	43
4.4.3. Índice de Rasgo.....	45
4.4.4. Resistência à Passagem de Ar.....	46
4.4.5. Módulo de Elasticidade Específico (MOE) e Energia de Deformação (TEA)	48
4.4.6. Peso Específico Aparente (PEA) e Volume Específico Aparente (VEA).....	51
4.4.7. Consumo de Energia no Refino.....	52
5. CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
APÊNDICE A – BRANQUEAMENTO DE PINUS RADIATA.....	60

APÊNDICE B – BRANQUEAMENTO DA MISTURA EM DIFERENTES PROPORÇÕES (30/70%) DE EUCALYPTUS GLOBULUS E EUCALPTUS NITENS	72
APÊNDICE C – PROPRIEDADES DOS TESTES FÍSICO-MECÂNICOS DAS POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO.....	104

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS MADEIRAS.....	3
QUADRO 2 - TEOR DE ÁCIDO 4-O-METILGLICURÔNICO (AMEGLIC) E ÁCIDOS HEXENURÔNICOS (AHEX) EM POLPA KRAFT CONVENCIONAL DE MADEIRA DE FIBRAS CURTA E LONGA.....	4
QUADRO 3 - CARACTERÍSTICAS INICIAIS DAS AMOSTRAS DE POLPAS PRÉ-O ₂ DE PINHO E EUCALIPTO	13
QUADRO 4 - CONDIÇÕES UTILIZADAS NO APERFEIÇOAMENTO DO BRANQUEAMENTO DA POLPA DE PINHO	14
QUADRO 5 - CONDIÇÕES UTILIZADAS NO APERFEIÇOAMENTO DO BRANQUEAMENTO DA POLPA DE EUCALIPTO	15
QUADRO 6 - PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LICOR E DA POLPA CELULÓSICA.....	18
QUADRO 7 - TESTES FÍSICOS-MECÂNICOS REALIZADOS NA POLPA E A RESPECTIVA NORMA TAPPI	19
QUADRO 8 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA O ESTÁGIO D ₀ DAS POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO.....	27
QUADRO 9 – EFEITO DA TEMPERATURA DO ESTÁGIO (EPO) NAS POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO.....	29
QUADRO 10 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA O ESTÁGIO (EPO) DAS POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO.....	34

QUADRO 11 – EFEITO DO PH EM D ₁ E D ₂ PARA O BRANQUEAMENTO DE POLPA DE EUCALIPTO PARA A SEQUÊNCIA D(EPO)DD	37
QUADRO 12 - CONDIÇÕES APERFEIÇOADAS PARA O BRANQUEAMENTO DA POLPA DE PINHO COM A SEQUÊNCIA D(EPO)DD.	38
QUADRO 13 - CONDIÇÕES APERFEIÇOADAS PARA O BRANQUEAMENTO DA POLPA DE EUCALIPTO COM A SEQUÊNCIA D(EPO)DD.	39
QUADRO 14- RESUMO DOS RESULTADOS DO BRANQUEAMENTO A 90%ISO DAS POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO.....	39
QUADRO 15 - CONSTITUIÇÃO QUÍMICA DOS CARBOIDRATOS DAS POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO.....	41

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- EFEITO DA DQO DA POLPA DE PINHO NO CONSUMO TOTAL DE CLO ₂ (KG/TAS) E NO CUSTO TOTAL DE BRANQUEAMENTO (US\$/TAS) PARA OBTENÇÃO DE ALVURA 90,0% ISO.	22
FIGURA 2 - EFEITO DO FATOR KAPPA E DA DOSAGEM TOTAL DE DIÓXIDO DE CLORO NA ALVURA DAS POLPAS DE PINHO (A) E EUCALIPTO (B).	23
FIGURA 3 - EFEITO DO FATOR KAPPA E DO CUSTO TOTAL DO BRANQUEAMENTO NA ALVURA DAS POLPAS DE PINHO (A) E EUCALIPTO (B).	23
FIGURA 4 - EFEITO DO FATOR KAPPA E DA DOSAGEM DE DIÓXIDO DE CLORO NA REVERSÃO DE ALVURA DAS POLPAS DE PINHO (A) E EUCALIPTO (B).	24
FIGURA 5 - EFEITO DO FATOR KAPPA E DA DOSAGEM DE DIÓXIDO DE CLORO NA VISCOSIDADE DAS POLPAS DE PINHO (A) E EUCALIPTO (B).	25
FIGURA 6 - EFEITO DO PH FINAL DE REAÇÃO DO ESTÁGIO D ₀ , DA DOSAGEM TOTAL DE DIÓXIDO DE CLORO (A) E DO CUSTO TOTAL DE BRANQUEAMENTO (B) NA ALVURA DA POLPA DE EUCALIPTO.	26
FIGURA 7 - EFEITO DO PH FINAL DE REAÇÃO DO ESTÁGIO D ₀ E DA DOSAGEM TOTAL DE DIÓXIDO DE CLORO NA REVERSÃO DE ALVURA DA POLPA DE EUCALIPTO.	26

FIGURA 8 - EFEITO DO PH FINAL DE REAÇÃO DO ESTÁGIO D_0 E DA DOSAGEM TOTAL DE DIÓXIDO DE CLORO NA VISCOSIDADE DA POLPA DE EUCALIPTO.	27
FIGURA 9 - EFEITO DA DOSAGEM DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO E DA DOSAGEM TOTAL DE DIÓXIDO DE CLORO NA ALVURA DAS POLPAS DE PINHO (A) E EUCALIPTO (B).	30
FIGURA 10 - EFEITO DA DOSAGEM DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO E DO CUSTO TOTAL DO BRANQUEAMENTO NA ALVURA DAS POLPAS DE PINHO (A) E EUCALIPTO (B).	31
FIGURA 11 - EFEITO DA DOSAGEM DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO E DA DOSAGEM DE DIÓXIDO DE CLORO NA REVERSÃO DE ALVURA DAS POLPAS DE PINHO (A) E EUCALIPTO (B).	31
FIGURA 12 - EFEITO DA DOSAGEM DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO E DA DOSAGEM DE DIÓXIDO DE CLORO NA VISCOSIDADE DAS POLPAS DE PINHO (A) E EUCALIPTO (B).	32
FIGURA 13 - EFEITO DA DOSAGEM DE OXIGÊNIO NO ESTÁGIO (EPO), DA DOSAGEM TOTAL DE DIÓXIDO DE CLORO (A) E DO CUSTO TOTAL DE BRANQUEAMENTO (B) NA ALVURA DA POLPA DE EUCALIPTO.	33
FIGURA 14 - EFEITO DA DOSAGEM DE OXIGÊNIO NO ESTÁGIO (EPO) E DA DOSAGEM TOTAL DE DIÓXIDO DE CLORO NA REVERSÃO DE ALVURA DA POLPA DE EUCALIPTO.	33
FIGURA 15 - EFEITO DA DOSAGEM DE OXIGÊNIO NO ESTÁGIO (EPO) E DA DOSAGEM TOTAL DE DIÓXIDO DE CLORO NA VISCOSIDADE DA POLPA DE EUCALIPTO.	34
FIGURA 16. ÍNDICE DE TRAÇÃO EM FUNÇÃO DO GRAU SCHOPPER RIEGLER PARA POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO BRANQUEADAS NAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA E APERFEIÇOADAS.	43
FIGURA 17. ÍNDICE DE ARREBENTAMENTO EM FUNÇÃO DO GRAU SCHOPPER RIEGLER PARA POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO BRANQUEADAS NAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA E APERFEIÇOADAS. ...	44

FIGURA 18. ÍNDICE DE RASGO EM FUNÇÃO DO GRAU SCHOPPER RIEGLER PARA POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO BRANQUEADAS NAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA E APERFEIÇOADAS.....	46
FIGURA 19. RESISTÊNCIA À PASSAGEM DE AR EM FUNÇÃO DO GRAU SCHOPPER RIEGLER PARA POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO BRANQUEADAS NAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA E APERFEIÇOADAS. ...	47
FIGURA 20. MÓDULO DE ELASTICIDADE EM FUNÇÃO DO GRAU SCHOPPER RIEGLER PARA POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO BRANQUEADAS NAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA E APERFEIÇOADAS.....	49
FIGURA 21. ENERGIA DE DEFORMAÇÃO EM FUNÇÃO DO GRAU SCHOPPER RIEGLER PARA POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO BRANQUEADAS NAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA E APERFEIÇOADAS.....	50
FIGURA 22. PESO ESPECÍFICO APARENTE EM FUNÇÃO DO GRAU SCHOPPER RIEGLER PARA POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO BRANQUEADAS NAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA E APERFEIÇOADAS. ...	51
FIGURA 23. VOLUME ESPECÍFICO APARENTE EM FUNÇÃO DO GRAU SCHOPPER RIEGLER PARA POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO BRANQUEADAS NAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA E APERFEIÇOADAS. ...	52
FIGURA 24. CONSUMO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DO GRAU SCHOPPER RIEGLER PARA POLPAS DE PINHO E EUCALIPTO BRANQUEADAS NAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA E APERFEIÇOADAS.....	53

RESUMO

ANDRADE, Marcela Freitas. M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2010. **Estudo comparativo da branqueabilidade de polpas kraft de *Pinus radiata* e de uma mistura de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens***. Orientador: Jorge Luiz Colodette. Co-orientadores: José Lívio Gomide e Rubens Chaves de Oliveira.

Nas últimas décadas, a indústria de celulose vem modificando e aperfeiçoando os seus processos fabris, com o objetivo de melhorar a sua capacidade de produção, a qualidade de seus produtos e o seu desempenho ambiental. A linha de branqueamento da unidade Valdivia, do grupo Arauco, se opera numa mesma sequência de branqueamento D(EPO)DD com polpas de *Pinus radiata* (Pinho) e de uma mistura (30/70%) de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* (Eucalipto). O objetivo desse trabalho foi aperfeiçoar a sequência D(EPO)DD visando minimizar o consumo de dióxido de cloro (ClO_2) e o custo de reagentes para os dois tipos de polpa. Os resultados do processo aperfeiçoado foram comparados com os obtidos nas condições operacionais vigentes na unidade industrial, em relação ao consumo de ClO_2 , ao custo do branqueamento, às propriedades físico-químicas das polpas e à carga poluente dos efluentes. Foram utilizadas polpas de Pinho e Eucalipto pré-deslignificadas com oxigênio de números kappa 10 e 9, respectivamente. O estudo de aperfeiçoamento consistiu da avaliação do arraste, fator kappa, temperatura e pH do primeiro estágio de dioxidação, da temperatura e dosagens de H_2O_2 e O_2 do estágio (EPO), e do pH e dosagem de ClO_2 do segundo e terceiro estágios de dioxidação da sequência D(EPO)DD. Na condição aperfeiçoada foi possível minimizar o consumo de ClO_2 em 1,60 kg/tas para a polpa de Pinho e 4,50 kg/tas para a polpa de Eucalipto, sem prejuízos da qualidade da polpa ou dos efluentes, em relação à referência (condições atuais da

fábrica). O custo do branqueamento na condição aperfeiçoada foi US\$ 2,90/tas e US\$ 8,70/tas inferiores aos da referência, para as polpas de Pinho e Eucalipto, respectivamente. Foi demonstrado que as variáveis que mais influenciam o custo de reagentes químicos do branqueamento são o valor de pH do segundo estágio de dioxidação e a temperatura do estágio (EPO), para polpa de Eucalipto. Para polpa de Pinho as variáveis mais importantes foram o fator kappa do primeiro estágio de dioxidação e a temperatura do estágio (EPO).

ABSTRACT

ANDRADE, Marcela Freitas. M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2010. **Comparative study on the bleachability of kraft pulp from *Pinus radiata* and a mixture of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*.** Adviser: Jorge Luiz Colodette. Co-advisers: José Livio Gomide and Rubens Chaves de Oliveira.

In recent decades, the pulp industry has been changing and improving its manufacturing processes in order to improve production capacity, product quality and environmental performance. The bleaching unit at Valdivia, Arauco Group, operates pulps of *Pinus radiata* (Pine) and a mixture (30/70%) of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* (Eucalyptus) in a same D(EPO)DD bleaching sequence. The aim of this study was to optimize the D(EPO)DD sequence to reduce the consumption of chlorine dioxide (ClO_2) and the cost of reagents for the two types of pulp. Results of the improved process were compared with those obtained in the operating conditions existing at the mill for the use of ClO_2 , bleaching cost, physicochemical properties of the pulps and effluent pollution load. Pulps from pine and eucalyptus were pre-delignified with oxygen kappa numbers 10 and 9 respectively. The study consisted of the evaluation of the carryover, kappa factor, temperature and pH of the first stage of deoxidation, temperature and doses of H_2O_2 and O_2 of the (EPO) stage, and pH and ClO_2 dose of the second and third stages of deoxidation of the D (EPO) DD sequence. The improved condition allowed a reduction of 1.60 kg ClO_2 /odt for pine pulp and 4.50 kg ClO_2 /odt for eucalyptus pulp, without loss of pulp and effluent quality, comparing with the reference values (current operating conditions at the mill). The bleaching cost in the improved condition was US\$ 2.90/odt and US\$ 8.70/odt lower than the reference values for pine and eucalyptus pulps respectively. The study showed that the variables

that most influenced the cost of bleaching chemical reagents were the pH of the second stage of deoxidation and the temperature of the (EPO) stage for Eucalyptus pulp. For the pine pulp, the most important variables were the kappa factor of the first stage of deoxidation and the temperature of the (EPO) stage.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a indústria de celulose vem modificando e aperfeiçoando os seus processos fabris, com o objetivo de melhorar a sua capacidade de produção, a qualidade de seus produtos e o seu desempenho ambiental.

A operação de uma planta de branqueamento apresenta grandes desafios, especialmente quando novos estágios ou novas tecnologias são inseridos no processo. No caso particular da linha de branqueamento da unidade Valdivia opera-se numa mesma sequência de branqueamento D(EPO)DD uma polpa de *Pinus radiata* (Pinho) e uma polpa proveniente de uma mistura (30/70%) de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* (Eucalipto).

O gás cloro tem sido utilizado como agente de branqueamento de polpa desde 1774. Porém a sua aplicação está sendo descontinuada por gerar compostos orgânicos clorados prejudiciais ao meio ambiente e á saúde do homem. Os processos que não mais utilizam gás cloro, mas utilizam o dióxido de cloro, são denominados ECF (livre de cloro elementar) (GARCIA e VIDAL, 1984).

A tecnologia de branqueamento ECF aplicada a polpas químicas é hoje dominante no segmento de polpa branqueada de alta alvura. Os processos ECF têm se mostrado eficientes, especialmente para o branqueamento de polpas de fibra longa. No que se refere ao branqueamento de polpas de Eucalipto, o branqueamento ECF é também eficiente, mas pode se ainda melhorado. A diferença fundamental entre polpas de fibra longa e de Eucalipto é, essencialmente, a composição do número kappa, que no primeiro caso é principalmente lignina e no segundo uma mistura de lignina e ácidos hexenurônicos (HexA), com predominância desses últimos (COSTA e COLODETTE, 2002).

O branqueamento ECF é conduzido tipicamente em quatro ou cinco estágios de branqueamento com um estágio de oxigênio no início. O primeiro estágio de branqueamento com dióxido de cloro e a subsequente extração são os estágios de deslignificação dominantes. A adição de oxigênio ao estágio (E) aumenta a oxidação da lignina e a adição de peróxido de hidrogênio aumenta a alvura polpa (SUESS et al., 2001).

A determinação das condições de operação aperfeiçoadas para cada estágio de branqueamento permite encontrar a alvura desejada com menores custos de reagentes químicos, podendo também influenciar no rendimento e causar implicações na qualidade da polpa e carga ambiental.

De acordo com PIOTTO (2003), uma lavagem eficiente da polpa marrom reduz o consumo de oxidantes no branqueamento. Se for antes do primeiro estágio de branqueamento, haverá redução da carga de compostos orgânicos, resultando em diminuição das concentrações de AOX, DBO e DQO dos efluentes.

O objetivo desse trabalho foi aperfeiçoar a sequência D(EPO)DD da planta Valdivia para o branqueamento de polpas Kraft de Pinho e Eucalipto de números kappa similares, visando minimizar o consumo de dióxido de cloro (ClO_2) e o custo do branqueamento, enquanto mantendo a qualidade da polpa e dos efluentes gerados. Foi também avaliado o efeito da DQO (grau de lavagem) da polpa de Pinho no consumo de dióxido de cloro e no custo total do branqueamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Efeito da madeira

Sabe-se que madeiras de coníferas e folhosas diferem em sua composição química. Comparando madeiras de coníferas e folhosas do ponto de vista da composição química, particularmente as hemiceluloses são mais expressivas em sua diferenciação.

No Quadro 1 é observado a composição química da madeira de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* segundo MOKFIENSKI et al. (2003), e a composição química da madeira de *Pinus radiata* segundo SJOSTROM (1993).

Quadro 1 - Composição Química das Madeiras

Composição Química da Madeira	Espécie de Madeira		
	<i>Pinus radiata</i>	<i>Eucalyptus Globulus</i>	<i>Eucalyptus nitens</i>
Extrativos %	1,8	1,3	1,9
Lignina %	27,2	26,1	27,8
Xilanas %	8,5	16,6	18,6
Mananas %	20,4	1,2	1,4
Celulose %	37,4	42,4	38,2

É nítido o alto teor de xilanas nas madeiras de folhosas e o alto teor de mananas em madeiras de coníferas.

O maior teor de hemiceluloses está relacionado à acessibilidade de reagentes de branqueamento que degradam a lignina complexada com esses carboidratos. A estrutura ramificada das hemiceluloses dificulta a entrada das espécies químicas deslignificantes (ANT-WOUORINEN e VISAPAA, 1956). Madeiras com maiores teores de extrativos e lignina consomem mais reagentes durante o branqueamento.

A quantidade e a qualidade da lignina são importantes para análise da madeira e para a caracterização de polpas celulósicas. O principal objetivo dos processos químicos de polpação e de branqueamento é remover a lignina. Coníferas apresentam maiores teores de lignina que folhosas, e existem diferenças estruturais entre a lignina encontrada nos dois grupos. Rendimento, branqueabilidade e alvura são propriedades da polpa celulósica que refletem a presença da lignina (MIMMS, 1993).

As polpas kraft de fibra curta contêm mais grupos de ácidos hexenurônicos que as de fibra longa, produzidas pelo mesmo tipo de polpação (Quadro 2) (JIANG et al., 2000), uma vez que madeiras de fibras curtas contêm mais 4-O-metilglicuronoxilana, que é a precursora dos ácidos hexenurônicos.

Quadro 2 - Teor de ácido 4-O-metilglicurônico (AMeGlic) e ácidos hexenurônicos (AHex) em polpa kraft convencional de madeira de fibras curta e longa

Teor	Pinus (kappa = 25,9)	Birch (kappa = 18,2)
AMeGlic, $\mu\text{mol/g}$ polpa	14	42
AHex, $\mu\text{mol/g}$ polpa	54	76

É esperado que os HexA's e outras estruturas derivadas dos carboidratos possam apresentar diferentes branqueabilidades, quando comparadas com a lignina residual frente aos vários reagentes químicos de branqueamento. Portanto, polpas de mesmo número kappa contendo quantidades variáveis de HexA's e outras estruturas derivadas de carboidratos, que reagem com permanganato de potássio apresentam consumo diferenciado de oxidantes no branqueamento (COSTA e COLODETTE, 2002).

2.2. Branqueamento com dióxido de cloro (ClO_2)

O dióxido de cloro (ClO_2) é um dos principais agentes clareadores aplicados no branqueamento da polpa de celulose. Ele é usado tanto na fase de deslignificação (D_0) (pré-branqueamento), quanto nos estágios de branqueamento (D_1 e D_2).

Apesar da ampla utilização e várias décadas de intensa atividade de investigação, muitos aspectos sobre a química do branqueamento com dióxido de cloro ainda não são bem compreendidos. A maioria dos estudos de pesquisa, até agora, consiste em experiências de laboratório, entretanto, estudos em escala industrial e modelos cinéticos também foram aplicados. Os modelos atualmente disponíveis, muitas vezes empregam uma ou duas correlações empíricas para predizer a cinética de desenvolvimento do número kappa (GERMGÅRD, 1982; TESSIER e SAVOIE, 1997).

O dióxido de cloro é um agente oxidante muito seletivo para a lignina, reagindo muito mais rápido com a lignina do que com os carboidratos da polpa de celulose.

O processo de branqueamento utilizando dióxido de cloro é uma combinação complexa de reações orgânicas e inorgânicas. As reações com a lignina são iniciadas por uma rápida reação entre o dióxido de cloro (ClO_2) e as estruturas fenólicas da lignina (HOIGNÉ e BADER, 1994), que resulta em uma rápida diminuição do número kappa no início do branqueamento (GERMGÅRD, 1982; JONCOURT et al., 2000; BARROCA et al., 2001). Esta fase inicial é ligeiramente mais rápida em temperaturas elevadas, que consome quase todo o dióxido de cloro disponível (KOLAR et al., 1983; BARROCA et al., 2001).

A diminuição rápida do número kappa na fase inicial é seguida por uma fase em que a redução do número kappa e o consumo de dióxido de cloro são mais lentos (GERMGÅRD, 1982; JONCOURT et al., 2000; BARROCA et al., 2001). Na fase final do branqueamento, o número kappa aproxima-se de zero, essa proximidade é ainda maior em alta temperatura (GERMGÅRD, 1982; BARROCA et al., 2001), ou quando é elevada a dosagem de ClO_2 aplicado na polpa (LJUNGGREN et al., 1996).

Em um trabalho realizado por (LEHTIMAA et al., 2009) foi estudado o efeito da dosagem de dióxido de cloro (ClO_2) durante o branqueamento de polpas kraft de bétula. Constatou-se que a maior dosagem de ClO_2 resultou em uma maior diminuição do número kappa na fase inicial e na fase mais lenta do branqueamento; isso foi devido a maior concentração de ClO_2 disponível para oxidar diferentes estruturas orgânicas. Dosagens elevadas de dióxido de cloro aumentam a remoção de ácidos hexenurônicos; isso está relacionado com a quantidade de ClO_2 consumido, pois quanto maior o consumo de ClO_2 , mais HClO é formado para reagir com os HexA's.

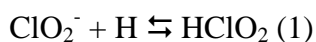
Segundo LEHTIMAA et al., (2009), a maior dosagem de ClO_2 não teve clara influência no seu consumo. Com 20 e 30 kg Cl/tas, a mesma quantidade de ClO_2 foi consumida, esse consumo constante implica que para oxidar todos os fenóis disponíveis

não seria preciso uma dosagem maior que 20 kg Cl/tas. Já com 15 kg Cl/tas, o consumo foi bem mais baixo, indicando que essa dosagem não foi capaz de oxidar todos os compostos fenólicos contidos na polpa. Dosagens mais elevadas de ClO₂ aumentaram a formação de clorato e cloreto (produtos finais do branqueamento com dióxido), no entanto, a proporção de ClO₂ convertido em Cl⁻ e ClO₃⁻ foram as mesmas, independente da dosagem aplicada. Esses mesmos autores afirmam que a temperatura não tem efeito sobre o consumo de dióxido de cloro e nem sobre a formação de clorato.

Uma das mais importantes variáveis da deslignificação com dióxido de cloro é o pH. Durante o processo de deslignificação alguma parte do dióxido de cloro é convertida em clorato (ClO₃⁻) e clorito (ClO₂⁻), resultando em substancial perda no poder de oxidação do dióxido de cloro. A extensão dessa conversão é altamente dependente do pH (CHANDRANUPAP e NGUYEN, 2000). Segundo esses autores, a deslignificação é mais rápida e eficiente em pH=4 do que em pH=2 ou 10.

A capacidade do branqueamento com dióxido de cloro é maior em pH entre 4,5 e 5,5, principalmente quando a polpa vinda do estágio anterior mantém muito pouco de lignina ou HexA's (EIRAS e COLODETTE, 2003). Portanto, o pH ideal no estágio D final depende da eficiência dos estágios anteriores.

Segundo MILANEZ et al., (2008) a eficiência de alvejamento no estágio D final é maior no valor de pH 5,5 apesar do fato de que mais dióxido de cloro é convertido em clorito nesse valor de pH. À medida que o branqueamento se processa o pH da reação diminui devido à formação de ácidos orgânicos, o clorito gerado é lentamente convertido em ácido cloroso que oxida a lignina através das reações (1) e (2). No estágio D, se o tempo e a temperatura forem suficientes para consumir todo o clorito gerado, um branqueamento mais eficiente é conseguido. O teor de OX na polpa branqueada também decresce com o aumento do pH final.

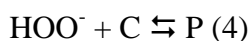


2.3. Branqueamento com peróxido de hidrogênio (H₂O₂)

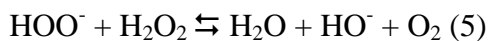
Uma planta típica de branqueamento de polpas químicas consiste de vários estágios, podendo alternar condições ácidas (Cl₂, O₃, ClO₂) e alcalinas (NaOH, H₂O₂, e/ou O₂).

O estágio alcalino do branqueamento ECF de polpas Kraft pode ser reforçado para extração da lignina com peróxido de hidrogênio. A eficiência da extração é aumentada na seguinte ordem $E < E_p < E_o < E_{op}$. Normalmente não há residual de peróxido de hidrogênio nesses estágios devido à quantidade significativa de lignina no meio. Ocorrem várias reações dos constituintes da madeira com oxigênio e peróxido de hidrogênio na presença de álcali. Algumas das mais importantes são: solubilização de fragmentos de lignina clorada, deslignificação da polpa, branqueamento da polpa, degradação da celulose e decomposição do peróxido. Enquanto as três primeiras são desejáveis e devem ser maximizadas, as outras são indesejáveis e devem ser evitadas para se obter a máxima eficiência do peróxido de hidrogênio e manter a viscosidade da polpa a níveis aceitáveis.

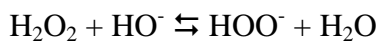
O efeito alvejante do H_2O_2 tem sido geralmente atribuído à ação oxidante do ânion per hidroxila (HOO^-) (ANDREASSON, 1995 e XU, 2000), produto da reação entre peróxido e álcali (equação 3), que reage nucleofilicamente com os grupos carbonilas conjugados, cromóforos (C), formando aldeídos e ácidos carboxílicos incolores (P) (equação 4).

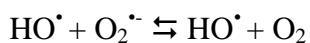


Contudo, sua eficácia é frequentemente diminuída por reações concorrentes, sendo uma delas sua decomposição em água e oxigênio quando em meio alcalino (equação 5). O mecanismo destas decomposições em meio alcalino ainda não está muito claro.



Os outros produtos da decomposição tais como radicais hidroxila (HO^\bullet) e radical ânion superóxido ($O_2^{\bullet-}$) se originam de reações em cadeia de radicais livres também promovidas pela alcalinidade do sistema, isto é, pelos íons hidroxilas (HO^-). Estes radicais atacam as fibras de celulose, reduzindo a viscosidade da polpa (equação 6).





Entretanto, sabe-se que esses radicais podem contribuir, em certa medida, para a deslignificação e o branqueamento da polpa (TUBINO e FILHO, 1998).

Algumas reações de decomposição do H_2O_2 são catalisadas pela presença de íons metálicos, principalmente Mn, Fe e Cu, provenientes da madeira, o que reduz a concentração de ânions peróxido, reduzindo a deslignificação e a alvura. A presença desses metais de transição no estágio com peróxido é prejudicial tanto para a alvura quanto para a viscosidade da polpa. Para que isso não aconteça, são adicionados aditivos tais como sais de magnésio e agentes quelantes (EDTA, DTPA, DTPMPA, etc). O magnésio captura radicais superóxido reduzindo a propagação das reações radicalares. A adição de sulfato de magnésio no estágio minimiza a decomposição do peróxido, melhorando a resistência e branqueamento da polpa (GAVRILIU, et al., 2000) . Os agentes quelantes seqüestram os íons metálicos tornando-os indisponíveis para degradar o peróxido. A aplicação de silicato de sódio também estabiliza e tampona a solução de peróxido de hidrogênio (RÄMO e SILLAMPÄÄ, 2000; RÄMO, 2003).

Em um trabalho realizado por MÉNDEZ e ÁREA (2009), foi observado que a alvura da polpa aumenta com o tempo de residência, geralmente a valores altos de temperatura e concentração inicial de peróxido de hidrogênio, com exceção de algumas experiências onde, com 240 minutos, a alvura diminui devido a pouca quantidade de peróxido residual no licor de branqueamento. Nessa extensão de tempo ocorre interação entre temperatura e concentração de peróxido de hidrogênio inicial. Somente a concentração inicial de peróxido de hidrogênio foi significativa nos diferentes tempos de reação, enquanto que a temperatura teve influência significativa na alvura aos 20, 45 e 180 minutos de reação.

Estudos realizados por MÉNDEZ e ÁREA (2009) confirmam que o peróxido de hidrogênio é consumido por duas reações paralelas: uma de decomposição (ou reação de concorrência) e outra de branqueamento. Esta última parece ser a mais lenta a altas temperaturas.

2.4. Reversão de alvura

O mercado consumidor de papel e celulose tem exigido alta alvura e alta estabilidade da mesma. A reversão de alvura é um processo em que uma polpa com alto nível de alvura sofre, com o passar do tempo, perda de alvura, tornando-se amarelada.

Polpas branqueadas com alvuras de mercado (88-92% ISO) podem conter ainda pequenas quantidades de substâncias leucocromóforas, isto é, substâncias que poderão vir a ser cromóforas (COSTA et al., 2003).

Para FORSSKÅHL et al., (2000), a indução ao amarelecimento da polpa está fundamentada em reações com a lignina residual e com os carboidratos. A contribuição dos cromóforos derivados de carboidratos deve ser investigada em conexão com o amarelecimento de polpas químicas, enquanto que a contribuição da lignina está mais relacionada ao amarelecimento de polpas mecânicas.

De acordo com BUCHERT et al. (1997) a reversão de alvura é proporcional ao conteúdo de ácidos hexenurônicos na polpa, que pode ser reduzido com um tratamento de hidrólise ácida (HENRICSON, 1997).

GELLERSTEDT et al. (2003) citaram que nem os ácidos hexenurônicos (HexA) presentes nas xilanas, nem as estruturas oxidadas tipo não-ligninas (carboxilas e carbonilas na celulose) contribuem, na sua origem, para a cor da polpa. Mas, significativa mudança pode ser observada no conteúdo destes componentes durante o branqueamento, sendo essas mudanças talvez responsáveis pela reversão de alvura. Os autores citam que é no estágio de deslignificação com oxigênio que ocorre o aumento de estruturas oxidadas tipo não-ligninas, porém o conteúdo de HexA permanece inalterado nesta etapa.

Segundo GELLERSTEDT et al. (2003) a perda de alvura do papel é influenciada pela quantidade de água na polpa, pela temperatura, tempo de armazenamento e pH da polpa. Um alto valor de reversão de alvura foi encontrado a um nível de secura de 92%, temperatura de 60°C, ou mais alta, pH 4 a 5.

JÄÄSKELÄINEN et al. (2003) analisaram o residual de lignina em polpa branqueada por Espectrometria de Ramam. Observou-se que em polpa branqueada ECF há uma notável quantidade de estruturas insaturadas, e que uma pequena porção de quinonas está presente em polpas de Eucalipto, podendo ser esses grupos os causadores da reversão de alvura.

A reversão de alvura pode ocorrer durante o processo de branqueamento se os agentes de branqueamento forem consumidos antes do resfriamento e neutralização da polpa (SAVOIE e TESSIER, 2001). De acordo com SMIT, 1993, sequências contendo dióxido de cloro produzem polpas de boa estabilidade de alvura. O dióxido de cloro faz um ataque específico na lignina, gerando pequenas quantidades de grupos oxidados. Entretanto, TIMEL, 1961, ALFREDSSON et al., 1961, e SJÖSTRÖM, 1975, citados por FENGEL e WEGENER, 1984, afirmam que grupos de ácidos urônicos e de ácidos glicourônicos são formados durante a deslignificação com dióxido de cloro.

O domínio das causas da reversão de alvura, particularmente o conhecimento dos estágios e condições operacionais de branqueamento que a favorecem, tem sido um desafio. Estudos visando reduzir os custos de operação da etapa de branqueamento e que, ao mesmo tempo, resultem em polpa de alta estabilidade de alvura são de grande relevância para a indústria de polpa kraft branqueada (EIRAS e COLODETTE, 2003).

2.5. Propriedades físico-mecânicas da polpa celulósica

Refinação é um processo onde a polpa celulósica é tratada mecanicamente em equipamentos chamados refinadores visando o desenvolvimento de determinadas características (KLINE, 1991; ABTCP 2001). No processo de refinação ocorrem modificações nas propriedades da polpa, como: aumento da sua flexibilidade, redução da sua dimensão e a fibrilação. A refinação produz fibrilação interna, externa e corte das fibras que acarretam o aumento do número e das áreas de ligações entre fibras (NEVELL E ZERONIAN, 1985).

BIERMANN (1996) mostra que qualquer processo de fabricação de papel passa pelas mesmas etapas. São elas: formação, que consiste na aplicação da polpa celulósica sobre uma tela; drenagem, que é a remoção inicial da água através de escoamento por gravidade ou uma diferença de pressão; consolidação, resultado da compactação do colchão de polpa celulósica e secagem, através da remoção da água pelo contato com superfícies aquecidas.

OLIVEIRA et al. (1981), ressaltam que as diferenças anatômicas entre as fibras de angiospermas e gimnospermas acarretam em diferenças de propriedades físicas e mecânicas do papel. As fibras curtas, como do Eucalipto, geram papéis com melhor formação e maior lisura, mas, baixa resistência ao rasgo. A presença de vasos pode prejudicar a qualidade de impressão neste papel. Já as fibras longas, como as de Pinho,

produzem papéis com melhores resistências mecânicas a seco e a úmido. Além dos aspectos técnicos e econômicos, as características anatômicas das madeiras de coníferas e folhosas incentivam a utilização de misturas de fibras longas e curtas na produção de papel, visando atender às exigências do mercado consumidor.

O comprimento médio da fibra afeta a formação da folha de papel e a uniformidade da distribuição (YUNG, 1980). A uniformidade e estabilidade dimensional do papel serão tanto maior quanto mais curtas forem as fibras. As propriedades mecânicas também são afetadas; por exemplo, a resistência ao rasgo decresce com a diminuição das dimensões médias das fibras.

É sempre importante relacionar as características da madeira com as necessidades do produto. Qualidade da madeira é a adequação desta para um determinado propósito (BIERMANN, 1996).

MIMMS (1993) afirma que os parâmetros químicos, físicos e anatômicos da madeira são essenciais para a produção de celulose e papel, pois cada um destes pode influenciar os processos positivamente ou negativamente.

Foelkel (1977) enumera algumas vantagens das polpas celulósicas de folhosas, como: melhor formação da folha, melhores propriedades superficiais (folha de superfície mais lisa), boas propriedades mecânicas, menor teor de lignina na madeira e maior teor de hemiceluloses. Como desvantagens das folhosas para produção de celulose citam-se: menor resistência ao rasgo, menor resistência da folha úmida e à presença de vasos, que pode ser prejudicial, pois fragmentos de vasos podem se levantar da superfície do papel durante a impressão.

Estudos realizados por BASSA, et. al., (2007) mostram os resultados apresentados para testes físicos realizados nas polpas celulósicas não refinadas, para um °SR de 14,8 e 23,8, respectivamente, para eucalipto e pinho. Foi observado que a polpa celulósica de uma mistura de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* apresentou um índice de tração de 64,4 N.m/g e índice de rasgo de 7,0mN. m²/g. Para a polpa de *Pinus taeda* o índice de tração foi de 53,1 N.m/g e destaca-se com relação ao índice de rasgo, com 13,9mN. m²/g. NISGOSKI (2005) obteve em seu estudo, em relação ao índice de rasgo, uma variação que ficou entre 10,68 mNm²/g e 18,25 mNm²/g estudando árvores de *Pinus taeda* com diferentes idades.

A maior resistência ao rasgo observada para a polpa celulósica do *Pinus taeda* era esperada, devido ao maior comprimento da fibra desse material, quando comparada aos outros materiais avaliados no trabalho.

WILLER FERREIRA *et al.* (1997) encontraram índices de tração para o papel de *Eucalyptus dunnii* de 96 a 98 Nm/g para cozimento kraft-antraquinona, número kappa 17 e grau de refino de °SR 35. Os valores encontrados de índice rasgo variaram de 14,77 a 15,17 mNm²/g.

A resistência à tração tem forte relação positiva com os índices relacionados às fibras, tendendo a crescer com a diminuição do diâmetro, da parede celular e da densidade da madeira. Tais comparações devem ficar restritas em cada espécie, segundo DINWOODIE (1965).

Estudos realizados por BARRICHELO E FOELKEL (1975), KLOCK *et al.* (2002) e BASSA (2007), demonstram que o índice de arrebatamento apresenta uma forte correlação com o índice de tração.

Em relação à resistência a passagem de ar, WILLER FERREIRA *et al.* (1997) encontraram valores de 13,10 a 13,27 s/100ml para papel de *Eucalyptus dunnii* em °SR 35 e de 0,8 a 0,9 s/100ml para polpa sem refino, demonstrando grande influência do colapso das fibras no resultado do ensaio.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

Foram coletadas amostras de polpas kraft pré-deslignificadas com oxigênio (pré-O₂) de *Pinus radiata* (Pinho) e de uma mistura (30/70%) de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* (Eucalipto) da unidade industrial de Valdivia pertencente ao Grupo Arauco S.A. As características gerais das polpas estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Características iniciais das amostras de polpas pré-O₂ de Pinho e Eucalipto

Caracterização	Pinho	Eucalipto
Alvura, % ISO	42,2	57,5
Número kappa	10,1	9,1
Viscosidade, dm ³ /kg	898	988
HexA, mmol/kg	28,9	56,8
DQO, kg O ₂ /tas	3,0	9,1
	Metais, g/tas	
Ca	751,0	534,0
Mg	280,0	90,5
Fe	9,7	12,6
Mn	18,6	7,3
Cu	1,9	5,4

3.2. Métodos

3.2.1. Condições gerais de branqueamento

O branqueamento das polpas de Pinho e Eucalipto foi realizado com a sequência D(EPO)DD e o resumo das condições do branqueamento encontra-se nos Quadros 4 e 5, respectivamente. São apresentadas as condições de projeto bem como as alterações efetuadas para aperfeiçoar o processo de branqueamento. Nas condições onde são apresentados vários níveis, os níveis que fizeram parte do processo de aperfeiçoamento estão convenientemente marcados. Os níveis sem marcação são os de projeto e utilizados, atualmente, no processo industrial.

Quadro 4 - Condições utilizadas no aperfeiçoamento do branqueamento da polpa de Pinho

Condições	Estágios de Branqueamento			
	D ₀	(EPO)	D ₁	D ₂
DQO, kg/tas	3 ¹ ; 6 ¹ ; 7; 9 ¹ ; 12 ¹ e 15 ¹	-	-	-
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5
Temperatura, °C	57	77; 85 ¹	76	76
Tempo, min	56	110	147	150
Pressão, kPa	-	499	-	-
pH final	2,8	10,5	4,0	4,0
Fator kappa	0,16 ¹ ; 0,20	-	-	-
NaOH, kg/tas	*	12,4	*	*
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5; 1,75 ¹ ; 3,0 ¹	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	*	-	*	*
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	1,5 ¹ ; 3,5 ¹ ; 5,0; 7,5 ¹	2,0

¹ Condições do branqueamento investigadas no processo de aperfeiçoamento.

* Dosagem variável para atingir o pH desejado e alvura final de 90% ISO.

Quadro 5 - Condições utilizadas no aperfeiçoamento do branqueamento da polpa de Eucalipto

Condições	Estágios de Branqueamento			
	D ₀	(EPO)	D ₁	D ₂
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5
Temperatura, °C	56	76; 85 ¹	74	75
Tempo, min	90	130	170	170
Pressão, kPa	-	477	-	-
pH final	2,8; 4,0 ¹	11,2	4,0; 4,5 ¹ ; 5,5 ¹	4,0; 5,0 ¹
Fator kappa	0,10 ¹ ; 0,12 ¹ ; 0,15 ¹ ; 0,21	-	-	-
NaOH, kg/t	*	13,2	*	*
O ₂ , kg/t	-	0,0 ¹ ; 3,3	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	0,5; 3,0 ¹	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/t	*	-	*	*
ClO ₂ , kg/t	7,3	-	6,4 ¹ ; 8,4; 10,4 ¹	1,6

¹ Condições do branqueamento investigadas no processo de aperfeiçoamento.

* Dosagem variável para atingir o pH desejado e alvura final de 90% ISO.

3.2.2. Deslignificação com dióxido de cloro - D₀

A deslignificação com dióxido de cloro foi efetuada em sacos de polietileno com amostras de 300g de polpa absolutamente secas de Pinho e Eucalipto, nas condições apresentadas nos Quadros 4 e 5, respectivamente. O licor de branqueamento contendo ClO₂, H₂O, NaOH ou H₂SO₄ foi adicionado à polpa em temperatura ambiente. O requerimento de ácido sulfúrico ou hidróxido de sódio para controle do pH foi determinado em estudo prévio, com mini-amostras de polpa. Após mistura manual, em sacos de polietileno, o material foi aquecido em forno de microondas até a temperatura desejada e transferido para um banho de vapor com controle de temperatura, onde foi mantido pelo tempo pré-estabelecido. Terminada a reação, foram extraídas amostras de licor residual para análises pertinentes. A polpa foi então lavada com o equivalente a 9m³ de água destilada por tonelada de polpa seca. Esse estágio foi realizado em duplicata.

3.2.3. Extração alcalina com oxigênio e peróxido pressurizado - (EPO)

Este estágio foi efetuado num reator/misturador Quantum - Mark V (reator de teflon) com amostras de 290g de polpa absolutamente secas de Pinho e Eucalipto, nas condições apresentadas nos Quadros 4 e 5, respectivamente. A polpa foi depositada no reator na consistência adequada e aquecida até a temperatura desejada. Atingida a temperatura, e sob efeito de agitação constante, foi injetada cargas preestabelecidas de NaOH e de H₂O₂ ao sistema, elevando-se a pressão de reação com O₂ até o valor desejado. Terminado o tempo total de reação, o sistema foi despressurizado e então foram extraídas amostras do licor residual para análises pertinentes. A polpa foi então lavada com o equivalente a 9m³ de água destilada por tonelada de polpa seca. A etapa (EPO) foi efetuada com diferentes dosagens de peróxido de hidrogênio para as polpas de Pinho e Eucalipto, de tal forma a aperfeiçoar o estágio e alcançar os objetivos de alvura desejada.. Esse estágio foi realizado em duplicata.

3.2.4. Branqueamento com dióxido de cloro - D₁ e D₂

O branqueamento com dióxido de cloro foi efetuado em sacos de polietileno com amostras de 250g (no estágio D₁) e 230g (no estágio D₂) de polpa absolutamente secas de Pinho e Eucalipto, nas condições apresentadas nos Quadros 4 e 5, respectivamente. O licor de branqueamento contendo ClO₂, H₂O, NaOH ou H₂SO₄ foi adicionado à polpa em temperatura ambiente. O requerimento de ácido sulfúrico ou hidróxido de sódio para controle do pH foi determinado em estudo prévio, com mini-amostras de polpa. Após mistura manual, em sacos de polietileno, o material foi aquecido em forno de microondas até a temperatura desejada e transferido para um banho de vapor com controle de temperatura, onde foi mantido pelo tempo pré-estabelecido. Terminada a reação, foram extraídas amostras de licor residual para análises pertinentes. A polpa foi então lavada com o equivalente a 9m³ de água destilada por tonelada de polpa seca. A etapa D₁ foi efetuada com várias dosagens de dióxido de cloro para as polpas de Pinho e Eucalipto, de tal forma a aperfeiçoar o estágio e alcançar os objetivos de alvura pré-estabelecidos (90% ISO). Esse estágio foi realizado em duplicata.

3.2.5. Efeito do grau de lavagem (DQO) da polpa de Pinho

Para estudar o efeito da DQO da polpa de Pinho na sua branqueabilidade, foi gerado um licor de branqueamento do estágio D₀. Esse licor foi utilizado para ajustar a DQO da polpa antes de realizar o branqueamento. A quantidade de licor adicionada à polpa no estágio D₀ foi estabelecida de acordo com os valores de DQO que se desejava estudar: 3,0; 6,0; 9,0; 12,0 e 15,0 kg O₂/tas. Após ter sido ajustado a DQO, a polpa foi branqueada a fim de determinar o consumo exato de dióxido de cloro causado pela DQO e o seu reflexo no custo total do branqueamento.

3.2.6. Custo dos reagentes de branqueamento

O custo dos reagentes químicos de branqueamento foi calculado em US\$/kg de polpa branqueada. Os preços (US\$/kg do produto) dos reagentes a seguir foram usados para calcular os custos dos reagentes químicos de branqueamento. Todos os produtos foram considerados na base 100%:

- dióxido de cloro = US\$1,98;
- peróxido de hidrogênio = US\$0,88;
- oxigênio = US\$0,04;
- hidróxido de sódio = US\$0,98; e
- ácido sulfúrico = US\$0,21.

3.2.7. Procedimentos analíticos

As análises da polpa, dos licores residuais e dos filtrados de branqueamento foram efetuadas seguindo os procedimentos analíticos da TAPPI, CPPA e SCAN, conforme descrito no Quadro 6. Todas as análises foram efetuadas em duplicata.

Quadro 6 - Procedimentos analíticos para caracterização físico-química do licor e da polpa celulósica

Parâmetros	Procedimentos
Confecção das folhas	TAPPI T218 sp-97
Número kappa	TAPPI T236 om-06
Número de Permanganato	CPPA G-17H
Viscosidade	TAPPI T230 om-08
Alvura	TAPPI T452 om-08
Reversão de alvura	TAPPI UM200
Titulação de soluções e residuais de branqueamento	MCDONALD R.G., 1967
Análise de metais	SCAN-CM 38:96
Ácidos hexenurônicos	VUORINEN et al. (1996).
Análise de carboidratos	HPLC - WALLIS et al. (1996) (IDEM) depois da hidrólise ácida de acordo com TAPPI T249
DQO do efluente	CPPA H3
AOX do efluente	SCAN W9:89

Nota 1: As dosagens de dióxido de cloro estão expressas como dióxido de cloro.

Nota 2: Todas as dosagens de reagentes estão expressas com base no peso da polpa absolutamente seca.

Nota 3: A análise de AOX foi efetuada no filtrado combinado (em partes iguais) dos estágios de branqueamento D₀, (EPO), D₁ e D₂.

3.2.8. Testes físicos-mecânicos das polpas

As polpas foram refinadas em moinho laboratorial PFI, conforme norma TAPPI wd- 97, com diferentes níveis de revoluções: 0, 3000, 5000 e 7000 para as polpas de Pinho e 0, 2000, 3000 e 4000 para as polpas de Eucalipto. Dessas amostras foram formadas folhas manuais com gramatura de aproximadamente 60 g/m², em uma formadora tipo Tappi, fabricada pela REGMED.

Os testes relacionados a esforços de tração foram feitos em aparelho Instron, com distância entre garras de 100 mm, velocidade de teste de 25 mm/min. e célula de carga de 1.000 N.

Os testes de resistência ao rasgo, ao arrebentamento e à passagem de ar foram realizados em aparelhos Eldendorf, Müllen e porosímetro Gurley, respectivamente.

Os procedimentos utilizados nos testes físicos-mecânicos das polpas são descritos no Quadro 7:

Quadro 7 - Testes físicos-mecânicos realizados na polpa e a respectiva norma Tappi

Parâmetros	Procedimentos
Gramatura	TAPPI T410 om-08
Espessura	TAPPI T551 om-06
Índice de rasgo	TAPPI T414 om-04
Índice de arrebentamento	TAPPI T403 om-02
Índice de tração	TAPPI T494 om-06
Módulo de elasticidade	TAPPI T494 om-96
Energia de deformação	TAPPI T494 om-96
Resistência à passagem de ar	TAPPI T460 om-02
Volume específico aparente	TAPPI T220 sp-96
Peso específico aparente	TAPPI T220 sp-96

3.2.9. Análises estatísticas

As análises estatísticas do branqueamento foram feitas com o auxílio do software Statística 7.0. Foram feitas análises de variância (ANOVA), usando um nível de significância de 5%. As hipóteses testadas foram:

H₀: todas as médias são iguais, ou seja, não existe diferença significativa entre os tratamentos; e

H_a: existe pelo menos uma média estatisticamente distinta das demais.

Os quatro tratamentos consistiram em duas condições diferentes de branqueamento (referência e otimizada) para polpas de Pinho e Eucalipto. À medida que a ANOVA mostrou diferença significativa entre os tratamentos, foi aplicado o teste de Tukey para descobrir quais tratamentos realmente se distinguem uns dos outros. Para médias estatisticamente iguais foram usadas letras iguais, e para médias estatisticamente diferentes, letras também diferentes.

Para análise dos testes físicos-mecânicos das polpas de Pinho e Eucalipto, tratadas com duas diferentes condições de branqueamento em diferentes níveis de

refino, foram utilizadas o software Curve Expert 1.4 para obtenção dos modelos. As equações ajustadas foram comparadas pelo teste F, utilizando-se o teste de identidade de modelos e adotando-se um nível de significância de até 5% de probabilidade, conforme metodologia apresentada por Regazzi (1993) para modelos lineares e Regazzi e Silva (2004) para modelos não lineares.

Foram comparadas as duas equações, a fim de verificar igualdade entre elas. Em caso afirmativo, as duas equações foram reduzidas a uma equação única. Caso fosse confirmada diferença significativa entre as equações, as duas equações foram representadas no gráfico (nesse caso as equações diferentes estatisticamente não foram reduzidas). As hipóteses testadas foram:

H_0 : todas as equações são iguais e podem ser representadas por uma equação reduzida comum; e

H_a : as equações são estatisticamente diferentes e não podem ser reduzidas a uma equação comum.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Efeito do grau de lavagem (DQO) da polpa de Pinho

A polpa de Pinho enviada ao laboratório passou por um processo de lavagem e, em decorrência disso, a DQO da polpa utilizada nos estudos de laboratório (3,0 kg/tas) era mais baixa que a atual DQO da indústria (7,0 kg/tas). Por isso foi realizado um estudo prévio do impacto da DQO da polpa de Pinho no consumo de dióxido de cloro.

Foram avaliadas cinco diferentes valores de DQO da polpa: 3,0; 6,0; 9,0; 12,0 e 15,0 kg O₂/tas, a fim de determinar qual seria o consumo exato de dióxido de cloro (kg/tas) causado pela DQO e o seu reflexo no custo total (US\$/tas) do branqueamento. Os resultados experimentais desse estudo encontram-se nos Quadros 1-5 do Apêndice A.

Verificou-se um aumento no consumo de dióxido de cloro de 0,34 kg/tas de polpa para cada 1,0 kg de DQO/tas adicionado ao sistema (Figura 1). Esse aumento do consumo de dióxido e de outros reagentes (ex: NaOH e/ou H₂SO₄) resultou num aumento de custo de reagentes da ordem de US\$0,89/tas de polpa por unidade de DQO/tas de polpa (Figura 1).

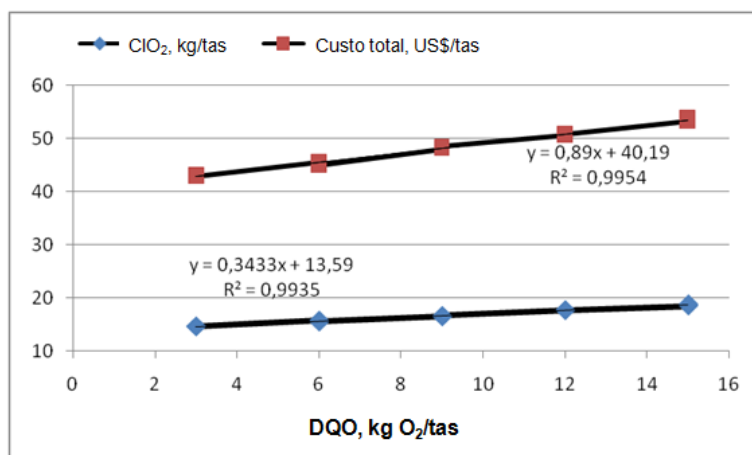


Figura 1- Efeito da DQO da polpa de Pinho no consumo total de ClO₂ (kg/tas) e no custo total de branqueamento (US\$/tas) para obtenção de alvura 90,0% ISO.

Portanto, a DQO de 7,0 kg O₂/tas presente na polpa de Pinho da planta Valdivia representa um consumo adicional de 2,38 kg de ClO₂/tas de polpa e um aumento de custo de US\$6,23/tas de polpa.

4.2. Aperfeiçoamento das variáveis de cada estágio do branqueamento

4.2.1. Aperfeiçoamento do estágio D₀

O estágio D₀ foi aperfeiçoado quanto ao efeito do fator kappa (FK) para as polpas de Pinho e Eucalipto e quanto ao efeito do pH somente para as polpas de Eucalipto. Os resultados médios do aperfeiçoamento do estágio D₀ estão apresentados nas Figuras 2-5 (para efeito do fator kappa) e 6-8 (para efeito do pH). Os resultados experimentais, com duas repetições estão apresentados nos Quadros 6-11 do Apêndice A para a polpa de Pinho e nos Quadros 1-24 do Apêndice B para a polpa de Eucalipto.

4.2.1.1. Efeito do fator kappa

Nas Figuras 2-5, são mostrados os resultados da alvura, reversão de alvura e viscosidade em função do consumo total de ClO₂ (kg/tas) e alvura em função do custo total de reagentes (US\$/tas) para o branqueamento das polpas de Pinho e Eucalipto com diferentes fatores kappa, a saber: 0,16 e 0,20 (Pinho) e 0,10; 0,12 e 0,15 (Eucalipto).

Os fatores kappa utilizados industrialmente na planta Valdivia são de 0,20 e 0,21, respectivamente, para polpas de Pinho e Eucalipto. O estudo de aperfeiçoamento desta variável indicou que esses fatores kappa podem ser reduzidos para 0,16 e 0,12, respectivamente, com economias significativas de dióxido de cloro (Figura 2) e reduções de custo do branqueamento (Figura 3), mantendo-se a alvura final na faixa de 90% ISO. Notar que os resultados apresentados nas Figuras 2 e 3 (A) foram obtidos com polpa bem lavada (DQO=3 kg O₂/tas de polpa)

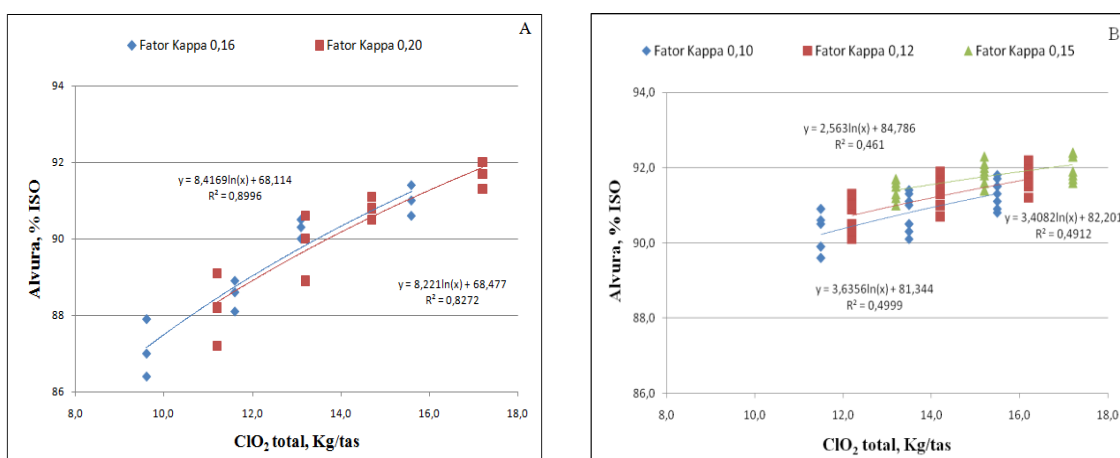


Figura 2 - Efeito do Fator kappa e da dosagem total de dióxido de cloro na alvura das polpas de Pinho (A) e Eucalipto (B).

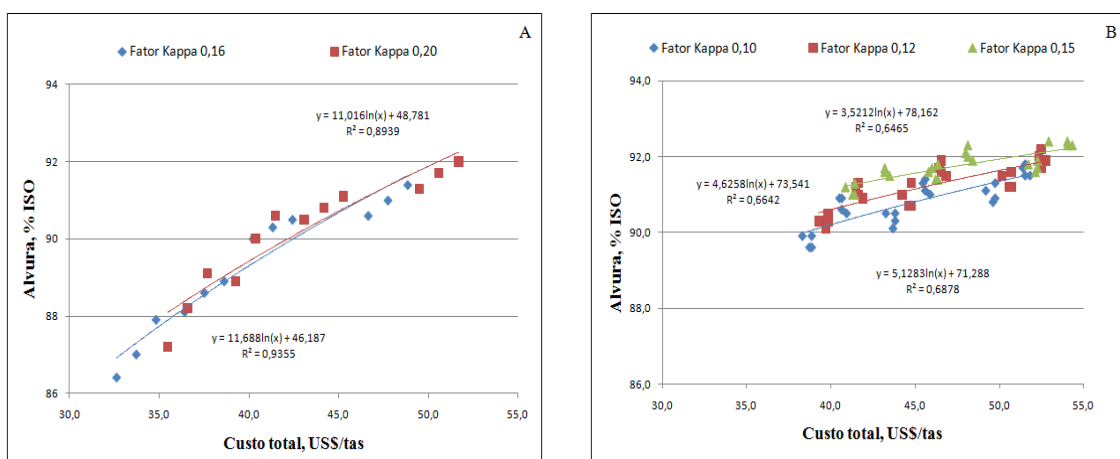


Figura 3 - Efeito do Fator kappa e do custo total do branqueamento na alvura das polpas de Pinho (A) e Eucalipto (B).

Os dados apresentados nas Figuras 2 e 3 mostram que a polpa de Eucalipto tem maior branqueabilidade que a de Pinho. As duas polpas apresentavam números kappa similares no início do branqueamento (Quadro 3), porém a polpa de Eucalipto consumiu muito menos dióxido de cloro e resultou em menor custo de reagentes para alcançar a alvura objetivo de 90% ISO. Esse fato provavelmente pode estar relacionado à presença de ligninas do tipo siringila na polpa de Eucalipto. Estas contêm maior quantidade de ligações β -O-4 (não condensada), que são mais facilmente removidas durante o branqueamento. Por outro lado, a polpa de Eucalipto possuía maior teor de HexA em relação à de Pinho (Quadro 3). A necessidade de dióxido para remover HexA é menor que aquela para remover lignina, sendo este também um fator importante que afeta a demanda total de dióxido de cloro para branqueamento da polpa.

Na Figura 4 observa-se que o branqueamento com fator kappa mais alto e com maiores dosagens de dióxido de cloro resulta em polpa com menor tendência de reversão de alvura, tanto para Pinho quanto para Eucalipto.

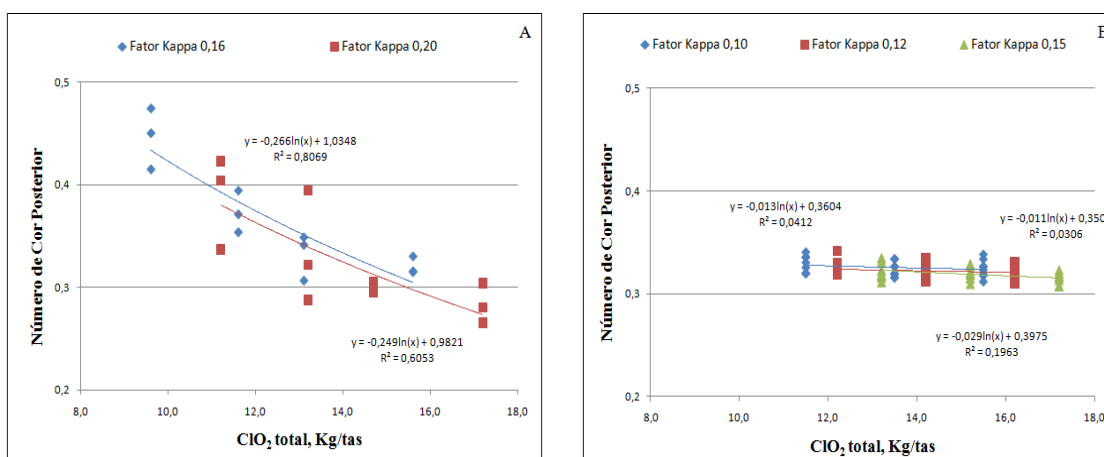


Figura 4 - Efeito do Fator kappa e da dosagem de dióxido de cloro na reversão de alvura das polpas de Pinho (A) e Eucalipto (B).

Ao se comparar as polpas de Pinho e Eucalipto (Figura 4 A e B) verifica-se que a última apresentou menor variação de reversão de alvura que a primeira; esse fato pode ser explicado pela maior variação de alvura final na polpa de Pinho (alvuras finais mais baixas) em relação às de Eucalipto. Porém para uma alvura de 90%ISO a polpa de Pinho apresentou menor valor de reversão de alvura que a polpa de Eucalipto. De acordo com BUCHERT et al. (1997) a reversão de alvura é proporcional ao conteúdo de

ácidos hexenurônicos na polpa. Polpas de eucalipto possuem maior teor de HexA's que as de Pinho.

As viscosidades finais das polpas branqueadas de Pinho e de Eucalipto diminuíram com o aumento da dosagem de ClO_2 e do fator kappa (Figura 5). Esse resultado é explicado pela maior formação de ácido hipocloroso quando a concentração de dióxido de cloro do meio reacional foi aumentada. O ácido hipocloroso é muito nocivo aos carboidratos da polpa.

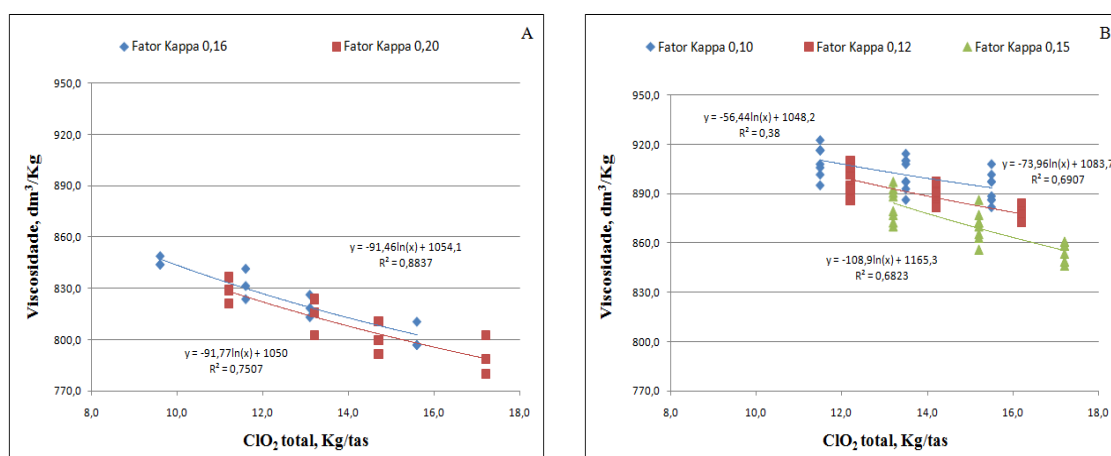


Figura 5 - Efeito do Fator kappa e da dosagem de dióxido de cloro na viscosidade das polpas de Pinho (A) e Eucalipto (B).

As viscosidades das polpas brancas de Eucalipto foram mais altas que as da polpa de Pinho; esse fato é explicado pela maior viscosidade inicial da polpa de Eucalipto em relação à de Pinho e também ao uso de fatores kappa mais elevados no branqueamento da polpa de Pinho.

4.2.1.2. Efeito do pH

O efeito do pH no estágio D_0 foi estudado somente no aperfeiçoamento do branqueamento de polpas de Eucalipto.

Na Figura 6 A e B são mostrados os resultados de alvura em função do consumo total de ClO_2 (kg/tas) e do custo total (US\$/tas) para valores diferentes de pH (2,8 e 4,0). Verifica-se que há uma ligeira vantagem do uso de pH 4,0 sobre o pH 2,8 em relação ao consumo total de ClO_2 e custo total de reagentes no branqueamento. Na planta Valdivia, o branqueamento da polpa de Eucalipto é efetuado em pH final de 2,8 em D_0 . A reversão de alvura não foi afetada pelo pH final no estágio D_0 (Figura 7),

porém diminuiu com o aumento da dosagem de ClO_2 . A viscosidade da polpa diminuiu ligeiramente com o aumento da dosagem de dióxido de cloro e com a redução do pH de 4,0 para 2,8 no estágio D_0 (Figura 8).

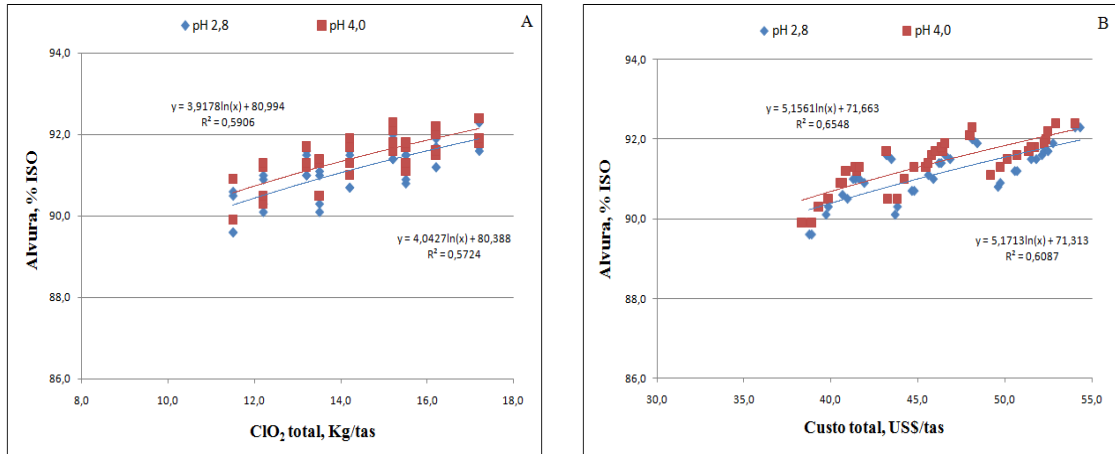


Figura 6 - Efeito do pH final de reação do estágio D_0 , da dosagem total de dióxido de cloro (A) e do custo total de branqueamento (B) na alvura da polpa de Eucalipto.

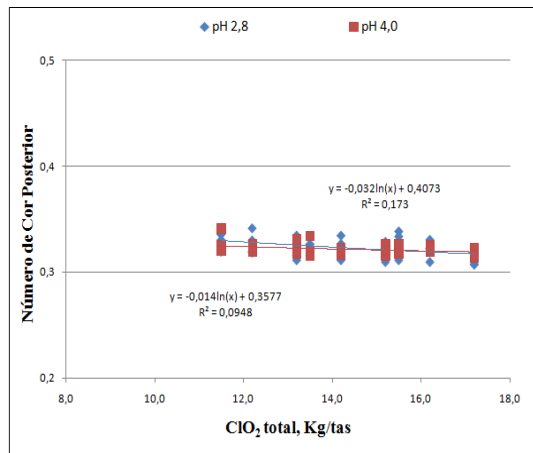


Figura 7 - Efeito do pH final de reação do estágio D_0 e da dosagem total de dióxido de cloro na reversão de alvura da polpa de Eucalipto.

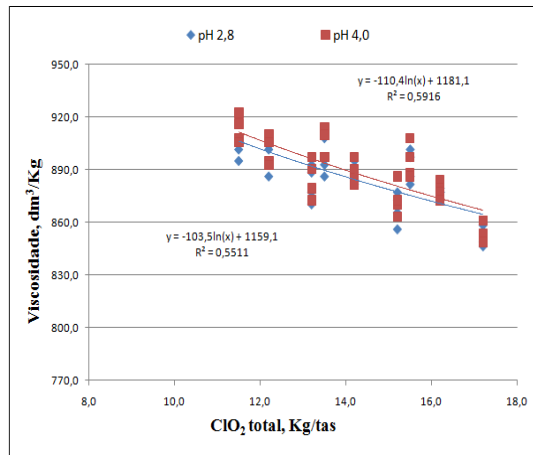


Figura 8 - Efeito do pH final de reação do estágio D_0 e da dosagem total de dióxido de cloro na viscosidade da polpa de Eucalipto.

Os resultados apresentados nas Figuras 6-8 indicam que o branqueamento da polpa opera mais eficientemente quando o pH final do estágio D_0 é mais alto (pH 4,0). O efeito positivo do aumento do pH de 2,8 para 4,0 é explicado pela minimização da conversão do dióxido de cloro em clorato e, conseqüentemente, pela menor perda desse reagente. Tendência similar foi observada por CHANDRANUPAP e NGUYEN (2000).

4.2.1.3. Condições aperfeiçoadas para o estágio D_0

O aperfeiçoamento do estágio D_0 para branqueamento das polpas de Pinho e Eucalipto é recomendando as alterações apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 - Condições operacionais para o estágio D_0 das polpas de Pinho e Eucalipto

Condições e Resultados	Pinho		Eucalipto	
	Referência	Aperfeiçoada	Referência	Aperfeiçoada
Tempo, min.	56	-	90	-
Consistência, %	10,5	-	10,5	-
Temperatura, °C	57	-	56	-
pH final	2,8	-	2,8	4,0
Fator kappa	0,20	0,16	0,21	0,12

Como observado no Quadro 8, para aperfeiçoamento do estágio D_0 é recomendado a diminuição do fator kappa, de 0,20 para 0,16 para a polpa de Pinho e de

0,21 para 0,12 para a polpa de Eucalipto. Reporta-se que a redução da dosagem de dióxido de cloro no primeiro estágio de dioxidação resulta menor geração de organoclorados (KLEIN e STRUNL, 1994). A literatura especializada (PRYKE e REEVE, 2000; SUSS, 2001) não recomenda fatores kappa acima de 0,22, tendo em vista a perda potencial de dióxido de cloro por reações laterais de decomposição a clorato, causadas pelo excesso de concentração desse reagente.

Para aperfeiçoamento do primeiro estágio de dioxidação da polpa de Eucalipto, o pH deve ser elevado de 2,8 para 4,0. Em geral, valores mais elevados de alvura foram verificados para o pH 4,0, em acordo com o conceito já consolidado de que nesse pH o dióxido de cloro apresenta seu maior poder alvejante (DENCE E REEVE, 1996). Esses autores relatam que alterações de pH dos estágios de dioxidação influenciam diretamente a formação de clorato/clorito, que afeta a carga efetiva de oxidante disponível para a oxidação.

4.2.2. Aperfeiçoamento do estágio (EPO)

O estágio (EPO) foi aperfeiçoado quanto ao efeito da temperatura, e dosagens de peróxido de hidrogênio (Pinho e Eucalipto) e de oxigênio (Eucalipto). Os resultados médios do aperfeiçoamento do estágio (EPO) estão apresentados nas Figuras 9-15. Os resultados experimentais encontram-se nos Quadros 6-12 do Apêndice A para Pinho e 1-25 do Apêndice B para Eucalipto.

4.2.2.1. Efeito da temperatura

Foram avaliadas duas diferentes temperaturas nas polpas de Pinho e Eucalipto: 77°C (temperatura de referência para a polpa de Pinho), 76°C (temperatura de referência para a polpa de Eucalipto) e 85°C (temperatura aperfeiçoada para ambas as polpas). A escolha da temperatura "ideal" foi realizada mediante a execução da sequência de branqueamento completa e aperfeiçoada para alvura de 90% ISO (Quadro 9). A temperatura de 85°C foi considerada melhor tanto para Pinho quanto para Eucalipto, pois o aumento de temperatura no estágio, acarretou em um menor consumo de reagentes e um menor custo ao final do branqueamento, para atingir a alvura desejada (90%ISO). Notar que no cálculo de custo foram considerados apenas os reagentes químicos, mas numa aplicação industrial há que se considerar também o custo do vapor

necessário para elevar a temperatura de 76-77°C para 85°C. Não houve efeito significativo da temperatura do estágio (EPO) nos parâmetros estabilidade de alvura e viscosidade da polpa branqueada.

Quadro 9 – Efeito da temperatura do estágio (EPO) nas polpas de Pinho e Eucalipto

Temperatura, °C	Pinho		Eucalipto	
	77	85	76	85
Fator Kappa	0,16	0,16	0,12	0,12
ClO ₂ Total, kg/tas	13,1	13,1	12,2	12,2
ClO₂ Total para 90% ISO, kg/tas	13,1	12,6	11,7	11,5
H ₂ O ₂ , kg/tas	0,5	0,5	0,5	0,5
O ₂ , kg/tas	4,7	4,7	0,0	0,0
NaOH Total, kg/tas	14,4	14,4	14,2	14,2
H ₂ SO ₄ Total, kg/tas	2,5	2,5	0,5	0,5
Cloro Ativo Total, kg/tas	35,5	35,5	33,1	33,1
Custo Total dos Reagentes, US\$/tas	41,2	41,2	39,8	39,8
Custo Total Reagente (90% ISO), US\$/tas	41,2	40,2	38,8	38,4
Número Kappa da Polpa Branqueada	0,7	0,4	1,1	1,0
Alvura, % ISO	90,0	90,3	90,8	91,0
Alvura Revertida, % ISO	87,7	87,9	88,2	88,3
Reversão, % ISO	2,3	2,4	2,6	2,7
Consumo de H ₂ O ₂ em (EPO), %	100	100	100	100
Viscosidade, dm ³ /kg	826	824	906	895

O aumento de temperatura (85°C) no estágio (EPO) eleva a alvura do estágio e também a alvura final da polpa branqueada. Isso ocorre possivelmente devido ao fato do peróxido de hidrogênio ser consumido mais rapidamente, assim evitando reações de decomposição e de escurecimento que são típicas desse reagente. Por outro lado, a eficiência de extração de compostos oxidados é sempre maior em temperaturas mais altas, pois o álcali tem maior facilidade de penetração nas camadas internas da fibra.

4.2.2.2. Efeito da dosagem de peróxido de hidrogênio

Nas Figuras 9-12 são mostrados os resultados da alvura, reversão de alvura e viscosidade em função do consumo total de ClO_2 e da alvura em função do custo total do branqueamento, para as polpas branqueadas com diferentes dosagens de peróxido de hidrogênio para a polpa de Pinho (0,5, 1,75, e 3,0 kg/tas) e de Eucalipto (0,5 e 3,0 kg/tas).

Pode-se observar na Figura 9 para ambas as polpas de Pinho e Eucalipto que há uma tendência geral de diminuição do consumo de ClO_2 com o aumento da dosagem de H_2O_2 no estágio (EPO). No entanto, essa tendência não é verificada com a mesma intensidade em relação ao custo total do branqueamento (Figura 10). Isso é explicado pelo fato de que a diminuição da dosagem de dióxido ocorre à custa do aumento da dosagem de peróxido, que também é um reagente de alto custo. Por outro lado, o estágio de peroxidação necessita de um consumo adicional de soda para poder branquear a polpa.

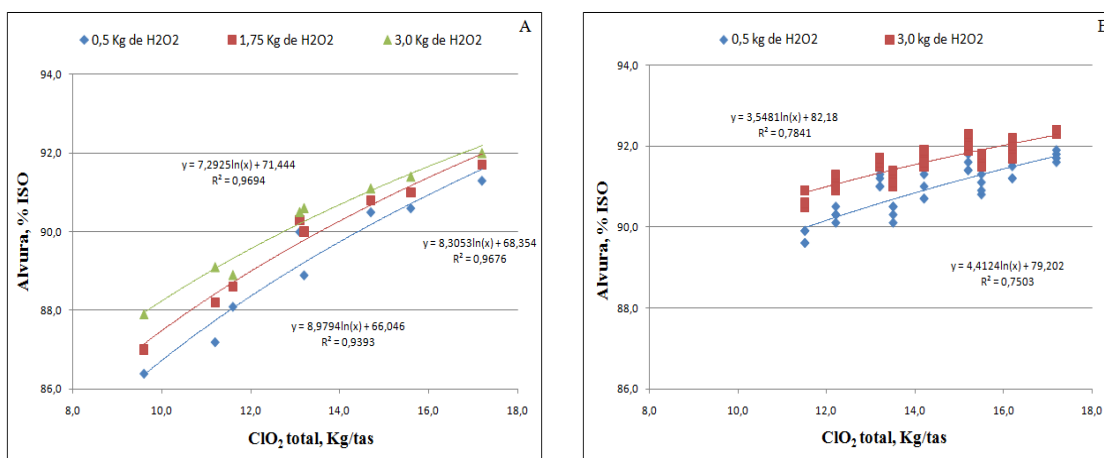


Figura 9 - Efeito da dosagem de peróxido de hidrogênio e da dosagem total de dióxido de cloro na alvura das polpas de Pinho (A) e Eucalipto (B).

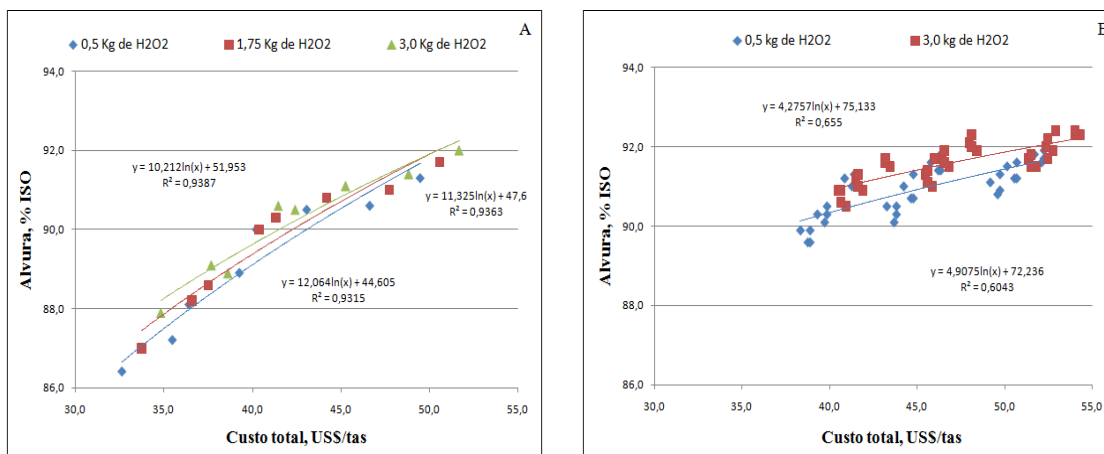


Figura 10 - Efeito da dosagem de peróxido de hidrogênio e do custo total do branqueamento na alvura das polpas de Pinho (A) e Eucalipto (B).

Os dados apresentados nas Figuras 9 e 10 mostram a facilidade com que a polpa de Eucalipto branqueia em relação à polpa de Pinho. Com a menor dosagem de peróxido de hidrogênio (0,5 kg H₂O₂/tas) a polpa de Eucalipto atinge a alvura desejada (90%ISO), consumindo menos ClO₂ que a de Pinho e resultando em menor custo final de branqueamento.

Na Figura 11 observa-se que a reversão de alvura tende a diminuir com o aumento da dosagem de peróxido de hidrogênio no estágio (EPO) para a polpa de Pinho e não é afetada pela dosagem de peróxido de hidrogênio no estágio (EPO) para a polpa de Eucalipto.

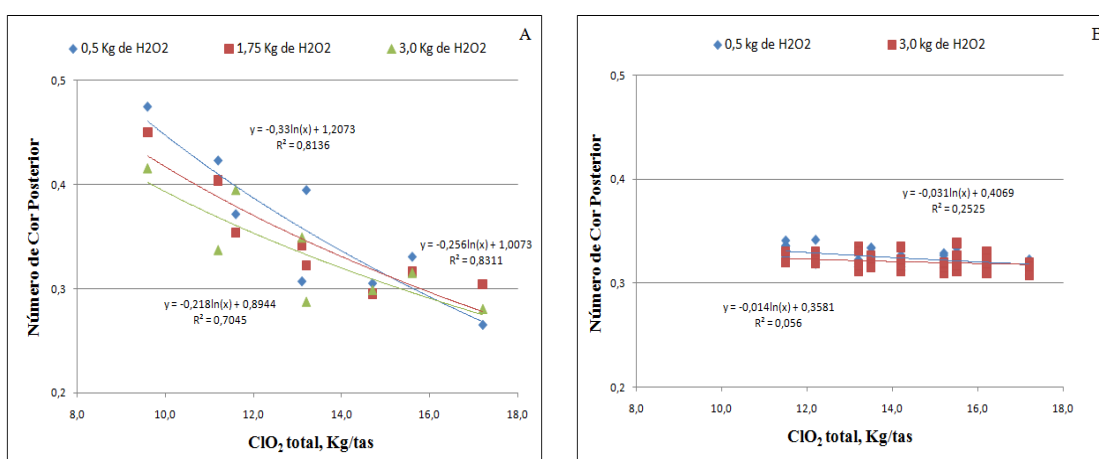


Figura 11 - Efeito da dosagem de peróxido de hidrogênio e da dosagem de dióxido de cloro na reversão de alvura das polpas de Pinho (A) e Eucalipto (B).

Ao comparar a polpa de Pinho com a de Eucalipto verifica-se que na polpa de Eucalipto ocorreu menor reversão e menor variação de reversão de alvura em relação à polpa de Pinho; esse fato pode ser explicado pela maior variação de alvura final na polpa de Pinho (alvuras finais mais baixas) em relação à polpa de Eucalipto. Porém para uma alvura de 90%ISO a polpa de Pinho apresentou menor valor de reversão de alvura que a polpa de Eucalipto.

As viscosidades das polpas de Pinho e Eucalipto diminuíram com o aumento da dosagem total de dióxido de cloro e com o aumento da dosagem de peróxido de hidrogênio utilizado no estágio (EPO) (Figura 12). A decomposição do peróxido de hidrogênio em meio alcalino gera radicais livres que atacam as fibras de celulose, reduzindo a viscosidade da polpa.

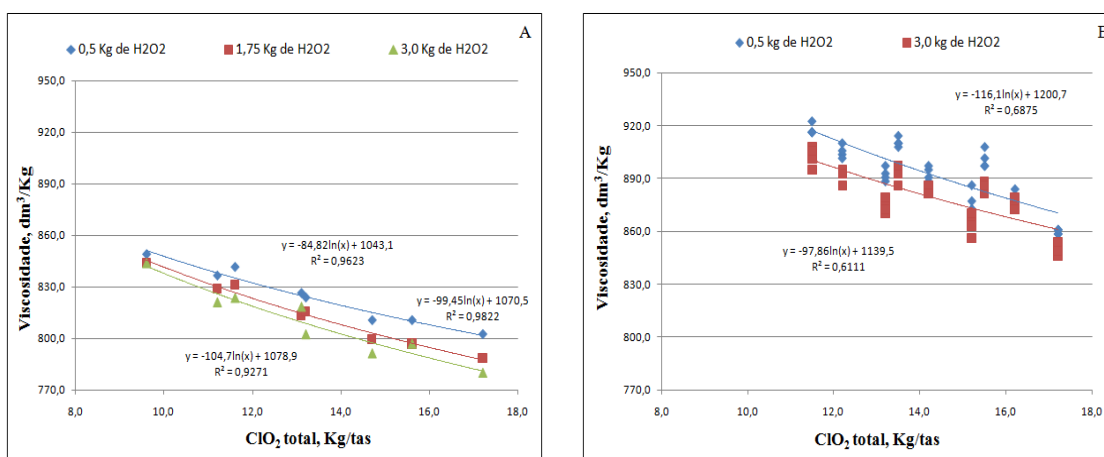


Figura 12 - Efeito da dosagem de peróxido de hidrogênio e da dosagem de dióxido de cloro na viscosidade das polpas de Pinho (A) e Eucalipto (B).

Os valores de viscosidade da polpa de Eucalipto foram mais altos que os da polpa de Pinho, em razão da viscosidade inicial mais baixa da polpa de Pinho e das maiores perdas de viscosidade das polpas de Pinho no branqueamento, em relação à polpa do Eucalipto. As perdas maiores no caso do Pinho são explicadas pela maior demanda de dióxido de cloro para alcançar a alvura de 90% ISO.

4.2.2.3. Efeito da dosagem de oxigênio no estágio (EPO) para polpa de Eucalipto

Na Figura 13 são mostrados os resultados da alvura em função do consumo total de ClO₂ e do custo total de reagentes, para a polpa de Eucalipto, com 3,3 kg/tas de

oxigênio e sem a utilização de oxigênio no estágio (EPO). Verifica-se que o uso de oxigênio não afetou significativamente o consumo de dióxido de cloro nem o custo total de branqueamento. A reversão de alvura também não foi afetada pela dosagem de oxigênio no estágio (EPO) (Figura 14). A viscosidade da polpa tende a diminuir com o aumento da dosagem de dióxido de cloro e com o uso de oxigênio no estágio (EPO) (Figura 15).

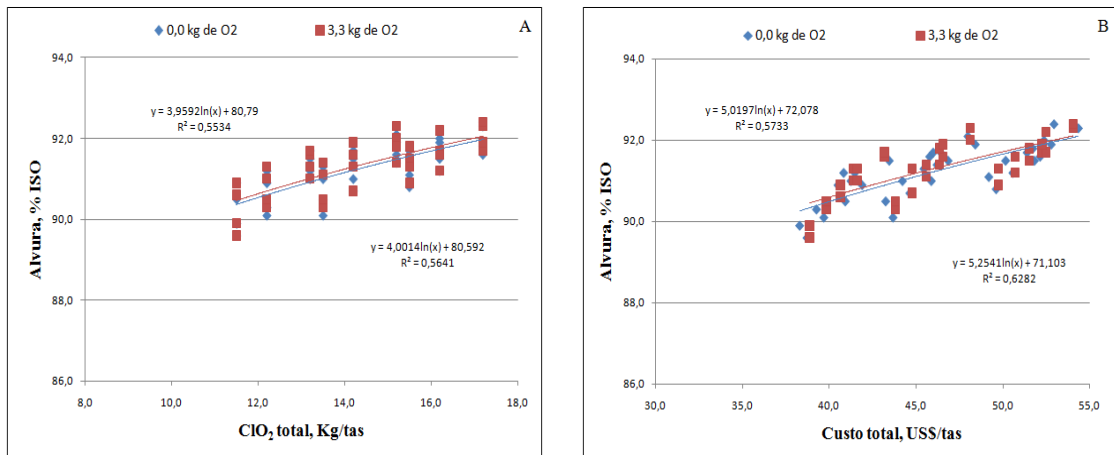


Figura 13 - Efeito da dosagem de oxigênio no estágio (EPO), da dosagem total de dióxido de cloro (A) e do custo total de branqueamento (B) na alvura da polpa de Eucalipto.

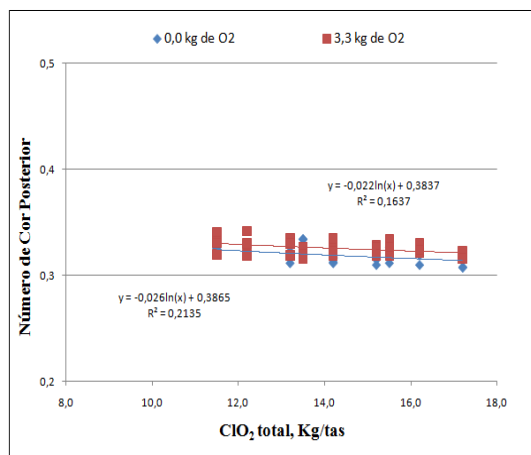


Figura 14 - Efeito da dosagem de oxigênio no estágio (EPO) e da dosagem total de dióxido de cloro na reversão de alvura da polpa de Eucalipto.

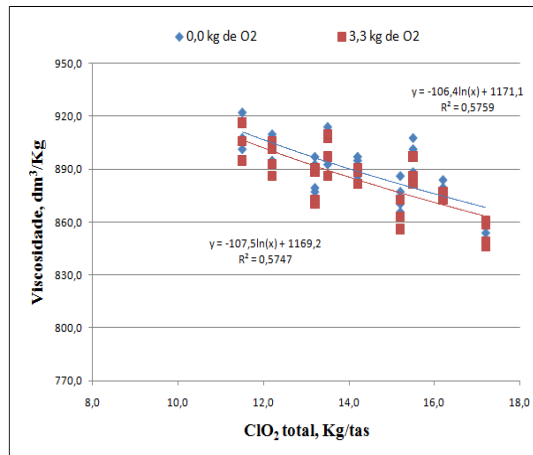


Figura 15 - Efeito da dosagem de oxigênio no estágio (EPO) e da dosagem total de dióxido de cloro na viscosidade da polpa de Eucalipto.

4.2.2.4. Condições aperfeiçoadas para o estágio (EPO)

Para o aperfeiçoamento do estágio (EPO) das polpas de Pinho e Eucalipto é recomendando as seguintes alterações apresentadas no Quadro 10.

Quadro 10 - Condições operacionais para o estágio (EPO) das polpas de Pinho e Eucalipto

Condições e Resultados	Pinho		Eucalipto	
	Referência	Aperfeiçoada	Referência	Aperfeiçoada
Tempo, min.	110	-	130	-
Consistência, %	10,5	-	10,5	-
Pressão, kPa	499	499	477	0,0
Dosagem de O ₂ , kg/tas	4,7	4,7	3,3	0,0
Temperatura, °C	77	85	76	85
Dosagem de H ₂ O ₂ , kg/tas	0,5	0,5	0,5	0,5

Para aperfeiçoamento do estágio (EPO) da polpa de Pinho e de Eucalipto, é recomendada a utilização de uma temperatura mais alta (85° C). De acordo com BRIAN et al. (1995), a aplicação de peróxido de hidrogênio em temperaturas mais elevadas aumenta a eficiência do processo. A taxa de extração dos grupos cromóforos pelo peróxido é governada pela lei de Arrhenius que prevê um aumento da velocidade de

reação com o aumento da temperatura, melhorando também a difusão dos reagentes no meio reacional.

Estudos (PEREIRA, et al., 1994) mostraram que a pressão e o tipo de gás pressurizante é outro fator importante para aumentar a eficiência do branqueamento com peróxido, tendo sido o oxigênio considerado o gás mais apropriado. Deve ser ressaltado que esse estudo foi efetuado com cargas muito elevadas de peróxido e focalizado no branqueamento de polpa por processos TCF.

Nesse estudo a dosagem de oxigênio do estágio (EPO) foi analisada somente para a polpa de Eucalipto e verificou-se que o oxigênio não promoveu efeitos relevantes na alvura final da polpa, podendo ser eliminado do processo sem causar prejuízos à qualidade da polpa; pela eliminação do oxigênio o estágio (EPO) seria convertido em (EP), assim eliminando a necessidade do uso de um sistema pressurizado.

Para a polpa de Pinho a presença de oxigênio no estágio (EPO) é importante, pois nesta etapa a polpa ainda contém quantidade significativa de lignina condensada em sua constituição, diferentemente do que ocorre com o Eucalipto. O oxigênio é um agente eletrofílico e, portanto, muito útil na ação de deslignificar, ou seja, atacar a lignina, mas não os ácidos hexenurônicos, que são resistentes ao oxigênio. Portanto, quando o oxigênio é aplicado no estágio de extração alcalina para o branqueamento de fibras longas (Pinho), são alcançados resultados significativos, pois estas fibras apresentam números kappa na faixa de 4,0 a 6,0 na entrada da primeira extração, sendo estes valores basicamente representados por lignina residual. Por outro lado, as polpas de eucalipto (fibras curtas) entram no primeiro estágio de extração com números kappa muito baixos (1,5 - 3,0), sendo estes valores, na sua grande maioria, representados por ácidos hexenurônicos. Uma vez que o oxigênio não reage com ácidos hexenurônicos (VUORINEN et al.,1996) ele tem um papel muito pequeno quando aplicado no primeiro estágio de extração de polpas de fibras curtas.

A menor dosagem de peróxido de hidrogênio (0,5 kg/tas) foi escolhida como “ideal” para o estágio (EPO), pois esta atingiu a alvura desejada (90% ISO) em ambas as polpas estudadas, com um menor custo final de branqueamento.

4.2.3. Aperfeiçoamento do estágio D₁ e D₂

No estágio D₁ foram testadas quatro cargas de dióxido de cloro (1,5, 3,5, 5,0 e 7,5 kg/tas) para a polpa de Pinho e três cargas de dióxido de cloro (6,4, 8,4 e 10,4

kg/tas) para a polpa de Eucalipto, com o objetivo de alcançar a aperfeiçoamento do estágio, ou seja, alcançar a alvura de 90% ISO com o menor consumo de ClO_2 e menor custo total. Para o estágio final de branqueamento (D_2), foram utilizadas as cargas fixas de 2,0 kg/tas e 1,5 kg/tas de ClO_2 para as polpas de Pinho e Eucalipto, respectivamente. Esses valores são os mesmos utilizados no estágio D_2 da fábrica. Nos Quadros 6-11 do Apêndice A e 1-24 do Apêndice B estão apresentados os resultados experimentais do aperfeiçoamento do estágio D_1 e D_2 para as polpas de Pinho e Eucalipto, respectivamente.

Para a sequência aperfeiçoada da polpa de Eucalipto foram testados três valores de pH (4,0, 4,5 e 5,5) em D_1 e dois valores de pH final (4,0 e 5,0) em D_2 . Os resultados experimentais do aperfeiçoamento do pH do estágio D_1 e D_2 da polpa de Eucalipto encontram-se nos Quadros 26-31 do Apêndice B.

4.2.3.1. Condições aperfeiçoadas para o estágio D_1 e D_2

Para a polpa de Pinho, foi considerada como condição ideal para operar o estágio D_1 a dosagem de dióxido de cloro de 5,0 kg/tas, sendo esta, a mesma dosagem utilizada pela fábrica (referência). Para a polpa de Eucalipto foi considerada a dosagem de dióxido de cloro de 6,4 kg/tas como ideal, resultando numa economia de 2,0 kg/tas de dióxido de cloro em relação ao branqueamento de referência.

Para a polpa de Eucalipto, embora o pH do estágio D_1 não tenha afetado significativamente a demanda de ClO_2 na faixa de 4,0-5,5, o pH final de 4,0 foi o que resultou no menor custo de reagentes para a alvura desejada. No estágio D_2 a diferença de pH não causou mudanças relevantes na alvura e no consumo de reagentes químicos no branqueamento final da polpa; porém, o pH 5,0 resultou no menor custo de branqueamento. No Quadro 11 observa-se o efeito do pH em D_1 e D_2 na polpa de Eucalipto.

Quadro 11 – Efeito do pH em D₁ e D₂ para o branqueamento de polpa de Eucalipto para a sequência D(EPO)DD

	pH D ₁	4,0	4,0	4,5	4,5	5,5	5,5
	pH D ₂	4,0	5,0	4,0	5,0	4,0	5,0
Fator Kappa		0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
pH D ₀		4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
ClO ₂ Total, kg/tas		12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
ClO₂ Total para 90% ISO, kg/tas		12,0	11,7	11,9	11,6	11,6	11,3
H ₂ O ₂ , kg/tas		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
O ₂ , kg/tas		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NaOH Total, kg/tas		13,7	14,2	14,2	14,7	14,7	15,2
H ₂ SO ₄ Total, kg/tas		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Cloro Ativo Total, kg/tas		33,1	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1
Custo Total de Reagentes, US\$/tas		39,3	39,8	39,8	40,3	40,3	40,8
Custo Total Reagente (90% ISO), US\$/tas		38,9	38,8	39,2	39,1	39,1	39,0
Número Kappa da Polpa Branqueada		1,2	1,1	1,2	1,0	1,1	0,9
Alvura, % ISO		90,3	90,8	90,4	91,0	90,6	91,3
Alvura Revertida, % ISO		87,8	88,2	87,9	88,3	88,0	88,5
Reversão, % ISO		2,5	2,6	2,5	2,7	2,6	2,8
Viscosidade, dm ³ /kg		912	906	912	899	910	895

Os dados apresentados no Quadro 11 mostram que a combinação do valor de pH final 4,0 em D₁ e 5,0 em D₂ na sequência estudada apresentou menor custo final de branqueamento para uma alvura de 90% ISO.

Estudos realizados por MILANEZ et al. (2008) reportam que a alvura final aumenta com o aumento do pH na faixa de 3,5 a 5,5. A eficiência de alvejamento da polpa é maior no pH 5,5 apesar do fato de que mais dióxido de cloro é convertido em clorito nesse valor de pH.

A viscosidade da polpa tende a decrescer com o aumento do pH de 4,0 para 5,0 no estágio D₂, um fato que pode ser explicado pela concentração mais alta de ácido hipocloroso no sistema nos valores de pH mais altos.

4.3. Branqueamento pela sequência aperfeiçoada

Após o aperfeiçoamento das condições de cada estágio da sequência D₀(EPO)D₁D₂ para polpa de Pinho e Eucalipto, foi realizado um branqueamento completo com o objetivo de comparar os resultados de consumo de reagentes e características da polpa branqueada, com os do branqueamento de referência (condições de projeto). Os resultados experimentais do branqueamento com as condições aperfeiçoadas e de referência encontram-se, respectivamente, nos Quadros 6A e 9A do Apêndice A para a polpa de Pinho e nos Quadros 25B e 32B do Apêndice B para a polpa de Eucalipto. Nos Quadros 12 e 13 são apresentados resumos das condições aperfeiçoadas de todos os estágios da sequência estudada para as polpas de Pinho e Eucalipto, respectivamente.

Quadro 12 - Condições aperfeiçoadas para o branqueamento da polpa de Pinho com a sequência D(EPO)DD.

Condições	D ₀	(EPO)	D ₁	D ₂
Temperatura, °C	57	85	76	76
Tempo, min.	56	110	147	150
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5
Pressão, kPa	-	499	-	-
Fator kappa	0,16	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	6,1	-	5,0	2,0
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-
pH final	2,8	10,5	4,0	4,0

Quadro 13 - Condições aperfeiçoadas para o branqueamento da polpa de Eucalipto com a sequência D(EPO)DD.

Condições	D ₀	(EPO)	D ₁	D ₂
Temperatura, °C	56	85	74	75
Tempo, min.	90	130	170	170
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5
Fator kappa	0,12	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-
pH final	4,0	11,2	4,0	5,0

No Quadro 14 estão apresentados os resultados comparativos do branqueamento pelas sequências aperfeiçoada e referência das polpas de Pinho e Eucalipto.

Quadro 14- Resumo dos resultados do branqueamento a 90% ISO das polpas de Pinho e Eucalipto

Característica	Pinho Ref.	Pinho Aperfeiçoada	Eucalipto Ref.	Eucalipto Aperfeiçoada
Consumo de ClO ₂ , kg/tas	14,2 ^a	12,6 ^b	16,0 ^c	11,5 ^d
Custo total, US\$/tas	43,1 ^a	40,2 ^b	47,1 ^c	38,4 ^d
Viscosidade, dm ³ /kg	811 ^a	826 ^b	829 ^b	895 ^c
Reversão de alvura, % ISO	2,4 ^a	2,3 ^a	2,8 ^b	2,7 ^b
Número Kappa	0,4 ^a	0,7 ^b	0,6 ^b	1,0 ^c
AOX, mg/l	5,61 ^a	3,16 ^b	3,28 ^b	2,25 ^c
HexA's (mmol/kg)	1,8 ^a	1,9 ^{ab}	2,2 ^b	2,7 ^c

Nota: As médias, sobreescritas pelas mesmas letras, em cada linha, não diferem entre si pelo teste da diferença mínima significativa de Tukey (HSD), a 5% de probabilidade.

A sequência aperfeiçoada da polpa de Pinho resultou numa economia de 1,60 kg de ClO₂/tas e US\$ 2,90/tas. Para a polpa de Eucalipto essa economia foi de 4,50 kg de ClO₂/tas e US\$ 8,7/tas.

A viscosidade mostrou-se maior nas condições aperfeiçoadas tanto para a polpa de Pinho quanto de Eucalipto e diferiram-se estatisticamente das condições de referência para ambas as polpas.

A reversão de alvura não mostrou diferenças estatisticamente significativas entre as condições de referência e aperfeiçoada para as polpas de Pinho e Eucalipto, mas mostrou-se estatisticamente diferentes entre as duas polpas; essa diferença se deve ao maior teor de ácidos hexenurônicos na polpa de Eucalipto em relação ao Pinho, e estes contribuem para a reversão de alvura.

Em relação ao número kappa, este se apresentou maior nas condições aperfeiçoadas e foram estatisticamente diferentes das condições de referência para ambas as polpas.

Os valores de AOX do filtrado combinado dos estágios de branqueamento mostraram-se maiores nas condições de referência tanto para a polpa de Pinho quanto de Eucalipto e diferiram-se estatisticamente das condições aperfeiçoadas de ambas as polpas. O menor valor de AOX nas polpas obtidas pelo processo aperfeiçoado se deve ao menor consumo total de ClO_2 e ao maior valor de pH no estágio D_0 ; JONCOURT et al. (2000) relatam que o aumento do pH do estágio D_0 resulta em decréscimo na formação de AOX no efluente.

O conteúdo de ácidos hexenurônicos na polpa de Pinho não teve diferenças estatisticamente significativas entre as condições de branqueamento de referência e aperfeiçoada. Já para a polpa de Eucalipto, os teores de HexA são diferentes estatisticamente entre as condições. A polpa produzida pelo processo aperfeiçoado apresentou um teor de HexA maior que o da polpa de referência, esse fato se deve a maior quantidade de ClO_2 usada no branqueamento de referência.

Grande parte das vantagens da sequência aperfeiçoada em relação à referência, tanto para a polpa de Pinho quanto para a polpa de Eucalipto, foi causada pelo uso de um fator kappa mais baixo no estágio D_0 da sequência aperfeiçoada. No caso da sequência de referência, foi utilizado um fator kappa mais alto no estágio D_0 , que resultou em um gasto maior de ClO_2 , elevando o custo final do branqueamento. É importante destacar que a temperatura do estágio (EPO) deve ser elevada para 85°C , já que esta proporcionou polpas com valores de alvura maiores.

No Quadro 15 está apresentada a constituição química dos carboidratos medidos nas polpas branqueadas pelas sequências de referência e aperfeiçoada, para as polpas de

Pinho e Eucalipto. Os valores estão expressos em % base peso da polpa absolutamente seca.

Quadro 15 - Constituição química dos carboidratos das polpas de Pinho e Eucalipto

Característica	Pinho Ref.	Pinho Aperfeiçoada	Eucalipto Ref.	Eucalipto Aperfeiçoada
Glicanas, %	85,6 ^a	84,7 ^a	80,3 ^b	79,6 ^b
Xilanas, %	7,5 ^a	7,0 ^a	18,8 ^b	19,1 ^b
Mananas, %	5,2 ^a	5,8 ^a	-	-

Nota: As médias, sobrescritas pelas mesmas letras, em cada linha, não diferem entre si pelo teste da diferença mínima significativa de Tukey (HSD), a 5% de probabilidade.

Não foram observadas diferenças estatísticas na composição de carboidratos das polpas de Pinho e Eucalipto produzidas nas condições de referência e aperfeiçoadas.

Naturalmente, as composições polissacarídicas das polpas de Pinho e de Eucalipto são muito diferentes entre si. As polpas de Pinho possuem teores de glicanas estatisticamente maiores e teores de xilanas estatisticamente menores que as polpas de Eucalipto. Em relação às mananas, as condições de tratamento das polpas de Pinho são iguais estatisticamente; as polpas de Eucalipto não possuem mananas em sua constituição química.

4.4. Propriedades físico-mecânicas das polpas de Pinho e Eucalipto produzidas em condições aperfeiçoadas e de referência

Após o branqueamento, as polpas de Pinho e Eucalipto (condições de referência e aperfeiçoada) foram refinadas em diferentes níveis de refino e avaliadas quanto às suas propriedades físico-mecânicas. Os resultados obtidos em uma série de propriedades estão representados nas Figuras 16 a 24 na forma gráfica. Todas as propriedades foram expressas em função do grau Schopper Riegler (resistência a drenagem), uma vez que este se relacionou melhor graficamente com as demais propriedades. As polpas foram comparadas aos pares, polpa de referência e aperfeiçoada, sendo esses pares oriundos da mesma sequência de branqueamento. Cada gráfico apresenta, além dos pontos representativos das médias dos dados experimentais, as curvas que descrevem os modelos ajustados. A maior parte das vezes têm-se uma curva comum no gráfico,

evidenciando comportamentos iguais entre as polpas estudadas, ou seja, indicando que a hipótese de igualdade entre as equações, testada pelo teste F para identidade de modelos, foi aceita, a uma significância de 5%. Em apenas dois casos é observado que os dois modelos ajustados diferem estatisticamente, a 5% de probabilidade, e, portanto, têm-se duas curvas distintas no gráfico, evidenciando comportamentos diferentes entre as polpas estudadas. Todos os dados experimentais estão apresentados no Quadro 1C do Apêndice C.

4.4.1. Índice de Tração

O índice de tração expressa a resistência de papéis à tração. Este índice deriva da força de tração responsável pela ruptura do corpo-de-prova, em relação à sua largura e gramatura. O número de ligações interfibrilares durante a formação do papel é o parâmetro que mais influencia essa propriedade (D'ALMEIDA, 1988).

SMOOK (1990) relatou que a resistência à tração é determinada ao medir a força requerida para rompimento de uma tira de papel quando a sua largura e a velocidade da carga são padronizadas.

A resistência à tração é relacionada com a durabilidade e utilidade de um papel, como por exemplo, para embalagens, e outros usos sujeitos a tensão direta. No caso de papéis de impressão, a resistência à tração indica a probabilidade de ruptura quando estão sujeitos a tensão exercida durante o processo de impressão (D'ALMEIDA, 1988).

Na Figura 16 são apresentadas as relações entre o índice de tração e o grau Schopper Riegler, para as condições de referência e aperfeiçoada das polpas de Pinho e Eucalipto.

Com base no teste F, a hipótese de igualdade das duas equações não foi rejeitada, podendo-se concluir que as duas equações não diferem significativamente ($P > 0,05$). Assim, uma equação comum pode ser usada como uma estimativa das duas equações envolvidas.

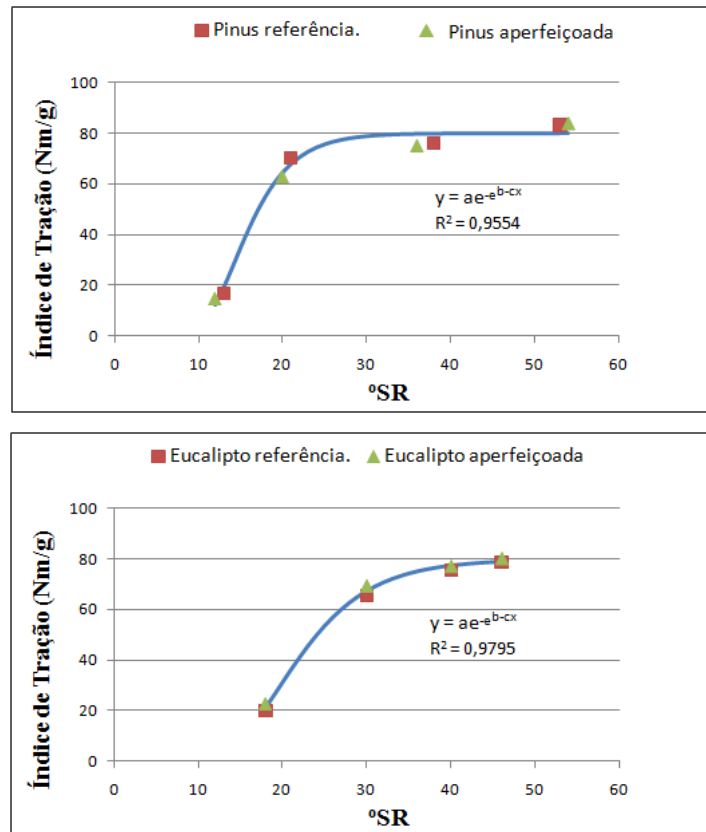


Figura 16. Índice de tração em função do grau Schopper Riegler para polpas de Pinho e Eucalipto branqueadas nas condições de referência e aperfeiçoadas.

Como se nota, a Figura 16 mostra a curva comum de resposta para índice de tração, ou seja, os resultados mostraram não haver diferença significativa no índice de tração tanto para as polpas de Pinho quanto para as de Eucalipto nas condições de referência e aperfeiçoada, independentemente do processo de branqueamento empregado.

4.4.2. Índice de Arrebatamento

A resistência ao arrebatamento é definida como a força necessária para promover o arrebatamento da folha de papel, ao aplicar uma pressão uniformemente crescente, transmitida por um diafragma elástico de área circular igual a 962mm² (SMOOK, 1990).

O índice de arrebatamento é influenciado, principalmente, pelo número de ligações interfibras e pela força destas ligações, portanto os efeitos primários do refino são intensificados com o aumento do grau de refino, o que resulta em maior

compactação e maior área de contato entre elas favorecendo o número e a força das ligações, consequentemente o aumento da resistência ao arrebentamento.

Na Figura 17 são apresentadas as relações entre o índice de arrebentamento e o grau Schopper Riegler, para as condições de referência e aperfeiçoada das polpas de Pinho e Eucalipto.

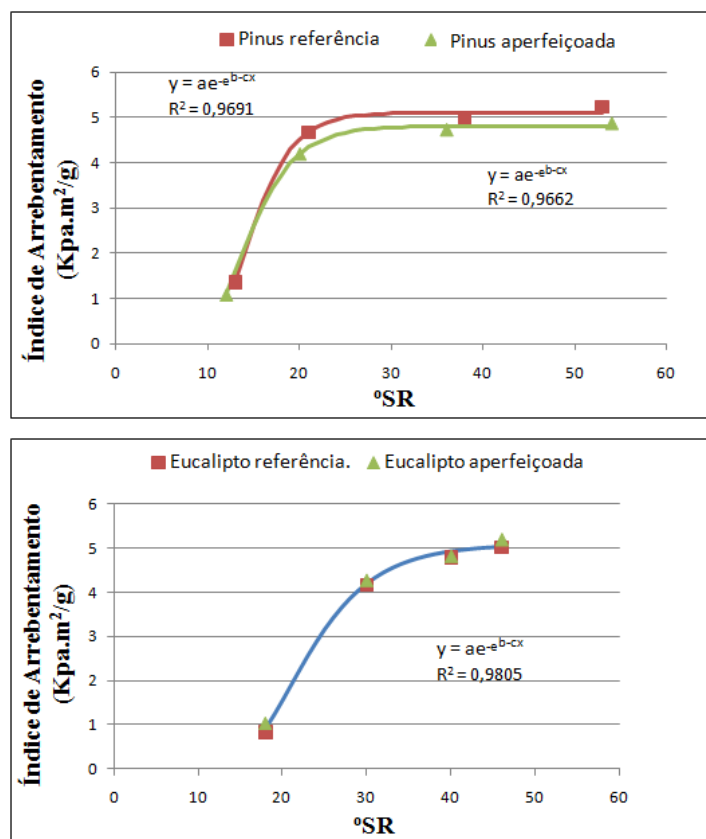


Figura 17. Índice de arrebentamento em função do grau Schopper Riegler para polpas de Pinho e Eucalipto branqueadas nas condições de referência e aperfeiçoadas.

É observado que há diferenças significativas entre o índice de arrebentamento nas condições de referência e aperfeiçoada da polpa de Pinho; e em relação a polpa de Eucalipto, os resultados mostram não haver diferenças significativas entre as condições estudadas, podendo ser representada por uma curva comum.

A polpa aperfeiçoada de Pinho apresentou índice de arrebentamento menor que polpa de referência. Isso se deve, provavelmente, ao fato de que, durante o branqueamento, a polpa referência de Pinho demandou uma carga excessiva de dióxido de cloro e foi, portanto, mais degradada. As fibras nessas condições, apesar de terem

uma estrutura mais frágil, refinam melhor e mais facilmente, portanto, tendem a formar maior número de ligações interfibras.

4.4.3. Índice de Rasgo

A resistência ao rasgo, por definição, é o trabalho executado por um pêndulo, necessário para rasgar um conjunto de folhas, após um corte inicial de comprimento especificado ter sido previamente realizado nas amostras (SMOOK, 1990). O índice de rasgo é o resultado da divisão da força média necessária para rasgar uma folha, pela sua gramatura (D'ALMEIDA, 1988).

A resistência ao rasgo é influenciada pelo número total de fibras que participam na ruptura da folha, no comprimento e na espessura das fibras e resistência das ligações interfibras (CASEY, 1966, citado por CASTANHO e OLIVEIRA, 2000).

As relações entre o índice de rasgo e o grau Schopper Riegler podem ser visualizadas na Figura 18, para as condições de referência e aperfeiçoada das polpas de Pinho e Eucalipto.

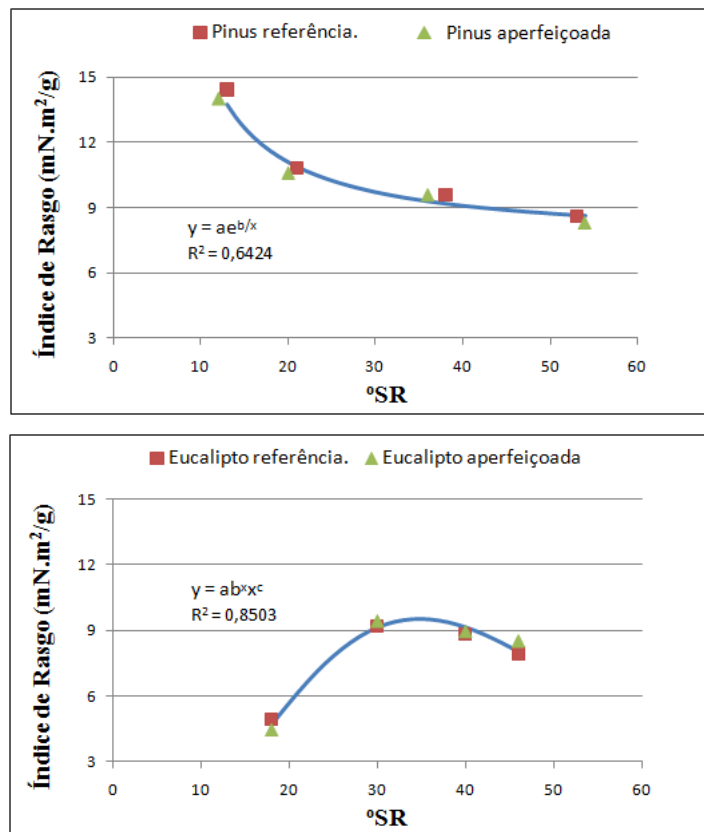


Figura 18. Índice de rasgo em função do grau Schopper Riegler para polpas de Pinho e Eucalipto branqueadas nas condições de referência e aperfeiçoadas.

A Figura 18 mostra não haver diferença significativa no índice de rasgo para as condições de referência e aperfeiçoada nas polpas de Pinho e Eucalipto; podendo ser representada por uma curva comum.

Ao compararmos a polpa de Pinho com a de Eucalipto, notamos que a polpa de Pinho possui, em geral, índice de rasgo muito maior que a polpa de Eucalipto no início do tratamento, isso se deve ao fato de a polpa de Pinho apresentar fibras longas, mais robustas; para a polpa de Eucalipto o índice de rasgo aumenta inicialmente até atingir o máximo valor, decaindo em seguida à medida que aumenta o refino.

4.4.4. Resistência à Passagem de Ar

A resistência à passagem de ar mostra o valor de resistência que determinada folha de papel tem sobre a passagem de dado volume de ar, de forma que um papel mais poroso leva a uma menor resistência à passagem de ar.

A resistência à passagem de ar é fortemente influenciada pelo refino, aumentando à medida que se eleva o grau de refino da polpa. Seu comportamento, em função do grau Schopper Riegler, pode ser evidenciado na Figura 19.

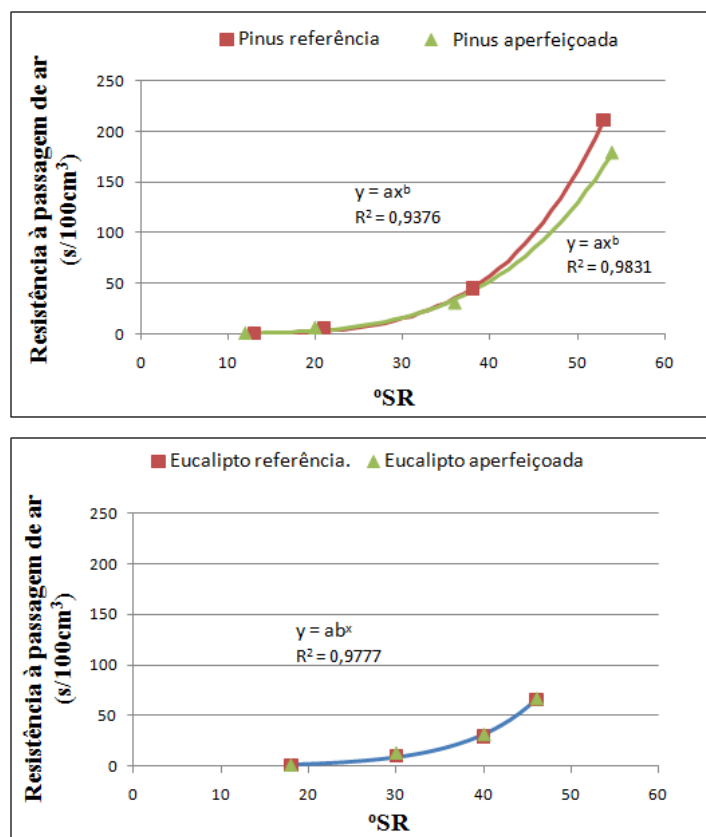


Figura 19. Resistência à passagem de ar em função do grau Schopper Riegler para polpas de Pinho e Eucalipto branqueadas nas condições de referência e aperfeiçoadas.

É observado que há diferenças significativas entre a resistência à passagem de ar nas condições de referência e aperfeiçoada da polpa de Pinho; e em relação a polpa de Eucalipto, os resultados mostram não haver diferenças significativas entre as condições estudadas, podendo ser representada por uma curva comum.

A polpa aperfeiçoada de Pinho apresentou uma menor resistência à passagem de ar que polpa de referência. Isso deve ao fato de que a polpa referência de Pinho demandou uma quantidade mais elevada de dióxido de cloro, e isso causou perda de viscosidade. Como a viscosidade tem alguma relação com a qualidade da fibra, era esperado que a polpa de referência apresentasse fibras mais frágeis aos efeitos primários de refino e possivelmente, com geração de finos durante o refino, diminuindo, assim, a quantidade de espaços vazios e, portanto, aumentando a resistência à passagem de ar.

Essa degradação da fibra durante o branqueamento, devido à maior carga de reagentes, não parece ter sido tão extensiva no caso da polpa de Eucalipto, tanto na condição de referência quanto na aperfeiçoada.

Comparando a polpa de Pinho com a de Eucalipto, a primeira apresenta maior resistência à passagem de ar ao longo do refino.

4.4.5. Módulo de Elasticidade Específico (MOE) e Energia de Deformação (TEA)

O módulo de elasticidade expressa a capacidade de um material resistir a uma deformação, quando é submetido a um esforço com variação crescente de carga aplicada por unidade de massa do material. O papel, quando submetido a um esforço contínuo, geralmente descreve, inicialmente, um comportamento linear (região elástica) e, após ultrapassar essa região, assume comportamento plástico (região plástica) até atingir a carga máxima que é capaz de absorver, chegando, portanto, ao rompimento (MOREIRA, 2006).

A energia de deformação (TEA) mede a habilidade do papel em absorver energia sob condições de aplicação de carga. O TEA é representado pela área sob a curva de força *versus* deformação, que corresponde às regiões de comportamento elástico e plástico do papel. A amostra de papel sofre deformação em regime de tração, em relação à sua forma original (MOREIRA, 2006).

Nas Figuras 20 e 21, apresentam-se os comportamentos do módulo de elasticidade específico (MOE) e da energia de deformação (TEA), respectivamente, em função grau Schopper Riegler, para as condições de referência e aperfeiçoada das polpas de Pinho e Eucalipto.

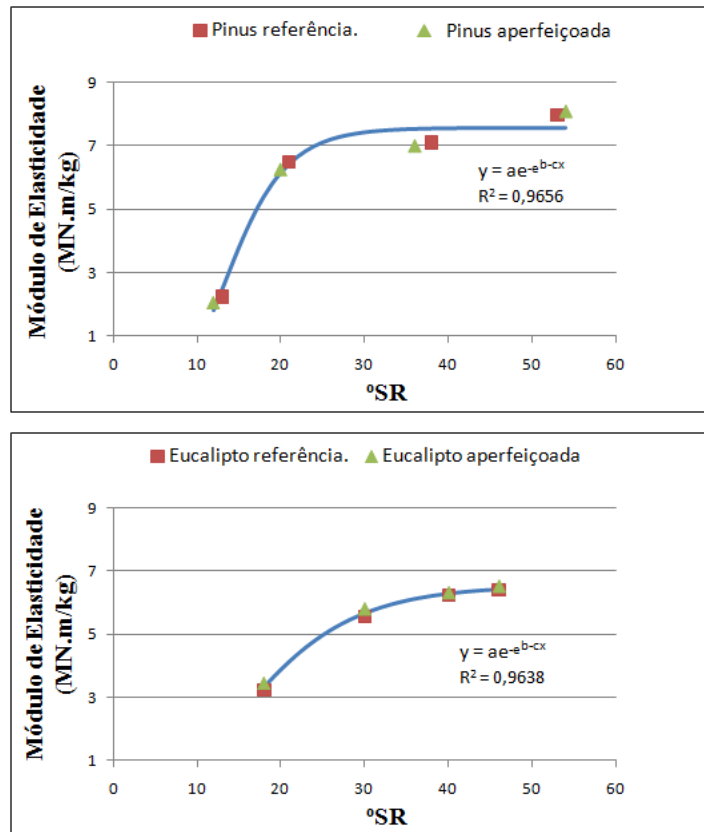


Figura 20. Módulo de elasticidade em função do grau Schopper Riegler para polpas de Pinho e Eucalipto branqueadas nas condições de referência e aperfeiçoadas.

Não se observaram diferenças significativas nos valores de módulo de elasticidade entre as condições estudadas (referência e ótima) das polpas de Pinho e Eucalipto, podendo ser representadas por uma curva comum.

Comparando-se a polpa de Pinho com a de Eucalipto, observa-se que a polpa de Pinho possui maior MOE que a de Eucalipto ao longo do refino das polpas, ou seja, maior é a capacidade do material absover determinada carga, sem sofrer grandes deformações.

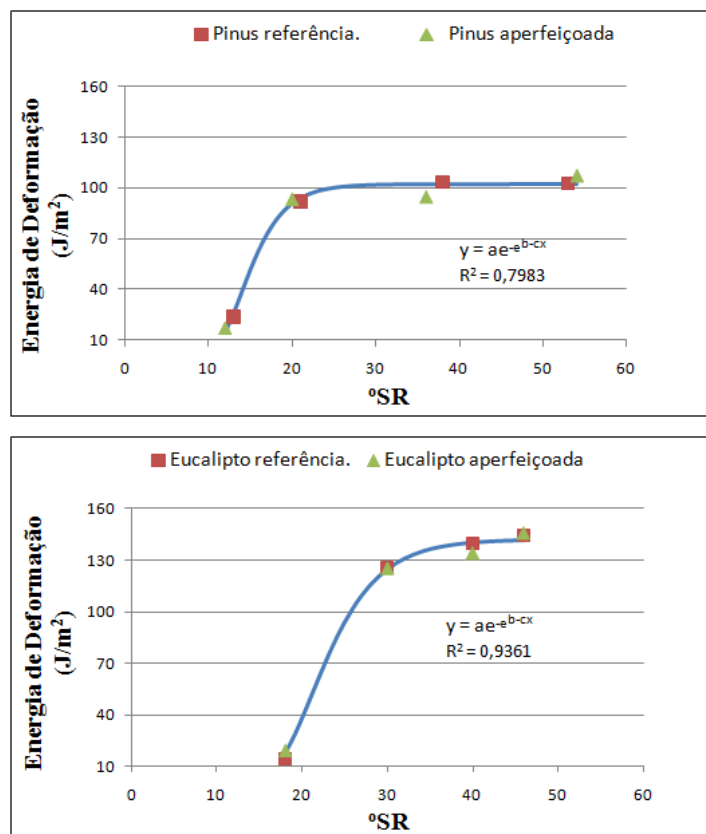


Figura 21. Energia de deformação em função do grau Schopper Riegler para polpas de Pinho e Eucalypto branqueadas nas condições de referência e aperfeiçoadas.

Não se observaram diferenças significativas nos valores de energia de deformação entre as condições estudadas (referência e aperfeiçoada) das polpas de Pinho e Eucalypto, podendo ser representadas por uma curva comum.

Comparando-se a polpa de Pinho com a de Eucalypto, observa-se que a polpa de Pinho possui menor TEA que a de Eucalypto ao longo do refino das polpas.

Dentre as características morfológicas das fibras, o diâmetro do lúmen tem maior influência no potencial de conformabilidade e colapsabilidade das fibras durante a formação do papel. No entanto, as fibras mais longas são, em geral, mais flexíveis, o que aumenta o potencial de colapsabilidade na formação do papel. Contudo, as fibras com maior fração parede, com a ação do refino, podem sofrer com maior efeito de desfibrilamento, aumentando o potencial de ligações interfibras, o que pode favorecer a absorção de energia quando da aplicação de uma força de tração.

4.4.6. Peso Específico Aparente (PEA) e Volume Específico Aparente (VEA)

O peso específico aparente (PEA) e o volume específico aparente (VEA) são propriedades bastante importantes quando se trata de papéis de impressão, já que estão intimamente ligadas com a opacidade do papel. Numa mesma matéria-prima, o aumento no VEA, ou seja, uma diminuição no PEA, significa aumento de opacidade.

O volume específico aparente, também conhecido como *bulk*, é obtido dividindo-se a espessura do papel por sua gramatura. As características estruturais das fibras também influenciam a determinação dessa propriedade. Fibras mais rígidas ao colapso contribuem com o incremento no volume específico dos papéis por apresentarem menor capacidade de conformação (HOWARD e BICHARD, 1992).

Nas Figuras 22 e 23, apresentam-se os comportamentos do peso específico aparente (PEA) e volume específico aparente (VEA), respectivamente, em função grau Schopper Riegler, para as condições de referência e aperfeiçoada das polpas de Pinho e Eucalipto.

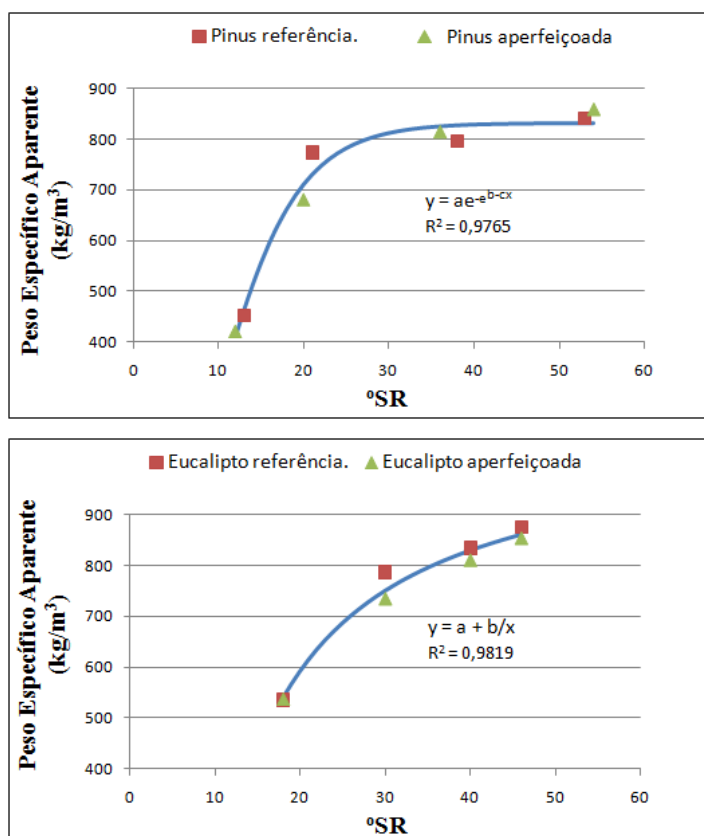


Figura 22. Peso específico aparente em função do grau Schopper Riegler para polpas de Pinho e Eucalipto branqueadas nas condições de referência e aperfeiçoadas.

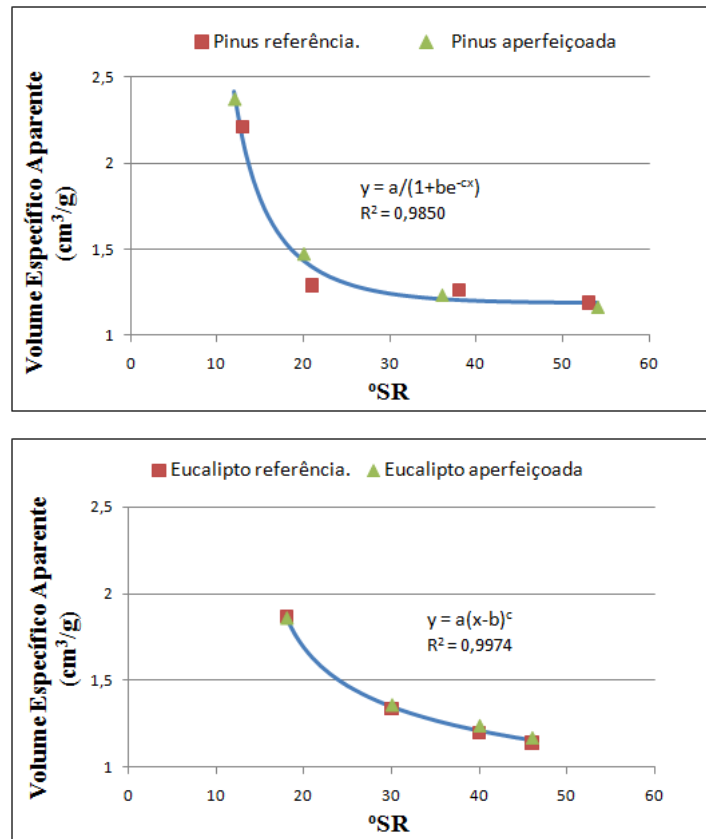


Figura 23. Volume específico aparente em função do grau Schopper Riegler para polpas de Pinho e Eucalypto branqueadas nas condições de referência e aperfeiçoadas.

Não foram verificadas diferenças significativas nos resultados de VEA das polpas branqueadas de Pinho e Eucalypto pelas condições de referência e aperfeiçoada, nem no PEA (Figura 22) de ambas as polpas pelas condições estudadas, podendo ser representadas por uma curva comum.

O refino tende a diminuir o VEA, como pode ser visualizado na Figura 23. A polpa de Pinho, por conter fibras longas (mais rígidas) apresenta-se com um maior VEA em relação a polpa de Eucalypto, no início do tratamento de refino.

4.4.7. Consumo de Energia no Refino

O refino é um processo que consome grande quantidade de energia, de forma que o consumo de energia durante o refino é um parâmetro importante na composição do custo de fabricação do papel.

A Figura 24 ilustra o consumo de energia durante o refino de cada polpa estudada, em função do grau schopper riegler.

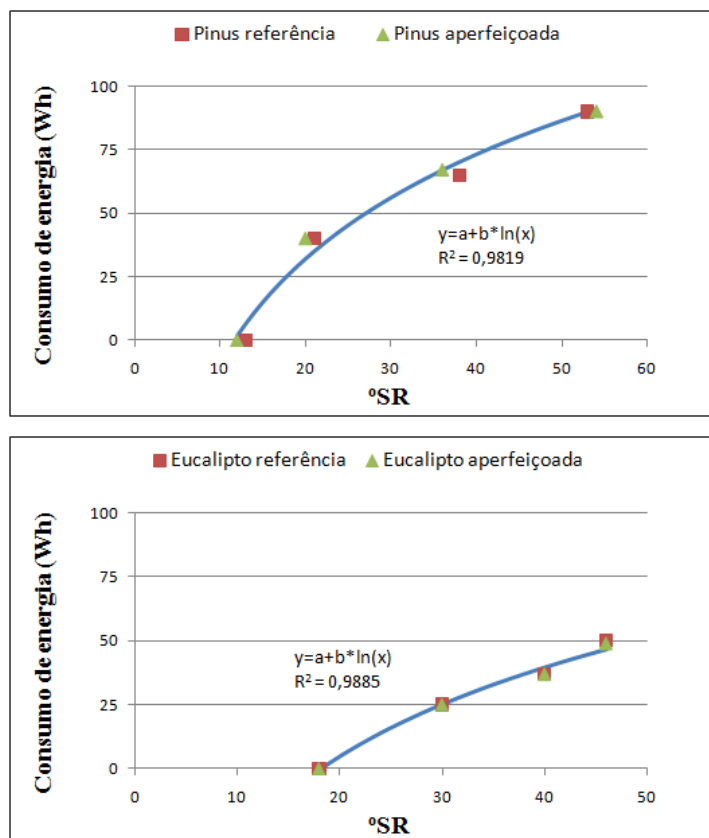


Figura 24. Consumo de energia em função do grau Schopper Riegler para polpas de Pinho e Eucalypto branqueadas nas condições de referência e aperfeiçoadas.

Os resultados mostraram não haver diferença significativa no consumo de energia para refinar as condições de referência e aperfeiçoada das polpas de Pinho e Eucalypto, independentemente do processo de branqueamento empregado.

Ao compararmos a polpa de Pinho com a de Eucalypto, observamos que a polpa de Pinho consome mais energia ao longo do refino que a polpa de Eucalypto.

5. CONCLUSÕES

- O estudo de aperfeiçoamento da sequência $D_0(EPO)D_1D_2$ permitiu reduzir o consumo de ClO_2 em 1,60 kg/tas para a polpa de Pinho e 4,50 kg/tas para a polpa de Eucalipto, sem prejuízos da qualidade da polpa ou dos filtrados, em relação à referência (condições de projeto).
- A sequência aperfeiçoada da polpa de Pinho resultou numa economia de US\$ 2,90/tas; para a polpa de Eucalipto essa economia foi de US\$ 8,70/tas.
- O estágio D_0 deve ser operado com um fator kappa mais baixo: 0,16 (Pinho) e 0,12 (Eucalipto) para se obter um menor consumo de ClO_2 sem causar prejuízos a alvura final desejada.
- O valor de pH do estágio D_0 da polpa de Eucalipto deve ser elevado de 2,8 para 4,0.
- O estágio (EPO) deve ser operado a uma temperatura de 85°C para ambas as polpas.
- O estágio D_2 na polpa de Eucalipto deve ser realizado a um valor de pH mais alto (pH 5,0).
- O aperfeiçoamento do branqueamento da polpa de Pinho acarretou em um menor índice de arrebatamento e uma menor resistência à passagem de ar em relação a polpa de referência; para as outras propriedades físico-mecânicas não houve diferenças estatísticas entre as condições estudadas.
- Para a polpa de Eucalipto as condições de referência e aperfeiçoada se mostraram estatisticamente iguais em todas as propriedades físico-mecânicas realizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABTCP **Curso sobre refinação da pasta celulósica**. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. São Paulo, 2001. 87p.

ANDREASSON, P., The corrosion of titanium in hydrogen peroxide bleaching solutions, **Proceedings...of the 8th International Symposium on Corrosion in the Pulp and Paper Industry**, Suecia, 119, 1995.

ANT-WOUORINEN,O.; VISAPAA, A. The dependence of the functional group determination results of cellulose on its state of accessibility. **Papper och Trã Journal**, n.10, p.479-490, 1956.

BARRICHELO, L. E. G. e FOELKEL, C. E. B. **Mistura de celuloses de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribea* var. *caribea***. IPEF, n.10, 1975. p 63-76.

BARROCA, M. J.M.C.; SIMÕES, R.M.S.; CASTRO, J.A.A.M. Kinetics of chlorine dioxide delignification of a hardwood kraft pulp. **Appita J.** 2001, 54(2), 190-195.

BASSA, A. G. M. C., JUNIOR, F.G. da S. e SACON, V. M. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids. **Sci. For.**, Piracicaba, n. 75, p. 19-29, set. 2007

BIERMANN, C.J. **Handbook of pulping and papermaking**. Academic Press. 2 ed. San Diego, 1996. 754p.

Brian p. Roy et al., Proc. Of **TAPPI** Pulping Conference, October 1-5, 1995, Chicago, USA.

BUCHERT, J.; TENKANEN, M.; VOURINEN, T.; VIKARI, L. Characterization of uronic acids during kraft and superbatches pulping. **In: International Symposium on Wood and Pulping Chemistry, Montreal**. Proc. Montreal: CPPA, 1997, p. M3- 1 – M3-3, v.9, 1997.

CASTANHO, C. G.; OLIVEIRA, R. C. Estudos de aproveitamento de rejeito fibroso industrial da polpação kraft de Eucalipto na produção de papéis reciclados. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL. 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2000. 18 p.

CHANDRANUPAP, P.; NGUYEN, K. L. Effect of pH on kinetics and bleaching efficiency of chlorine dioxide delignification. **Appita Journal**, v. 53, n. 2, p. 108- 110, 2000.

COSTA, M.M., COLODETTE, J.L. The effect of kraft pulp composition on its bleachability. In: **2002 International Pulp Bleaching Conference**. May 18-23, 2002, Portland. Oral Sessions. pp. 195-213.

COSTA, M. M.; OLIVEIRA, M. J; SANTOS, C. A. Efeito do fator kappa na estabilidade de alvura de polpas Kraft branqueada de *Eucalyptus* spp, Colóquio Internacional sobre Celulose Kraft de Eucalipto, **Anais...**, Viçosa, 2003.

CANADIAN PULP AND PAPER ASSOCIATION. **Technical Section. Standard test methods**. Montreal, 1986.

D'ALMEIDA, M. L. O **Celulose e papel**. Tecnologia de fabricação do papel. 2. ed., v. 2, São Paulo: IPT, 1988. 403 p.

DENCE, C. W. e REEVE, D. Pulp bleaching. Atlanta: **Tappi Press**, 1996.

DINWOODIE, J. M. **The relationship between fiber morphology and paper properties**: a review of literature. Tappi, Vol 48 n.8, August 1965. p 440-447.

EIRAS, K.M.M. E COLODETTE, J.L. (2003). **J. Pulp and Paper Science**, 29(2):1.

FENGEL, D. E WEGENER, G. (1984) Wood-Chemistry, Ultrastructure, Reactions. **Walter de Gruyter**, Berlin. p. 38

FOELKEL, C.E.B. **Estrutura da madeira**. Belo Oriente: Cenibra, 1977. 84p.

FORSSKÅHL, I. In: Papermaking Science and Technology. Editors J. Gullichsen and H. Paulapuro, **Tappi Press**, Atlanta, USA. 2000. p. 277-350

GARCÍA HORTAL, J.A. E VIDAL LLUCIÁ, T., **Ch. 1: Introducción en blanqueo de pastas en la industria papelera**, pp.1-25, ETSII de Terrasa, Ed. Publicación de La Universidad Politécnica de Cataluña (1984).

GAVRILIU, M., IRVING, J. CHAPPEL, D. Introduction of soluble MgSO₄ in peroxide – reinforced oxidative extraction at Fort James, Camas. **Pulping/Process & Product Quality Conference**, 2000.

GELLERSTEDT, G.; Li, J.; SVASTYANOVA, O. Proc. Eucepa Conference. **Sustainable Development for the pulp and paper industry**, 28, Lisboa, 2-4 Abril. Tecnicelpa, Tomar, Portugal. p. 58-64, 2003.

GERMGÅRD, U. Stoichiometry of chlorine dioxide prebleaching of softwood kraft pulp. **Svensk papperstidn.** 1982, 85(6), R43-R50.

HENRICSON, K. Paperi ja Püü, 79(8):546-550, 1997.

HOIGNÉ, J.; BADER, H. Kinetics of Reactions of Chlorine Dioxide (OClO) in Water – I. Rate Constants for Inorganic and Organic compounds. **Wat. Res.** 1994, 28(1), 45- 55.

HOWARD, R. C.; BICHARD, W. The basic effects of recycling on pulp properties. **Journal of Pulp and Paper Science**, v. 18, n. 4, p. j151-159, 1992.

JÄÄSKELÄINEM, A. S.; SAARIAHO, A. M.; MATOUSEK, P.; PARKER, A. W.; TOWRIE, M.; VUORINEM, T. Characterization of Residual Lignin Structures by UV Resonance Raman Spectroscopy and the Possibilities of Raman Spectroscopy in the Visible Region With Kerr-gated Fluorescence Rejection. ISWPC, Madison, WI, **Proceedings...**, 2003, p. 139-142.

JIANG, Z. H.; LIEROP, B. V.; BERRY, R. Hexenuronic acid groups in pulping and bleaching chemistry. **Tappi Journal**, v. 83, n. 1, p. 167-175, 2000.

JONCOURT, M.,J.; FROMENT, P.; LACHENAL, D.; CHIRAT, C. Reduction of AOX formation during chlorine dioxide bleaching. **Tappi J.** 2000, 83(1), 144-148.

KLEIN, R.J. and STRUNK, W.G. Low kappa factor bleaching – A Low capital strategy to achieve EPA guidelines. In: PULP & PAPER INTERNATIONAL NON CHLORINE BLEACHING CONFERENCE, 1994. **Proceedings...**, 1994, Session 2.3.

KLINE, J.E. **Paper and paperboard, manufacturing and converting fundamentals.** San Francisco. ed.2, 245p. 1991.

KLOCK, U.; SILVA, D. A.; ANDRADE, A. S.; BITTENCOURT, E.; MOCELIN, E.Z. **Propriedades do papel Kraft feito a mão a partir de *Pinus maximinoi* H. E. Moore e *Pinus taeda* L.** Congresso Iberoamericano de Investigación em Celulosa y Papel, 2002.

KOLAR, J.J.; LINDGREN, B.O.; PETTERSSON, B. Chemical reactions in chlorine dioxide stages of pulp bleaching. **Wood. Sci. Technol.** 1983, 17(2), 117-128

LEHTIMAA, T., TARVO, V., KUITUNEN, S., JÄÄSKELÄINEN, A., VUORINEN, T. The effect of process variables in chlorine dioxide prebleaching of birch kraft pulp. Part 1. Inorganic chlorine compounds, kappa number, lignin and hexenuronic acid content. **Journal of Wood Chemistry and Technology.** Julho, 2009.

LJUNGGREN, S.; GIDNERT, E. B.; KOLAR, J. Chlorine dioxide bleaching with a two-step low-to-high pH profile. **Tappi J.** 1996, 79(12), 152-160.

MCDONALD, R. G. **Pulp e paper manufacture: kraft pulping.** 2. ed. New York: McGraw-hill Book Company, 1967. p. 628-725. volume 1.

MÉNDEZ, C. M. e ÁREA, M. C., Cinética do estágio (EP) no branqueamento ECF de polpas Kraft. **O Papel**, n.6, p. 48-56, junho 2009.

MILANEZ, A. F., COLODETTE, J.L., CARVALHO, A. M. M. L. Condições ótimas para branquear polpa kraft de Eucalipto com uma sequência de três estágios. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 78, p. 105-113, jun. 2008.

MIMMS, A. Kraft pulping, a compilation of notes. **TAPPI PRESS**. ed.2. Atlanta, 1993. 181 p.

MOREIRA, E. **Efeito da lixiviação ácida de cavacos de Eucalipto no processo kraft**. Dissertação de mestrado. Viçosa – MG, 2006. 108p. Universidade Federal de Viçosa.

NEVELL, T.P.; ZERONIAN, S.H. **Celulose chemistry and its applications**. New York: John Wiley & Sons, 1985.

NISGOSKI, S. **Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L.** Curitiba. 2005. 160f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

OLIVEIRA, R. C.; FOELKEL, C.E.B.; GOMIDE, J. L. Misturas de madeiras de *Pinus strobus* var. *chiapensis* e *Eucalyptus urophylla* na polpação Kraft. **O Papel**, São Paulo, v 42, n.1, pp67-78, jan. 1981.

PEREIRA E.R., COLODETTE J.L. E BARNA J., 27º Congresso Brasileiro de Celulose e Papel. **Anais...** Novembro 7-11, 1994, São Paulo, Brasil.

PIOTTO, Z. C.; **Eco-eficiência na indústria de celulose e papel – estudo de caso**. Tese (Doutorado). São Paulo, 2003. 379p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PRYKE, D. C. e REEVE, D. W. Chlorine dioxide delignification practices in Canada. In: SPRING CONFERENCE, Whistler, 1997. **Proceedings...** Montreal, CPPA, 1997.

RÄMO, J., SILLAMPÄÄ, M., **Degradation of EDTA by hydrogen peroxide in alkaline conditions**, J. Cleaner Production, 9, 191-195, 2000.

RÄMÖ, J., **Hydrogen peroxide-metals-chelating agents; interactions and analytical techniques**, Tesis. pp 18-25., University of Oulu, Finlandia, 2003.

REGAZZI, A. Teste para identificar a identidade de modelos de regressão e igualdade de alguns parâmetros num modelo polinomial ortogonal. **Revista Ceres**. Viçosa, v. 40, n. 228, p. 176-195, 1993.

REGAZZI, A.; SILVA, C. H. O. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. I. Dados no delineamento inteiramente casualizado. **Revista Matemática Estatística**, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 33-45, 2004.

SAVOIE, M. TESSIER, P. (2001). **Pulp and Paper Can.**, 102(10): T282.

- SMIT, D. (1993). **Paper Southern Africa**, 8,34-39.
- SMOOK, G. A. Manual para técnicos de pulpa y papel. 1. ed. Atlanta: **Tappi Press**, 1990. 396 p.
- SUESS, H. U., FILHO, C. L., SCHMIDT, K., Alvura superior no branqueamento de pasta kraft de Eucalipto. **O Papel**, p. 78-86, março, 2001.
- TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi Standard Methods**, Atlanta: TAPPI, 1993, 1996 e 2000.
- TESSIER, P. and SAVOIE, M. **Chlorine Dioxide Delignification Kinetics and EOP Extraction of Softwood Kraft Pulp**. Can. J. Chem. Eng. 1997, 75 (1), 23-30.
- TUBINO, M.; FILHO, O.M., Branqueamento seletivo com peróxido de hidrogênio: estudos cinéticos e mecanísticos visando a catálise inteligente, **O Papel**, (2) 44-54, 1998.
- VUORINEN, T.; TELEMAN, A.; FAGERSTROM, P.; BUCHERT, J.; TENKANEN, M. Selective hydrolysis of hexenuronic acid groups and its application in ECF and TCF bleaching of kraft pulps. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE, 1996, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: Tappi Press, 1996. p. 43-51.
- XU, E.C., H₂O₂ Bleaching of Mechanical Pulps. Part I: Kinetics and Mechanism, **J. Pulp Paper Sci.** 26 (10) 367- 376, 2000.
- YOUNG, J. H. Pulp and paper: chemistry and chemical technology. **3 ed. John Wiley & Sons**. New York, 1980. 1446 p.
- WALLIS, A. F. A.; WEARNE, R. H.; WRIGHT, P. J. Chemical analysis of polysaccharides in plantation eucalyptus woods and pulps. **Appita Journal**, v. 4, p. 258-262, 1996.
- WILLER FERREIRA, G.; VIEIRA GONZAGA, J.; FOELKEL, C. E. B. et al. **Qualidade da celulose Kraft antraquinona de *Eucalyptus dunnii* plantado em cinco espaçamentos em relação ao *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna***. Ciência Florestal, Santa Maria, v 7, n.1, 1997, p 41-63.

Apêndice A – Branqueamento de *Pinus radiata*

Quadro 1: Resultados experimentais do efeito da DQO da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D2	D3	D4	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	3,5	5	7,5	2	2	2	14,2
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	1	1,2	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	0,7	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,9	-	-	-	-	0,4	-	-
pH final	2,9	11,4	4,3	4,1	4,0	4,0	3,9	4,3	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	63,6	73,4	82,6	86,4	88,8	88,9	90,5	91,3	90,0
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	86,3	88,1	89	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,4	2,3	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	-	-	-	-	824	810	800	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D2	D3	D4	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	3,5	5,0	7,5	2	2	2	14,3
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	1	1,2	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	0,7	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,9	-	-	-	-	0,4	-	-
pH final	2,9	11,5	4,2	4,0	4,0	3,9	3,9	4,2	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	63,5	73,3	82,6	86,3	88,6	88,9	90,4	91,3	-
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	86,3	88,1	89	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,3	2,3	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	-	-	-	-	824	811	804	-

Quadro 2: Resultados experimentais do efeito da DQO da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D2	D3	D4	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	4,1	6,1	8,1	2	2	2	15,3
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	1	1,3	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,1	-	-	-	-	0,5	-	-
pH final	2,8	11,2	3,9	3,8	4,0	4,1	4,2	4,3	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	61,5	71,6	82,5	86,2	88,6	88,8	90,4	91,1	90,0
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	86,2	87,9	88,5	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,5	2,6	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	-	-	-	-	821	810	802	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D2	D3	D4	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	4,1	6,1	8,1	2	2	2	15,3
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	1	1,3	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,1	-	-	-	-	0,5	-	-
pH final	2,7	11,1	3,8	3,8	4,1	4,2	4,1	4,2	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	61,4	71,8	82,7	86,3	88,7	88,9	90,4	91,2	-
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	86,3	88,0	88,6	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,4	2,6	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	-	-	-	-	824	811	804	-

Quadro 3: Resultados experimentais do efeito da DQO da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D2	D3	D4	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	4,9	6,9	8,9	2	2	2	16,0
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	1	1,5	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,3	-	-	-	-	0,5	-	-
pH final	2,7	10,9	3,9	3,7	4,0	3,9	3,9	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	9,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	60,1	70,5	82,7	86,4	88,8	89,0	90,6	91,4	90,0
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	86,3	87,9	88,7	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,7	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	-	-	-	-	819	804	800	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D2	D3	D4	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	4,9	6,9	8,9	2	2	2	16,0
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	1	1,5	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,3	-	-	-	-	0,5	-	-
pH final	2,6	10,8	3,8	3,7	3,9	4,0	4,1	4,2	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	9,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	60,2	70,6	82,7	86,6	88,9	89,1	90,5	91,3	-
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	86,3	87,7	88,6	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,8	2,8	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	-	-	-	-	818	806	804	-

Quadro 4: Resultados experimentais do efeito da DQO da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D2	D3	D4	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	6,1	8,1	10,1	2	2	2	17,3
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	1	1	1,7	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,5	-	-	-	-	0,6	-	-
pH final	2,6	10,7	3,9	3,5	4,2	4,1	4,2	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	12,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	58,9	69,4	82,6	86,3	88,6	88,9	90,4	91,3	90,0
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	86,2	87,6	88,5	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,8	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	-	-	-	-	816	801	797	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D2	D3	D4	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	6,1	8,1	10,1	2	2	2	17,3
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	1	1	1,7	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,6	-	-	-	-	0,7	-	-
pH final	2,7	10,8	3,9	3,4	4,1	4,3	4,1	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	12,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	59	69,6	82,6	86,4	88,7	89,0	90,4	91,4	-
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	86,3	87,7	88,6	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,7	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	-	-	-	-	813	800	796	-

Quadro 5: Resultados experimentais do efeito da DQO da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	D ₀	(EPO)	D ₂	D ₃	D ₄	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	7,0	9,0	11,0	2	2	2	18,2
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	1	1	2	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,7	-	-	-	-	0,8	-	-
pH final	2,5	10,5	3,6	3,3	3,8	4	3,9	3,8	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	15,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	57,8	68,5	82,7	86,4	88,7	88,9	90,5	91,5	90,0
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	86,1	87,5	88,5	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,8	3,0	3,0	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	-	-	-	-	813	800	793	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	D ₀	(EPO)	D ₂	D ₃	D ₄	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	7,0	9,0	11,0	2	2	2	18,2
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	1	1	2	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,8	-	-	-	-	0,9	-	-
pH final	2,4	10,3	3,7	3,4	3,9	4,0	4,1	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	15,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	57,9	68,6	82,8	86,5	88,8	88,9	90,5	91,6	-
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	86,2	87,4	88,6	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	3,1	3,0	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	-	-	-	-	811	798	791	-

Quadro 6: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação	
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D		D(EPO)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	150	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	6,1	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	2	13,10
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	2,5	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,3	-	-	-	-	-	-	0,7	-	-	-
pH final	2,9	11,5	4,2	4,1	4	4,3	3,9	4,1	4,2	4	4	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	59,6	70,7	78,3	80,2	83,6	85,6	86,4	88,1	90,0	90,6	90,0	90,0
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	83,9	85,8	87,7	88	88	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,5	2,3	2,3	2,6	2,6	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	850	841	828	811	811	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação	
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D		D(EPO)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	6,1	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	2	13,18
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	2,5	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,2	-	-	-	-	-	-	0,7	-	-	-
pH final	2,8	11,5	4,1	4	4	4,3	3,9	4,1	4,1	3,9	3,9	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	59,5	70,5	78,2	80,2	83,5	85,6	86,3	88,1	89,9	90,6	90,6	90
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	83,9	85,8	87,7	88	88	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,4	2,3	2,2	2,6	2,6	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	847	840	824	810	810	-

Quadro 7: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação	
	D ₀	(EPO)	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D	D	D	D		D(EPO)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	150	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	6,1	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	2	12,84
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	1,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	2,5	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,9	-	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-
pH final	2,9	11,3	3,6	3,7	3,5	3,8	3,9	4	3,9	4,2	-	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	59,6	73,1	79,0	80,5	84,0	86,1	86,9	88,6	90,3	91,0	90,0	-
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	84,5	86,3	87,7	88,4	-	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,4	2,3	2,6	2,6	-	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	844	831	813	797	-	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação	
	D ₀	(EPO)	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D	D	D	D		D(EPO)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	6,1	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	2	12,85
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	1,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	2,5	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3	-	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-
pH final	2,9	11,4	3,6	3,7	3,6	3,8	3,8	4	3,8	4,1	-	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	59,5	73,1	79,7	80,5	84,1	86,1	87	88,5	90,3	91	-	-
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	84,5	86,3	87,7	88,4	-	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,5	2,2	2,6	2,6	-	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	844	831	812	796	-	-

Quadro 8: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação	
	D ₀	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D		D(EPO)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	150	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	6,1	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	2	12,66
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	2,5	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,8	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-
pH final	2,9	11,5	4,1	4	4	3,8	4,2	4,2	3,9	4	4	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	59,6	75,8	80,6	81,6	84,8	86,7	87,9	88,8	90,5	91,4	91,4	90,0
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	85,4	86,3	87,8	88,7	88,7	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,5	2,5	2,7	2,7	2,7	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	844	825	819	797	797	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação	
	D ₀	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D		D(EPO)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	6,1	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	2	12,63
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	2,5	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,8	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-
pH final	2,8	11,4	4,1	4	3,9	3,8	4	4,2	3,9	3,9	3,9	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	59,6	75,9	80,7	81,6	84,9	86,8	87,9	88,9	90,5	91,3	91,3	-
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	85,4	86,3	87,8	88,7	88,7	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,5	2,6	2,7	2,6	2,6	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	843	823	819	796	796	-

Quadro 9: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação	
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D		D(EPO)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	150	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	2	14,23
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,9	-	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-
pH final	2,9	11,4	4,1	4,3	4,1	4	4,1	4	3,9	4,3	-	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	63,6	73,4	82,0	82,6	86,4	88,8	87,2	88,9	90,5	91,3	90,0	-
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	84,8	86,3	88,1	89	-	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,4	2,6	2,4	2,3	-	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	835	824	810	800	-	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação	
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D		D(EPO)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	2	14,3
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,9	-	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-
pH final	2,9	11,5	3,9	4,2	4	4	4,1	3,9	3,9	4,2	-	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	63,5	73,3	81,8	82,6	86,3	88,6	87,2	88,9	90,4	91,3	90,0	-
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	84,8	86,3	88,1	89	-	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,4	2,6	2,3	2,3	-	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	836	824	811	804	-	-

Quadro 10B: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação	
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D		D(EPO)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	150	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	2	13,20
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	1,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,6	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-	-
pH final	2,9	11,3	4	4,3	4	4,2	4,2	4,1	3,9	4,3	4,3	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	63,6	75,3	82,5	84,7	87,9	89,0	88,2	90,0	90,6	91,6	90,0	-
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	-	85,7	87,6	88,4	89	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	-	2,5	2,4	2,2	2,6	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	-	828	816	800	789	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação	
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D		D(EPO)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	2	13,20
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	1,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,6	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-	-
pH final	2,8	11,3	3,9	4,2	4	4	4,1	4	3,9	4,2	4,2	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	63,6	75,2	82,3	84,5	87,9	88,9	88,2	90	90,8	91,7	90,0	-
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	-	85,7	87,6	88,4	89	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	-	2,5	2,4	2,4	2,7	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	-	829	815	800	788	-

Quadro 11A: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	12,45
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,3	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-
pH final	2,9	11,3	4	3,7	3,9	3,9	4,1	3,9	4,1	4	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	67,7	77,9	83,5	85,7	88,5	89,3	89,0	90,6	91,1	92,0	90,0
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	86,8	88,3	88,6	89,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,2	2,3	2,5	2,6	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	820	801	790	780	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	77	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	55,6	109,8	147,3	147,3	147,3	147,3	149,7	149,7	149,7	149,7	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,7	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	12,49
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	1	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	2,4	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-
pH final	2,9	11,4	4	3,8	4	3,9	4,1	4	3,9	4,1	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	63,5	77,8	83,5	85,6	88,3	89,3	89,1	90,5	91	91,9	-
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	86,8	88,3	88,6	89,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,3	2,2	2,4	2,5	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	822	802	792	781	-

Quadro 12A: Resultados da otimização da sequência de branqueamento D₀(EPO)D₁D₂ com a temperatura de 85°C no estágio (EPO).

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação D(EPO)DD
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	85	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	6,1	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	12,6
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	2,5	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,0	-	-	-	-	-	-	0,4	-	-
pH final	2,8	10,8	4,1	4,2	3,9	4,1	4,0	4,0	4,1	3,9	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	59,8	80,5	78,8	80,6	84,0	86,2	87,0	88,5	90,4	90,9	90,0
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	84,4	86,3	88,0	88,6	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,6	2,2	2,4	2,3	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	842	831	820	809	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento										Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação D(EPO)DD
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D4	D	D	D	D	
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	57	85	76	76	76	76	76	76	76	76	-
Tempo, min	56	110	147	147	147	147	150	150	150	150	-
Pressão, kPa	-	500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	6,1	-	1,5	3,5	5	7,5	2	2	2	2	13,1
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	12,4	-	-	1	2,5	1	1	1	1	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	2,5	-	1,5	0,7	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	3,1	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-
pH final	2,9	10,9	4,0	4,1	3,8	4,2	4,1	4,0	3,9	3,8	-
Reagente	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	59,6	80,3	78,6	80,4	83,8	86,0	86,9	88,3	90,3	90,8	90
Alvura revertida, %	-	-	-	-	-	-	84,6	85,9	87,9	88,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	-	2,3	2,4	2,4	2,4	-
Viscosidade,	-	-	-	-	-	-	845	837	828	815	-

**Apêndice B – Branqueamento da mistura em diferentes proporções (30/70%) de
Eucalyptus globulus e *Eucalyptus nitens***

Quadro 1: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	13,11
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6,3	-	-	-	1,4	1,3	1,1	-
pH final	2,9	11,3	4,1	4,0	4,1	4,0	3,9	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	70,2	77,3	87,7	88,1	89,2	89,6	90,1	90,8	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,2	87,6	88,2	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,4	2,5	2,6	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,3	21,7	20,9	20,0	20,0	19,7	19,3	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	13,11
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6,3	-	-	-	1,4	1,3	1,1	-
pH final	2,9	11,3	4,0	4,0	4,1	4,1	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	70,3	77,3	87,6	88,1	89,1	89,6	90,1	90,8	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,2	87,6	88,3	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,4	2,5	2,5	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,3	21,7	20,8	20,0	20,1	19,7	19,3	-

Quadro 2: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,12
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6	-	-	-	1,3	1,1	1,0	-
pH final	2,8	11,3	4,1	3,9	4,2	3,9	4,1	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,5	78,4	88,0	88,5	89,4	90,1	90,7	91,2	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,7	88,2	88,5	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,4	2,5	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	21,6	20,9	20,1	19,3	19,4	19,0	18,3	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,12
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6	-	-	-	1,3	1,1	1,0	-
pH final	2,8	11,3	4,1	4,1	4,2	4,0	4,1	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,5	78,3	88,0	88,4	89,4	90,0	90,7	91,1	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,7	88,2	88,5	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,3	2,5	2,6	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	21,6	20,9	20,1	19,3	19,4	19,0	18,3	-

Quadro 3: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,61
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,2	-	-	-	1,1	1,0	0,9	-
pH final	2,8	11,3	4,1	4,0	4,2	3,9	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,0	78,9	88,5	88,8	89,6	91,0	91,4	91,6	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,4	88,7	88,9	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,7	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,0	19,3	18,5	17,8	18,9	18,2	17,4	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,61
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,2	-	-	-	1,1	1,0	0,9	-
pH final	2,8	11,3	4,1	3,9	4,1	3,9	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74	78,9	88,5	88,8	89,6	91,0	91,4	91,6	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,4	88,8	88,9	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,6	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,0	19,3	18,5	17,8	18,8	18,1	17,3	-

Quadro 4: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,13
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,9	-	-	-	1,2	1,1	1,0	-
pH final	2,9	11,2	4,0	4,0	4,1	4,1	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	70,3	82,0	88,7	89,2	89,9	90,5	91,0	91,5	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,1	88,4	88,8	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,4	2,6	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,5	19,5	19,1	18,8	19,3	18,9	18,5	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,13
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,9	-	-	-	1,2	1,1	1,0	-
pH final	2,9	11,2	4,0	4,0	4,1	4,1	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	70,3	82,0	88,7	89,2	89,9	90,5	91,0	91,5	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,0	88,4	88,8	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,5	2,6	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,6	19,7	19,2	19,0	19,3	18,8	18,6	-

Quadro 5: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,40
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,3	-	-	-	1,0	0,9	0,9	-
pH final	2,8	11,1	3,9	4,1	4,0	4,1	4,0	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,5	82,8	89,1	89,4	90,1	90,9	91,5	91,9	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,3	88,8	89,1	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,7	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,1	19,8	19,1	18,6	18,9	18,5	18,2	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,40
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,3	-	-	-	1,0	0,9	0,9	-
pH final	2,8	11,1	3,9	3,9	4,0	4,1	3,9	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,5	82,8	89,1	89,4	90,1	90,9	91,5	91,9	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,3	88,8	89,1	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,7	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,0	19,6	19,1	18,6	18,9	18,5	18,2	-

Quadro 6: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,00
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	4,9	-	-	-	1,0	0,8	0,7	-
pH final	2,8	11,3	4,1	4,0	4,2	3,9	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,0	83,8	89,5	89,8	90,5	91,5	91,9	92,3	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,9	89,1	89,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,8	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,6	19,0	18,5	18,0	18,2	17,7	17,0	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,00
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	4,9	-	-	-	1,0	0,8	0,7	-
pH final	2,8	11,3	4,1	4,0	4,2	3,9	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74	83,8	89,5	89,8	90,5	91,5	91,9	92,3	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,9	89,1	89,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,8	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,5	19,0	18,4	18,0	18,2	17,7	17,0	-

Quadro 7: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,83
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6,2	-	-	-	1,3	1,1	1,0	-
pH final	4,0	11,4	3,9	4,1	4,1	3,9	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,2	77,7	88,1	88,4	89,2	89,9	90,5	91,1	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,5	87,9	88,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,4	2,6	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,6	21,6	20,9	20,3	20,3	19,9	19,6	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,83
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6,2	-	-	-	1,3	1,1	1,0	-
pH final	4,1	11,4	4,1	4,1	4,2	4,0	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,1	77,7	88,1	88,4	89,3	89,9	90,5	91,1	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,5	87,9	88,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,4	2,6	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,6	21,5	20,8	20,2	20,2	19,9	19,6	-

Quadro 8: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,96
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	-	-	1,2	1,0	0,9	-
pH final	4,1	11,1	3,9	4,0	4,1	4,1	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,3	88,8	89,5	90,3	91	91,5	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,8	88,4	88,7	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,5	2,6	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,0	20,6	20,0	19,1	19,8	19,2	18,5	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,96
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	-	-	1,2	1,0	0,9	-
pH final	4,0	11,3	3,9	4,1	4,0	4,1	4,0	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,3	88,8	89,5	90,3	91	91,5	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,8	88,4	88,7	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,5	2,6	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	21,9	20,6	20,1	19,1	19,7	19,1	18,5	-

Quadro 9: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,43
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5	-	-	-	1,0	1,0	0,8	-
pH final	3,9	11,3	4,1	4,0	4,2	3,9	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,9	80,3	88,7	89,1	89,8	91,2	91,6	91,8	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,5	88,8	89,0	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,8	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,5	19,6	19,1	18,2	19,0	18,6	17,6	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,43
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5	-	-	-	1,0	1,0	0,8	-
pH final	4,1	11,3	4,1	4,0	4,2	3,9	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,9	80,3	88,7	89,1	89,8	91,2	91,6	91,8	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,5	88,8	89,0	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,8	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,5	19,6	19,1	18,2	19,1	18,6	17,4	-

Quadro 10: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	10,78
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,7	-	-	-	1,1	0,9	0,8	-
pH final	4,1	11,2	4,1	3,9	4,0	41,0	3,9	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,1	82,6	88,9	89,5	90,3	90,9	91,3	91,7	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,3	88,6	88,9	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,7	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,7	19,9	19,5	19,1	19,6	19,1	18,7	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	10,78
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,7	-	-	-	1,1	0,9	0,8	-
pH final	4,0	11,3	4,1	4,0	4,0	4,0	3,9	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,1	82,6	88,9	89,5	90,3	90,9	91,3	91,7	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,3	88,6	88,9	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,7	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,7	20,0	19,4	19,1	19,6	19,1	18,7	-

Quadro 11: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,24
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5	-	-	-	1,0	0,8	0,7	-
pH final	4,1	11,1	4,0	4,1	4,2	3,9	4,1	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	83,2	89,2	89,8	90,5	91,2	91,7	92,0	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,5	88,9	89,1	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,8	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,2	19,7	19,3	18,8	19,0	18,6	18,3	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,24
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5	-	-	-	1,0	0,8	0,7	-
pH final	3,9	11,3	4,0	3,9	4,1	3,9	4,1	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	83,2	89,2	89,8	90,5	91,2	91,7	92	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,5	89,0	89,1	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,7	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,1	19,7	19,2	18,9	19,0	18,6	18,3	-

Quadro 12: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,84
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	4,7	-	-	-	0,8	0,7	0,7	-
pH final	4,0	11,3	4,1	4,0	4,2	3,9	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,9	84,3	89,7	90,1	90,9	91,7	92,1	92,4	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,9	89,2	89,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,8	2,9	3,0	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,7	19,1	18,6	18,0	18,3	17,9	17,2	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,84
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	4,7	-	-	-	0,8	0,7	0,7	-
pH final	4,0	11,3	3,9	4,0	4,1	3,9	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,8	84,3	89,7	90,1	90,8	91,7	92,0	92,3	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,9	89,2	89,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,8	2,8	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,7	19,1	18,6	18,0	18,3	17,9	17,2	-

Quadro 13: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,64
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6,3	-	-	-	1,3	1,1	1,1	-
pH final	2,9	11,3	4,0	4,0	4,1	4,1	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	70,3	77,4	87,6	88,3	89,1	89,6	90,3	90,9	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,2	87,8	88,2	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,4	2,5	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,2	21,2	20,7	20,1	20,0	19,6	19,1	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,64
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6,3	-	-	-	1,3	1,1	1,1	-
pH final	2,8	11,1	4,0	4,0	3,9	4,1	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	70,3	77,4	87,6	88,4	89,1	89,6	90,3	90,9	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,2	87,8	88,2	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,4	2,5	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,1	21,3	20,7	20,0	20,0	19,6	19,1	-

Quadro 14: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,98
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6	-	-	-	1,2	1,1	1,0	-
pH final	2,8	11,3	4,1	3,9	4,2	3,9	4,1	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,5	78,6	88,1	88,5	89,5	90,3	90,7	91,2	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,7	88,1	88,5	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,6	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	21,4	20,8	19,7	18,8	19,3	18,7	18,2	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,98
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6	-	-	-	1,2	1,1	1,0	-
pH final	2,8	11,3	4,1	3,9	4,2	3,9	4,1	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,5	78,6	88,1	88,5	89,5	90,3	90,7	91,2	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,7	88,1	88,5	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,6	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	21,6	20,9	19,9	18,9	19,3	18,7	18,2	-

Quadro 15: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,56
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,2	-	-	-	1,0	0,9	0,9	-
pH final	2,8	11,3	3,9	4,0	4,1	3,9	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,0	79,2	88,5	88,9	89,7	91,0	91,4	91,7	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,3	88,6	88,9	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,8	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,8	19,2	18,6	17,9	18,7	18,0	17,4	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,56
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,2	-	-	-	1,0	0,9	0,9	-
pH final	2,8	11,3	4,1	4,0	4,2	3,9	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,1	79,3	88,5	88,9	89,7	91,0	91,3	91,7	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,3	88,6	88,9	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,7	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,8	19,1	18,4	18,0	18,7	18,0	17,4	-

Quadro 16: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	10,99
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,9	-	-	-	1,1	1,0	1,0	-
pH final	2,9	11,2	4,0	4,0	4,1	4,1	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	70,3	82,2	88,7	89,3	89,9	90,6	91,1	91,5	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,0	88,4	88,6	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,7	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,4	19,7	19,1	18,9	19,0	18,6	18,4	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	10,99
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,9	-	-	-	1,1	1,0	1,0	-
pH final	2,8	11,2	4,0	4,0	3,9	4,1	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	70,3	82,3	88,7	89,4	89,9	90,6	91,1	91,5	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,0	88,4	88,6	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,7	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,4	19,8	19,2	19,1	19,0	18,6	18,4	-

Quadro 17: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,31
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,3	-	-	-	1,0	0,9	0,8	-
pH final	2,8	11,1	3,9	4,1	4,0	4,1	4,0	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,5	82,8	89,2	89,4	90,2	91,0	91,6	91,7	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,3	88,7	88,8	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,9	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,0	19,4	19,1	18,6	18,6	18,4	18,0	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,31
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,3	-	-	-	1,0	0,9	0,8	-
pH final	2,8	11,2	4,1	3,9	4,0	3,9	4,1	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,4	82,8	89,1	89,4	90,2	91,0	91,6	91,7	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,3	88,7	88,8	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,9	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,9	19,3	19,0	18,5	18,6	18,4	18,0	-

Quadro 18: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,85
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	4,9	-	-	-	0,9	0,7	0,7	-
pH final	2,8	11,3	4,1	4,0	4,2	3,9	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,0	83,9	89,7	89,8	90,6	91,6	92,0	92,3	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,7	89,1	89,3	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,9	2,9	3,0	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,4	18,9	18,2	17,7	17,9	17,3	16,9	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,85
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	4,9	-	-	-	0,9	0,7	0,7	-
pH final	2,8	11,3	3,9	4,0	4,1	3,9	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,0	84,0	89,7	89,8	90,6	91,6	92	92,3	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,7	89,1	89,3	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,9	2,9	3,0	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,4	18,9	18,2	17,7	17,9	17,3	16,9	-

Quadro 19: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,83
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6,2	-	-	-	1,3	1,1	0,9	-
pH final	4,1	11,4	4,1	4,1	4,2	4,0	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,1	77,8	88,1	88,5	89,4	89,9	90,5	91,3	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,4	88,0	88,6	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,5	2,5	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,4	21,1	20,8	20,1	20,0	19,7	19,1	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,83
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	6,2	-	-	-	1,3	1,1	0,9	-
pH final	3,9	11,2	3,9	4,1	4,2	4,0	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,1	77,9	88,1	88,5	89,4	89,9	90,5	91,2	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	87,4	88,0	88,6	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,5	2,5	2,6	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,4	21,2	20,8	20,1	20,0	19,7	19,1	-

Quadro 20: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,82
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	-	-	1,1	0,9	0,8	-
pH final	4,1	11,1	4,1	4,1	4,0	3,9	4,0	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,7	88,4	88,9	89,4	90,5	91,3	91,6	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,0	88,6	88,8	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,5	2,7	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	21,8	20,5	20,0	18,9	19,5	18,8	18,2	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,82
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	-	-	1,1	0,9	0,8	-
pH final	4,1	11,1	3,9	4,1	4,0	4,1	4,0	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,7	88,4	88,9	89,5	90,5	91,3	91,6	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,0	88,6	88,8	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,5	2,7	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	21,7	20,8	20,1	18,9	19,5	18,8	18,2	-

Quadro 21: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,33
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5	-	-	-	0,9	0,8	0,7	-
pH final	3,9	11,3	4,1	4,0	4,2	3,9	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,9	80,5	88,9	89,1	89,9	91,3	91,8	91,9	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,6	88,9	89,0	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,9	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,2	19,3	18,5	18,1	18,8	18,0	17,5	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	12,33
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5	-	-	-	0,9	0,8	0,7	-
pH final	4,1	11,1	3,9	4,0	4,1	3,9	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,9	80,5	88,9	89,1	89,8	91,3	91,8	91,9	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,6	88,9	89,0	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,9	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,2	19,3	18,5	18,1	18,8	18,0	17,5	-

Quadro 22: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	10,74
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,7	-	-	-	1,1	0,9	0,7	-
pH final	4,0	11,3	3,9	4,0	4,0	4,0	3,9	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,1	82,7	89,0	89,6	90,4	90,9	91,4	91,8	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,3	88,7	88,9	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,7	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,6	20,0	19,7	19,1	19,4	19,1	18,5	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	3,5	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	10,74
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	8	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5,7	-	-	-	1,1	0,9	0,7	-
pH final	4,0	11,3	4,1	4,0	4,0	4,0	3,9	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	71,1	82,7	89,0	89,6	90,4	90,9	91,4	91,8	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,3	88,7	88,9	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,6	2,7	2,9	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,5	20,0	19,7	19,1	19,5	19,1	18,6	-

Quadro 23: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,21
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5	-	-	-	0,9	0,7	0,7	-
pH final	4,1	11,1	4,0	4,1	4,2	3,9	4,1	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	83,4	89,2	89,8	90,7	91,3	91,9	92,2	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,6	89,0	89,2	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,9	3,0	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,0	19,4	18,9	18,4	18,9	18,4	18,0	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,21
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	5	-	-	-	0,9	0,7	0,7	-
pH final	4,1	11,3	4,0	3,9	4,2	4,1	4,2	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	83,3	89,1	89,8	90,6	91,3	91,8	92,2	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,6	89,0	89,2	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,7	2,8	3,0	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	20,0	19,1	18,8	18,1	18,8	18,4	18,0	-

Quadro 24: Resultados experimentais da sequência D₀(EPO)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,77
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	4,7	-	-	-	0,8	0,7	0,6	-
pH final	4,1	11,3	3,9	4,0	4,2	3,9	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,9	84,3	89,8	90,3	91,0	91,7	92,2	92,4	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,8	89,3	89,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,9	2,9	3,0	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,5	18,8	18,3	17,7	18,0	17,6	17,0	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento								Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D2	D3	D	D	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	74	74	75	75	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	170	170	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-	-	-	-	-
Fator kappa	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	5,2	-	6,4	8,4	10,4	1,6	1,6	1,6	11,77
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	3,0	-	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1	3	0,5	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Número kappa	-	4,7	-	-	-	0,8	0,7	0,6	-
pH final	4,0	11,3	4,1	4,0	4,2	3,9	4,0	3,9	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	74,9	84,3	89,8	90,3	91	91,7	92,3	92,4	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	-	-	88,8	89,3	89,4	-
Reversão % ISO	-	-	-	-	-	2,9	3,0	3,0	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	19,5	18,8	18,3	17,8	18,0	17,6	17,0	-

Quadro 25: Resultados da otimização da sequência de branqueamento D₀(EP)D₁D₂ com a temperatura de 85°C no estágio (EPO).

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	85	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,47
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	1,1	-
pH final	4,0	11,2	4,1	5,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	80,7	88,8	91,0	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	88,3	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	21,1	20,2	19,0	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	85	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,55
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	1,1	-
pH final	4,1	11,1	3,9	5,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	80,8	88,7	90,9	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	88,3	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,6	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	21,0	20,0	19,1	-

Quadro 26: Resultados da otimização da sequência de branqueamento D₀(EP)D₁D₂ com variação no pH no estágio D₁ e D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,96
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	1,2	-
pH final	4,1	11,1	3,9	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,3	90,3	90,0
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	87,8	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,5	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,0	20,6	19,8	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,96
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	1,2	-
pH final	4,1	11,1	4,0	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,3	90,3	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	87,8	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,5	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,0	20,6	19,8	-

Quadro 27: Resultados da otimização da sequência de branqueamento D₀(EP)D₁D₂ com variação no pH no estágio D₁ e D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,60
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	0,5	1,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	1,0	-
pH final	4,1	11,1	4,5	5,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,5	91,0	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	88,3	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,0	20,6	19,2	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,60
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	0,5	1,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	1,0	-
pH final	4,1	11,1	4,5	5,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,5	91,0	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	88,3	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,7	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,0	20,6	19,2	-

Quadro 28: Resultados da otimização da sequência de branqueamento D₀(EP)D₁D₂ com variação no pH no estágio D₁ e D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,60
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	0,8	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	1,1	-
pH final	4,1	11,1	5,6	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,9	90,6	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	88,0	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,6	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,1	20,6	19,7	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,60
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	0,8	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	1,1	-
pH final	4,1	11,1	5,6	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,9	90,6	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	88,0	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,6	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,1	20,6	19,7	-

Quadro 29: Resultados da otimização da sequência de branqueamento D₀(EP)D₁D₂ com variação no pH no estágio D₁ e D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,33
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	0,8	1,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	0,9	-
pH final	4,1	11,1	5,6	5,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,9	91,3	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	88,5	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,1	20,6	19,0	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,33
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	0,8	1,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	0,9	-
pH final	4,1	11,1	5,6	5,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,9	91,3	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	88,5	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,1	20,6	19,0	-

Quadro 30: Resultados da otimização da sequência de branqueamento D₀(EP)D₁D₂ com variação no pH no estágio D₁ e D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,90
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	1,2	-
pH final	4,1	11,1	4,4	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,5	90,4	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	87,9	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,5	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,1	20,6	19,8	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,90
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	0,5	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	-
Número kappa	-	5,8	-	1,2	-
pH final	4,1	11,1	4,4	4,1	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,5	90,4	-
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	87,9	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,5	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,1	20,6	19,8	-

Quadro 31: Resultados da otimização da sequência de branqueamento D₀(EP)D₁D₂ com variação no pH no estágio D₁ e D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	
Temperatura, °C	56	76	74	75	
Tempo, min	90	130	170	170	
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,70
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1,0	
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	
Número kappa	-	5,8	-	1,1	
pH final	4,1	11,1	3,9	5,1	
Reagente consumido, %	100	100	100	100	
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,3	90,8	
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	88,2	
Reversão % ISO	-	-	-	2,6	
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,0	20,6	19,5	

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90%ISO via interpolação
	Do	(EPO)	D1	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	
Temperatura, °C	56	76	74	75	
Tempo, min	90	130	170	170	
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	0,0	-	-	-
Fator kappa	0,12	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	4,2	-	6,4	1,6	11,70
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	-	1,0	
H ₂ SO ₄ , kg/tas	6,0	-	-	-	
Número kappa	-	5,8	-	1,1	
pH final	4,1	11,1	3,9	5,1	
Reagente consumido, %	100	100	100	100	
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	72,3	79,6	88,3	90,8	
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	88,2	
Reversão % ISO	-	-	-	2,6	
Viscosidade, dm ³ /kg	-	22,0	20,6	19,5	

Quadro 32B: Resultados do branqueamento de referência da sequência D₀(EP)D₁D₂.

(A)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90% ISO via interpolação
	D ₀	(EP)	D ₁	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-
Fator kappa	0,21	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,3	-	8,4	1,6	15,98
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	1,0	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	2,0	-	-	-	-
Número kappa	-	3,9	-	0,6	-
pH final	2,9	11,3	4,0	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	82,1	86,9	89,6	91,9	90
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	89,1	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	18,1	17,2	16,2	-

(B)

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				Consumo químico para alvura de 90% ISO via interpolação
	D ₀	(EP)	D ₁	D	D(EP)DD
Consistência, %	10,5	10,5	10,5	10,5	-
Temperatura, °C	56	76	74	75	-
Tempo, min	90	130	170	170	-
Pressão, kPa	-	-	-	-	-
O ₂ , kg/tas	-	3,3	-	-	-
Fator kappa	0,21	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	7,3	-	8,4	1,6	16,00
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	0,5	-	-	-
NaOH, kg/tas	-	13,2	1,0	0,5	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	2,0	-	-	-	-
Número kappa	-	3,9	-	0,6	-
pH final	2,9	11,3	4,0	4,0	-
Reagente consumido, %	100	100	100	100	-
DQO da polpa, kg O ₂ /t	-	-	-	-	-
Alvura, % ISO	82,1	86,9	89,6	91,9	90
Reversão de alvura, % ISO	-	-	-	89,1	-
Reversão % ISO	-	-	-	2,8	-
Viscosidade, dm ³ /kg	-	18,1	17,2	16,2	-

Apêndice C – Propriedades dos testes físico-mecânicos das polpas de Pinho e Eucalipto

Quadro 1 C: Resultados dos testes físico-mecânicos das polpas de Pinho e Eucalipto.

Amostras	Nº Revo-luções	Consumo de energia Wh	°SR	Espessu-ra µm	P.E.A. kg/m³	V.E.A. cm³/g	T.E.A. J/m²	M.O.E. MNm/kg	I.T. N.m/g	I.A. kPa.m²/g	I.R. mN.m²/g	Alonga-mento %	Opacidade %	CDL m²/kg	RPA s/100cm³
D(EPO)DD Pinus Valdivia Ref.	0	0	13,0	137	453,07	2,21	23,79	2,23	16,75	1,35	14,44	2,58	69,82	29,75	0,51
	3000	40	21,0	80	773,88	1,29	99,74	6,50	70,13	4,67	10,32	3,17	59,47	19,55	6,00
	5000	65	38,0	79	795,57	1,26	103,35	7,11	76,13	4,99	9,58	3,06	57,07	17,50	43,13
	7000	90	53,0	75	841,60	1,19	102,49	7,97	83,12	5,22	8,60	2,79	53,92	15,78	211,02
D(EPO)DD Pinus Valdivia Ótima	0	0	12,0	150	421,20	2,37	17,15	2,05	14,86	1,05	14,01	2,12	71,29	31,50	0,51
	3000	40	20,0	95	680,81	1,47	93,49	6,24	62,94	4,19	10,56	3,20	61,27	50,56	6,00
	5000	67	36,0	80	814,63	1,23	94,98	6,99	75,07	4,73	9,57	2,99	58,17	18,18	30,67
	7000	90	54,0	76	858,82	1,16	107,45	8,08	83,87	4,87	8,27	2,91	55,28	16,31	178,87
D(EP)DD Euc. Valdivia Ref.	0	0	18,0	117	535,81	1,87	14,59	3,22	19,97	0,84	4,91	1,57	80,92	52,63	1,06
	2000	25	30,0	84	741,09	1,34	125,87	5,57	65,60	4,15	9,21	4,26	74,30	36,87	10,06
	3000	37	40,0	76	833,95	1,20	139,65	6,24	75,56	4,78	8,82	4,16	70,53	30,98	29,34
	4000	50	46,0	72	875,56	1,14	144,57	6,40	78,78	5,02	7,95	4,10	68,49	28,56	65,54
D(EP)DD Euc. Valdivia Ótima	0	0	18,0	117	537,69	1,86	19,36	3,45	22,74	1,03	4,45	1,80	81,80	53,59	1,09
	2000	25	30,0	86	734,35	1,36	125,25	5,80	69,27	4,28	9,39	4,06	73,72	34,49	13,13
	3000	37	40,0	77	809,61	1,24	134,11	6,33	77,00	4,83	8,97	4,30	70,65	30,43	31,34
	4000	49	46,0	74	852,63	1,17	145,70	6,52	80,04	5,21	8,53	4,14	68,67	28,40	66,30

NOTA: Revol. = ⁰SR = Schopper Riegler; PEA = peso específico aparente; VEA = volume específico aparente; TEA = energia de deformação; MOE = módulo de elasticidade específico; IT = índice de tração; IA = índice de arrebatamento; IR = índice de rasgo; CDL = coeficiente de dispersão de luz; RPA = resistência a passagem de ar.