

FERNANDO JOSÉ BORGES GOMES

**Aperfeiçoamento do branqueamento de polpa kraft da mistura de madeira de
Pinus spp. e *Eucalyptus spp.* pela sequência OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP.**

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

FERNANDO JOSÉ BORGES GOMES

**Aperfeiçoamento do branqueamento de polpa kraft da mistura de madeira de
Pinus spp. e *Eucalyptus spp.* pela sequência OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP.**

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: 24 de fevereiro de 2010.

Sérgio Henrique Saavedra Martinelli

Prof. Rubens Chaves de Oliveira
Co-orientador

Prof. Jorge Luiz Colodette
Orientador

AGRADECIMENTOS

Ao professor Jorge Luiz Colodette, pela orientação no decorrer desse trabalho, e pela oportunidade de crescimento profissional.

Aos professores José Lívio Gomide, Rubens Chaves de Oliveira pela coorientação ao longo desse trabalho e pelos ensinamentos que muito contribuem para meu crescimento profissional e acadêmico.

Ao professor Claudio Mudado Silva e aos funcionários, estagiários, alunos do Laboratório de Celulose e Papel – DEF / UFV, e, em especial, aos amigos José Maurício, Sandra, Andréia, Jaqueline, Dalton, Oldair, Marcelo, Mário, Juracy, Marcos Antônio e Claudio Bittencourt, pela amizade, pelos ensinamentos e convivência durante o período de graduação e pós-graduação.

Ao Sérgio Martinelli, pelas boas discussões, que muito contribuíram para a execução e condução desse trabalho.

À Klabin, pelo apoio, cedendo o material de pesquisa e dados internos, que possibilitaram a execução dessa dissertação.

À Larisse, por todo apoio, carinho e incentivo ao longo dessa caminhada.

Aos meus pais Odilon e Josefina, e aos meus irmãos João e Odilon, pela ajuda e apoio incondicional a mim concedido.

A Deus, por tudo.

BIOGRAFIA

Fernando José Borges Gomes, filho de Josefina Borges Gomes e Odilon Justino Gomes, nasceu em 25 de abril de 1983, em Teixeiras, estado de Minas Gerais.

Cursou o ensino fundamental do pré-escolar à quarta série na Escola Estadual Professor Carlos Trivellato, em Ponte Nova, MG, e o ensino fundamental da quinta à oitava série e o ensino médio, na Escola Estadual Professor Antônio Gonçalves Lanna, também em Ponte Nova, MG.

Em 2004, ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa. Foi bolsista da FAPEMIG por dois anos no projeto “Avaliação não destrutiva da madeira visando à produção de celulose Kraft”. Foi estagiário por quatro anos no Laboratório de Celulose e Papel na área de química da madeira e branqueamento de polpa celulósica, sob a orientação do professor Jorge Luiz Colodette. Concluiu a graduação em Engenharia Florestal em janeiro de 2009.

Em março de 2009 ingressou no programa de Mestrado Profissionalizante em Tecnologia de Celulose e Papel da Universidade Federal de Viçosa.

ÍNDICE

LISTA DE ABREVIATURAS	vi
LISTA DE QUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Características anatômicas da madeira	4
2.2. Características químicas da madeira	5
2.2.1. Celulose	7
2.2.2. Lignina	9
2.2.3. Hemiceluloses	10
2.2.4. Extrativos	11
2.2.5. Constituintes inorgânicos	12
2.3. Polpação da madeira	12
2.3.1. Cinética da polpação kraft	12
2.4. Branqueamento ECF	13
2.4.1. Introdução ao branqueamento ECF (elementary chlorine free)	13
2.4.2. Deslignificação com oxigênio	14
2.4.3. Branqueamento pelas tecnologias D e D*	16
2.4.4. Branqueamento pelas tecnologias P e (OP)	17
2.5. Aperfeiçoamento do branqueamento	19
2.6. Qualidade do papel	20
3. OBJETIVOS	22
3.1. Objetivos específicos	22
4. MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1. Material	23
4.2. Plano experimental	23
4.2.1. Aperfeiçoamento das sequências	24
4.2.2. Avaliação da refinabilidade e propriedades físicas e mecânicas da polpa	26
4.2.3. Avaliação do impacto ambiental do branqueamento	26
4.3. Métodos	27

4.3.1. Deslignificação com Oxigênio - (Pré-O ₂)	27
4.3.2. Estágio para remoção de metais da polpa – (Q)	27
4.3.3 Branqueamento com dióxido de cloro (D* e D ₁)	28
4.3.4. Extração alcalina com peróxido pressurizado e oxigênio (OP)	28
4.3.5. Procedimentos Analíticos	29
4.3.6. Cálculo do ganho de alvura, eficiência, seletividade da deslignificação e rendimento da Pré-O ₂	30
4.3.7. Instabilidade de alvura	32
4.4. Análise estatística	33
5. RESULTADOS	34
5.1. Deslignificação com oxigênio (estágio Pré-O ₂)	34
5.2. Quelação (estágio Q)	40
5.3. Branqueamento	42
5.3.1. Aperfeiçoamento do estágio D*	42
5.3.1.1. Efeito do pH	42
5.3.1.2. Efeito do fator Kappa e da temperatura	45
5.3.2. Aperfeiçoamento do estágio (OP)	50
5.3.3. Aperfeiçoamento do estágio (D)	52
5.3.4. Avaliação da aplicação de H ₂ O ₂ na Torre de Alta Consistência (TAC) - Sequência QD*(OP)DP	55
5.3.5. Branqueamento pelas sequências OQD*(OP)D e OQD*(OP)DP aperfeiçoadas	57
5.3.5.1 Consumo de reagentes	58
5.3.5.2. Qualidade da polpa	58
5.3.6. Impacto ambiental	61
5.4. Refinabilidade e Propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas	62
5.4.1. Refinabilidade	62
5.4.2. Índice de Arrebentamento	63
5.4.3. Índice de rasgo	65
5.4.4. Índice de tração	66
5.4.5. Módulo de elasticidade	68
5.4.6. Resistência à passagem de ar	70
6. CONCLUSÕES	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
Apêndice A	82
Apêndice B	146

LISTA DE ABREVIATURAS

- AOX** – Halógenos orgânicos adsorvíveis
- D** – Estágio do branqueamento de dioxidação
- D*** – Estágio do branqueamento de dioxidação a quente
- DQO** – Demanda bioquímica de oxigênio
- ECF** – Elementary chlorine free (Livre de cloro elementar)
- kPa** – Quilopascal
- LM** – Lamela média
- MWh** – Mega Watts por hora
- O** – Deslignificação com oxigênio
- (OP)** – Estágio do branqueamento com peróxido e oxigênio pressurizado
- OX** – Halógenos orgânicos adsorvíveis na polpa celulósica
- P** – Estágio do branqueamento com uso de peróxido
- PP** – Parede primária da célula vegetal
- Q** – Estágio de quelação
- S1** – Primeira camada formada na parede secundária da célula vegetal
- S2** – Segunda camada formada na parede secundária da célula vegetal
- S3** – Terceira camada formada na parede secundária da célula vegetal
- SCAN** – Scandinavian pulp, paper and board testing committee
- Pré-O₂** – Deslignificação com oxigênio
- TAPPI** – Technical Association of the Pulp and Paper Industry
- TAC** – Torre de alta consistência
- TAS** – Tonelada absolutamente seca
- NCP** – Número de cor posterior

Wh – Watts por hora

°SR – Grau Schopper Riegler

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Proporção dos componentes químicos estruturais da madeira de clima temperado.....	6
Quadro 2. Características iniciais da amostra de polpa marrom.....	27
Quadro 3. Procedimentos analíticos utilizados para análise da polpa, licores residuais do branqueamento	29
Quadro 4. Condições gerais de branqueamento atualmente utilizadas pela empresa concedente do material estudado	32
Quadro 5. Condição aperfeiçoada para a sequência OQD*(OP)D.....	56
Quadro 6. Sumário dos resultados do branqueamento	56
Quadro 7. Composição química das polpas branqueadas.....	58
Quadro 8. Sumário das características dos filtrados do branqueamento	59

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Esquema da organização da parede celular da fibra (FENGEL e WEGENER, 1989). 7
- Figura 2.** Estrutura da celulose, destacando a unidade de celobiose, formada por duas unidades de glicose unidas por ligação do tipo β (1,4) (LEWIN e GOLDSTWEIN, 1991) 8
- Figura 3.** Estrutura da Parede Celular da Madeira (GLORIA e GUERREIRO, 2003).... 8
- Figura 4.** Representação esquemática da lignina de folhosas (Piló-Veloso, 1993) 9
- Figura 5.** Principais açúcares e ácidos constituintes das hemiceluloses: (1) D-glicose, (2) D-galactose, (3) L-arabinose, (4) D-xilose (5) D-manose, (6) 4-O-metil-D-Glicurônico e (7) L-Ramnose (SJÖSTROM, 1992) 11
- Figura 6.** Viscosidade da polpa celulósica submetida à deslignificação com oxigênio, realizada sem Mg e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH..... 33
- Figura 7.** Viscosidade da polpa celulósica submetida à deslignificação com oxigênio, realizada com Mg (3 kg MgSO₄.7H₂O/tas) e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH 36
- Figura 8.** Seletividade da deslignificação com oxigênio realizada sem Mg e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH..... 36

Figura 9. Seletividade da deslignificação com oxigênio realizada com Mg (3 kg MgSO ₄ .7H ₂ O/tas) e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH.....	37
Figura 10. Eficiência de deslignificação com oxigênio realizada sem e com Mg (3 kg de MgSO ₄ .7H ₂ O/tas) e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH.....	37
Figura 11. Rendimento (medido indiretamente pelos sólidos do licor) da deslignificação com oxigênio realizada sem e com Mg (3 kg MgSO ₄ .7H ₂ O/tas) e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH (kg/tas).	39
Figura 12. Efeito do uso de Mg no estágio O na viscosidade da polpa, sendo as condições de temperatura de 95 °C e dosagem de NaOH de 15kg/tas.....	39
Figura 13. Efeito do uso de Mg nos estágios O e/ou (OP) na viscosidade da polpa branqueada, sendo que D1, D2 e D3 referem-se às dosagens de 3,8, 5,7 e 7,6 kg ClO ₂ /tas aplicadas no estágio D da sequência QD*(OP)D. As dosagens de magnésio citadas no gráfico referem-se a kg de MgSO ₄ .7H ₂ O/tas.....	41
Figura 14. Conteúdo de metais da polpa marrom extraída do último lavador, e das polpas queladas na condição de referência (pH 10,8) e em meio neutro (pH 6,2), extraídas após o estágio Q.....	43
Figura 15. Efeito do pH e da temperatura do estágio D* na viscosidade da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C.....	44
Figura 16. Efeito do pH e da temperatura do estágio D* na reversão de alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C.....	45
Figura 16. Efeito do pH e da temperatura do estágio D* na reversão de alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C.....	47

Figura 17. Efeito do pH e da temperatura do estágio D* na alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C.....	48
Figura 18. Efeito do fator Kappa e da temperatura do estágio D* na viscosidade da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C, (C) conduzido a 90 °C e (D) efeito global da temperatura do estágio D* na viscosidade	49
Figura 19. Efeito do fator Kappa e da temperatura do estágio D* na reversão de alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C.....	51
Figura 20. Efeito do fator Kappa e da temperatura do estágio D* na alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP) , sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C	52
Figura 21. Efeito da dosagem de H2O2 e magnésio e da temperatura do estágio (OP) na viscosidade da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo as dosagens de H2O2 expressas em kg/tas, sendo (A) tratamentos conduzidos a 75°C e (B) conduzido a 90°C.....	53
Figura 22. Efeito da dosagem de H2O2 (A) e da temperatura (B) do estágio (OP) na reversão de alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D	54
Figura 23. Efeito da dosagem de H2O2 (A) e da temperatura (B) do estágio (OP) na alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D.....	54
Figura 24. Efeito do pH do estágio D1 na viscosidade da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D.....	55
Figura 25. Efeito do pH do estágio D1 na reversão de alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D.....	56
Figura 26. Efeito do pH do estágio D1 na alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D	56

Figura 27. Efeito do pH do estágio D1 nos teores de cloreto, clorito e clorato presentes nos filtrados dessa etapa.....	60
Figura 28. Efeito da dosagem de H ₂ O ₂ , do pH e da temperatura do estágio de peroxidação efetuado na TAC na viscosidade final da polpa	61
Figura 29. (A) Efeito da dosagem de H ₂ O ₂ e do pH na alvura final da polpa; (B) efeito da dosagem de H ₂ O ₂ e da temperatura na alvura final da polpa.....	63
Figura 31. Teor de OX da polpa branqueada na condição de referência e aperfeiçoada pela sequência OQD*(OP)D	64
Figura 32. Consumo de energia versus oSR para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP)	64
Figura 33. Índice de tração versus o índice de arrebentamento para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).....	65
Figura 34. Índice de arrebentamento versus °SR para polpas branqueadas pelo processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).....	65
Figura 35. Índice de arrebentamento versus consumo de energia para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).....	65
Figura 36. Índice de rasgo versus oSR para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP)	66
Figura 37. Índice de rasgo versus consumo de energia para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP)	66
Figura 38. Índice de tração versus o OSR da polpa branqueada para os três tratamentos avaliados.....	67
Figura 39. Índice de tração versus consumo de energia para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP)	68

Figura 40. Módulo de elasticidade versus oSR da para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP)	69
Figura 41. Módulo de elasticidade versus consumo de energia polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).....	69
Figura 42. Resistência à passagem de ar versus oSR para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP)	70
Figura 43. Resistência à passagem de ar versus consumo de energia para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).....	71

RESUMO

GOMES, Fernando José Borges, *M.Sc.*, Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2010. **Aperfeiçoamento do branqueamento de polpa kraft da mistura de madeira de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.* pela sequência OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP.** Orientador: Jorge Luiz Colodette. Conselheiros: Rubens Chaves de Oliveira e José Lívio Gomide.

O objetivo principal desse trabalho foi aperfeiçoar o branqueamento de uma polpa celulósica mista de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, pela sequência OQD*(OP)D, visando redução no consumo de reagentes químicos e melhoria da viscosidade e das propriedades físico-mecânicas da polpa branqueada. Investigou-se ainda estudar a viabilidade do uso de peróxido na torre de estocagem de polpa branqueada (TAC), se transformado a sequência OQD*(OP)D em OQD*(OP)DP. Foi utilizada uma polpa Kraft industrial composta por 30% de *Pinus spp.* e 70% de *Eucalyptus spp.* de número Kappa 19,1. No processo de aperfeiçoamento foram estudadas as principais variáveis de cada estágio da sequência OQD*(OP)D, como dosagens de reagentes, temperatura e pH de reação. O processo aperfeiçoado decresceu o consumo de ClO_2 e de H_2O_2 em 2,3 e 1,8 kg/tas, respectivamente, em relação ao processo de referência (condição industrial atual), para branquear a polpa até alvura de 90% ISO. Adicionalmente, o processo aperfeiçoado permitiu aumentar a viscosidade da polpa branqueada em $145 \text{ dm}^3/\text{kg}$, com consequente melhoria das suas propriedades de rasgo e tração, para um mesmo nível de energia de refino, em relação à referência. Outra vantagem evidente do processo de aperfeiçoamento da sequência OQD*(OP)D foi a significativa redução do impacto ambiental do efluente, com reduções de 46,6, 23,5 e 24,5% dos valores de AOX, DQO e cor do efluente, respectivamente, em relação à referência. A aplicação de um estágio adicional de branqueamento com peróxido na torre de estocagem (TAC)

mostrou-se viável, com possibilidade de economizar 3,5 kg/tas de ClO_2 em relação à referência na condição aperfeiçoada, e ainda melhorar todas as propriedades físicas mecânicas da polpa, a um dado nível de energia de refino.

ABSTRACT

GOMES, Fernando José Borges, *M.Sc.*, Universidade Federal de Viçosa, February, 2010.
Bleaching improvement of kraft pulp in wood mixture of *Pinus spp.* and *Eucalyptus spp.* by the sequence OQD* (PO) and OQD*(PO)DP. Adviser: Jorge Luiz Colodette. Co-advisers: Rubens Chaves de Oliveira and José Lívio Gomide.

The objective of this study was investigating the bleaching of a pulp blend composed of *Pinus spp.* and *Eucalyptus spp.*, using the OQD*(OP)D sequence, aiming at reducing chemicals consumption, as well as improving the physical-mechanical characteristics of the bleached pulp. It was also investigated the feasibility of using hydrogen peroxide in the High Consistency Tower (TAC). A kraft pulp sample comprised of 30% of *Pinus spp.* and 70% of *Eucalyptus spp.*, was used throughout the study. g. The main variables of each bleaching stage were optimized, including chemical doses, temperature and end pH. It was observed that by perfecting each bleaching stage, it was possible to reach 90% ISO brightness by decreasing ClO₂, and H₂O₂ consumption by 2.3 and 1.8 kg/odt, respectively. In addition, a viscosity gain of 145 dm³/kg was observed for the perfected process, which resulted in tensile and tear strength improvements at a given drainage degree. The perfected process also improved bleaching effluent quality with a decrease of 46.6, 23.5 and 24.5% of the AOX, COD and color values, respectively in comparison to reference. The application of an additional peroxide stage in the TAC allowed for 3.5 kg/odt ClO₂ savings in comparison to the reference, with the advantage of improving pulp strength properties and refinability at a given drainage degree and refining energy consumption.

1. INTRODUÇÃO

O evidente potencial de desenvolvimento do setor papelero no Brasil leva a acreditar na possibilidade de que o País venha a se tornar, em breve, uma referência mundial no assunto. Atualmente, estão plantados 2 milhões de hectares de Pinus e Eucaliptos, e o País é o maior produtor de celulose de fibra curta de Eucalipto do mundo sendo o 12º na fabricação de papel (BRACELPA, 2009). Para atender a um mercado consumidor exigente por produtos de qualidade e a menor preço, é preciso conhecer e criar alternativas para as matérias-primas e os processos de produção.

Nos dias de hoje, a disputa por uma melhor posição no mercado depende do desempenho de cada empresa. O custo de produção aumentou consideravelmente nos processos industriais e a globalização tornou ainda mais acirrada a competitividade entre as empresas. Além disso, as preocupações sociais e ambientais têm crescido muito, sendo grandes alicerces da chamada sustentabilidade. Esses fatores levam projetistas e pesquisadores a se preocuparem muito com a questão da conservação de energia, minimização do consumo de químicos e com ganhos em produtividade, mantendo sempre a qualidade do produto final.

A busca constante por um produto de maior qualidade e de baixo custo tem sido, na evolução histórica da fabricação de papel, o elemento direcionador de muitos esforços no sentido de desenvolver novas tecnologias. Além disso, procura aperfeiçoar as tecnologias existentes, com o objetivo final de produzir um papel com qualidade tal que possa competir nesse grande mercado globalizado.

As principais fontes de matéria-prima para produção de celulose e papel no Brasil são oriundas de reflorestamentos com os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, sendo a principal

vantagem comparativa do Brasil, o desenvolvimento da celulose de fibra curta à base de eucalipto e a sua inserção no mercado internacional.

Ao se comparar esses dois gêneros, ou mesmo dentro do mesmo gênero, notam-se diferenças marcantes e, entre elas, se destaca o comprimento das fibras. As fibras do gênero *Eucalyptus* apresentam um comprimento entre 0,5 e 1,5 mm. As do gênero *Pinus*, por sua vez, são fibras longas (traqueídeos de 3 e 6 mm). Fibras mais longas resultam em polpas mais resistentes e mais fáceis de drenar, que permitem maior velocidade nas máquinas durante a fabricação do papel. Uma maior resistência da folha úmida e seca e uma maior facilidade de drenagem podem representar maior eficiência da produção (BASSA, 2007).

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 a presença de vasos – que pode ser prejudicial, pois fragmentos de vasos podem se levantar da superfície do papel durante a impressão.

Misturas de polpas celulósicas de *Pinus* e *Eucalipto* podem ser usadas para a produção de papéis com propriedades de nível superior àquelas feitas com as polpas isoladamente. Em trabalho usando diferentes proporções de *Pinus* e *Eucalipto*, Sacon, Menochelli e Ratnieks (1994) mostram que a fibra longa aumenta a resistência ao rasgo e que tração e arrebatamento mantêm-se correlacionadas ao longo da variação da mistura.

Há três maneiras citadas na literatura para se proceder às misturas de polpas, podendo ser conduzidas ao longo do processo de polpação no mesmo digestor na proporção desejada. Outra possibilidade é o processamento das madeiras de cada espécie, isoladamente e então juntas, antes do procedimento de refinação ou após o processo de refinação da polpa. A produção de polpas com mistura de madeira ainda no digestor implica em um branqueamento com características especiais, uma vez que a composição química das polpas de folhosas e coníferas apresenta particularidades – resultado das peculiaridades de cada espécie de madeira (OLIVEIRA, 2009).

A operação de uma nova planta de branqueamento apresenta grandes desafios, especialmente quando novas matérias-primas, novos estágios ou novas tecnologias são

inseridos no processo. No caso particular de unidades fabris, operando pela sequência OQD*(OP)D, os estágios D* e (OP) merecem maiores estudos, já que são tecnologias relativamente novas e não totalmente conhecidas para o branqueamento de polpa Kraft mista de *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.*. Por outro lado, os estágios que precedem e procedem a essas novas tecnologias podem influenciá-las ou serem influenciados por elas e, portanto, precisam também ser aprimorados.

Grande parte das novas plantas de branqueamento de polpa de eucalipto contempla tecnologias de hidrólise ácida a quente, que utiliza a *tecnologia D**. Considerando-se que a eficiência dessa tecnologia depende consideravelmente do tipo de polpa sob avaliação, em especial do seu conteúdo de HexA, é necessária a otimização dessa etapa para cada polpa em particular e também do estágio de deslignificação com oxigênio (O), que usualmente precede o estágio D*.

Por outro lado, o desempenho do estágio (OP) subsequente ao D* é muito influenciado pelas condições operacionais deste último. Por isso, uma avaliação do estágio D* implica necessariamente na avaliação do estágio (OP). O mesmo raciocínio se aplica para o estágio D final, que é influenciado pelas condições operacionais dos dois estágios anteriores. Em geral, as condições mais críticas do estágio D* são pH, temperatura e fator Kappa, enquanto que, do estágio (OP), são as dosagens de peróxido e magnésio e a temperatura. No estágio D final, as variáveis mais importantes são o pH, temperatura e dosagem de dióxido de cloro.

Para se garantir máxima eficiência de uma sequência moderna, como a sequência OQD*(OP)D, algumas variáveis importantes de cada estágio do branqueamento precisam ser estudadas. Assim sendo, o objetivo principal desse estudo foi aperfeiçoar os estágios, O, Q, D*, (OP) e D da sequência OQD*(OP)D, para branqueamento de uma polpa industrial mista de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.* até alvura de 90% ISO, com mínimo custo e impacto ambiental, maximizando-se a viscosidade e as propriedades de resistência do produto final.

2. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

2.1. Características anatômicas da madeira

A madeira é um material que se desenvolve na parte interna do câmbio vascular, tanto no tronco como nos ramos e raízes. É o resultado das inúmeras divisões do câmbio e está constituída por células ou elementos lenhosos que passaram por diferentes etapas de desenvolvimento, desde a divisão celular até uma diferenciação e amadurecimento das células para formar o tecido lenhoso (SILVA, 2007). A madeira de uma árvore, quando observada à luz de um microscópio, apresenta diferentes tipos de elementos anatômicos (células), como fibras, traqueídeos, vasos, células de raio, etc.

As características anatômicas mais importantes das fibras de madeiras usadas na fabricação de papel são a largura (L), o comprimento (C), a espessura de parede celular (E), o diâmetro do lúmen (D), o número de fibras por grama e o peso de fibra por unidade de comprimento (*Coarseness*: mg/100 m de fibra). A medição das dimensões dos elementos celulares é realizada por técnicas de maceração (individualização das fibras), de coloração das fibras para contraste em observações microscópicas, ou por técnica da microtomia, na qual delgadas camadas da madeiras são removidas, tratadas e observadas microscopicamente (BURGER *et al.*, 1991). Modernamente, as dimensões e os formatos dos elementos fibrosos estão sendo mensurados com equipamentos automatizados, como GALAI CIS-100 ou KAJAANI FS 200 (CARVALHO *et al.*, 1997; O'NEILL *et al.*, 1996), Fibermaster (Metso), Morfi (CTP francês) e o Fiber Analyser (Canadense). Esses equipamentos permitem, ainda, a determinação do *Coarseness* e o número de fibras por grama de polpa. Os resultados são normalmente

diferentes, pois, na técnica microscópica, medem-se fibras inteiras, enquanto no método automático são detectadas e medidas tanto as fibras inteiras como as quebradas, porém os finos são medidos separadamente.

A anatomia das madeiras de coníferas (gimnospermas) é mais simples que a das folhosas, por serem mais antigas na ordem evolutiva. Seus principais elementos estruturais são os traqueoides axiais ou fibras, que ocupam 95% do volume da madeira (BURGER e RICHTER, 1991). Os traqueoides são células estreitas e alongadas, com comprimento médio em torno de 2 a 5 mm (IPT, 1981).

As folhosas (angiospermas) são vegetais mais evoluídos, portanto, sua composição anatômica é bem mais complexa e especializada que as gimnospermas. Sua estrutura é composta principalmente de vasos, fibras, parênquima axial e radial. Fibras são células peculiares às angiospermas, compondo de 20 a 80% do seu lenho, são esbeltas de extremidades afiladas, que lembram ligeiramente traqueoides axiais de lenho tardio das coníferas, porém mais curtos, em média de 0,5 a 2,5 mm (BURGER E RICHTER, 1991).

2.2. Características químicas da madeira

A madeira é constituída de celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e de uma pequena fração de inorgânicos. Esses constituintes encontram-se distribuídos nas diversas camadas que compõem o elemento anatômico principal – a fibra ou traqueídeo –, sendo suas proporções apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Proporção dos componentes químicos estruturais de madeiras de clima temperado

Componente	Teor (%)
Celulose	40 – 45
Hemicelulose	15 – 35 (folhosas) 20 – 30 (coníferas)
Lignina	21 – 25 (folhosas) 25 – 35 (coníferas)
Extrativos	3 – 8
Cinzas	0,4 – 0,5

Fonte: LEWIN e GOLDSTWEIN (1991); TSOUMIS (1991); SJÖSTROM (1993).

Nas árvores, as cadeias de celulose estão agrupadas em feixes, nas fibras e fibrilas, imersas em hemiceluloses e cimentadas pela lignina, formando uma estrutura mecanicamente estável (SALMÉN e OLSON, 1998). No processo de polpação química (alcalino ou ácido), a substância química cimentante – a lignina – é dissolvida para liberar as fibras constituídas basicamente de holocelulose (celulose e hemiceluloses). Os extrativos, em sua maior parte, são dissolvidos nas etapas iniciais do processo de polpação (ALMEIDA e SILVA, 1997).

As fibras são os principais elementos estruturais da madeira e apresentam quatro camadas concêntricas envolvendo a cavidade central, denominada lúme. A camada mais externa é a parede primária (P), enquanto as outras três formam a parede secundária, sendo dividida em externa (S1), média (S2) e interna (S3). A camada S2 é a mais importante do ponto de vista da produção de celulose, por ser, geralmente, dez vezes mais espessa que P, S1 ou S3; nela se encontra a maior quantidade de celulose da fibra. A região entre as fibras – denominada lamela média – é rica em lignina. No entanto, a maior quantidade de lignina encontra-se dispersa na camada secundária S2. Na Figura 1 é apresentado um esquema da estrutura da fibra de madeira.

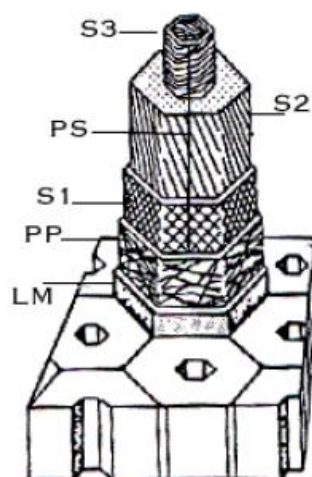


Figura 1. Esquema da organização da parede celular da fibra (FENGEL e WEGENER, 1989).

Um dos objetivos dos processos químicos de cozimento é o de remover a lignina da lamela média, visando a separação das fibras (GOMIDE, 1979). No entanto, a ação do licor de cozimento não se limita à lamela média, pois atinge também a lignina e os carboidratos da parede da fibra. A retirada de parte dos polissacarídeos e sua alteração determinam a qualidade da polpa celulósica tanto para fabricar papel, quanto de derivados de celulose. Da mesma maneira, a solubilização de componentes não pertencentes à parede celular é importante para a qualidade da pasta.

2.2.1. Celulose

A celulose é o principal componente da parede celular da madeira. É um polissacarídeo de alta massa molar, que se apresenta como um polímero de cadeia linear, consistindo exclusivamente de unidades de β -D-glicopiranoses unidas por ligações do tipo (1 \rightarrow 4) (Fig. 2). Aproximadamente 50% da composição química da madeira é celulose (FENGEL *et al.*, 1989).

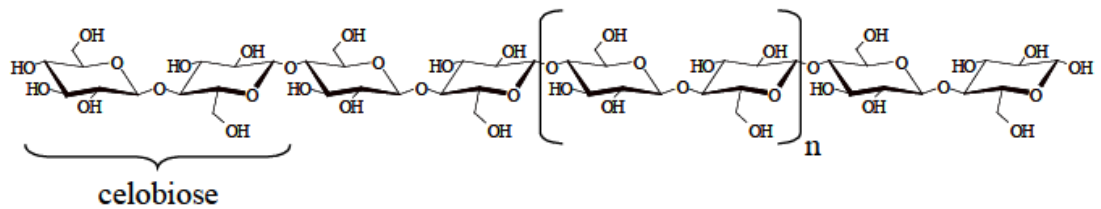


Figura 2. Estrutura da celulose, destacando a unidade de celobiose, formada por duas unidades de glicose unidas por ligação do tipo β (1,4) (LEWIN e GOLDSTWEIN, 1991).

As moléculas de celulose tendem a formar pontes de hidrogênio intramoleculares (entre unidades de glicose da mesma molécula) e intermoleculares (entre unidades de glicose de moléculas adjacentes). O primeiro tipo de interação é responsável por certa rigidez das cadeias unitárias e, o segundo, pela formação da fibra vegetal (KRÄSSIG, 1993).

A estrutura da celulose (Fig. 3) é formada por duas regiões: uma cristalina (ordenada) e outra amorfa (desordenada). Essas regiões não possuem fronteiras bem definidas, mas existe uma transição de arranjo ordenado das cadeias de celulose para estado desordenado ou amorfo, no qual essas cadeias apresentam uma orientação menor (KRÄSSIG, 1993). Na região cristalina, a fibra possui maior resistência à tração, ao alongamento e à solvatação. Na região amorfa, a fibra tem maior flexibilidade. A cristalinidade pode ser estudada por várias técnicas como, por exemplo, difratometria de raios-X (LEWIN e GOLDSTWEIN, 1991), espectroscopia no infravermelho, ressonância magnética nuclear e outros.

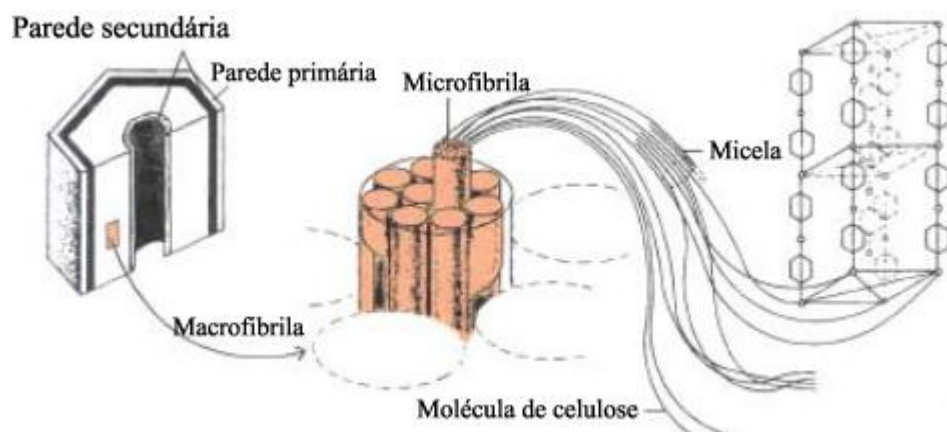


Figura 3. Estrutura da Parede Celular da Madeira (GLORIA e GUERREIRO, 2003).

O tamanho da cadeia celulósica é normalmente dado pelo grau médio de polimerização (DP) que pode ser determinado por métodos como viscosimetria, ultracentrifugação (equilíbrio de sedimentação), coeficiente de dispersão de luz, osmometria, etc. O grau de polimerização de uma molécula de celulose é o número de unidades de β -D-glicose que ela possui (FENGEL e WENEGER, 1989).

2.2.2. Lignina

Depois da celulose, a lignina é a substância orgânica polimérica mais abundante nas plantas. A lignina da madeira é um composto orgânico de alto peso molecular, sendo o fenilpropano sua unidade básica. Ela está presente em cerca de 20 a 30%, agindo como material adesivo, agente de enrijecimento e como barreira contra a degradação enzimática e/ou microbiana da parede celular (FENGEL e WEGENER, 1989). O rendimento em polpa tende a aumentar com a diminuição da quantidade de lignina contida na árvore (KIBLEWHITE *et al.*, 1998).

A maior concentração de lignina ocorre na lamela média, existindo uma menor concentração no interior da parede secundária. A lignina é um composto amorfo, tridimensional, de composição química bastante complexa, que se constitui de unidades de fenilpropano, tendo uma cadeia altamente ramificada (Fig. 4). É o componente mais hidrofóbico da madeira, tendo função adesiva entre fibras, o que confere dureza e rigidez à parede celular.

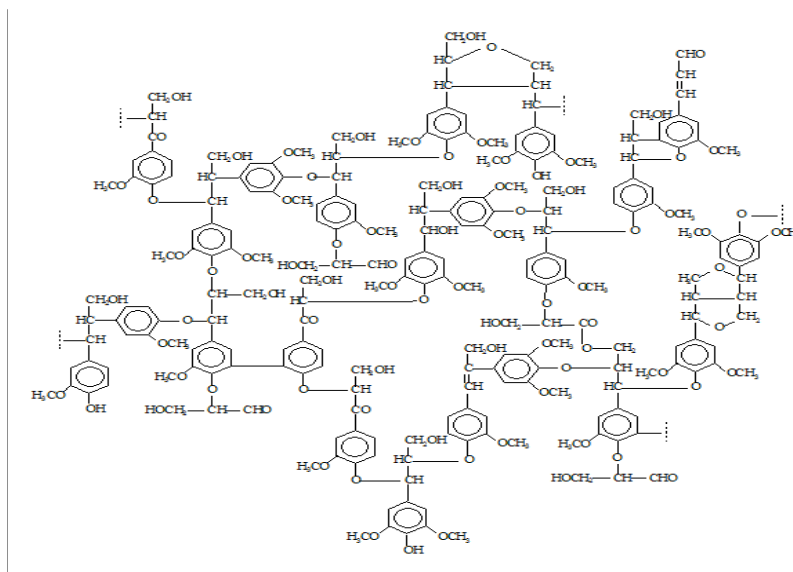


Figura 4. Representação esquemática da lignina de folhosas (Piló-Veloso, 1993).

A lignina é um constituinte considerado indesejável para a produção de polpa celulósica branqueada. As operações de cozimento e branqueamento visam remover a maior parte possível da lignina, sem causar dano apreciável às fibras. Entretanto, a existência de um residual ótimo de lignina na polpa não branqueada concorre para que a fibra se torne mais rígida, o que resulta em polpa celulósica com boas propriedades de resistência. Por outro lado, madeiras com alto teor de lignina, normalmente, exigem maior carga de produtos químicos para sua deslignificação. Uma pequena redução no teor de lignina tem impacto significativo no rendimento da polpação, nos custos de processo e nas descargas de efluentes.

2.2.3. Hemiceluloses

As hemiceluloses também são polissacarídeos e diferem-se da celulose por serem polímeros ramificados e de cadeia curta. São os mais importantes polissacarídeos não celulósicos presentes na madeira e se consistem, principalmente, de xilanas, arabinoxilanas, mananas e galactanas. As arabinoxilanas e mananas são as principais hemiceluloses das coníferas e as xilanas são as principais das folhosas. Sabe-se que as hemiceluloses são constituintes desejáveis na polpação, pois contribuem para o rendimento e apresentam efeitos benéficos na refinabilidade, na ligação interfibras e na resistência da polpa celulósica.

As hemiceluloses consistem numa mistura de polissacarídeos de baixa massa molecular (Fig. 5), os quais estão associados à celulose e à lignina (SALMÉN *et al.*, 1998). Algumas estão presentes em grandes quantidades, quando a planta está sob estresse. Além disso, as hemiceluloses variam qualitativa e quantitativamente de acordo com a espécie e entre os indivíduos de uma mesma espécie (LEWIN e GOLDSTWEIN, 1991; SJÖSTROM, 1993).

A presença de altas concentrações de hemiceluloses afeta as propriedades físico-mecânicas da folha de papel, alterando o módulo de elasticidade, e a resistência da polpa à tração. A energia consumida no refino de polpas é também afetada pela concentração de hemiceluloses, através da inserção de moléculas de água nas regiões cristalinas da fibra (SCOTT e ABBOTT, 1995).

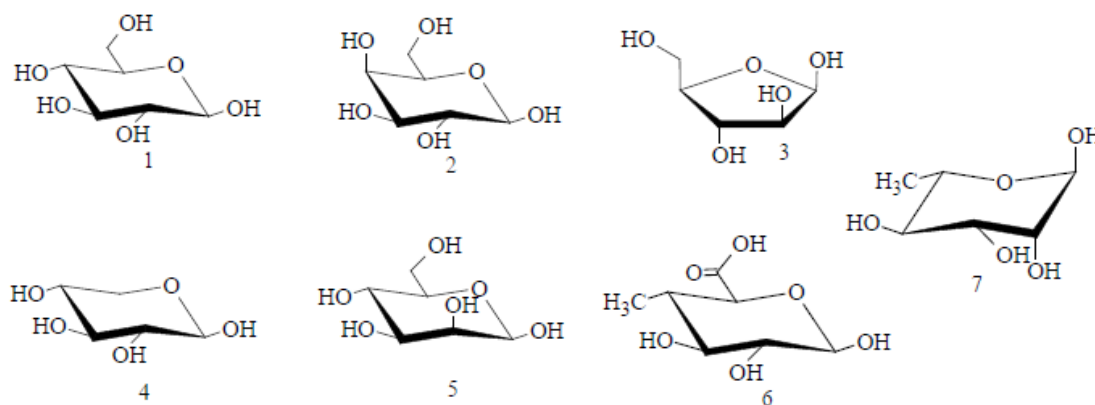


Figura 5. Principais açúcares e ácidos constituintes das hemiceluloses: (1) D-glicose, (2) D-galactose, (3) L-arabinose, (4) D-xilose (5) D-manose, (6) 4-O-metil-D-Glicurônico e (7) L-Ramnose (SJÖSTROM, 1992).

2.2.4. Extrativos

O conteúdo de extrativos é considerado um importante parâmetro para produção de celulose e papel. Os extrativos incluem um elevado número de compostos, e muitos podem ser solúveis em água quente, álcool, benzeno e outros solventes. Eles pertencem a diferentes grupos químicos, como as resinas, os açúcares, os taninos, os ácidos graxos, entre outros, os quais causam problemas econômicos e técnicos nos processos de celulose e papel (GUTIÉRREZ, 2001).

Os extrativos podem exercer vários tipos de influência na fabricação de pasta celulósica, como redução no rendimento (madeiras com alto teor de extraíveis), aumento no consumo de reagentes (extrativos que reagem com os agentes químicos do licor de cozimento), notadamente os acídicos e polifenóis (ALMEIDA *et al.*, 1997), inibição da reação de deslignificação (impermeabilidade, solubilidade dos fragmentos de lignina, decomposição do licor), corrosão de equipamento, diminuição da qualidade da polpa, dificuldade de recuperação do licor e incrustação (KOGA e PHILLIP, 1988; ALMEIDA e SILVA, 1997).

2.2.5. Constituintes inorgânicos

O conteúdo dos componentes minerais na madeira é normalmente pequeno e pode incluir óxidos de cálcio, potássio, fósforo, magnésio, entre outros. Esses compostos possuem funções associadas ao sistema fisiológico, exercendo importante papel no metabolismo da planta (FENGEL e WENEGER, 1989). Usualmente, o teor de inorgânicos é menor que 1% em madeiras de zona temperada e, ligeiramente maior, naquelas de climas tropicais. A presença de alguns metais de transição (ex: Fe, Cu e Mn) na madeira e, conseqüentemente, na polpa prejudica o seu branqueamento, especialmente quando este é efetuado com peróxidos. Esses metais causam a decomposição do peróxido dando origem a intermediários radiculares que, potencialmente, podem degradar a celulose (COLODETTE *et al.*, 1999).

2.3. Polpação da madeira

O objetivo do processo de polpação kraft é dissolver a lignina da madeira e separar as suas fibras para serem utilizadas na fabricação do papel. A separação das fibras é obtida com a dissolução da lignina da lamela média, que mantém as fibras unidas no tronco da árvore.

2.3.1. Cinética da polpação kraft

De acordo com MIMMS *et al.* (1993), a cinética da polpação kraft, devido à sua complexidade, pode ser subdividida em etapas para melhor compreensão dos fenômenos e das variáveis envolvidas, bem como das velocidades relativas de reação. De forma simplificada, a cinética da polpação kraft tem início com o transporte de íons do licor de cozimento para a superfície dos cavacos, acontece então a difusão dos íons para o interior dos cavaco. Ocorrem reações químicas entre os íons e os componentes da madeira, com conseqüente difusão dos produtos das reações para o exterior dos cavacos, resultando em um transporte dos produtos de reação para o licor de cozimento.

Sendo que o principal objetivo da polpação é a remoção da lignina e liberação do material fibroso da madeira. Segundo SJÖSTROM (1993), experimentos realizados sustentam a hipótese de que os íons do licor de cozimento difundem gradualmente do lúmen para as camadas das fibras, uma vez que, tanto na polpação kraft como na polpação sulfito, a deslignificação progride mais rapidamente na parede secundária do que na lamela média.

2.4. Branqueamento ECF

2.4.1. Introdução ao branqueamento ECF (elementary chlorine free)

No início da década de 1980, inúmeros estudos mostraram o impacto adverso do uso do cloro elementar no branqueamento, tanto na qualidade da polpa como na qualidade do efluente descarregado para o meio ambiente. O cloro elementar, aplicado no primeiro estágio de branqueamento, é reconhecidamente um excelente agente químico para a remoção da lignina residual polpa. Além da sua efetividade no trato de polpas com alto teor de lignina residual, o cloro elementar contribui para a obtenção de polpas com alvuras elevadas e estáveis.

A polpa celulósica kraft apresenta coloração marrom, resultante dos grupos cromóforos gerados no processo de polpação e associados à lignina residual e aos carboidratos. Na fabricação de papéis brancos, a matéria-prima principal é a celulose branqueada. O branqueamento ou alveamento de polpa celulósica pode ser classificado em processos que removem substâncias coloridas e processos que mascaram tais substâncias sem, no entanto, removê-las (DENCE e REEVE, 1996).

O branqueamento de uma polpa celulósica química é feito em múltiplos estágios. Cada etapa ou estágio de branqueamento é constituído de misturadores de vapor e reagentes, de um reator, de um sistema de lavagem e de sistemas de controle de processo. Nos primeiros estágios da sequência de branqueamento, os agentes químicos utilizados têm a função de atacar quimicamente a lignina residual e outros compostos indesejáveis, a fim de dissolvê-los e eliminá-los do processo. Nos estágios finais, os agentes químicos principais têm a função de promover o alveamento da polpa até níveis desejados de alvura (DENCE *et al.*, 1998).

No entanto, foi constatada uma relação direta entre o uso de cloro elementar e o aparecimento de diversos compostos organoclorados de baixos, médios e elevados pesos moleculares, sendo alguns deles de difícil degradação natural. Além disso, os estudos revelaram que alguns desses compostos, como a 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-dioxina (2,3,7,8-TCDD) e 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-furano (2,3,7,8-TCDF), eram potencialmente bioacumulativos em certos organismos aquáticos e, portanto, nos consumidores desses produtos alimentares. Grandes esforços, científicos e tecnológicos, foram utilizados para melhorar o desempenho ambiental do processo de branqueamento (DENCE e REEVE, 1996).

O branqueamento ECF (livre do cloro elementar) surge como alternativa para atender as legislações ambientais restritivas quanto à minimização dos níveis de AOX dos efluentes de branqueamento das indústrias de celulose. Visando substituir o estágio de cloração, novas tecnologias de branqueamento foram desenvolvidas e implementadas, incluindo estágios tais como A/D, D*, Z, X, Paa, etc. (COLODETTE, 2009).

2.4.2. Deslignificação com oxigênio

A deslignificação com oxigênio é considerada uma extensão do processo de polpação. No contexto do branqueamento pode ser compreendida como um processo de pré-branqueamento, pois é um estágio que tem ação mais deslignificante do que alvejante.

A deslignificação da polpa marrom com oxigênio permite, por um lado, que a polpação convencional possa ser interrompida no início da terceira fase. Com isso, a degradação dos carboidratos (celulose + hemiceluloses) é atenuada e a lignina residual removida em processo de deslignificação mais seletivo (CORREIA, 2002).

Essa tecnologia, cuja utilização teve início na década de 1970, está plenamente aceita e difundida. Além da deslignificação, essa tecnologia ganhou reputação no contexto ambiental, pela redução da carga orgânica dos efluentes e pela economia decorrente da redução do consumo de reagentes químicos alvejantes na planta de branqueamento. Outro fator que valorizou o uso da deslignificação com oxigênio foi a

adoção, na década de 1990, de sequências de branqueamento livres de cloro elementar (ECF) (CORREIA, 2002).

O pré-branqueamento com oxigênio tem o potencial de reduzir em mais de 50% o teor de lignina residual da polpa marrom. Além da degradação e dissolução seletiva de grande parte da lignina residual, esse processo tem o potencial de remover parte dos extrativos saponificáveis remanescentes da polpa marrom (MOKFIENSKI, 2008).

A eficiência do desempenho da pré-O₂, em termos de redução do número Kappa e preservação dos carboidratos, depende da qualidade da madeira, das condições do processo de polpação e das variáveis de processo empregadas na produção (SALVADOR *et al.*, 2001; COLODETTE *et al.*, 1996).

Quimicamente, o oxigênio em meio alcalino atua preferencialmente nas estruturas fenólicas livres da lignina. Essa reação com a lignina provoca sua fragmentação em estruturas solúveis que são removidas da madeira e, finalmente, enviadas para queima na caldeira de recuperação (COLODETTE *et al.*, 1996). O oxigênio reage com a polpa promovendo a deslignificação e, também, ocasionando a formação de radicais livres e formação do peróxido de hidrogênio. Os radicais livres degradam os carboidratos, promovendo a redução no seu grau de polimerização. A formação de peróxido é desejável, uma vez que este promove o alveamento da polpa (LACHENAL, 1996).

As reações que degradam os polissacarídeos podem ser divididas em duas categorias: (1) a clivagem das ligações glicosídicas em algum ponto ao longo da cadeia e (2) a reação de descascamento, através da qual os grupos terminais redutores são removidos sucessivamente. Ainda que ambas possam ocorrer durante a deslignificação com oxigênio, a primeira é a mais significativa e acelerada por traços de metais de transição. Devido à clivagem das ligações glicosídicas, esses ataques levam a uma diminuição na viscosidade da polpa e, conseqüentemente, a uma redução nas propriedades de resistência da mesma (ALÉN, 2000).

Uma alternativa para minimizar a ação desses metais seria a lavagem ácida da polpa antes do estágio com oxigênio ou, ainda, a adição de compostos protetores ou aditivos para inibir a degradação dos carboidratos (McDONOUGH, 1996).

A adição de sais de magnésio tem sido usada na deslignificação com oxigênio como uma maneira de atenuar a formação de radicais livres que degradam os

carboidratos, com conseqüente melhoria da qualidade da polpa, tanto para “softwood” quanto “hardwood”. (MANFREDI, 1998)

2.4.3. Branqueamento pelas tecnologias D e D*

A substituição do cloro por dióxido de cloro no primeiro estágio de branqueamento foi uma maneira eficaz de se reduzir a carga poluente do efluente do branqueamento ao meio ambiente. A redução da carga poluente é caracterizada pela diminuição da emissão de cor, acidez, teor de cloretos, sólidos suspensos, DQO, DBO, TOC, toxidez e mutagenicidade do efluente (CROON e STEN, 1968; KUTNEY e MACAS, 1984 e AXEGARD, 1986). Segundo MCKAGUE *et al.* (1998), a concentração de AOX no efluente de branqueamento com cloro e dióxido de cloro varia entre 3,7-6,8, e 0,9-1,7 kg/t de polpa, respectivamente.

O dióxido de cloro é o agente alvejante mais indicado para ataque à lignina residual, pois reage muito lentamente com carboidratos (DENCE e REEVE, 1996). A reação mais adversa de qualquer seqüência de branqueamento é a oxidação nos sítios C-2, C-3 e C-6 da unidade monomérica do açúcar, o que resulta na formação de grupos carbonilas. O grupo carbonila de C-2 tem o potencial de migrar para a posição C-4, sendo esse composto facilmente degradado com clivagem do carboidrato na posição C-4 e formação de novos grupos redutores finais (SJÖSTROM, 1993).

O dióxido de cloro é uma espécie eletrofílica que ataca, predominantemente, os anéis aromáticos com grupos de hidroxílicos fenólicos livres. O uso industrial do dióxido de cloro em substituição ao cloro teve como propósito inicial reduzir as perdas de resistência da polpa causadas pelo cloro e aumentar a seletividade do processo. Sua dosagem industrial é designada conforme o número kappa da polpa a ser branqueada, sendo definido como o percentual de cloro ativo por tas dividido pelo número kappa da polpa (COLODETTE, 2009)

As condições de operação para deslignificação com ClO_2 têm mostrado que a temperatura não é considerada um fator crítico. Comumente, de um modo geral as fábricas que utilizam operam o estágio de dióxido em baixas temperaturas, variando entre 40 e 60 °C. A razão disso é que a taxa de reação do ClO_2 com a lignina é muito rápida (EIRAS, 2002).

Entretanto, foi proposto por Norden e Mellander (1996), citados por LACHENAL *et al.* (1998), que em se operando o estágio de dióxido em alta temperatura pode-se reduzir o tempo de sua reação com a lignina a poucos minutos. Adicionalmente, em condição de alta temperatura, o pH do estágio D convencional pode ser facilmente ajustado aos valores adequados ao estágio de hidrólise ácida em alta temperatura. Dessa forma, foi desenvolvido o estágio de dióxido combinado com estágio ácido, denominado D/A, D_{HT}, D* ou DualD, que pode reduzir o custo operacional do branqueamento, sem aumentar significativamente o custo de capital (LACHENAL *et al.*, 1998).

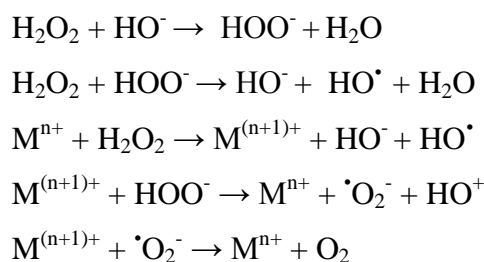
O estágio D em alta temperatura (95 °C) tem mostrado ser mais eficiente que o estágio D convencional conduzido em baixa temperatura (45 °C) (LACHENAL *et al.*, 1998; CHIRAT *et al.*, 1999). Em alta temperatura, o ClO₂ é consumido em poucos minutos e, a despeito disso, o número Kappa reduz continuamente em um intervalo de uma a três horas. Esse efeito é muito mais pronunciado em polpas de folhosas que em polpas de coníferas. Em polpas kraft de folhosas, 15 a 20% do ClO₂ pode ser economizado, comparado com o estágio D convencional, para atingir o mesmo número Kappa após D (LACHENAL *et al.*, 1998).

2.4.4. Branqueamento pelas tecnologias P e (OP)

O peróxido de hidrogênio é o principal oxidante empregado nos estágios P e (OP) de sequências de branqueamento ECF, porém ele é muito sensível à decomposição catalisada por metais (KUJALA *et al.*, 2004). COLODETTE e DENCE (1988) relataram que o peróxido de hidrogênio é o reagente mais afetado pela ação dos metais, sendo a sua decomposição induzida primariamente por metais de transição, citando-se formas insolúveis do ferro, manganês e, em menor extensão, cobre.

O Mn, que está presente naturalmente na madeira, decompõe o peróxido de hidrogênio rapidamente sob condições alcalinas. Por outro lado, o cobre e o ferro, apesar de também terem possibilidade de causar problemas, estão fortemente ligados às fibras, sendo cataliticamente menos ativos que o manganês (COLODETTE; DENCE, 1989).

Segundo COLODETTE *et al.* (1988), o Mn decompõe o peróxido de hidrogênio diretamente em oxigênio e água, sem passar por intermediários radiculares. Por outro lado, a decomposição causada pelo Cu ocorre por via radicalar, com a formação de radicais superóxido e hidroxila. Entretanto há controvérsia se a decomposição catalisada por ferro ocorre por mecanismo radicalar ou iônico. A decomposição do peróxido por metais de transição, através do mecanismo radicalar, ocorre através de reações em cadeia do tipo:



As reações de decomposição catalisadas pelos metais de transição desperdiçam peróxido de hidrogênio, porque levam à perda do íon perhidroxila (HOO-) (LINDHOLM, 2000). Além disso, a decomposição catalítica gera radicais hidroxilas, que causam danos aos polissacarídeos (ALÉN, 2000). Idealmente, a concentração dos íons metálicos nas polpas deve ser reduzida pelo uso de tratamentos ácidos ou de quelação antes do estágio de branqueamento com peróxido.

Uma opção para o melhor desempenho do estágio de extração é a adição de pressão ao processo, que permite o uso de temperaturas de reação mais elevadas, diminuindo significativamente o tempo de reação. Adiciona-se o gás oxigênio à celulose em forma de micro-bolhas e gera-se uma mistura homogênea de celulose, gás e água. Ambos os produtos químicos, oxigênio e peróxido, oxidam a lignina em fragmentos solúveis com mais baixo peso molecular. O oxigênio reage primariamente como eletrófilo com as estruturas fenólicas, mas produz também como intermediário o peróxido de hidrogênio, que, em meio alcalino, ataca cadeias laterais da lignina residual através de reação nucleofílica. O íon peróxido (HO₂⁻), que se comporta como um oxidante, reage com grupos carbonílicos sem, no entanto, conduzir à efetiva deslignificação (PESSOTI, 2000).

GERMGÄRD e NORDÉN (1994) mostraram que um único estágio com peróxido pressurizado, onde o branqueamento é realizado com peróxido de hidrogênio e oxigênio a 100 – 110 °C substitui vários estágios de branqueamento com peróxido de hidrogênio em condições atmosféricas. Uma comparação feita a uma dada carga de peróxido mostrou que um ganho de alvura na ordem de 6 - 8% ISO pode ser atingido quando se substitui um estágio convencional de peróxido (90 °C e quatro horas) por um estágio de peróxido pressurizado (110 °C e duas horas).

2.5. Aperfeiçoamento do branqueamento

Preocupações ambientais e a busca constante por um produto de baixo custo e alta qualidade tem motivado a realização de vários estudos, com intuito de se aperfeiçoar o branqueamento ECF de polpa celulósicas.

Por exemplo, um estudo realizado por MILANEZ (2008), mostra a aplicabilidade de um estudo laboratorial da branqueabilidade da polpa de folhosas onde se desenvolveu a otimização das variáveis mais significativas da seqüência D*(PO)D, sendo: temperatura, fator kappa e pH no estágio D*; temperatura, pH, carga de oxigênio e de sulfato de magnésio no estágio (PO); carga de dióxido de cloro e pH no estágio D final. Os resultados obtidos por meio de seu estudo permitiram concluir que as condições ótimas para o estágio D* foram: temperatura entre 80°C e 85°C, fator kappa 0,25 e pH 3,0. A elevação da temperatura do estágio (PO) de 80°C para 95°C prejudica a eficiência e a seletividade do processo, sendo seu uso neste estágio totalmente dispensável. O estágio final D da seqüência D*(PO)D é muito mais eficiente quando realizado em pH 5,5, mostrando-se diferente das práticas normalmente utilizadas de pH entre 3,5 e 4,0. Sob as condições otimizadas acima descritas, os consumos de reagentes químicos requeridos para obtenção de alvura 89% ISO foram 9,7 kg de ClO₂/tas, 4,5 kg de H₂O₂/tas, 8,6 kg de NaOH/tas). O sucesso desse estudo de laboratório foi observado na indústria, em uma planta de branqueamento da Suzano Papel e Celulose S.A, auxiliando na partida do branqueamento e otimizando a planta para menores consumos de reagentes químicos. Sendo descrito que após a implementação da otimização, a planta de branqueamento reduziu em 21,58% e 18% as aplicações de ClO₂ e de NaOH, respectivamente.

2.6. Qualidade do papel

O papel é um produto tridimensional produzido a partir de uma suspensão aquosa de fibras, que são entrelaçadas aleatoriamente e desaguado por processos mecânicos e térmicos. A folha formada a partir da polpa celulósica recebe aditivos orgânicos ou minerais para conferir-lhe melhores propriedades desejadas em sua utilização (CIT, 2007).

Para a avaliação da qualidade do papel, algumas de suas características estruturais devem ser levadas em consideração, sendo essas: espessura, gramatura, uniformidade de formação, orientação das fibras, densidade aparente, porosidade e textura (SCOTT *et al.*, 1995). Algumas podem ser observadas ou medidas diretamente sobre a folha, já outras, precisam ser testadas por meio de corpos de prova com dimensões e características específicas.

Testes físico-mecânicos permitem verificar propriedades do papel e podem ser convenientemente divididos em grupos, por exemplo, segundo sua característica de força a ser exercida sobre o papel. Segundo KUAN (1988), as propriedades do papel são classificadas em cinco grupos principais: dimensionais - espessura, gramatura, densidade específica aparente (DEA) e volume específico aparente (VEA); superfície - lisura e rugosidade (propriedades ligadas à sensação de maciez desejada no segmento de papéis absorventes); permeância - permeabilidade ao ar e ao vapor d'água; resistência mecânica - índice de tração (IT), índice de arrebentamento (IA) e índice de rasgo (IR); e ópticas - opacidade, refletância e espalhamento de luz.

Os ensaios mecânicos permitem a observação de propriedades a partir das reações a esforços a que as folhas de papel são submetidas. Segundo CIT (2007), as ligações entre fibras geram a coesão interna do papel. As interações mecânicas entre as fibras durante a fabricação e uso do papel se dão por meio das ligações entre elas, notadamente através de ligações de hidrogênio e entrelaçamento físico. Os ensaios mecânicos, na maioria das vezes, são destrutivos em relação aos corpos-de-prova. Diversas pesquisas relacionam as propriedades mecânicas do papel ao comportamento deste sob a condição de esforço (SCOTT *et al.*, 1995).

Em geral, as propriedades do papel dependem das condições ambientais, notadamente da temperatura e da umidade relativa do ar. Assim, para haver coerência de testes intra- e inter-laboratoriais, as folhas de papel são mantidas em salas

climatizadas (ex: 23 ± 2 °C e $50 \pm 2\%$ de umidade relativa TAPPI 2005 sp-95) até equilíbrio. Os testes são realizados nesse mesmo ambiente e de acordo com as normas específicas (OLIVEIRA, 2009).

3. OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho foi aperfeiçoar o branqueamento de uma polpa celulósica mista de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, pela sequência OQD*(OP)D, para um alvura de 90% ISO visando redução no consumo de reagentes químicos e melhoria da viscosidade e das propriedades físico-mecânicas da polpa branqueada. Investigou-se ainda estudar a viabilidade do uso de peróxido na torre de estocagem de polpa branqueada (TAC), se transformado a sequência OQD*(OP)D em OQD*(OP)DP.

3.1. Objetivos específicos

Esse trabalho tem como intuito aperfeiçoar parâmetros importantes de cada sequência de branqueamento, a saber: no estágio Pré-O₂ quanto à temperatura de reação, dosagem de álcali e dosagem de magnésio; no estágio D* quanto ao pH, temperatura e fator Kappa (dosagem de ClO₂); no estágio (OP) quanto à dosagem de H₂O₂, dosagem de magnésio e temperatura de reação e no estágio D quanto ao pH final de reação.

Outro objetivo específico, foi o de avaliar uso de H₂O₂ na torre de estocagem de polpa branqueada, aperfeiçoando-se o pH e a dosagem de peróxido.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

Foi utilizada polpa celulósica industrial coletada após o último lavador de massa marrom, antes da deslignificação com oxigênio. A polpa foi derivada de um processo de polpação kraft realizado com mistura de duas madeiras, na proporção de 30% de *Pinus spp.* e 70% de *Eucalyptus spp.*

4.2. Plano experimental

Após a coleta da polpa, foi separado o excesso de filtrado em centrífuga e as amostras foram lavadas com excesso de água. Em seguida, a polpa foi centrifugada, desagregada e armazenada em sacos de polietileno. As características gerais da amostra de polpa estão apresentadas no Quadro 2.

Para a realização desse estudo, os experimentos foram dispostos em esquema fatorial. As seguintes etapas foram realizadas para o aperfeiçoamento do branqueamento da polpa pelas sequências OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP:

4.2.1. Aperfeiçoamento das sequências

Para uma real comparação entre a planta industrial e os dados gerados nesse trabalho, foi promovido o ajuste da DQO da polpa marrom para o valor exato reinante nas condições industriais (Quadro 4).

Aperfeiçoamento das variáveis temperatura, dosagem de álcali e dosagem de magnésio do estágio de deslignificação com oxigênio (Pré-O₂), considerando 3 níveis de temperatura (85, 95 e 105 °C), 3 níveis de álcali (13, 17 e 21 kg de NaOH /tas) e 2 níveis de magnésio (0 e 1,5 kg de MgSO₄/tas), conforme abaixo, gerando 18 tratamentos, que, realizados com duas repetições, totalizam 36 experimentos. Foram mantidas constantes as demais condições industriais (pressão, consistência e dosagem de O₂) da planta de branqueamento de referência (Quadro 1). Além disso, foi estabelecido um alvo mínimo de 45% de eficiência na deslignificação com oxigênio.

Como critério de avaliação da Pré-O₂, foram mensurados o pH final, alvura, número Kappa, rendimento (*via* sólidos dissolvidos) e gravimétrico, viscosidade, eficiência de deslignificação, seletividade do processo, ganho de alvura e sólidos no licor. A melhor condição de deslignificação com oxigênio foi determinada com base na avaliação conjunta dos dados de eficiência, seletividade e rendimento do processo.

O estágio Q, conforme condições industriais da planta de branqueamento de referência (Quadro 4), para avaliar a sua performance, foi determinado número Kappa, alvura e teor de metais da polpa após o tratamento.

No aperfeiçoamento do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), foram estudados 2 níveis de temperatura (60, 75 e 90 °C), 2 níveis de pH final de reação (3,0, 4,0 e 5,0). Para o estudo do fator Kappa do estágio D*, foram considerados 3 níveis a saber: 0,28 , 0,32 , 0,36.

Para que a avaliação do estágio D* fosse melhor interpretada, foi conduzido o branqueamento das suas amostras até alvura 90% ISO. Para isso, após cada um dos experimentos do D*, foi realizado estágio oxigênio pressurizado (OP) nas seguintes condições operacionais fixas: 75 °C, 120 min., 10% consistência, 500 kPa, 1,0% NaOH, 0,3% H₂O₂, 0,4% O₂, 0,15% MgSO₄. Foi realizado estágio dioxidação (D) final nas seguintes condições fixas: 70 °C, 120 min., 10% consistência, pH 4,5 e suficiente ClO₂ para alcançar alvura de 90±0,2% ISO (curva com três pontos de dosagem). Para avaliar o estágio D* foram mensurados: os residuais de dióxido e pH, após (OP) residuais de

peróxido, pH final, alvura e número Kappa; após D residuais de dióxido, pH final, alvura, reversão da alvura, número Kappa e viscosidade.

No aperfeiçoamento do estágio (OP), foram estudadas as variáveis temperatura dosagem de H_2O_2 e dosagem de $MgSO_4$ no estágio (OP), considerando 2 níveis em cada variável, sendo 75 e 90 °C, 3 e 6 kg de H_2O_2 /tas e 0 e 1,5 kg de $MgSO_4$ /tas respectivamente.

Antes do estágio (OP), foi realizado estágio D* nas condições aperfeiçoadas obtidas para o estágio D*. Após cada um dos experimentos com o estágio (OP), foram realizados estágios D finais nas seguintes condições fixas: 70 °C, 120 min., 10% consistência, pH 4,5 e suficiente ClO_2 para alcançar alvura de $90\pm 0,2\%$ ISO (curva com 3 pontos de dosagem). Para avaliar o estágio após D* foram mensurados: após D* os residuais de dióxido e pH (confirmação); após (OP) os residuais de peróxido, pH final, alvura e número Kappa; e após D os residuais de dióxido, pH final, alvura, reversão da alvura, número Kappa e viscosidade.

No aperfeiçoamento do estágio D final, foi avaliado o pH final de reação considerando-se 3 níveis (3,5, 4,5 e 5,5). As demais condições do estágio D final foram conduzidas nas seguintes condições fixas: 70 °C, 120 min., 10% consistência e suficiente ClO_2 para alcançar alvura de $90\pm 0,2\%$ ISO (curva com 3 pontos de dosagem).

Antes do estágio D final, foi realizado estágio D* e (OP) nas condições aperfeiçoadas de cada estágio. Para a avaliação do estágio D final, foram mensurados: após D* os residuais de dióxido e pH (confirmação); após (OP) os residuais de peróxido, pH final, alvura e número Kappa; após D os residuais de dióxido, pH final (confirmação), alvura, reversão da alvura, número Kappa e viscosidade.

Para estudar a viabilidade do uso de peróxido na torre de estocagem de polpa branqueada (TAC), foram avaliadas a dosagem de H_2O_2 e o pH de reação considerando-se 3 níveis em cada variável, sendo 1, 2 e 3 kg de H_2O_2 /tas e valores de pH 8,0, 9,0 e 10,0. Foi realizado tratamento na TAC nas condições fixas atualmente praticadas na planta de branqueamento referência (Quadro 4), exceto pelo pH e dosagem de H_2O_2 que foram aperfeiçoados, com o objetivo de alcançar alvura de $90\pm 0,2\%$ ISO.

Antes do tratamento com peróxido na TAC, foi realizado estágio D*, (OP) e D final nas condições aperfeiçoadas conforme os estudos descritos anteriormente, porém até alvura de 88% ISO, deixando-se os 2 pontos de alvura faltantes para serem

alcançados na torre de estocagem. Para a avaliação do uso de H_2O_2 foram mensurados: após D*os residuais de dióxido e pH (confirmação); após (OP) os residuais de peróxido, pH final, alvura e número Kappa; após D os residuais de dióxido, pH final (confirmação) e alvura; e após TAC os residuais de peróxido, pH final (confirmação), alvura, reversão da alvura, número Kappa e viscosidade.

4.2.2. Avaliação da refinabilidade e propriedades físicas e mecânicas da polpa

A partir dos aperfeiçoamentos realizados, foi determinada a condição operacional ótima para a sequências de branqueamento OQD*(OP)D e para a sequência com uso de peróxido na TAC, sequência OQD*(OP)DP, que resultaram no menor custo operacional no que tange ao uso de produtos químicos. Nessa condição, as amostras de polpa foram preparadas em quantidade suficiente para realização de curva de refino e determinação de propriedades químicas (HexA e OX) e físico-mecânicas da polpa. Uma amostra de polpa branqueada nas condições operacionais exatas utilizadas pela empresa cedente do material estudado (Quadro 4) foi preparada e também avaliada quanto às mesmas propriedades.

4.2.3. Avaliação do impacto ambiental do branqueamento

A partir dos aperfeiçoamentos realizados, foi determinada a condição operacional ótima de branqueamento que resultará no menor custo operacional no que tange ao uso de produtos químicos. Nessa condição, foram coletadas amostras de filtrados de cada estágio de branqueamento (exceto estágio O) e determinados os valores e de cor, DQO, e AOX dos efluentes individuais e do efluente combinado. Uma amostra de polpa branqueada nas condições operacionais exatas utilizadas pela empresa cedente do material estudado (Quadro 5) foi preparada, sendo seu efluente coletado para avaliação do impacto ambiental.

Quadro 2. Características iniciais da amostra de polpa marrom

Características da amostra		
Alvura , %ISO	38,3	
Número Kappa	19,1	
Ácidos hexenurônicos, mmol/kg	33,6	
Viscosidade, dm ³ /kg	919	
Conteúdo de Metais na polpa, mg/kg	Ca	776
	Fe	8,5
	Mn	26,3
	Mg	158
	Cu	2,0

4.3. Métodos

4.3.1. Designificação com Oxigênio - (Pré-O₂)

Essa etapa foi efetuada em um reator/misturador modelo Mark V (Quantum Technologies Inc.) com amostras de 300 gramas de polpa absolutamente secas, nas condições apresentadas nos Quadros de resultados (Apêndice). A polpa foi depositada no reator na consistência adequada e aquecida até a temperatura desejada. Atingida a temperatura, e sob efeito de agitação constante, foram injetadas as cargas preestabelecidas de sulfato de magnésio e NaOH ao sistema, elevando-se a pressão de reação com O₂ até o valor desejado. Terminada a reação, o sistema foi despressurizado e foram coletadas amostras do licor residual para análises pertinentes. A polpa foi transferida para o descarregador de polpa e então lavada com o equivalente a 9m³ de água destilada por tonelada de polpa. Essas etapas foram efetuadas em duplicata.

4.3.2. Estágio para remoção de metais da polpa – (Q)

Essa etapa foi efetuada em sacos de polietileno com amostras de 290g de polpas absolutamente seca, nas condições apresentadas nos Quadros de resumo (Apêndice).

Após mistura manual, em sacos de polietileno, o material foi aquecido em forno de micro-ondas até a temperatura desejada e transferido para um banho de vapor com controle de temperatura, onde foi mantido pelo tempo preestabelecido. Terminada a reação, foram extraídas amostras de licor residual para análises pertinentes. A polpa foi então lavada com o equivalente a 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa seca. Essas etapas foram efetuadas em duplicata.

4.3.3 Branqueamento com dióxido de cloro (D* e D₁)

O branqueamento com dióxido de cloro foi efetuado em sacos de polietileno com amostras de 280g (D*) e 130g (D₁) de polpa absolutamente secas, nas condições apresentadas nos Quadros resumo (Apêndice). 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 micro-ondas até a temperatura desejada e transferido para um banho de vapor com controle de temperatura, onde foi mantido pelo tempo preestabelecido. 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. Essas etapas foram efetuadas em duplicata. A etapa D₁ foi efetuada com várias dosagens de dióxido de cloro de tal forma a alcançar os objetivos de alvura preestabelecidos.

4.3.4. Extração alcalina com peróxido pressurizado e oxigênio (OP)

Essa etapa foi efetuada em um reator/misturador Quantum - Mark V (reator de teflon) com amostras de 270 gramas de polpa absolutamente secas, nas condições apresentadas nos Quadros resumo (Apêndice). A polpa foi depositada no reator na consistência adequada e aquecida até a temperatura desejada. Atingida a temperatura, e sob efeito de agitação constante, foram injetadas as cargas preestabelecidas de NaOH e H₂O₂ ao sistema (nesta ordem), 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. Em seguida, a polpa foi lavada com o equivalente a 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa seca. Essas etapas foram efetuadas em duplicata.

4.3.5. Procedimentos Analíticos

As análises da polpa e dos licores residuais do branqueamento foram efetuadas seguindo os procedimentos analíticos da TAPPI, CPPA e SCAN, conforme descrito no Quadro 3. Todas as análises foram efetuadas em duplicata.

Quadro 3. Procedimentos analíticos utilizados para análise da polpa e dos licores residuais do branqueamento

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 (4h, 105 °C, 0% UR, após acondicionamento das folhas por 4 h em sala climatizada)
Titulação de soluções e residuais de branqueamento	Kraft, P., In: Pulp & Paper Manufacture, Vol. 1, McDonald, R.G. (editor), 2 nd ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1967, p. 628-725
Preparo da polpa para análise de metais	CPPA G30
Análise de metais	Espectrofotometria de absorção atômica - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2000
Ácidos hexenurônicos	VUORINEN, T., TELEMAN, A., FAGERSTROM, P., BUCHERT, J., and TENKANEN, M., Selective hydrolysis of hexenuronic acid groups and its application in ECF and TCF bleaching of kraft pulps. Proc. 1996 Intl. Pulp Bleaching Conf., Tappi Press 1:43-51 (1996).
Análise de carboidratos	WALLIS (1996)

Cor do efluente	CPPA H1
DQO do efluente	CPPA H3
AOX do efluente	Scan W9:89
OX da polpa	Scan W9:89
Refino em moinho tipo PFI	T248 sp-08
Grau de refinabilidade, Schopper Riegler (°SR)	Adaptação de T227 om-09
Formação de folhas para testes físicos	T205 sp-06
Gramatura de papéis	T410 om-08
Espessura de folhas de papéis	T551 om-06
Volume específico aparente	T220 sp-06
Resistência a passagem de ar	T536 om-07
Resistência ao arrebentamento	T403 om-02
Resistência ao rasgo (Elmendorf)	T414 om-04
Índice de tração	T494 om-06
Módulo específico de elasticidade (MOE)	T494 om-06

4.3.6. Cálculo do ganho de alvura, eficiência, seletividade da deslignificação e rendimento da Pré-O₂

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

$$GA(\%) = A_f - A_i \quad (1)$$

Onde:

GA = ganho de alvura, % ISO;

A_i = alvura inicial, % ISO; e

A_f = alvura final, % ISO.

$$E(\%) = \frac{(K_i - K_f)}{K_i} * 100 \quad (2)$$

Onde:

E = eficiência de deslignificação, %;

K_i = número Kappa inicial; e

K_f = número Kappa final.

$$S = \frac{\Delta k}{\Delta V} \quad (3)$$

Onde:

S = seletividade;

ΔK = unidades removidas do número Kappa; e

ΔV = unidades removidas da viscosidade.

Os rendimentos das etapas de pré-deslignificação com oxigênio foram obtidos de forma indireta (equação 4), pela medição do teor de sólidos nos filtrados e mensuração gravimétrica (Equação 5) do rendimento da mesma.

$$\text{Rendimento da Pré-O}_2(\%) = -4,315 * SOL + 101,2 \quad (4)$$

$$\text{Rendimento da Pré-O}_2(\%) = (A/B) * 100 \quad (5)$$

Onde:

SOL = Sólidos dissolvidos no licor, em %.

A = Massa de polpa na entrada da Pré-O₂

B = Massa de polpa na saída da Pré-O₂

4.3.7. Instabilidade de alvura

A instabilidade de alvura foi expressa pela reversão de alvura e pelo número de cor posterior (NCP). A reversão de alvura foi determinada pela diferença entre a alvura final medida após o branqueamento e a alvura envelhecida conforme procedimento Tappi UM 200 (4h, 105±3 °C, 0% UR). O NCP foi obtido comparando-se as relações entre os coeficientes de absorção e de dispersão da luz, antes e após a reversão da alvura (Equação 6), calculado conforme Tappi TIS 017-10.

$$NCP = \left[\left(\frac{K}{S} \right)_{DEPOIS} - \left(\frac{K}{S} \right)_{ANTES} \right] * 100 \quad (6)$$

Onde:

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R}$$

R = Alvura;

K = Coeficiente de absorção de luz; e

S = Coeficiente de dispersão de luz

Quadro 4. Condições gerais do branqueamento referência (condições atuais de operação)

Condição	Estágio de Branqueamento						
	O – L1	O – L2	Q	D*	(OP)	D	TAC
Consistência, %	9,5	10,0	9,0	9,0	9,0	9,5	10,0
Temperatura, °C	90	100	80	88,0	90,0	57,0	45,0
Tempo, min.	60	60	30	120	60	120	-
Pressão, kPa	350	200	-	-	200	-	-
Dosagem de NaOH, kg/tas	15,3	16,7	-	-	10,3	-	-
Dosagem de O ₂ , kg/tas	16,1	16,8	-	-	3,4	-	-
Dosagem de MgSO ₄ , kg/tas	1,5	1,5	-	-	1,5	-	-
Dosagem de H ₂ O ₂ , kg/tas	-	-	-	-	7,0	-	-
Dosagem de H ₂ SO ₄ , kg/tas	-	-	-	6,5	-	1,9	-

Dosagem de ClO ₂ , kg/tas	-	-	-	12,7	-	2,7	-
Dosagem de DTPA, kg/tas	-	-	1,5	-	-	-	-
Dosagem de NaHSO ₃ , kg/tas	-	-	-	-	-	-	-
Residuais de oxidantes, kg/tas	-	-	-	-	-	-	-
Número Kappa – entrada	20,1	20,1	-	-	-	-	-
Número Kappa – saída	10,7	13,5	-	-	-	-	-
Viscosidade, dm ³ /kg – entrada	910	910	-	-	-	-	-
Viscosidade, dm ³ /kg – saída	760	860	-	-	-	660	-
Alvura, % ISO – saída	47	47	-	-	84,0	90,0	-
DQO, kg/tas – saída	25	25	-	-	-	-	-

4.4. Análise estatística

Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial. Os dados obtidos foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância e Teste Tukey ao nível de 95% de confiança.

Para analisar os resultados de Refinabilidade e Propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas, foi realizada a comparação de equações de regressão não-linear nos parâmetros, utilizou-se o teste F para identidade de modelos, conforme metodologia apresentada por REGAZZI e SILVA (2004).

5. RESULTADOS

5.1. Deslignificação com oxigênio (estágio Pré-O₂)

Nas Figuras 6-9, são apresentados os resultados do estudo de aperfeiçoamento do estágio de deslignificação com oxigênio (Pré-O₂) no que tange à viscosidade da polpa, seletividade, eficiência e rendimento do processo. Nos Quadros 1A a 3A do Apêndice A são mostrados os resultados experimentais do estudo de aperfeiçoamento da deslignificação com oxigênio.

Verificou-se redução da viscosidade da polpa com o aumento da temperatura e da dosagem de álcali (Figs. 6 e 7), o que penalizou a seletividade dessa etapa (Figs. 8 e 9). Esse efeito negativo na viscosidade pode ser consequência da presença de metais de transição na polpa. O controle dos metais de transição é muito importante para a seletividade da etapa de deslignificação com oxigênio, uma vez que o peróxido de hidrogênio é um intermediário nessa etapa, e sua decomposição catalítica forma radicais hidroxila que podem atacar os polissacarídeos, trazendo resultados prejudiciais à viscosidade (GULLICHSEN, 2000).

O uso do sulfato de magnésio (3 kg/tas do MgSO₄.7H₂O), utilizado como aditivo ao estágio O, mostrou efeito positivo na minimização de degradação da celulose, preservando assim, a viscosidade da polpa, e colaborando para uma maior seletividade do processo (Fig. 9). O mecanismo de estabilização dos carboidratos pelo magnésio na deslignificação com oxigênio pode ser explicado por várias teorias: (1) compostos de magnésio formam complexos estáveis com metais de transição; (2) colóides de hidróxido de magnésio sorvem metais de transição em sua superfície; (3) compostos de

magnésio formam fortes complexos com unidades glicosídicas dos carboidratos; e (4) íons magnésio promovem a dismutação de radicais superóxidos (PESSOTI, 2000). Essa última teoria tem sido a mais aceita.

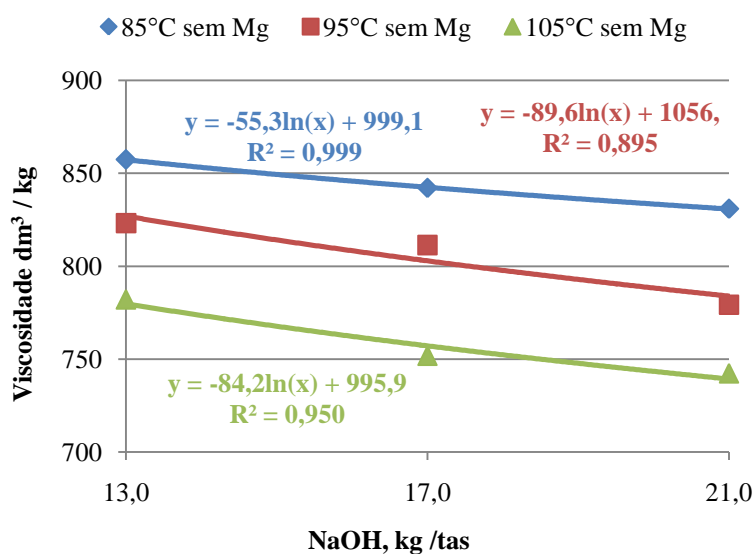


Figura 6. Viscosidade da polpa celulósica submetida à deslignificação com oxigênio, realizada sem Mg e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH.

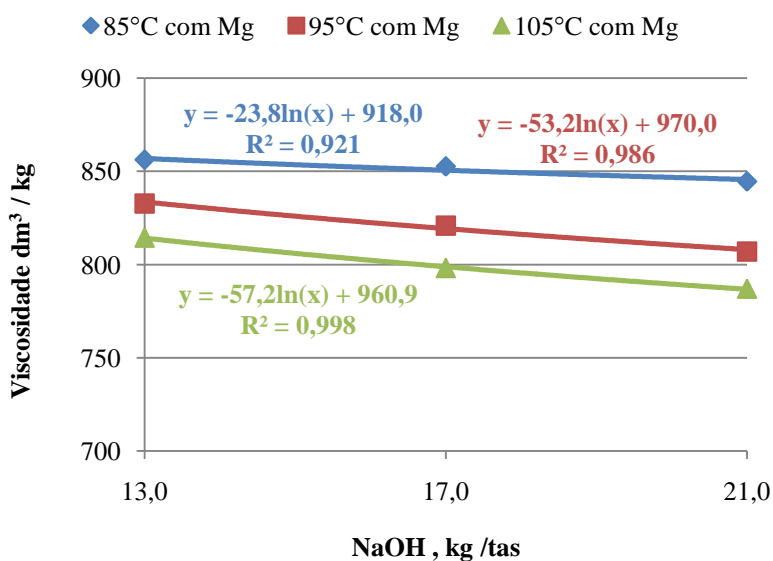


Figura 7. Viscosidade da polpa celulósica submetida à deslignificação com oxigênio, realizada com Mg (3 kg MgSO₄·7H₂O/tas) e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH.

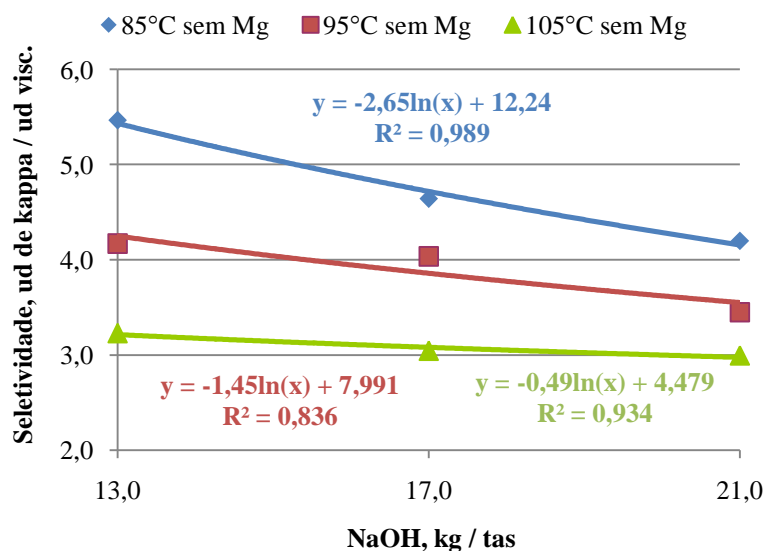


Figura 8. Seletividade da deslignificação com oxigênio realizada sem Mg e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH.

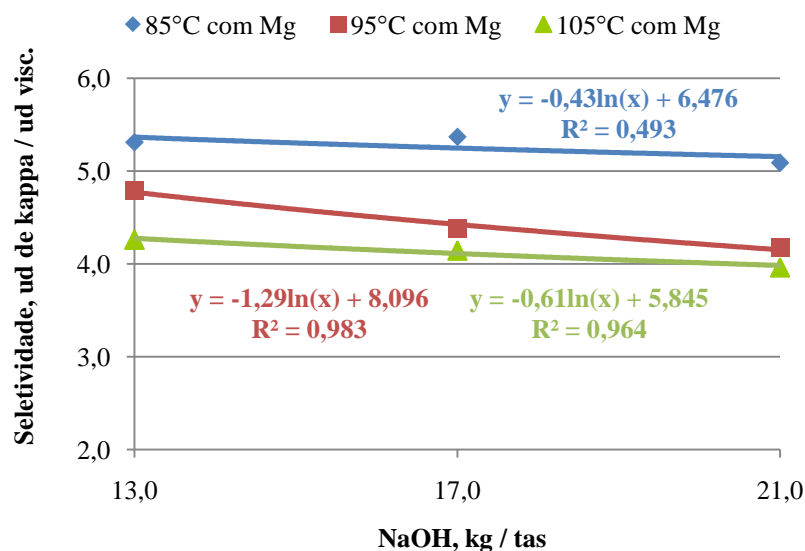


Figura 9. Seletividade da deslignificação com oxigênio realizada com Mg (3 kg MgSO₄.7H₂O/tas) e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH.

A eficiência de deslignificação foi influenciada positivamente pelo aumento da temperatura, entretanto, não foi afetada pelo uso do Mg (Fig. 10). Como esperado, o rendimento do estágio de deslignificação com oxigênio se apresentou ligeiramente maior com o uso de Mg no processo (Fig. 11).

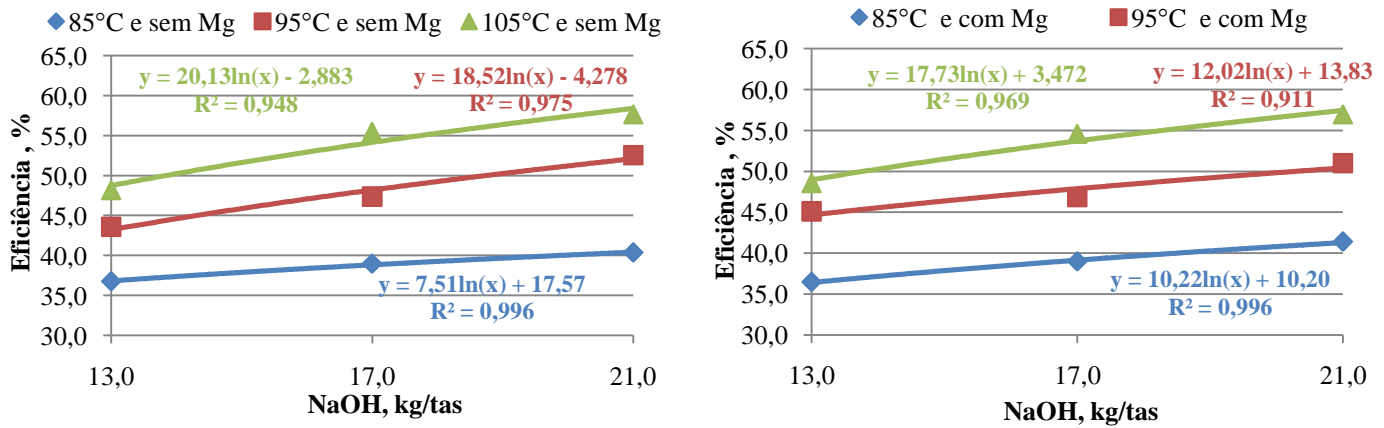


Figura 10. Eficiência de deslignificação com oxigênio realizada sem e com Mg (3 kg de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ /tas) e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH

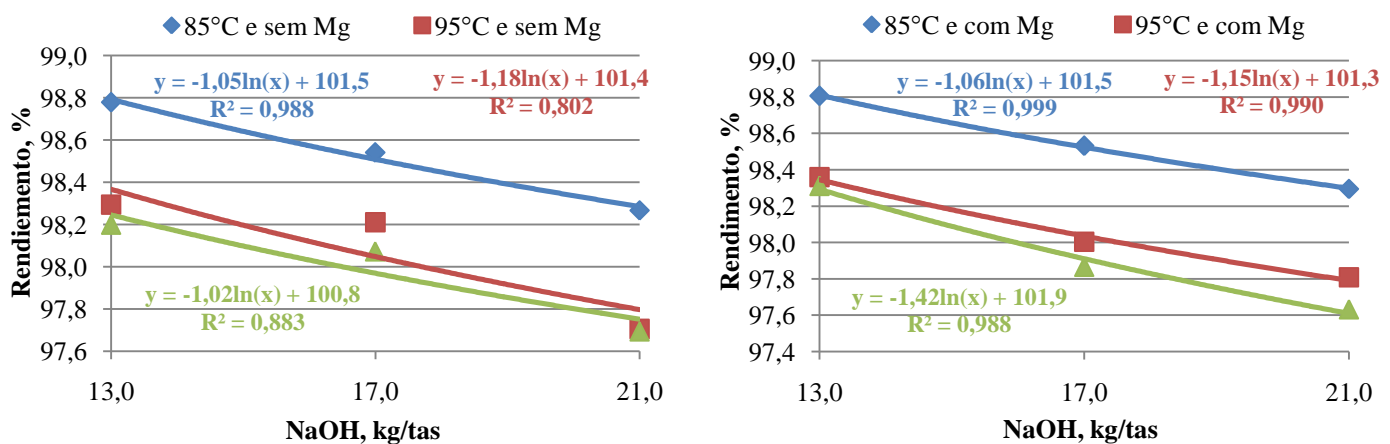


Figura 11. Rendimento (medido indiretamente pelos sólidos do licor) da deslignificação com oxigênio realizada sem e com Mg (3 kg $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ /tas) e em diferentes temperaturas e dosagens de NaOH (kg/tas).

Os dados de eficiência de deslignificação ($\geq 45\%$ como premissa do projeto), viscosidade e seletividade mostrados nas Figuras 6-11, indicaram que a dosagem de NaOH de 15kg/tas é a mais apropriada para dar continuidade aos estudos. O uso do Mg foi também considerado essencial, já que resultou ganhos significativos de viscosidade, sendo esta propriedade de grande importância para esse projeto. Apesar de maiores seletividades serem observadas na temperatura de 85°C, a temperatura de 95 °C foi a escolhida como condição ótima para realização da deslignificação com oxigênio, pois a temperatura mais baixa não atendeu à premissa de eficiência mínima de 45%. O estudo

apresentado nas Figuras 6-11, especialmente no que tange ao efeito do magnésio como aditivo, motivou a investigação de outras dosagens desse sal. Assim sendo, foram avaliados vários cenários com o uso de magnésio em dosagens mais altas, mantendo-se constantes a dosagem de álcali (15 kg NaOH/tas) e a temperatura de reação (95 °C), respectivamente.

Os resultados mostrados na Figura 12 indicam que dosagens de magnésio superiores a 6 kg/odt de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ não resultam em ganhos significativos de viscosidade. Para se ter o real efeito do uso de Mg no estágio O na viscosidade do produto final, a polpa foi branqueada com a sequência QD*(OP)D, até se alcançar alvura de 90% ISO, segundo as condições atuais da planta de branqueamento de referência. Foram avaliados quatro cenários, a saber: (1) livre de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (não foi utilizado Mg em nenhuma etapa do branqueamento); (2) 0 kg/tas de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (não foi utilizado Mg no estágio O e 3kg/tas de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ no estágio OP); (3) 3 kg/tas de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (foi utilizada esta dosagem nos estágios O e OP); (4) 6 kg/tas de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (foi utilizada esta dosagem no estágio O; e 3kg/tas de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ no estágio (OP).

Um sumário dos resultados desse estudo está apresentado na Figura 13. Os resultados experimentais, obtidos para cada estágio de branqueamento, estão apresentados nos Quadros 4A-7A do Apêndice. Verifica-se que o tratamento no qual foram utilizadas as dosagens de 6 kg $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ /tas no estágio O e 3 kg $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ /tas em (OP) foi a que resultou a polpa de maior viscosidade ao final do branqueamento, indicando o efeito positivo do magnésio nesse parâmetro. Os códigos D₁, D₂ e D₃ na Figura 7 referem-se às dosagens de dióxido de cloro empregadas no estágio D da sequência QD*(OP)D que foram de 3,8, 5,7 e 7,6 kg/tas, respectivamente. O objetivo de alvura de 90% ISO foi alcançado com a dosagem de 5,7 kg/tas. Portanto, o valor de viscosidade a ser considerado na Figura 5 é aquele representado pelo código D₂.

Considerando-se a relevância do parâmetro viscosidade da polpa para o escopo desse estudo, foi escolhida a condição de número 4, i.e., na qual foram aplicadas as dosagens de 6 kg $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ /tas no estágio O e 3 kg $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ /tas no estágio (OP). Vale ressaltar que essas dosagens representam aproximadamente 3 kg MgSO_4 /tas no estágio O e 1,5 kg MgSO_4 /tas no estágio (OP), considerando-se o sal de sulfato de magnésio anidro. As demais condições operacionais do estágio O foram 15 kg

NaOH/tas, 18 kg O₂/tas, temperatura 95 °C, tempo 60 min., pressão 538 kPa, consistência 9,5%. Nas condições escolhidas para operar o estágio O, foi obtida polpa com viscosidade 853 dm³/kg, número Kappa de 10,4 e alvura 46% ISO. Essa amostra de polpa foi utilizada para os estudos subsequentes de aperfeiçoamento da sequência QD*(OP)D.

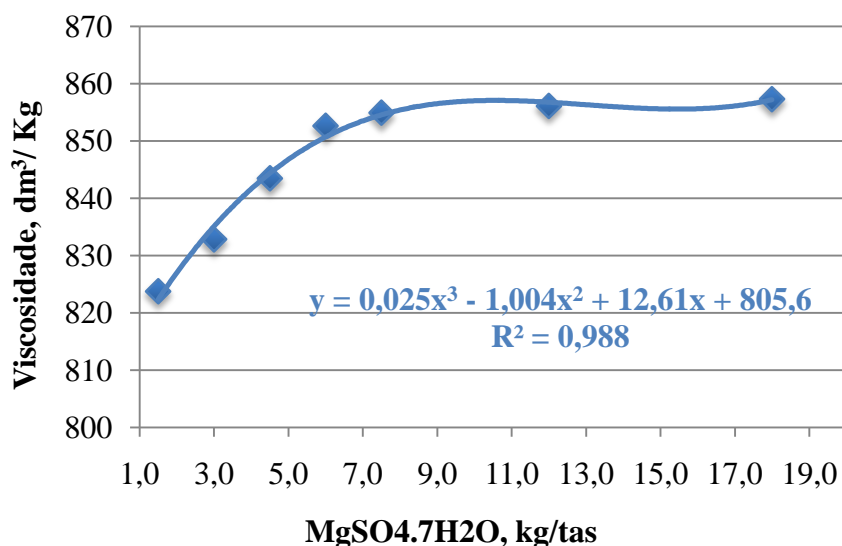


Figura 12. Efeito do uso de Mg no estágio O na viscosidade da polpa, sendo as condições de temperatura de 95 °C e dosagem de NaOH de 15kg/tas.

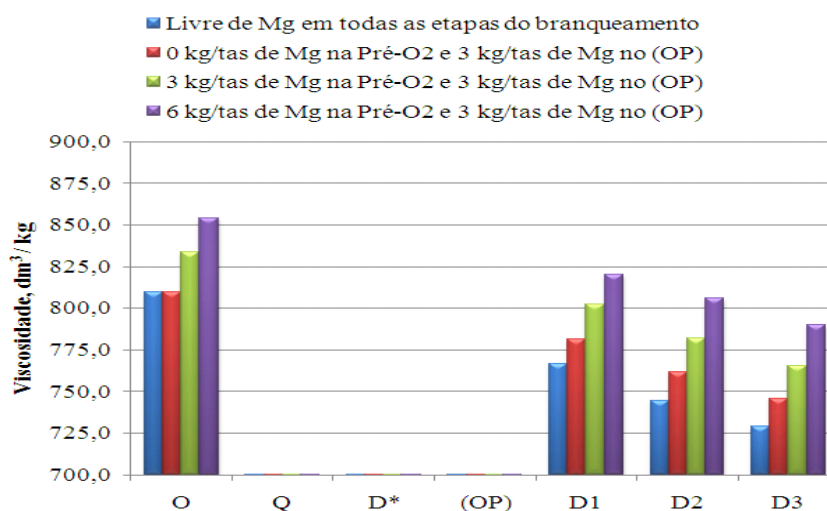


Figura 13. Efeito do uso de Mg nos estágios O e/ou (OP) na viscosidade da polpa branqueada, sendo que D₁, D₂ e D₃ referem-se às dosagens de 3,8, 5,7 e 7,6 kg ClO₂/tas aplicadas no estágio D da sequência QD*(OP)D. As dosagens de magnésio citadas no gráfico referem-se a kg de MgSO₄.7H₂O/tas.

5.2. Quelação (estágio Q)

O estágio de quelação foi conduzido na condição operacional da planta de branqueamento de referência (Quadro 4), exceto pelo ajuste de pH para 7 entre o estágio O e esse estágio.

O quelante ácido dietilenotriaminapentacético (DTPA) é mais efetivo no controle de metais quando utilizado em pH na faixa de 6 a 7, isso porque em pH muito acima do neutro ocorre formação de hidróxidos metálicos de baixa solubilidade, dificultando a ação do quelante. Estudo de quelação utilizando DTPA em pH 11 realizado por SIQUEIRA (2009), indica baixa eficiência de remoção de manganês. Isso pode ser explicado porque, à medida que o pH da polpa é abaixado para valores em torno de 6, a polpa se torna protonada, o que leva à liberação dos íons metálicos que se ligam ao quelante, formando hidróxidos (COLODETTE, 2009).

Esse fato motivou uma avaliação do conteúdo de metais na polpa após a etapa quelante, efetuada conforme a condição referência (pH 10,8) em pH neutro (6,2) pela adição de ácido sulfúrico à polpa antes da adição do quelante. Os resultados experimentais deste estudo estão apresentados no Quadro 8A do Apêndice A. Um sumário desses resultados está apresentado na Figura 14, onde se compara os conteúdos de metais da polpa original antes da quelação (polpa marrom), polpa quelada conforme de referência e polpa quelada conforme condição ótima de pH neutro.

Como esperado, o tratamento de quelação decresceu o conteúdo de todos os metais da polpa, exceto para Mg. O aumento do teor de Mg é explicado pelo uso de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ no estágio de deslignificação com oxigênio, realizado previamente a quelação. Foi observado uma maior remoção de metais na polpa com pH ajustado para pH de 6,2, se comparado à condição operacional referência (pH 10,8), onde não houve ajuste de pH. Porém as diferenças foram pequenas, o que não justificaria o ajuste de pH na prática industrial. Portanto, o estudo de otimização da sequência D*(PO)D prosseguiu com polpa quelada conforme a condição de referência, isto é, quelação sem ajuste de pH após o estágio O.

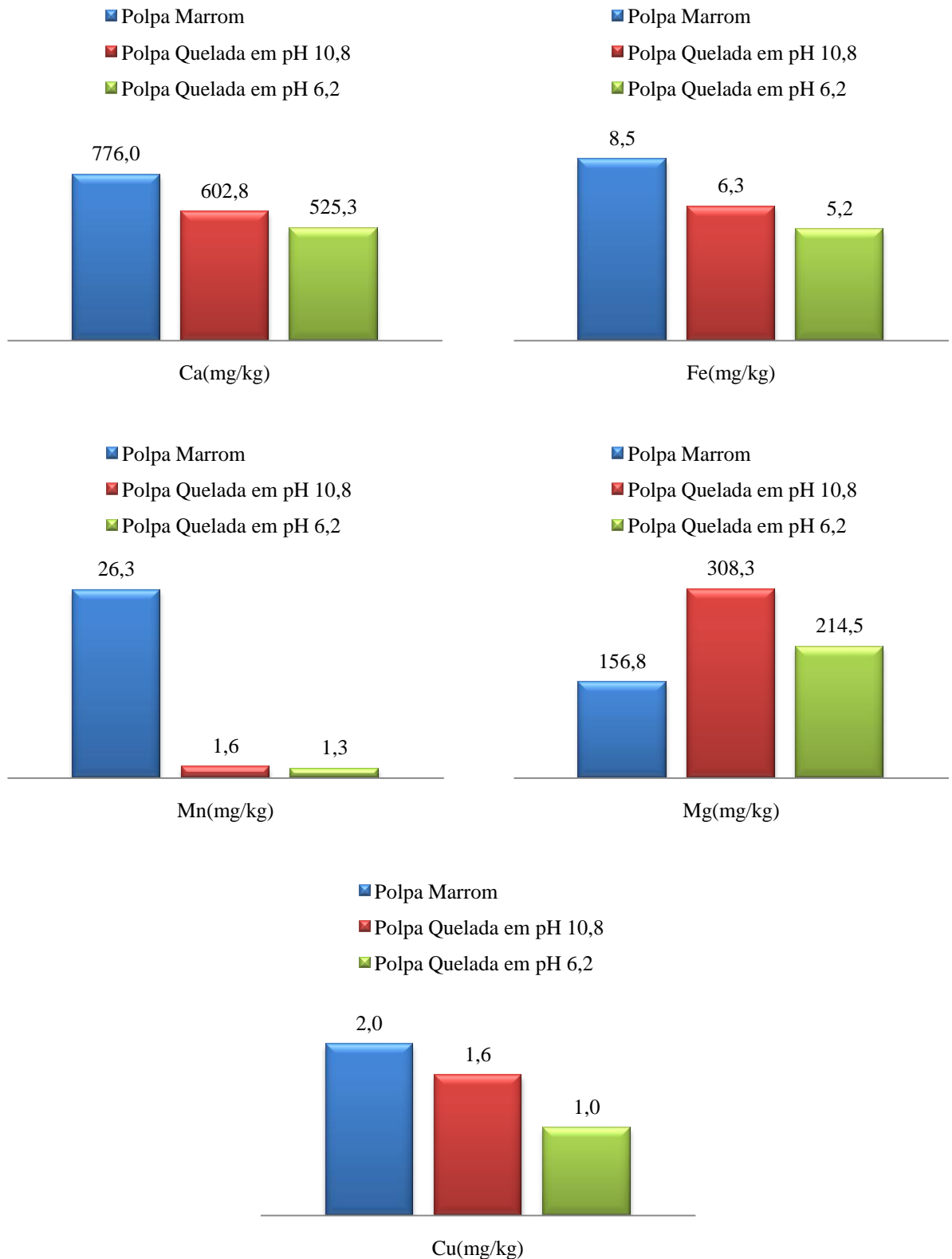


Figura 14. Conteúdo de metais da polpa marrom extraída do último lavador, e das polpas queladas na condição de referência (pH 10,8) e em meio neutro (pH 6,2), extraídas após o estágio Q.

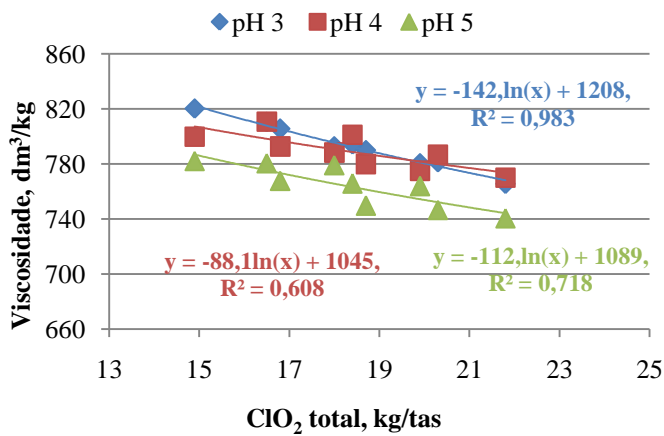
5.3. Branqueamento

5.3.1. Aperfeiçoamento do estágio D*

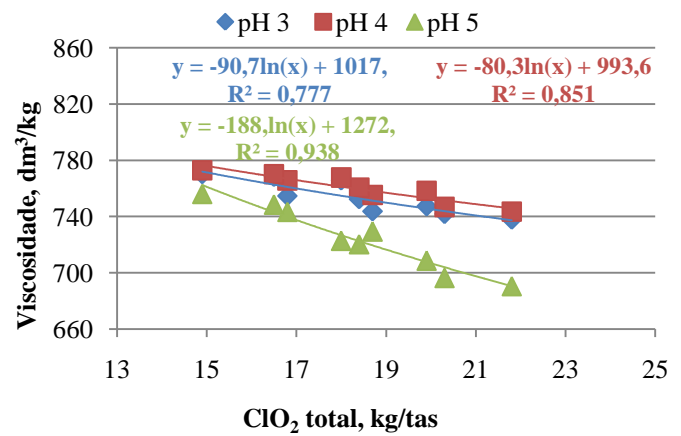
O estágio D* foi aperfeiçoado quanto ao efeito da temperatura, fator Kappa e pH final da reação. O efeito dessas variáveis foi monitorado após os estágios (OP) e D₁ realizado nas condições de referência (Quadro 4). Os resultados médios do aperfeiçoamento do estágio D* estão apresentados nas Figuras 15-17 e os resultados experimentais encontram-se nos Quadros 9A a 36A do Apêndice A.

5.3.1.1. Efeito do pH

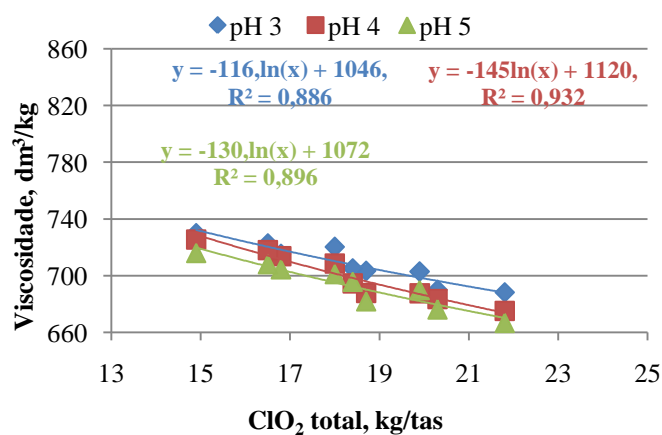
Nas Figuras 15 e 16, são mostrados os resultados de viscosidade e reversão de alvura, medida pelo número de cor posterior, em função do pH final de reação e consumo de dióxido de cloro para se atingir alvura de 90% ISO, em três temperaturas do estágio D*. Foi observada uma tendência de maximização da viscosidade da polpa na faixa de pH 3 a 4, independentemente da temperatura de reação. A redução da viscosidade acima de pH 4 pode ser racionalizada pelo aumento da geração de ácido hipocloroso (HClO), que atinge seu ponto de máxima formação em valores de pH próximo a 5,0. Houve uma tendência de diminuição da viscosidade com o aumento da dosagem de ClO₂, o que chama atenção para a necessidade de se aperfeiçoar o branqueamento no sentido de se alcançar a alvura objetivo com mínimo consumo desse oxidante.



(A)



(B)



(C)

Figura 15. Efeito do pH e da temperatura do estágio D* na viscosidade da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C.

Não foi observado influência dos níveis de pH do estágio D* no número de cor posterior da polpa branqueada (Fig. 16), indicando que o pH da reação desse estágio tem pouca influência na reversão de alvura. A ausência de efeito do pH foi observada independentemente da temperatura do estágio D*. Houve uma tendência de diminuição da reversão de alvura com o aumento da dosagem de ClO_2 , fato este bem documentado na literatura (EIRAS, 2001)

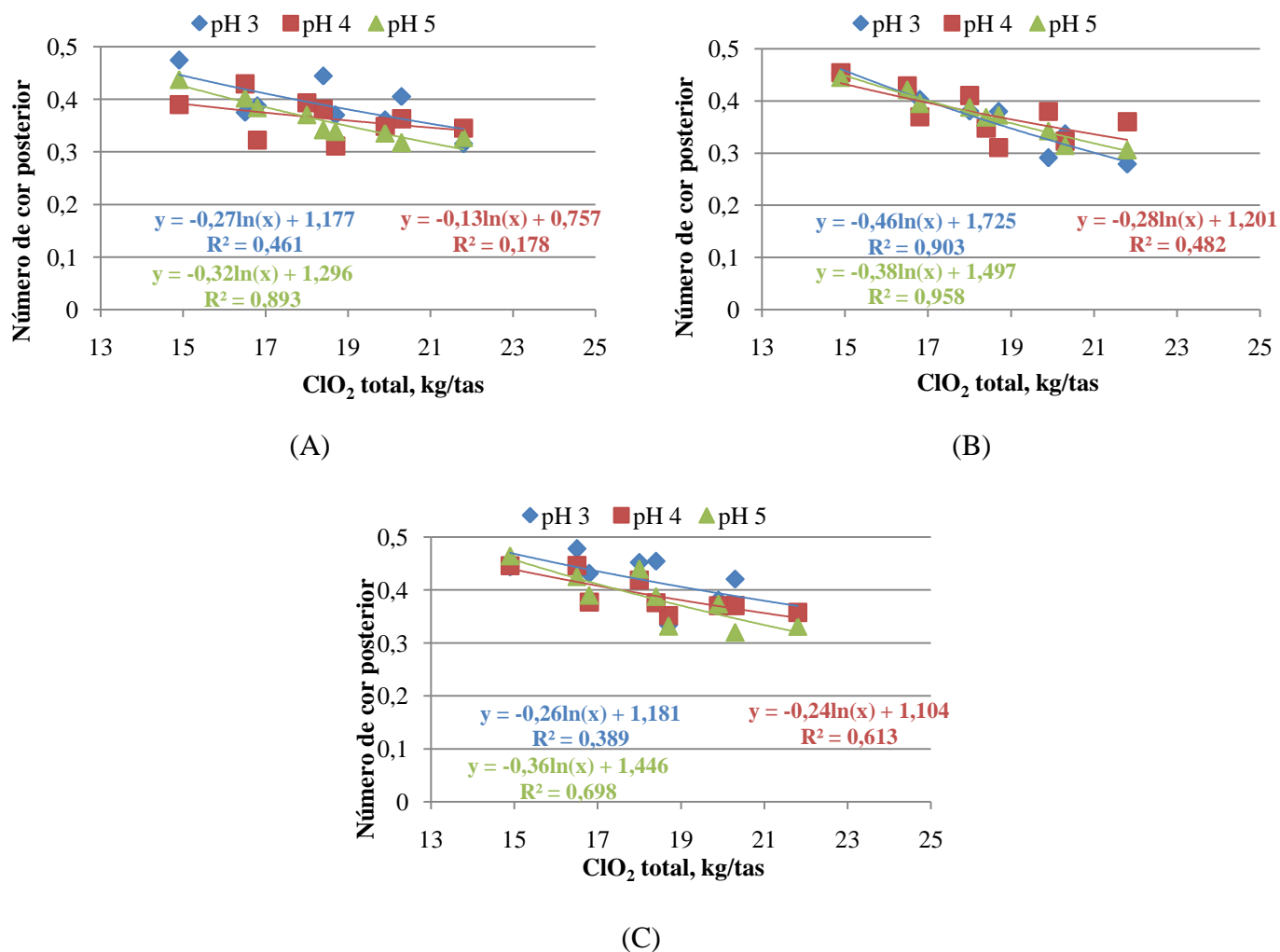
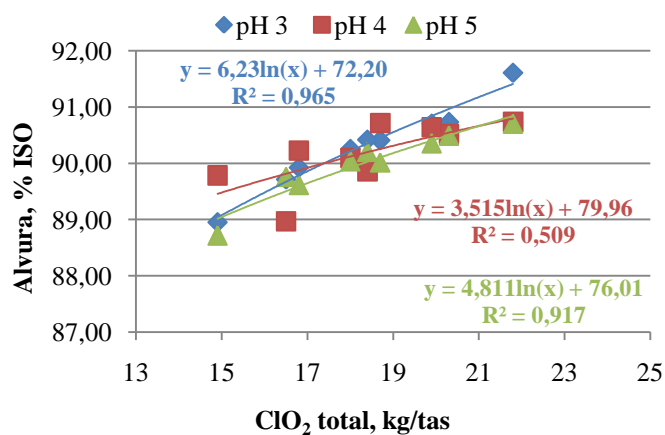
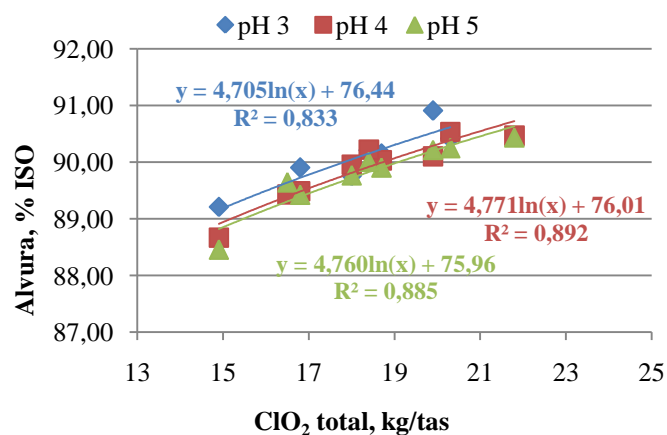


Figura 16. Efeito do pH e da temperatura do estágio D* na reversão de alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C.

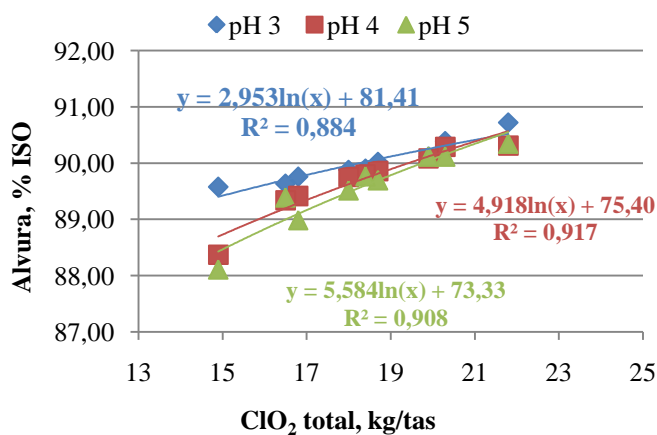
Em relação à alvura final da polpa (Fig. 17), verifica-se que o objetivo de 90% ISO foi alcançado com menor carga de dióxido em pH 4 na temperatura de 60 °C, em acordo com o conceito já consolidado de que, nesse pH, o dióxido de cloro apresenta o seu maior poder alvejante (DENCE e REEVE, 1996). Porém, para as temperaturas de 75 e 90 °C, o pH 3 produziu alvura de 90% ISO com menor consumo de ClO₂. Tais resultados indicam que o pH ótimo de operação do estágio D* depende da temperatura dessa etapa e deve ser aperfeiçoado e função da temperatura.



(A)



(B)



(C)

Figura 17. Efeito do pH e da temperatura do estágio D* na alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C.

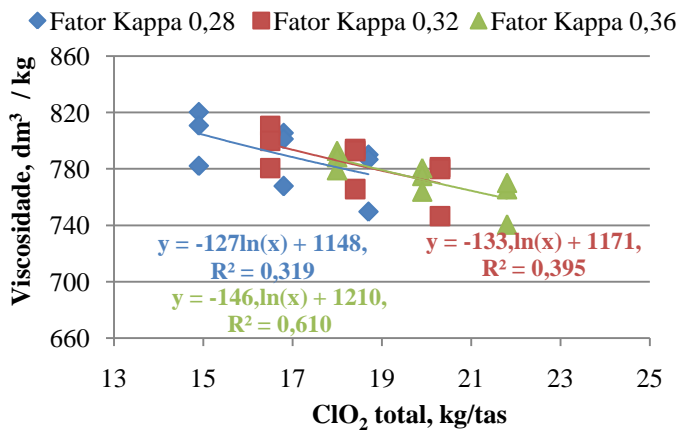
5.3.1.2. Efeito do fator Kappa e da temperatura

Nas Figuras 18, 19 e 20, são mostrados os resultados de viscosidade, número de cor posterior e alvura, respectivamente, em função da temperatura do estágio D* e do consumo total de dióxido de cloro na sequência QD*(OP)D.

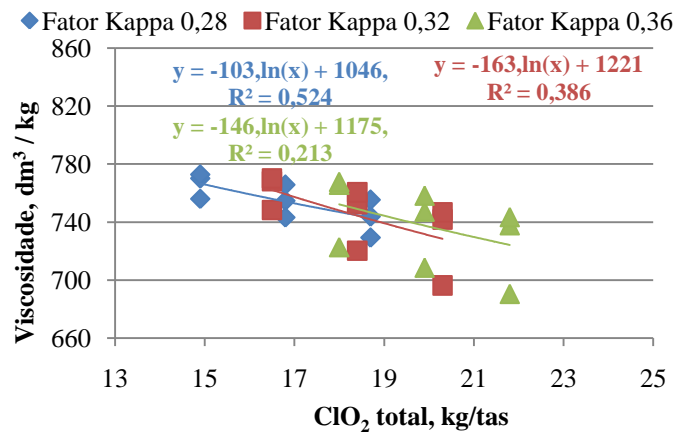
O aumento do fator Kappa do estágio D* na faixa de 0,28 a 0,36 não teve efeito muito significativo na viscosidade (Fig. 18), na reversão de alvura (Fig. 19) e na alvura final da polpa (Fig. 20), independentemente da temperatura empregada no estágio D*. Portanto, a decisão do melhor fator Kappa a se utilizar dependerá das condições

operacionais da etapa D* e D final. Nos casos onde há limitação de temperatura no estágio D₁ (situação da empresa cedente do material estudado) sugere-se o uso de um fator Kappa mais elevado no estágio D*. Porém, se houver a possibilidade de se trabalhar em temperatura mais alta no estágio D₁, recomenda-se usar um fator Kappa menor em D* e utilizar uma carga maior de ClO₂ em D₁. O uso de fatores Kappa mais baixos tem sido também recomendado pela literatura especializada (PRYKE e REEVE, 2000; SUSS, 2001), tendo em vista a perda potencial de dióxido de cloro por reações laterais de decomposição a clorato, causadas pelo excesso de concentração desse reagente.

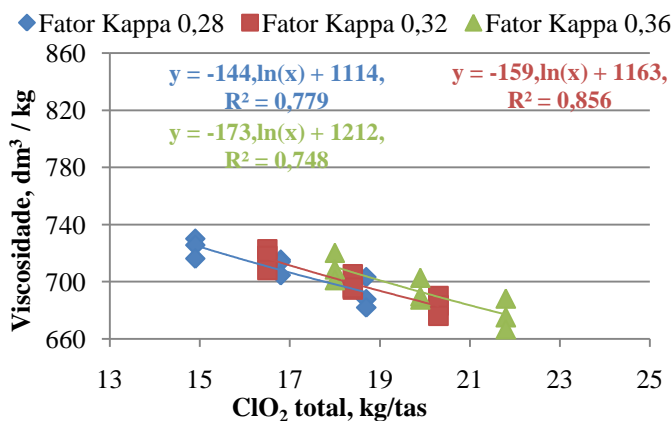
O aumento da temperatura do estágio D* afetou negativamente a viscosidade final da polpa branqueada (Fig. 18). Esse resultado era esperado, considerando-se que, no estágio D*, ocorre a geração de cloro elementar e ácido hipocloroso a partir do ClO₂, os quais, em condições de elevada temperatura, têm efeito negativo nas cadeias de celulose; isto pode ser observado por meio da Figura 18D, que mostra impacto negativo da temperatura do estágio D* na viscosidade. Houve uma tendência de diminuição da viscosidade final da polpa com o aumento da dosagem de ClO₂.



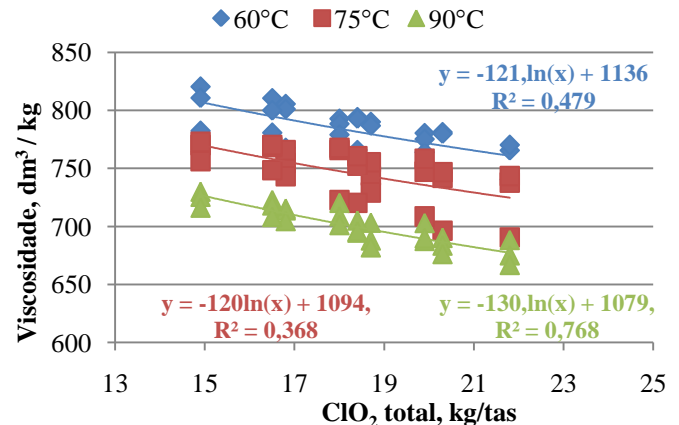
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 18. Efeito do fator Kappa e da temperatura do estágio D* na viscosidade da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C, (C) conduzido a 90 °C e (D) efeito global da temperatura do estágio D* na viscosidade.

Não foi verificada influência da temperatura do estágio D* no número de cor posterior da polpa branqueada (Fig. 19). Houve uma tendência de diminuição da reversão de alvura com o aumento da dosagem de ClO₂, em razão de uma maior purificação da polpa.

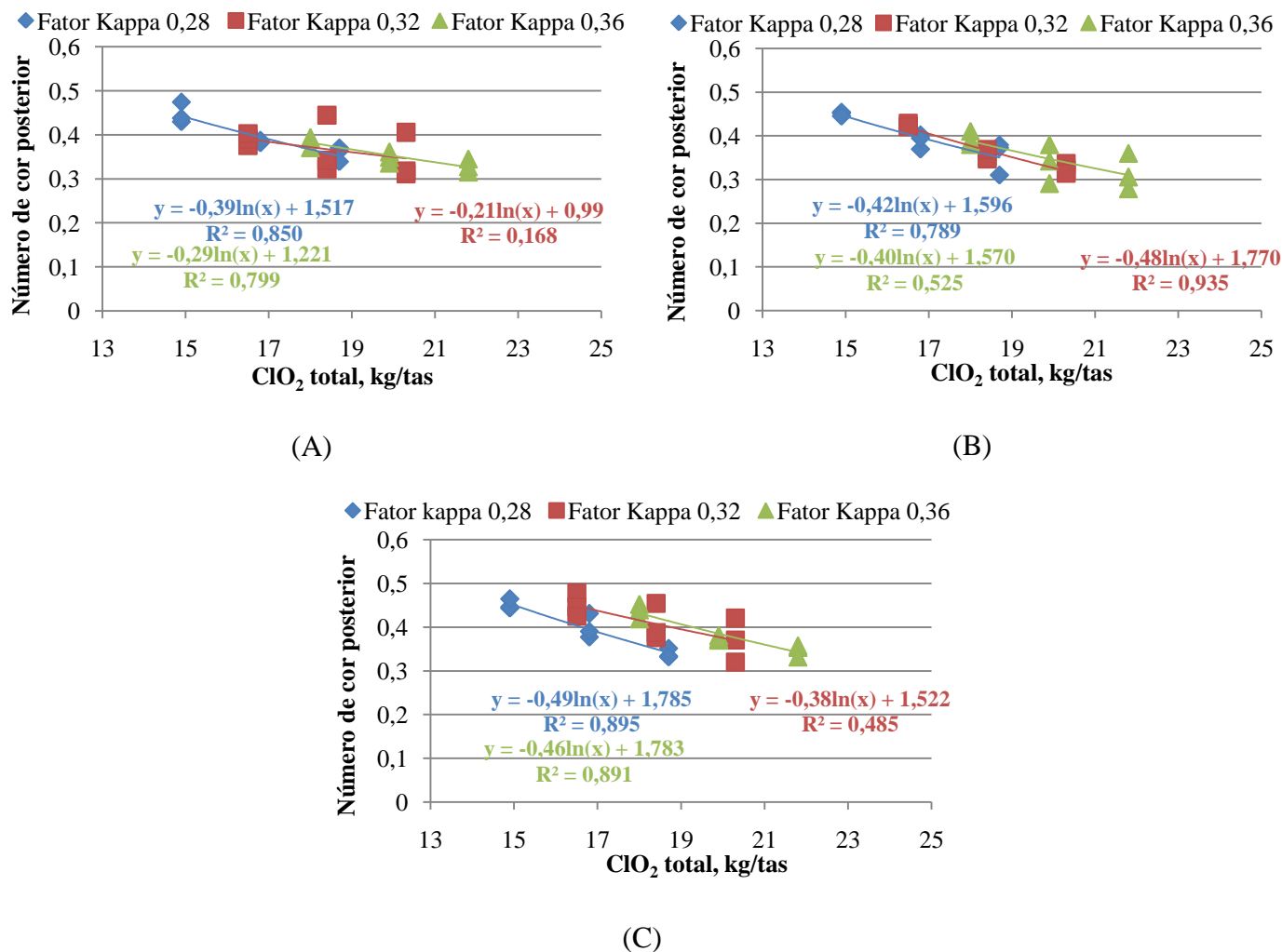


Figura 19. Efeito do fator Kappa e da temperatura do estágio D* na reversão de alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C.

Houve uma tendência de diminuição da alvura final da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D com o aumento da temperatura do estágio D*(Fig. 20). Esse resultado foi inesperado, tendo em vista que o estágio D* é considerado mais efetivo em temperaturas mais elevadas em razão da sua maior eficiência na remoção de HexA. Uma possível explicação para o efeito negativo da temperatura é a natureza da polpa sob investigação que apresentava teor muito baixo de HexA (33,6 mmol/kg – Quadro 2). O estágio D* não é recomendado para polpas com baixo teor de HexA, como as polpas de coníferas, por exemplo. A polpa utilizada nesse estudo continha teor de HexA típico de polpas de coníferas. Nas polpas de folhosas, o teor de HexA varia, tipicamente, na faixa de 60-80 mmol/kg. O efeito negativo na alvura causado pela temperatura do

estágio D* é usualmente compensado pela significativa remoção de HexA, o que, ao final, justifica o uso de elevadas temperaturas. Porém, se o teor de HexA é baixo, altas temperaturas no estágio D* podem resultar em branqueamento menos eficiente, como foi o caso desse estudo.

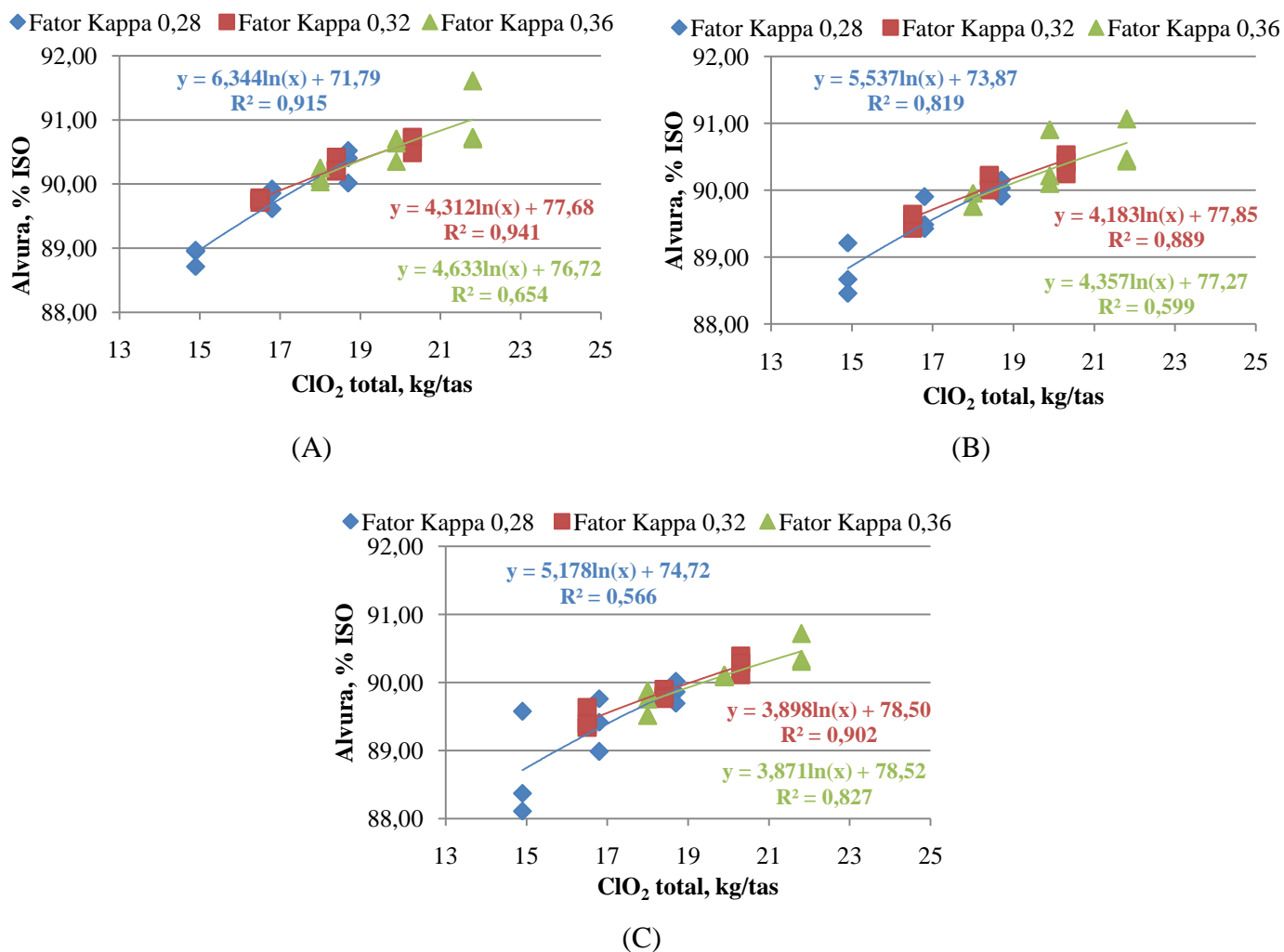


Figura 20. Efeito do fator Kappa e da temperatura do estágio D* na alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP) , sendo os tratamentos (A) conduzido a 60 °C, (B) conduzido a 75 °C e (C) conduzido a 90 °C.

5.3.2. Aperfeiçoamento do estágio (OP)

O controle dos metais de transição é muito importante para a seletividade da etapa de branqueamento com oxigênio e peróxido, uma vez que a decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio, nessa etapa, forma radical hidroxila que pode atacar os polissacarídeos, trazendo resultados prejudiciais (GULLICHSEN, 2000).

No estágio (OP) foram avaliadas duas temperaturas e duas dosagens de H_2O_2 em experimentos com e sem o uso de magnésio. O estágio (OP) foi realizado com a polpa branqueada pela sequência OQD*, nas condições consideradas ótimas pelos estudos dessas etapas. Nos Quadros 37A a 44A do Apêndice A estão apresentados os resultados experimentais desse estudo.

Um sumário do efeito da dosagem de H_2O_2 e magnésio e da temperatura do estágio (OP) na viscosidade, na reversão de alvura e na alvura de polpas branqueadas pela sequência QD*(OP)D está apresentado nas Figuras 21, 22 e 23, respectivamente. Verifica-se que o estágio (OP) é mais atrativo quando operado a $90\text{ }^\circ\text{C}$, visto que produz melhores alvuras finais que a $75\text{ }^\circ\text{C}$ (Fig. 21), sem causar prejuízos significativos à viscosidade (Fig. 22) e à estabilidade de alvura da polpa (Fig. 23). Foi verificado que a adição de 3,0 kg/tas de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ melhorou o desempenho do estágio (OP) em relação à viscosidade final da polpa branqueada (Fig. 22). Houve tendência de redução da reversão de alvura com o aumento da dosagem total de ClO_2 utilizada no branqueamento. Dosagens de peróxido mais elevadas resultaram em menores viscosidades, mas não tiveram efeito na reversão de alvura, medido pelo número de cor posterior.

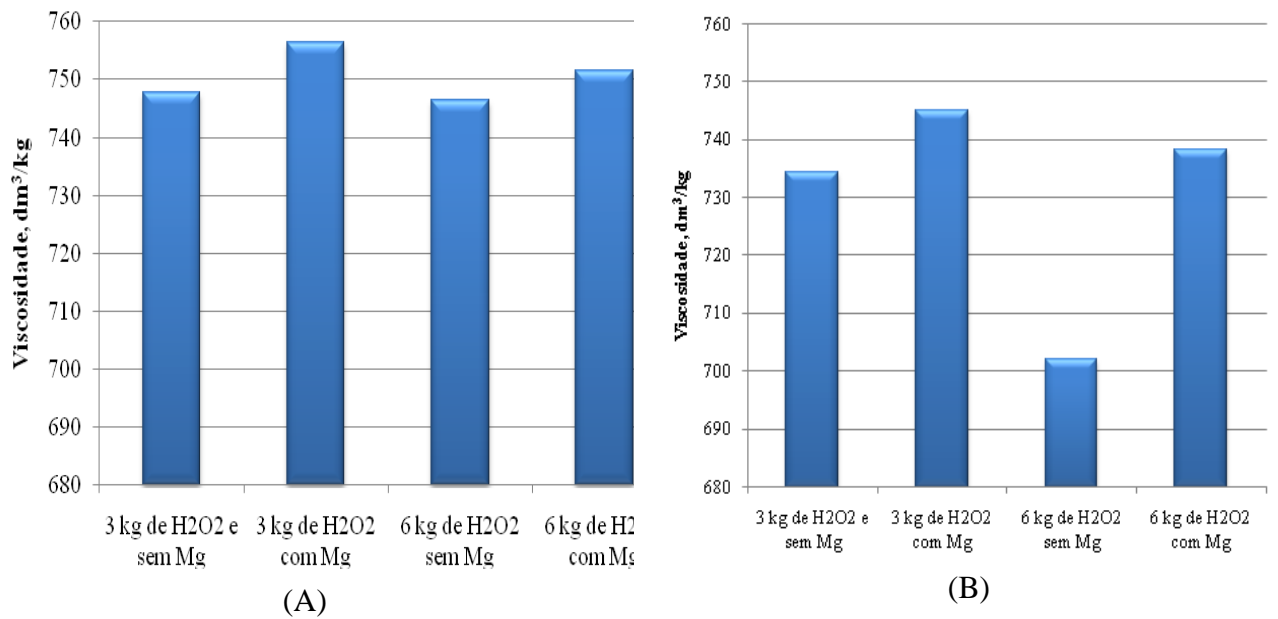


Figura 21. Efeito da dosagem de H₂O₂ e magnésio e da temperatura do estágio (OP) na viscosidade da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, sendo as dosagens de H₂O₂ expressas em kg/tas, sendo (A) tratamentos conduzidos a 75°C e (B) conduzido a 90°C.

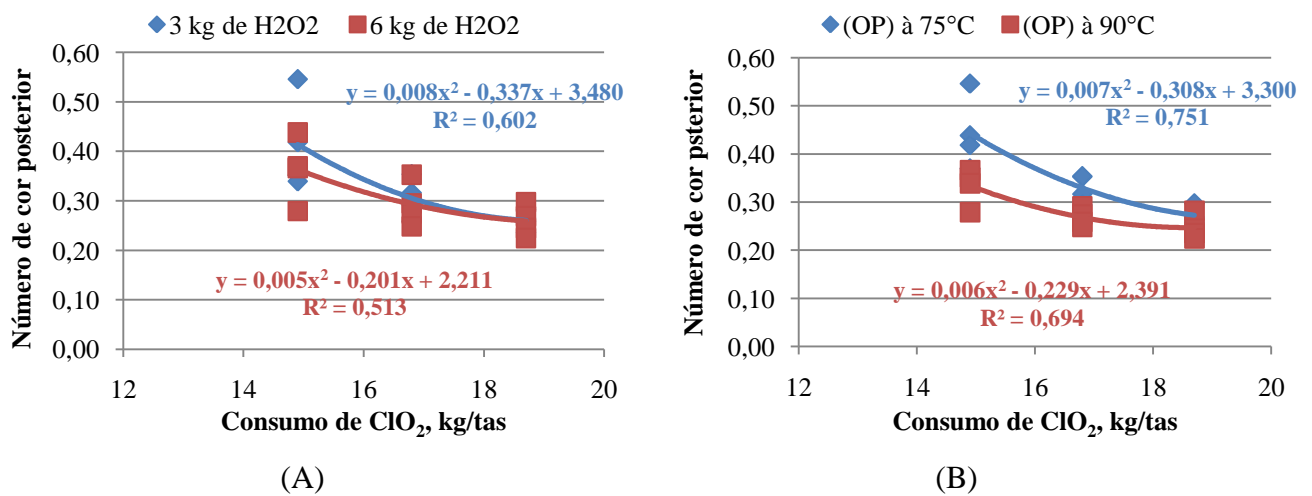


Figura 22. Efeito da dosagem de H₂O₂ (A) e da temperatura (B) do estágio (OP) na reversão de alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D.

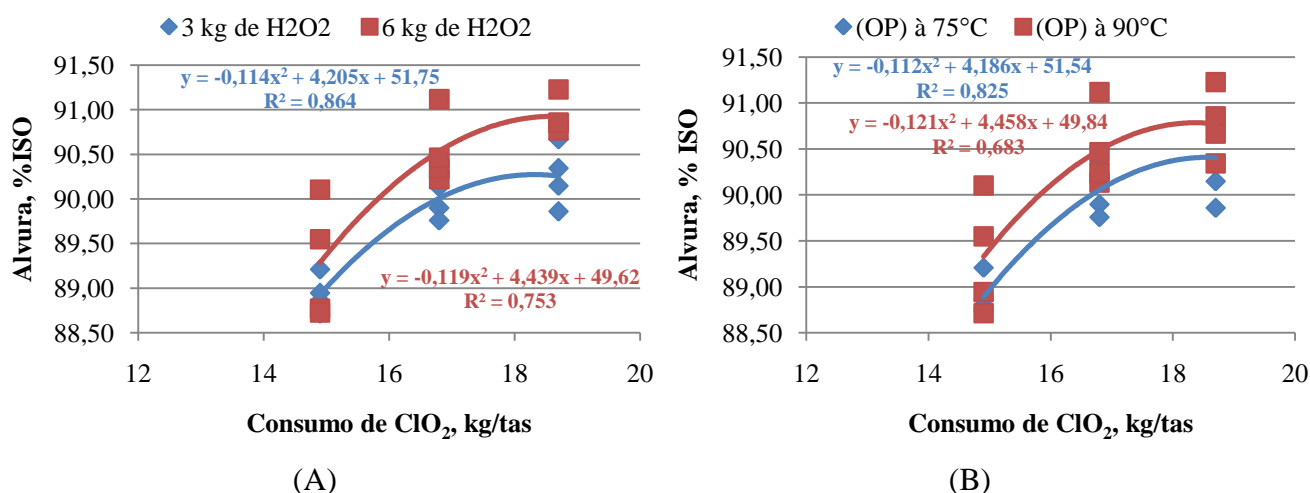


Figura 23. Efeito da dosagem de H₂O₂ (A) e da temperatura (B) do estágio (OP) na alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D.

5.3.3. Aperfeiçoamento do estágio (D)

Nos Quadros 45A a 47A do Apêndice A estão apresentados os resultados experimentais do aperfeiçoamento do estágio D. Nas Figuras 24, 25 e 26 é apresentado um sumário do efeito do pH do estágio D₁ na viscosidade, reversão de alvura e alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D, respectivamente.

As condições de operação para branqueamento com ClO₂ têm mostrado que a temperatura não é considerada um fator crítico. Comumente, as fábricas operam o estágio de dióxido em baixas temperaturas, variando entre 40 e 60 °C. A razão disso é que a taxa de reação do ClO₂ com a lignina é muito rápida. Daí outros parâmetros, como o pH de reação, serem importantes para que o estágio D opere em condições ideais de alveamento (EIRAS, 2004).

Verifica-se que o aumento do pH do estágio D₁, na faixa de 3,5 a 5,5, resulta em significativo decréscimo da viscosidade da polpa (Fig. 24). O efeito negativo deve-se à intensa formação de HClO nessa faixa de pH, sendo este último nocivo, as cadeias de celulose.

O pH do estágio D₁ não teve impacto significativo na estabilidade de alvura da polpa branqueada (Fig. 25). Porém, observa-se que o pH de 5,5 produz maiores alvuras para uma mesma carga de dióxido de cloro, quando comparado aos pHs de 3,5 e 4,5,

indicando que um valor de pH de 5,5 seria o ideal para operar o estágio D₁ no que tange à eficiência de branqueamento da polpa (Fig. 26).

As alterações no pH do estágio com dióxido de cloro influenciam diretamente a formação de clorato/clorito, que afeta a carga efetiva de oxidante disponível para deslignificação (EIRAS, 2004). Uma análise de ânions nos filtrados, obtidos do estágio de dioxidação (Fig. 27), revelou haver formação de clorito em pH 5,5. Esse fato explica maior eficiência de alveamento da polpa nesse valor de pH, pois o cloro molecular reage com os íons clorito, regenerando o dióxido de cloro (NI *et al.*, 1993). Essa regeneração ocorre de maneira controlada, com um melhor aproveitamento do dióxido de cloro aplicado.

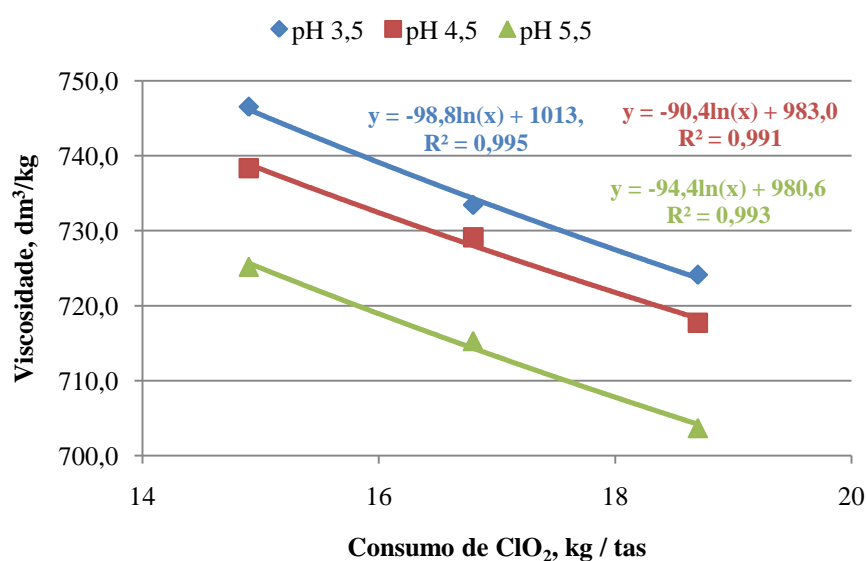


Figura 24. Efeito do pH do estágio D₁ na viscosidade da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D.

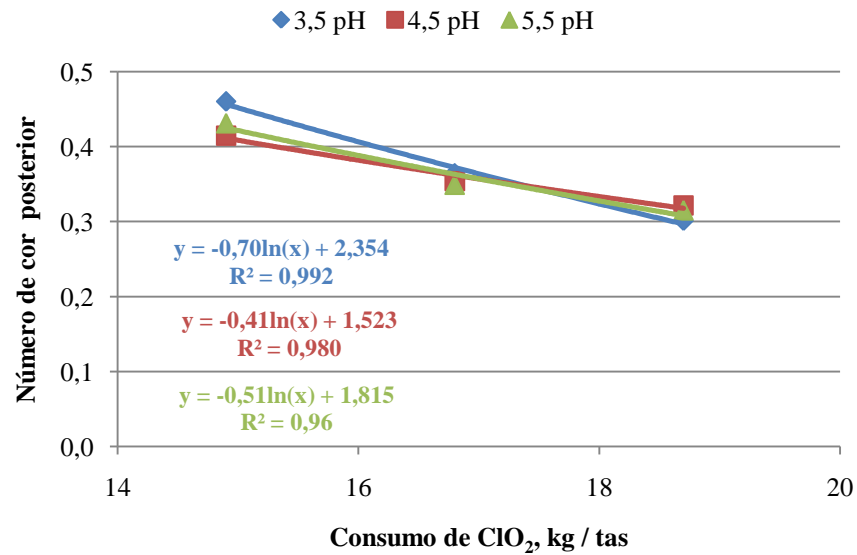


Figura 25. Efeito do pH do estágio D₁ na reversão de alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D.

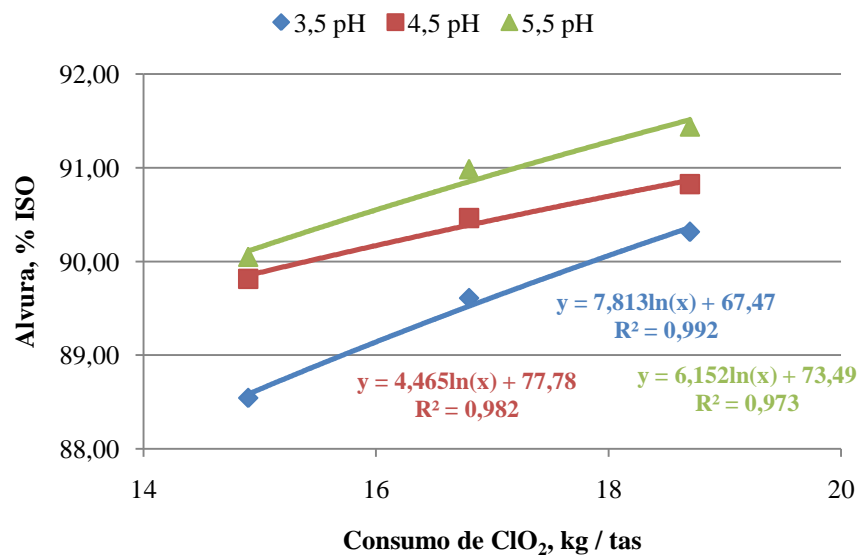


Figura 26. Efeito do pH do estágio D₁ na alvura da polpa branqueada pela sequência QD*(OP)D.

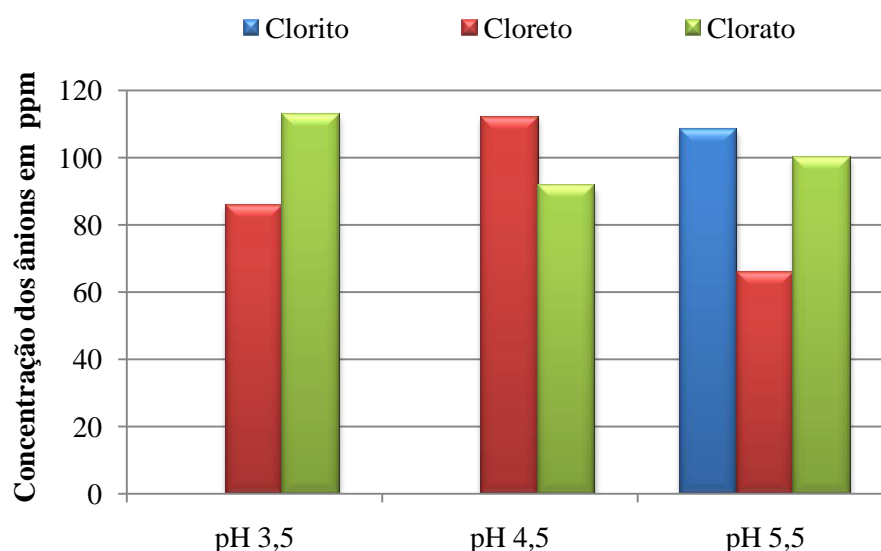


Figura 27. Efeito do pH do estágio D₁ nos teores de cloreto, clorito e clorato presentes nos filtrados dessa etapa.

5.3.4. Avaliação da aplicação de H₂O₂ na Torre de Alta Consistência (TAC) - Sequência QD*(OP)DP

Nessa etapa, foi realizado branqueamento da polpa pela sequência OQD*(OP)D nas condições previamente aperfeiçoadas, porém o branqueamento foi conduzido até a alvura 88% ISO. A polpa, nessa alvura, foi então branqueada com peróxido nas condições da torre TAC, variando-se a dosagem de H₂O₂, temperatura e pH. Pela aplicação dessa técnica, a sequência QD*(OP)D foi convertida em QD*(OP)DP, isto é, passou a ter um estágio adicional. Nas Figuras 28 a 30 estão apresentados os resultados médios desse estudo e, nos Quadros 48A a 60A do Apêndice A, estão apresentados os resultados experimentais.

A viscosidade da polpa foi influenciada negativamente pelo aumento da dosagem de peróxido de hidrogênio e pela temperatura, porém o pH teve pouco efeito nesse parâmetro (Fig. 27). A alvura da polpa foi pouco influenciada pelo pH final de reação na faixa de 7,5-9,0 (Fig. 28) e ligeiramente influenciada pela temperatura na faixa de 45 a 70°C (Fig. 30). Deve ser ressaltado que a temperatura de 70 °C teve impacto muito negativo na viscosidade da polpa, sendo, portanto, mais viável o uso da temperatura de 45 °C. Os resultados apresentados nas Figuras 28-30 sugerem a seguinte

condição de branqueamento com peróxido na torre TAC: pH 9, 45°C e 3,0 kg/tsa de H₂O₂.

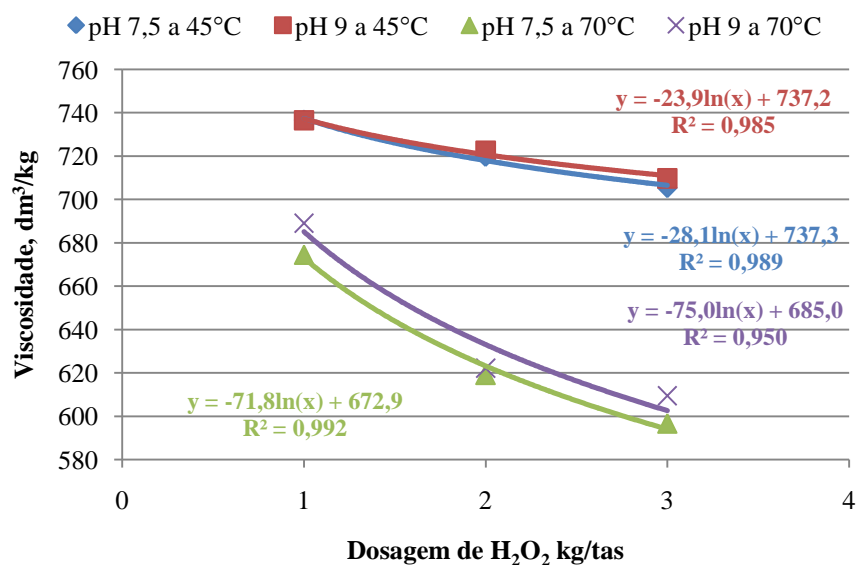


Figura 28. Efeito da dosagem de H₂O₂, do pH e da temperatura do estágio de peroxidação efetuado na TAC na viscosidade final da polpa.

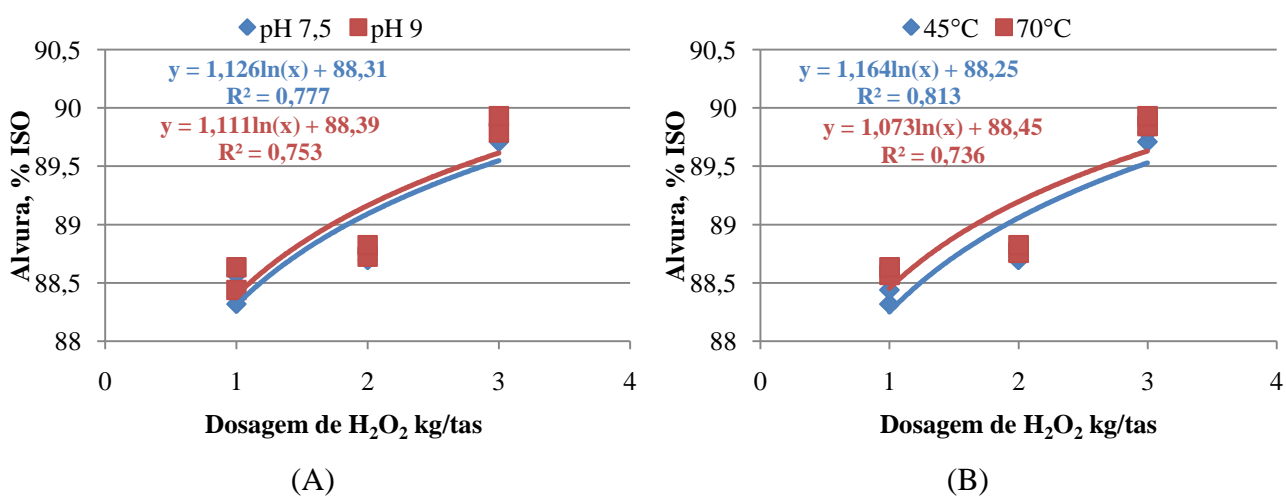


Figura 29. (A) Efeito da dosagem de H₂O₂ e do pH na alvura final da polpa; (B) efeito da dosagem de H₂O₂ e da temperatura na alvura final da polpa.

5.3.5. Branqueamento pelas sequências OQD*(OP)D e OQD*(OP)DP aperfeiçoadas

Após o aperfeiçoamento das condições de cada estágio das sequências OQD*(OP)D e OQD*(OP)DP (TAC), foram realizados três branqueamentos completos com o objetivo de comparar os consumos de reagentes, características das polpas branqueadas e características dos efluentes nas condições aperfeiçoadas, e naquelas de referência (condições operacionais atuais da empresa) (Quadros 6 e 7). Os resultados experimentais desse estudo se encontram nos Quadros 61A a 63A do Apêndice.

Quadro 6. Condição para a sequência referência

Condição	O	Q	D*	(OP)	D	TAC
Temperatura. °C	90	80	88	90	57	-
Tempo, min.	60	30	120	60	120	-
NaOH, kg/tas	15	-	-	11,4	-	-
MgSO ₄ , kg/tas	1,5	-	-	1,5	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	-	-	7,8	-	-
pH final	-	10,7	2,8	10,7	3,2	-

Quadro 7. Condição aperfeiçoada para as sequências OQD*(OP)D e OQD*(OP)DP

Condição	O	Q	D*	(OP)	D	TAC
Temperatura. °C	90	80	60	90	70	45
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
NaOH, kg/tas	15	-	-	10	-	3
MgSO ₄ , kg/tas	3	-	-	1,5	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	-	-	6	-	3
pH final	-	10,7	3	4,3	5,5	9,0

5.3.5.1 Consumo de reagentes

No Quadro 8 são mostrados os resultados comparativos de consumo de reagentes do branqueamento pelas sequências aperfeiçoadas e referência. A sequência aperfeiçoada OQD*(OP)D resultou em uma economia de 2,3 kg de ClO_2 /tas, 1,8 kg de H_2O_2 /tas e 1,4 kg de NaOH /tas. Foi observado que a redução do consumo de dióxido de cloro pode ser ampliada com o uso de H_2O_2 na TAC, sequência OQD*(OP)DP, com uma economia de 3,5 kg de ClO_2 /tas em relação a sequência referência, porém, com um acréscimo no uso do H_2O_2 em 1,2 kg/tas e de NaOH em 1,6 kg/tas. Em relação ao MgSO_4 , as condições aperfeiçoadas demandaram uma elevação no consumo de 1,5 kg/tas em relação à referência.

5.3.5.2. Qualidade da polpa

Em relação à viscosidade da polpa branqueada na condição de referência, e nas condições aperfeiçoadas pelas sequências QD*(OP)D e QD*(OP)DP, foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre elas, pelo teste Tukey a 5% de significância. A sequência QD*(OP)D aperfeiçoada apresentou viscosidade $145 \text{ dm}^3/\text{kg}$ superior à da referência, como mostrado na Figura 30. Isso ocorreu devido ao efeito benéfico do magnésio aplicado nos estágios O e (OP), e da menor temperatura no estágio D* em relação ao branqueamento referência. A sequência OQD*(OP)DP (TAC) apresentou viscosidade $97,8 \text{ dm}^3/\text{kg}$ superior à da referência. Uma maior estabilidade foi observada para as polpas branqueadas nas condições aperfeiçoadas em relação à referência. Não houve diferença estatística entre as estabilidades de alvuras das polpas produzidas pelos dois diferentes processos aperfeiçoados.

As polpas branqueadas nas condições operacionais aperfeiçoadas (OQD*(OP)D e OQD*(OP)DP), apresentaram maiores teores de ácido hexenurônico, fato este explicado pelas menores temperaturas e fatores Kappa utilizados no estágio D*. Quanto à composição de carboidratos das polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados, não foram observadas diferenças significativas entre resultados (Quadro 9).

Outro benefício obtido com as condições aperfeiçoadas foi uma redução do teor de OX da polpa em relação à referência (Fig. 31). Na verdade, grande parte das vantagens da sequência aperfeiçoada em relação à referência foi causada pelo abaixamento da temperatura do estágio D* e uso do pH mais alto no estágio D₁. No caso da sequência referência, foi utilizado temperatura de 88 °C no estágio D* e pH de 3,4 no estágio D₁, enquanto que, no processo aperfeiçoado, esses valores foram de 60 °C e 5,5, respectivamente.

Quadro 8. Sumário dos resultados do branqueamento

	Condição Referência	Condição Aperfeiçoada – sequência OQD*(OP)D	Condição aperfeiçoada - sequência OQD*(OP)DP
ClO ₂ , kg/tas	17,2	14,9	13,7
H ₂ O ₂ , kg/tas	7,8	6	9
H ₂ SO ₄ , kg/tas	9,3	-	-
NaOH, kg/tas	28,4	29,6	31,9
MgSO ₄ (anidro) , kg/tas	3,3	4,5	4,5
Viscosidade, dm ³ /kg	612 a	757,3 b	709,8 c
Número Kappa	0,53 a	0,45 a	0,50 a
Alvura, % ISO	89,8 a	90,1 b	89,8 a
Número de cor Posterior	0,66 a	0,41 b	0,42 b

Médias seguidas pela mesma letra nas linhas não possuem diferença estatística significativa entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Quadro 9. Composição química das polpas branqueadas

	Condição Referência	Condição Aperfeiçoada – sequência OQD*(OP)D	Condição aperfeiçoada - sequência OQD*(OP)DP
Glicanas, %	82,4 a	82,4 a	82,9 a
Xilanas, %	12,6 a	12,4 a	12,3 a
Mananas, %	3,2 a	3,1 a	3,0 a
HexA, mmol/kg de polpa	1,7 a	4,2 b	4,1 b

Médias seguidas pela mesma letra nas linhas não possuem diferença estatística significativa entre se pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

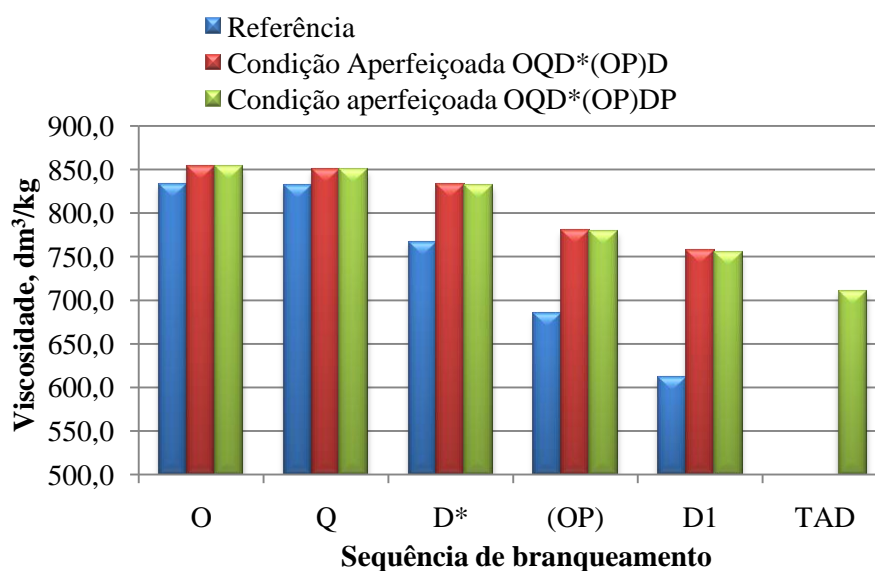


Figura 30. Viscosidades da polpa celulósica branqueadas pelas sequências referência e aperfeiçoadas pelas aperfeiçoadas conforme processos OQD*(OP)D e OQD*(OP)DP.

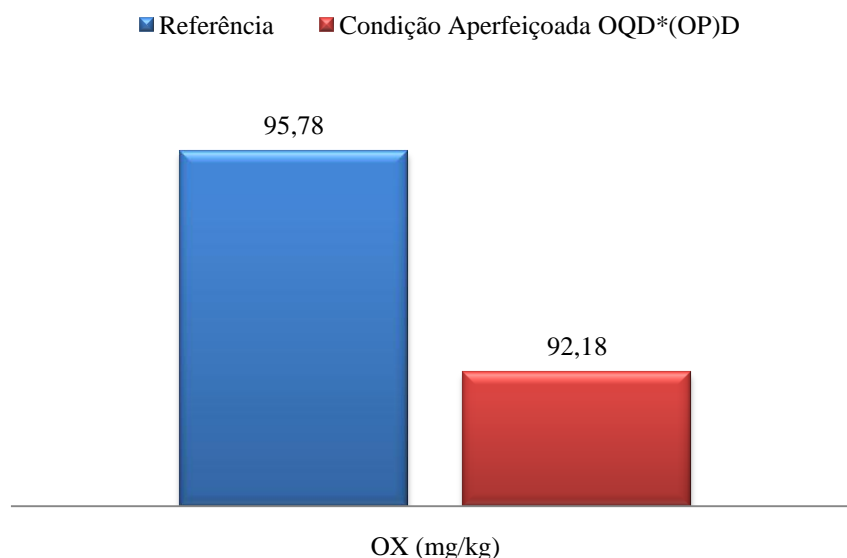


Figura 31. Teor de OX da polpa branqueada na condição de referência e aperfeiçoada pela sequência OQD*(OP)D.

5.3.6. Impacto ambiental

No Quadro 10 são mostrados os resultados comparativos de características do efluente proveniente da sequência OQD*(OP)D aperfeiçoada e da referência. Pode-se notar que o efluente da sequência aperfeiçoada apresentou menores valores de DQO e cor quando comparado o da sequência referência. O teor de AOX foi também menor para a sequência aperfeiçoada, resultado de uma menor carga de dióxido de cloro aplicada. Portanto, o processo aperfeiçoado gera um efluente de melhor qualidade que o da referência.

Quadro 10. Sumário das características dos filtrados do branqueamento

Características do efluente	Condição Referência	Sequência OQD*(OP)D aperfeiçoada
DQO, kg mg/L	635 a	486 b
Cor, mg Pt/L	327 a	247 b
AOX, mg/L	8,15 a	4,35 b

Médias seguidas pela mesma letra nas linhas não possuem diferença estatística significativa entre se pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

5.4. Refinabilidade e Propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas

As propriedades físico-mecânicas foram avaliadas nas polpas branqueadas pela sequência OQD*(OP)D, nas condições de referência (condições operacionais atuais) e condição aperfeiçoada, e pela sequência OQD*(OP)DP (aplicação de H₂O₂ na TAC) em condições aperfeiçoadas.

Sendo assim, para a discussão dos dados, serão apresentados gráficos com curvas distintas, o que indica um comportamento diferente entre os tratamentos estudados, e, eventualmente, será observada apenas uma curva, demonstrando que os dois modelos ajustados não diferem estatisticamente a 95% de confiança. Portanto, pode ser usada uma equação comum, como estimativa das três equações envolvidas, entretanto, para certas características, serão apresentadas as três curvas obtidas para os tratamentos, o que possibilita uma discussão mais aprofundada sobre a mesma.

5.4.1. Refinabilidade

O parâmetro refinabilidade é considerado neste trabalho como a quantidade de energia (MW.h) necessária para se alcançar um determinado grau de resistência da polpa à drenagem (ex: °SR), ou um certo nível de uma determinada propriedade (ex: 70 N.m/g de tração). O refino é um processo que consome grande quantidade de energia, sendo um parâmetro importante na composição do custo de fabricação de papéis que necessitam ser refinados (MOREIRA, 2007). Portanto, polpas de boa refinabilidade são desejáveis.

A análise estatística dos valores de energia consumida no refino das três polpas mostrou diferenças significativas entre a referência e as demais, porém, dentre as polpas branqueadas pelos processos aperfeiçoados não ocorreu diferença estatística (Fig.32). O maior consumo de energia para o tratamento referência em relação aos outros dois tratamentos aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP) é de difícil explicação, tendo em vista a maior viscosidade das polpas provenientes dos processos aperfeiçoados, porém, ao analisarmos o conteúdo de ácidos hexenurônicos das polpas, há um maior teor dos mesmos nos processos aperfeiçoados, o que pode ter influenciado positivamente a refinabilidade das polpas aperfeiçoadas.

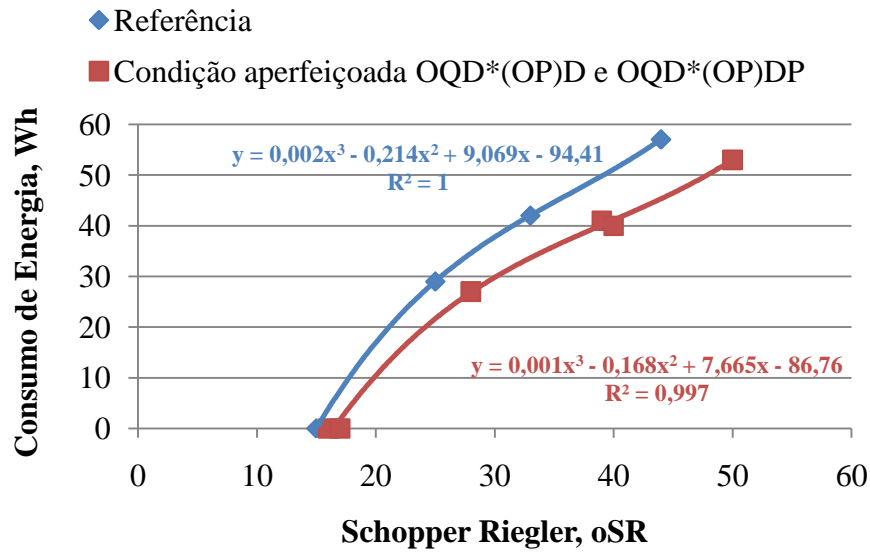


Figura 32. Consumo de energia versus °SR para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).

5.4.2. Índice de Arrebetamento

O índice de arrebetamento ou estouro é definido como a força necessária para promover o arrebetamento de uma folha de papel, ao se aplicar uma pressão uniformemente crescente por um diafragma elástico de área circular igual a 962 mm². O teste é realizado em um equipamento tipo Mullen e está altamente relacionado com a resistência à tração. Ele é influenciado, em maior intensidade, pelo número de ligações interfibras e pelas forças dessas ligações (MOREIRA, 2007).

Na Figura 33 é apresentado o gráfico da relação entre o índice de arrebetamento e o índice de tração, confirmando a tendência de alta correlação positiva entre esse dois parâmetros.

O índice de arrebetamento não apresentou diferença estatística entre todos os tratamentos quando analisado em função do °SR (Fig. 34). Quando o mesmo foi analisado em função do consumo de energia, foi observada diferença significativa entre o tratamento referência e os demais (Fig. 35), sendo mais baixos os resultados da referência.

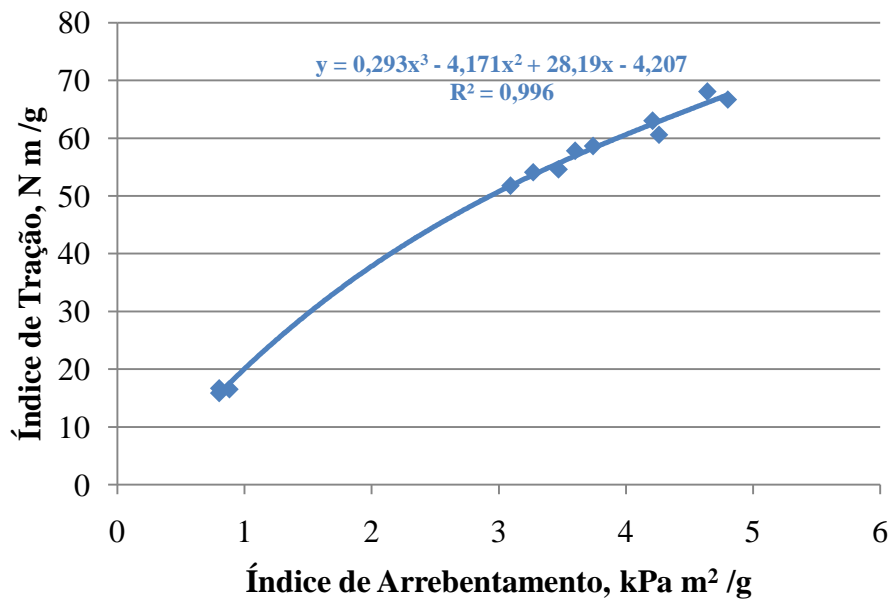


Figura 33. Índice de tração versus o índice de arrebetamento para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP)..

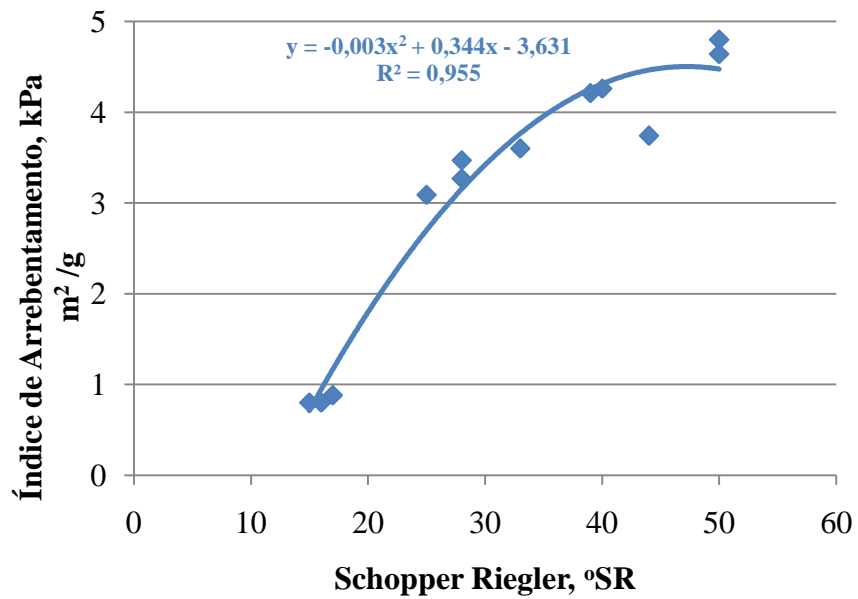


Figura 34. Índice de arrebetamento versus $^{\circ}\text{SR}$ para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).

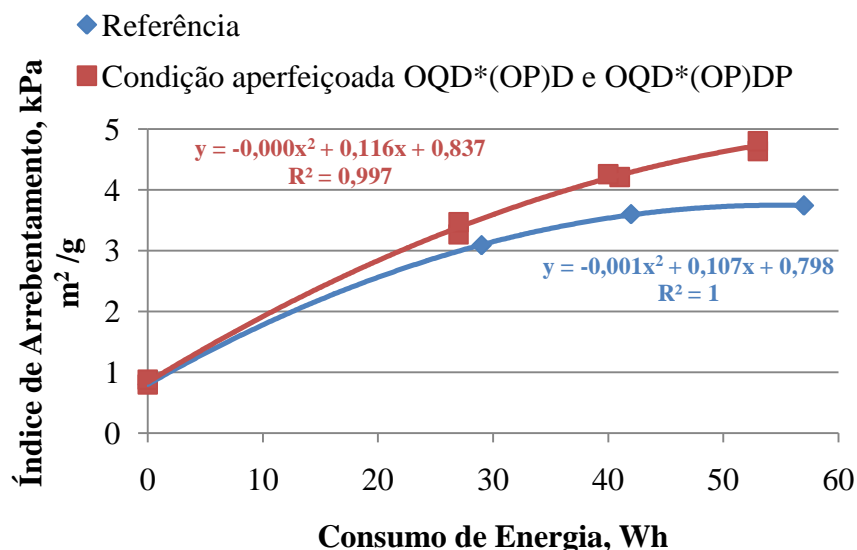


Figura 35. Índice de arrebetamento versus consumo de energia para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).

5.4.3. Índice de rasgo

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

A análise estatística a 5% de probabilidade, evidenciou que o índice de rasgo foi diferente entre todos os tratamentos analisados, tanto em função do °SR, quanto em função do consumo de energia. Esses resultados indicam que a maior viscosidade da polpa branqueada teve impacto positivo nessa propriedade. (Fig. 36-37).

Para essa dissertação, a viscosidade da polpa mostra-se como um parâmetro relevante para resistência ao rasgo, embora haja referências indicando pouco efeito da viscosidade na resistência da polpa ao rasgo (CARNEIRO *et al.*, 1995).

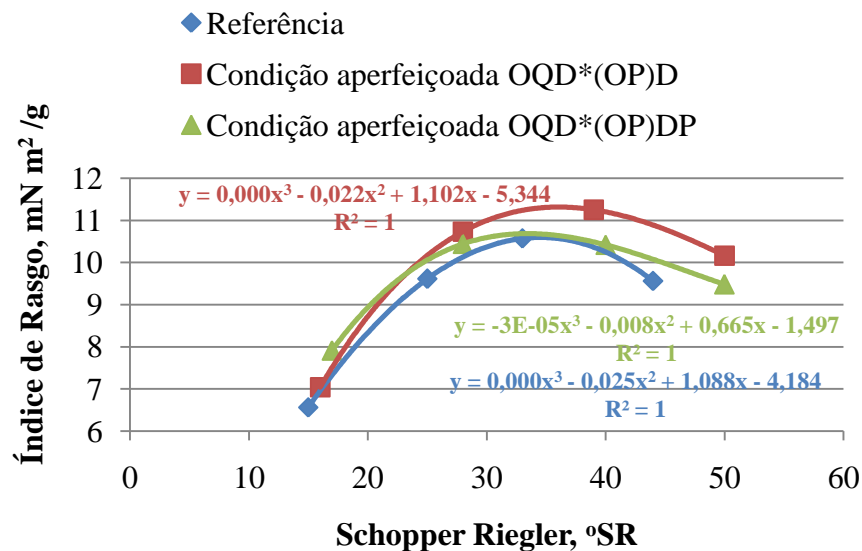


Figura 36. Índice de rasgo versus °SR para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).

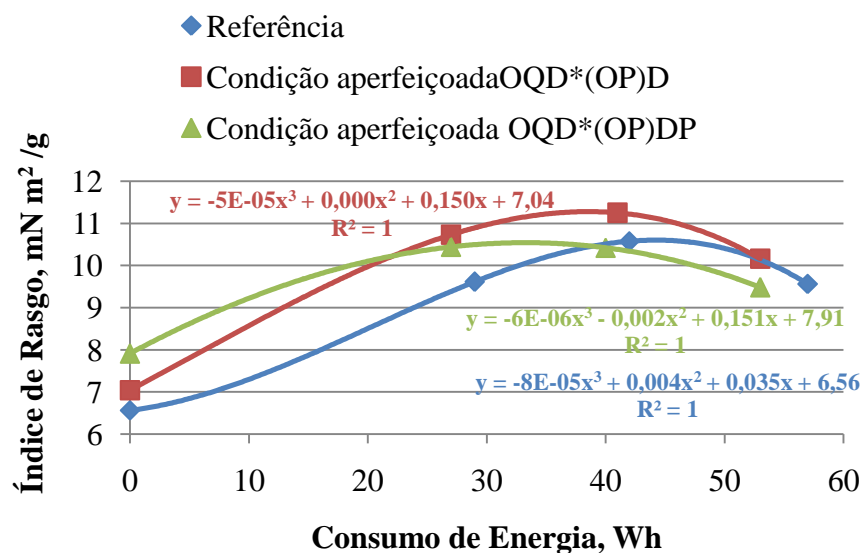


Figura 37. Índice de rasgo versus consumo de energia para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).

5.4.4. Índice de tração

O índice de tração pode ser encontrado pela força necessária para causar a ruptura da amostra em relação à sua gramatura. Ele é favorecido pela intensidade de ligações interfibrilares ocorridas durante a formação do papel, pela fibrilação externa e

pelo colapso da fibra. A resistência a tração está relacionada com a durabilidade e utilidade do papel, por exemplo, no caso de papéis de impressão, a resistência à tração indica a probabilidade de ruptura quando são sujeitos à tensão exercida durante o processo de impressão (D'ALMEIDA, 1988).

Os dados obtidos mostram não haver diferença estatística significativa para o índice de tração entre todos os tratamentos quando analisados em função do °SR (Fig. 38). Já quando analisado em função do consumo de energia, foi observado que o tratamento referência diferiu dos demais. Entre os tratamentos em condições aperfeiçoadas não houve diferença estatística significativa (Fig. 39).

Esses resultados indicam que uma maior viscosidade é favorável ao processo, pois implica em menor consumo de energia de refino para um mesmo índice de tração quando comparadas as condições referência e aperfeiçoadas.

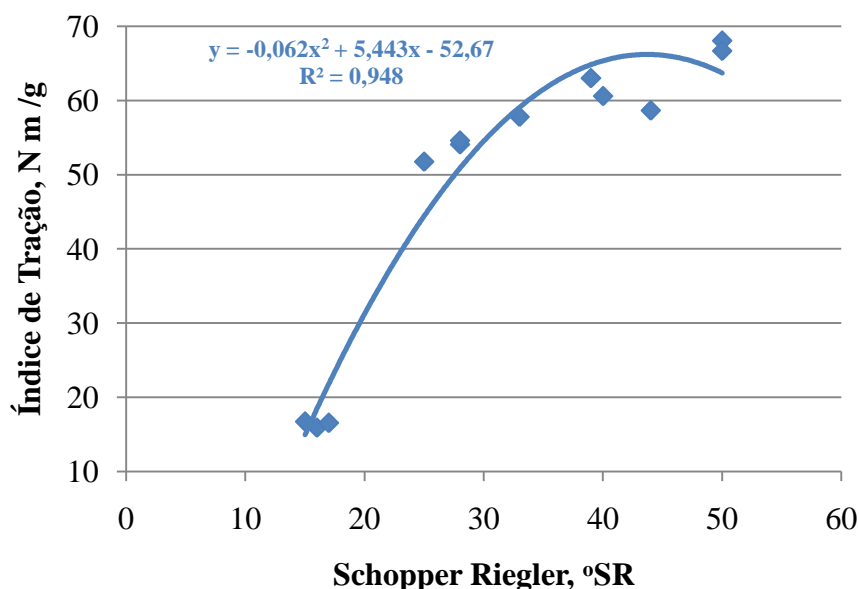


Figura 38. Índice de tração versus o °SR da polpa branqueada para os três tratamentos avaliados.

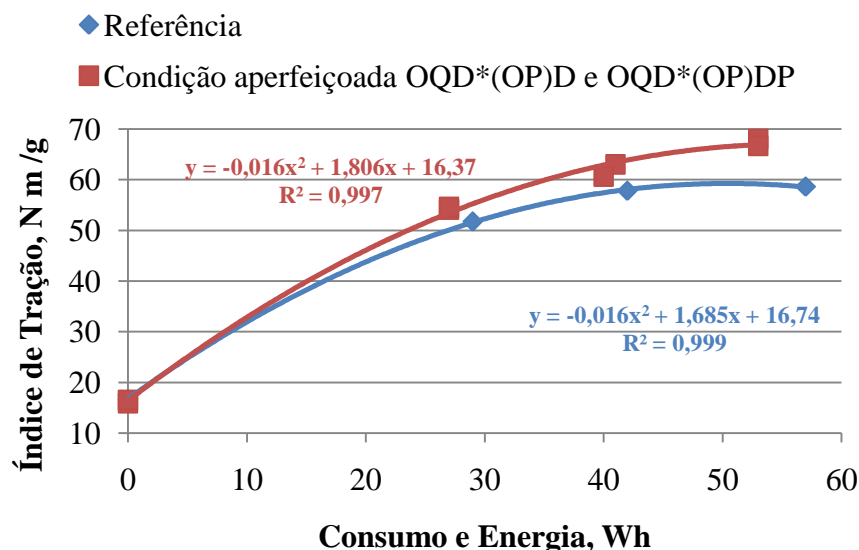


Figura 39. Índice de tração versus consumo de energia para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).

5.4.5. Módulo de elasticidade

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

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

O resultado, quando analisado em função do °SR, não apresentou diferença significativa entre os tratamentos (Fig. 40). Já quando analisado em função do consumo de energia, foi observado que o tratamento referência se difere dos demais (Fig. 41). Esses resultados mostram que uma maior viscosidade da polpa mostra-se positiva ao processo, no que tange à energia de refino, pois, para um mesmo consumo de energia, há um maior valor de MOE associado às polpas com maiores viscosidades.

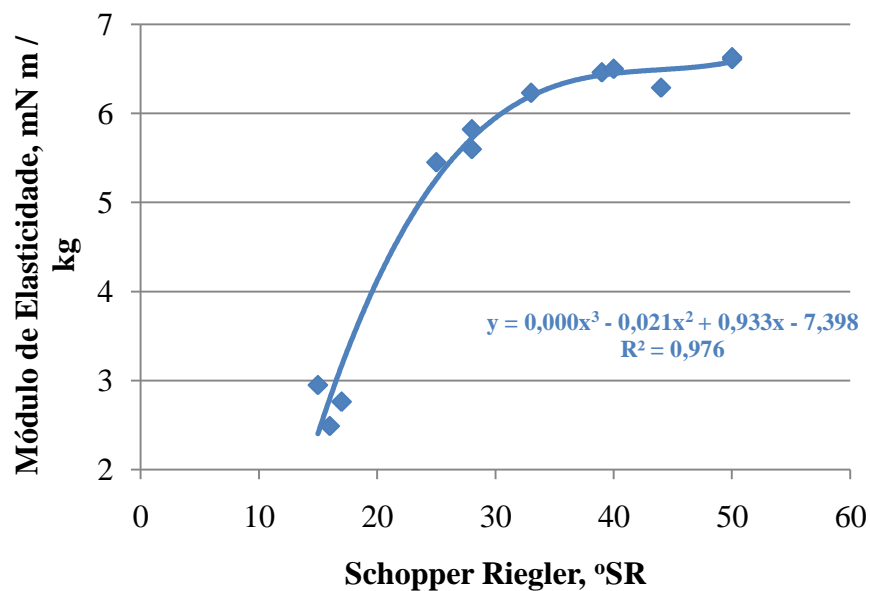


Figura 40. Módulo de elasticidade versus °SR da para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).

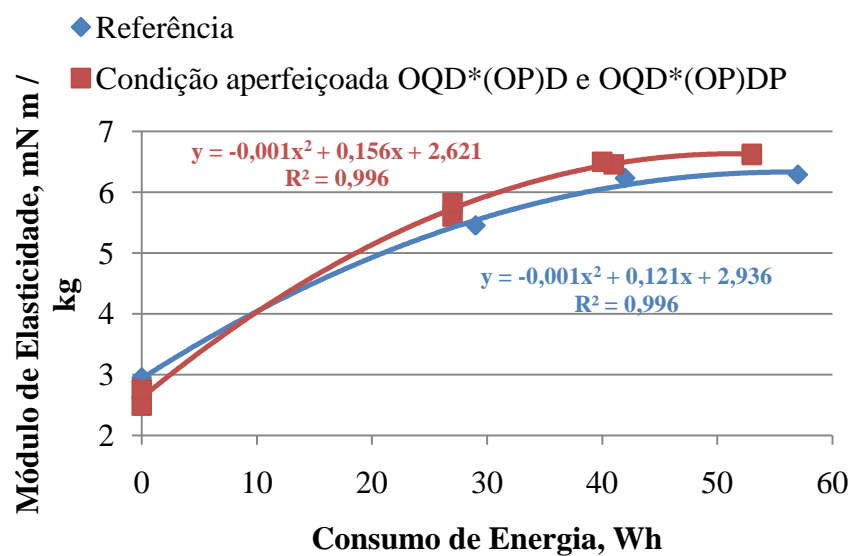


Figura 41. Módulo de elasticidade versus consumo de energia polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).

5.4.6. 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 gás ou vapor, de forma que um papel mais poroso leva a uma menor resistência à passagem de ar.

A permeância ao ar é recíproca da resistência à passagem de ar, e pode ser usada para estimar a permeância do papel a outros fluidos. Também são usadas indiretamente para estimar a penetração de tintas de impressão no papel (D' Almeida, 1988).

Os dados obtidos mostram não haver diferença estatística significativa para a resistência à passagem de ar entre todos os tratamentos, quando analisados em função do °SR (Fig. 42). Já quando analisados em função do consumo de energia, foi observado que o tratamento referência diferiu dos tratamentos em condições aperfeiçoadas.

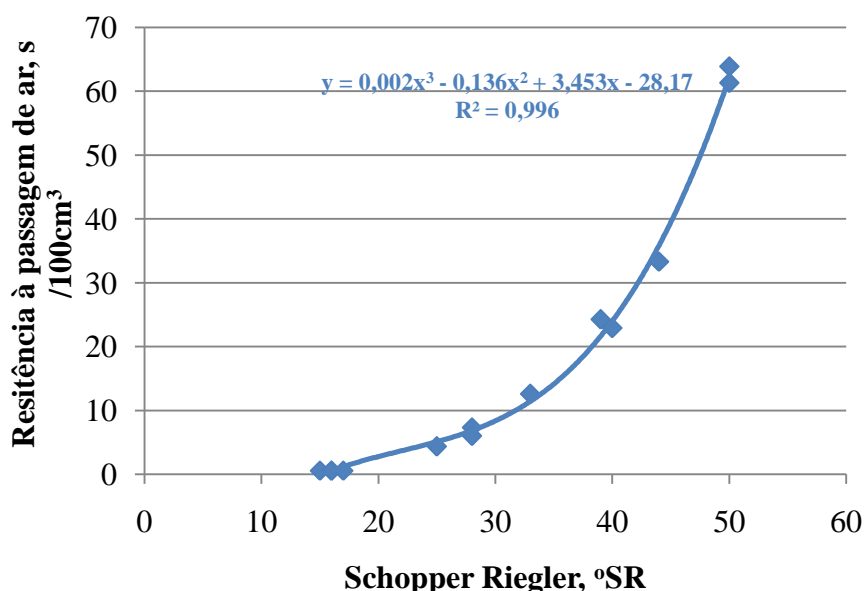


Figura 42. Resistência à passagem de ar versus °SR para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).

Dentre os tratamentos em condições aperfeiçoadas, não houve diferença estatística significativa (Fig. 43). Esses resultados ratificam os anteriores, em que, novamente, uma maior viscosidade e um maior teor de ácidos hexenurônicos da polpa mostra-se positiva ao processo, no que diz respeito ao consumo de energia de refino.

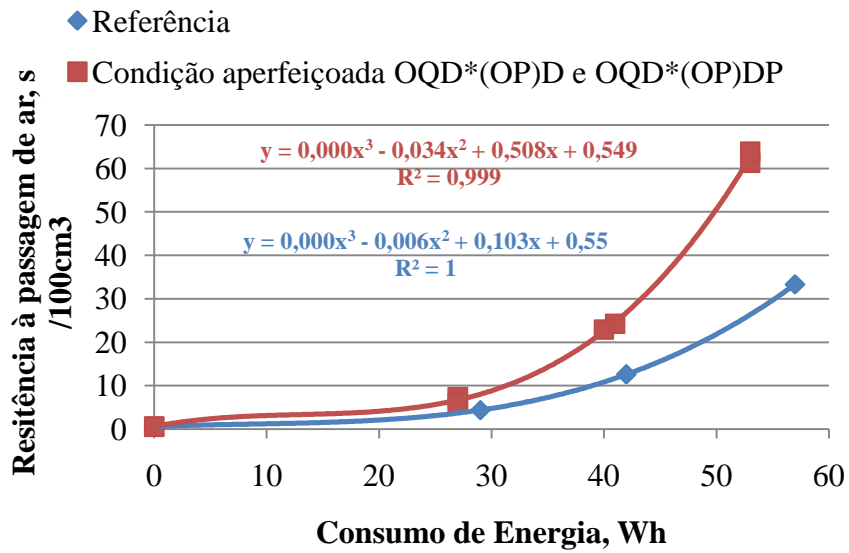


Figura 43. Resistência à passagem de ar versus consumo de energia para polpas branqueadas pelos processos de referência e aperfeiçoados (OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP).

6. CONCLUSÕES

Com a aperfeiçoamento da sequência de branqueamento OQD*(OP)D observaram-se os seguintes ganhos:

- ✓ Redução de consumo de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) de 7,8 para 6 kg/tas, com economia de 1,8 kg/tas de H_2O_2 .
- ✓ Redução de consumo de dióxido de cloro (ClO_2) de 17,2 para 14,9 kg/tas, com economia de 2,3kg/tas de ClO_2 .
- ✓ Aumento da na viscosidade da polpa em até $145 \text{ dm}^3/\text{kg}$, porém com elevação da dosagem de magnésio na deslignificação com oxigênio de 1,5 para 3,0 kg de $MgSO_4$ / tas.
- ✓ O estágio Q operado com ajuste de pH para quelante DTPA, possibilitou uma maior remoção de metais em relação a condição de referência, onde não se faz esse ajuste.
- ✓ Redução do OX da polpa (3,6 mg/kg) e AOX do efluente (3,8 mg/L).
- ✓ Menor carga orgânica e cor no efluente gerado.
- ✓ Melhoria de todas as propriedades físico-mecânicas da polpa quando avaliadas em função do consumo de energia de refino.

- ✓ A aplicação de um estágio de branqueamento com peróxido na TAC mostrou se viável, com possibilidade de economizar quantidades significativas de dióxido de cloro (3,5 kg/tas) e ainda melhorar todas as propriedades físicas mecânicas da polpa em relação ao consumo de energia de refino.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. M. **Estudos de maximização de rendimento e monitoramento da degradação dos constituintes da madeira de *Eucalyptus* em processo kraft contínuo**. 1999. 140 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

ALMEIDA, J. M.; SILVA, D. J. Inclusão de um novo e importante parâmetro potencial de seleção de eucalipto para produção de polpa Kraft. In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTO, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: IUFRO, 1997. v. 3, p. 69.

APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. **Anatomia Vegetal**. Viçosa, Editora UFV, Universidade Federal de Viçosa, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL – ABTCP. **Normas Técnicas**. São Paulo: ABTCP, s/d.

ASSOCIAÇÃO DOS FABRICANTES DE CELULOSE E PAPEL – BRACELPA. Disponível em: <<http://www.bracelpa.com.br>>. Acesso em: 17 abr. 2009.

BASSA, A. G. M. C.; JUNIOR, F. G. S.; 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. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n.75, p.19-29, set. 2007.

BROWNING, B. L. **Methods of wood chemistry**. New York: Interscience Publishers, v. 2, 1967. 518 p.

BURGER, M. L.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Ed. Nobel, 1991, cap. 7.

CANADIAN PULP & PAPER TECHNICAL ASSOCIATION – CPPA. **Standard Methods**, 1984.

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

CARVALHO, M. G.; FERREIRA, P.J.; MARTINS, A. A.; FIGUEIREDO, M. M. A comparative study of two automated techniques for measuring fiber length. **TAPPI Journal**, v.80, n.2, p.137-142, 1997.

CIT, E. J. **Qualidades da folha de polpa kraft em diferentes proporções de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* M.** Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; GLEYSYS, K.; KOGA, J.; JAASKELAINEN, A. S.; ARGYROPOULOS, D. Yield and bleachability of hardwood and softwood kraft/polysulphide pulps. **Pulp & Paper Canada**, v.102, n.9, p.269-272, 2001.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; ROBLES, Y. A. M.; ALMEIDA, J. M.; JAASKELAINEN, A. S.; ARGYROPOULOS, D. Effect of pulping processes on bleachability with ECF, Z-ECF and TCF sequences. **Appita Journal**, v.52, n.5, p.368-374, 1999.

COLODETTE, J. L. **Notas de aula da disciplina ENF 809 – Tecnologia do branqueamento de Celulose**. Universidade Federal de Viçosa, 2009.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; SALLES, D. V. C. Factors affecting kraft pulp bleachability with oxygen derived chemicals. In: INTERNATIONAL NON-CHLORINE BLEACHING CONFERENCE, 1996, Orlando. **Proceedings...** Orlando: FL, USA, TAPPI, 1996. p.1-20.

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

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

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

EIRAS, K. M. M.; COLODETTE, J. L. Eucalyptus kraft pulp bleaching with chlorine dioxide at hightemperature. **Journal of Pulp and Paper Science**, v.29, n.2, p.64, 2000.

EIRAS, K. M. M.; COLODETTE, J. L. **Influência das condições de operação no estágio DHT na branqueabilidade e nas características físico-químicas da polpa e do filtrado**. 34º Congresso Anual de Celulose e Papel, São Paulo, 2001.

EIRAS, K.M.M.; COLODETTE, J.L. Eucalyptus kraft pulp bleaching with chlorine dioxide at high temperature. **JPPS**, v.29, n.2, p.64, 2003.

FENGEL, D.; WENEGER, G. **Wood chemistry, ultrastructure, reactions**, Berlin: Walter de Gruyter, 1989.

FOELKEL, C. E. B. Qualidade da madeira de eucalipto para atendimento das exigências do mercado de celulose e papel. In: Conferência IUFRO sobre silvicultura e melhoramento de eucalipto, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: IUFRO, 1977. v.1, p.1.

GERMGÄRD, U., NORDÉN, S. OZP - Bleaching of kraft pulps to full brightness. In: International Pulp Bleaching Conference, 1994, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: 1994. p.53-58.

GOMIDE, J. L. **Polpa de celulose – Química dos processos alcalinos de polpação.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1979. 50p.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; GIRARD, R.; ARGYROPOULOS, D. Fatores que afetam a branqueabilidade de polpas kraft de *Eucalyptus*. Parte 2: Influência de parâmetros da polpação. **O papel**, p.61-70, 2000.

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

GULLICHSEN, J. *Fiber line operations*. In: Papermaking Science and Technology, Book 6. Johan Gullichsen and Hannu Paulapuro, Fapet, Helsinki, 2000.

GUTIÉRREZ, A., ROMERO, J., DEL RIO, J.C.; **Lipophilic extractives from Eucalyptus Globulus pulp during kraft cooking followed by TCF and ECF bleaching.** *Hyolzforschung*. v.55, p.260-264, 2001.

HENRIQUE, P. M.; COSTA, M. M.; CORREIA, F. M.; FONSECA, M. J. O.; SANTOS, J. R. C.; LANDIM, A. B. **Peróxido de hidrogênio em planta de branqueamento ecf:** a experiência industrial da cenibra. Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel, São Paulo, 2000.

HILLIS, W. E. **Wood extractives and their significance o the pulp and paper industry.** New York: Academic Press, 1962. 513 p.

KRÄSSIG, H. A. **Cellulose – structure, accessibility and reactivity.** Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1993. p.12.

KUAN, G. S. S. **Matérias-primas.** In: CELULOSE E PAPEL – Tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica. IPT, v.2, 1988, p.561-581.

LACHENAL, D., CHIRAT, C. and VIARDIN, M-T, High temperature chlorine dioxide delignification. A breakthrough in ECF bleaching of hardwood kraft pulps, **Tappi J.**, v. 83, n.8, p.96, 2000.

LEWIN, M.; GOLDSTWEIN, I. S. **Wood structure and composition**. New York: Marcel Dekker, 1991, p.488.

LIN, S. Y.; DENCE, C. W. **Methods in lignin chemistry**. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 578p.

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

REGAZZI, A. J.; 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. **Rev. Mat. Estat.**, 22: 33-45, 2004.

SACON, V.; MENOCELLI, S.; RATNIEKS, E. **Misturas de polpas brasileiras com o eucalipto**. In: Congresso anual de celulose e papel da associação brasileira de celulose e papel. São Paulo. ABTCP, 1994. p.463-473.

SALMÉM, L.; OLSON, A. M. Interaction between hemicelluloses, lignin and cellulose: Structure-property relationships. **Journal of Pulp and Paper Science**, v. 24, n. 3, p. 99-103, 1998.

MANFREDI, V., SALVADOR, E., CALDAS, P. G., SILVA, F.A. **Utilização de sulfato de magnésio na linha de branqueamento da Bahia Sul**. 1998. Disponível em: <<http://www.celuloseonline.com.br/>>. Acesso em: 02 fev. 2010.

MILANEZ, A. P.; BARTH, P. P. O.; PINHO, N. C.; VESZ, J. B. V. Influência das hemiceluloses nas propriedades óticas e físico-mecânicas da polpa. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 15, 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1982. p.155-170.

MIMMS, A.; KOCUREK, M. J.; PYATTE, J. A.; WRIGHT, E. E. **Kraft Pulping** – A compilation o Notes. Atlanta: Tappi Press, USA, 1990. 181p.

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

MOKFIENSKI, A.D.S. **Importância relativa da densidade básica e da constituição química de madeira de *Eucalyptus* spp no rendimento, branqueabilidade e qualidade da polpa kraft.** Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2008.

NI, Y., HEININGEN, A.R.P., KUBES, G.J. Mechanism of formation of chloro - organics during chlorine dioxide pre-bleaching of kraft pulps. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, v.8, n.4, p.350- 351, 1993.

OLIVEIRA, R. C. **Notas de Aula da Disciplina ENF 810: Tecnologia do Papel.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

O'NEILL, P.; MOHIDDIN, S.; MITCHELL, A. J. Exploring data for relationship between wood, fibre e paper properties. **Appita**, v.51, n.5, p.278, 1996.

PESSOTI, J. P. **Otimização de um processo industrial de branqueamento pela sequência O/ODED(PO)D.** 1999. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

PESSOTI, J. P.; COLODETTE, J. L.; ARAÚJO, G. A. T. . **Otimização dasequência O/ODED(PO)D de um processo industrial de branqueamento de polpa kraft de eucalipto.** Congresso Internacional de Celulose e Papel, Sao Paulo outubro de 2000.

PILÓ-VELOSO, D., NASCIMENTO, E.A., MORAIS, S.A.L. **Isolamento e análise estrutural de ligninas**. Química Nova, v.16, p.435-448, 1993.

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

SALVADOR, E.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. Efeito da deslignificação com oxigênio nas propriedades físico-mecânicas de polpas kraft. **O Papel**, p. 75-95, 2001.

SCANDINAVIAN PULP, PAPER AND BOARD TESTING COMMITTEE. **Scan Test Methods**, 1993.

SCOTT, E. W.; ABBOTT, J. C. **Properties of paper** – an introduction. Atlanta: Tappi Press, 1995. 136p.

SILVA JR., F. G.; DO VALLE, C. F.; MUNER, J. C. G. Programa de qualidade da madeira da Votorantim Celulose e Papel – VCP. **O Papel**, p. 35-43, 1996.

SILVA, José de Castro **Anatomia da Madeira e suas Implicações Tecnológicas (notas de aula)** Engenheiro Florestal – DS. Prof. Adjunto – DEF/UFV, 2007.

SJÖSTROM, E. **Wood chemistry, fundamentals and applications**. 2. ED. California, USA, Academic Press, 1992.

SJÖSTROM, E. **Wood chemistry, fundamentals and applications**. New York: Academic Press, 1993. 293p.

SMOOK, G. A. **Handbook for pulp & paper technologists**. 2nd. Angus Wilde Publications Inc. Vancouver, 1992. 419p.

SUSS, H. U.; FILHO LEPORINI, C.; SCHMIDT, K. Alvura superior no branqueamento de pasta kraft de eucalipto. **O Papel**, v.2, n.62, p. 25-35, 2001.

TAPPI standard (2002) T403 om-02, Bursting strength of pulp.

TAPPI standard (2004) T414 om-04, Internal tearing resistance of paper (Elmendorf-type method).

TAPPI standard (2006) T205 sp-06, Forming handsheets for physical tests of pulp.

TAPPI standard (2006) T220 sp-06, Physical testing of pulp handsheets.

TAPPI standard (2006) T236 om-06, Kappa number.

TAPPI standard (2006) T494 om-06, Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus).

TAPPI standard (2006) T551 om-06, Thickness of paper and paperboard (Soft platen method).

Technical association of the pulp and paper industry. **Tappi standard methods**. Atlanta: TAPPI, 2000.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Van Nostrand Reinold, 1991. 494p.

VUORINEN, T.; TELEMAN, A.; FAGERSTRÖM, 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, Washington. **Proceedings...** Washington, 1996, p. 43-51.

WALLIS, A. F. A.; WEARNE, R. H.; WRIGHT, P. J. Chemical analysis of polysaccharides in plantation eucalypt woods and pulps. **Appita Journal**, v.49, n.4, p.258-262, 1996.

Apêndice A

Quadro 1A. Resultados médios da otimização da Pré-O₂ para temperatura de 85 °C com e sem adição de MgSO₄.7H₂O.

Condições e Resultados	Repetição	Designificação com oxigênio					
		Temperatura 85 °C					
		sem MgSO ₄			com MgSO ₄		
Amostras		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Consistência, %	-	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Temperatura, °C		85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Tempo, min.		60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
O ₂ , kg/odt		18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Pressão, KPa		523	523	523	523	523	523
NaOH, kg/odt		13,0	17,0	21,0	13,0	17,0	21,0
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt		0,0	0,0	0,0	1,5	1,5	1,5
pH final	A	11,7	11,8	12,0	11,6	11,6	11,9
	B	11,7	11,8	12,0	11,6	11,8	11,9
	Média	11,7	11,8	12,0	11,6	11,7	11,9
Número Kappa	A	12,0	11,7	11,4	12,1	11,7	11,2
	B	12,1	11,6	11,3	12,2	11,6	11,2
	Média	12,1	11,7	11,4	12,1	11,7	11,2
Eficiência, %	-	36,8	39,0	40,4	36,5	39,0	41,4
Viscosidade Dinâmica, cPa.s	A	16,6	17,5	16,9	17,5	17,2	16,7
	B	18,1	16,0	15,7	17,1	17,1	16,9
	Média	17,4	16,7	16,3	17,3	17,2	16,8
Viscosidade Intrínseca, dm ³ /kg		857	842	831	856	852	844
Perda de viscosidade Intrínseca, %	Média	6,7	8,4	9,6	6,9	7,3	8,1
Seletividade= Efic./ Perda de Visc. Intrí.	Média	5,5	4,6	4,2	5,3	5,4	5,1
Alvura, % ISO	A	42,7	43,3	44,1	43,1	44,0	44,3
	B	43,2	43,5	44,4	42,5	43,5	44,1
	Média	43,0	43,4	44,3	42,8	43,8	44,2
Ganho de alvura, % ISO	Média	4,6	5,1	5,9	4,5	5,5	5,8
Teor de sólidos, %	A	0,58	0,66	0,71	0,57	0,63	0,70
	B	0,59	0,62	0,69	0,59	0,65	0,69
	Média	0,58	0,64	0,70	0,58	0,64	0,69
Rendimento <i>via</i> Sólidos, %	Média	98,8	98,5	98,3	98,8	98,5	98,3

Quadro 2A. Resultados médios da otimização da Pré-O₂ para temperatura de 95 °C com e sem adição de MgSO₄.7H₂O.

Condições e Resultados	Repetição	Designificação com oxigênio					
		Temperatura 95 °C					
		sem MgSO ₄			com MgSO ₄		
Amstras		7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
Consistência, %	-	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Temperatura, °C		95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0
Tempo, min.		60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
O ₂ , kg/odt		18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Pressão, KPa		538	538	538	538	538	538
NaOH, kg/odt		13,0	17,0	21,0	13,0	17,0	21,0
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt		0,0	0,0	0,0	1,5	1,5	1,5
pH final	A	11,2	11,7	11,7	11,4	11,6	11,9
	B	11,2	11,5	11,6	11,2	11,7	11,9
	Média	11,2	11,6	11,7	11,3	11,7	11,9
Número Kappa	A	10,8	10,1	9,1	10,6	10,2	9,3
	B	10,8	10,0	9,0	10,4	10,1	9,5
	Média	10,8	10,1	9,1	10,5	10,2	9,4
Eficiência, %	-	43,6	47,4	52,6	45,1	46,9	51,0
Viscosidade Dinâmica, cPa.s	A	16,0	15,5	14,6	16,5	15,8	15,4
	B	16,0	15,5	14,2	16,2	15,9	15,4
	Média	16,0	15,5	14,4	16,4	15,9	15,4
Viscosidade Intrínseca, dm ³ /kg		823	811	779	833	821	807
Perda de viscosidade Intrínseca, %	Média	10,5	11,7	15,2	9,4	10,7	12,2
Seletividade= Efic./ Perda de Visc. Intrí.	Média	4,2	4,0	3,4	4,8	4,4	4,2
Alvura , % ISO	A	44,9	46,5	49,6	45,7	46,4	48,8
	B	45,4	46,3	48,1	45,6	47,0	47,5
	Média	45,2	46,4	48,9	45,7	46,7	48,2
Ganho de alvura, % ISO	Média	6,8	8,1	10,5	7,3	8,4	9,8
Teor de sólidos, %	A	0,67	0,71	0,83	0,69	0,76	0,82
	B	0,65	0,72	0,84	0,67	0,76	0,79
	Média	0,66	0,72	0,84	0,68	0,76	0,80
Rendimento <i>via</i> Sólidos, %	Média	98,3	98,2	97,7	98,4	98,0	97,8

Quadro 3A. Resultados médios da otimização da Pré-O₂ para temperatura de 105 °C com e sem adição de MgSO₄.7H₂O.

Condições e Resultados	Repetição	Deslignificação com oxigênio					
		Temperatura 105 °C					
		sem MgSO ₄			com MgSO ₄		
Amostras		13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0
Consistência, %	-	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Temperatura, °C		105,0	105,0	105,0	105,0	105,0	105,0
Tempo, min.		60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
O ₂ , kg/odt		18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Pressão, KPa		552	552	552	552	552	552
NaOH, kg/odt		13,0	17,0	21,0	13,0	17,0	21,0
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt		0,0	0,0	0,0	1,5	1,5	1,5
pH final	A	10,2	10,7	11,3	10,6	10,7	11,1
	B	10,2	10,6	11,2	10,4	10,7	11,0
	Média	10,2	10,7	11,2	10,5	10,7	11,1
Número Kappa	A	9,8	8,4	8,0	9,8	8,6	8,3
	B	10,0	8,6	8,2	9,9	8,7	8,1
	Média	9,9	8,5	8,1	9,8	8,7	8,2
Eficiência, %	-	48,2	55,5	57,7	48,6	54,6	57,0
Viscosidade Dinâmica, cPa.s	A	14,1	13,5	13,3	15,8	15,3	14,6
	B	14,9	13,4	13,0	15,5	14,8	14,7
	Média	14,5	13,5	13,1	15,6	15,0	14,6
Viscosidade Intrínseca, dm ³ /kg		782	752	742	814	798	787
Perda de viscosidade Intrínseca, %	Média	14,9	18,2	19,3	11,4	13,2	14,4
Seletividade= Efic./ Perda de Visc. Intrí.	Média	3,2	3,0	3,0	4,3	4,1	4,0
Alvura, % ISO	A	49,2	50,5	51,2	48,2	50,1	50,9
	B	48,9	50,3	51,0	48,3	50,1	51,0
	Média	49,1	50,4	51,1	48,3	50,1	51,0
Ganho de alvura, % ISO	Média	10,7	12,1	12,8	9,9	11,8	12,6
Teor de sólidos, %	A	0,71	0,75	0,81	0,68	0,77	0,80
	B	0,72	0,73	0,84	0,70	0,81	0,89
	Média	0,72	0,74	0,83	0,69	0,79	0,84
Rendimento <i>via</i> Sólidos, %	Média	98,2	98,1	97,7	98,3	97,9	97,6

Quadro 4A. Resultados médios da otimização da Pré-O₂ para temperatura de 95 °C dosagem de 15kg /odt de NaOH e sem adição de MgSO₄.7H₂O em todos os estágios de branqueamento.

Condições e Resultados	Avaliação do Mg - totalmente livre de MgSO ₄ .7H ₂ O						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	9,5	9	9	10	10	10	10
Temperatura, 0C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	17,9	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,0	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	6,04		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15	-	2,0	10,0	0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,1	0,8	0,7	0,8
Final pH	11,20	6,25	2,97	10,75	4,50	4,60	4,50
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100	97,56	98
¹ Alvura, % ISO	46,00	48,58	70,31	80,70	88,89	89,91	90,41
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	85,88	87,12	87,59
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,01	2,79	2,82
Viscosidade, dm ³ /kg	809,7	-	-	-	766,8	744,3	728,7

Quadro 5A. Resultados médios da otimização da Pré-O₂ para temperatura de 95 °C dosagem de 15kg /odt de NaOH e sem adição de MgSO₄.7H₂O na Pré-O₂.

Condições e Resultados	Avaliação do Mg - 0 kg MgSO ₄ .7H ₂ O / odt na Pré-O ₂						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	9,5	9	9	10	10	10	10
Temperatura, 0C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	17,9	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	6,02		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15	-	2,0	10,0	0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,1	0,9	0,7	0,7
Final pH	11,10	6,31	2,98	10,78	4,40	4,40	4,60
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100	97,5	97,32
¹ Alvura, % ISO	46,00	48,51	70,21	80,64	88,94	89,91	90,44
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	85,88	87,12	87,59
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,06	2,79	2,85
Viscosidade, dm ³ /kg	809,7	-	-	-	781,2	761,4	745,6

Quadro 6A. Resultados médios da otimização da Pré-O₂ para temperatura de 95 °C dosagem de 15kg /odt de NaOH e com adição de 3kg/odt MgSO₄.7H₂O na Pré-O₂.

Condições e Resultados	Avaliação do Mg - 3 kg MgSO ₄ .7H ₂ O / odt na Pré-O ₂						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	9,5	9	9	10	10	10	10
Temperatura, 0C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	17,9	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,2	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,96		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3	-	-	-
NaOH, kg/odt	15	-	2	10	0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	3	-	-	3	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,67	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,055	0,8	0,7	0,7
Final pH	11,10	6,33	2,97	10,52	4,60	4,60	4,40
Reagente Consumido, %	-	-	100	100	100	97,7	97,24
¹ Alvura, % ISO	46,00	48,29	70,43	80,65	88,92	89,93	90,44
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	85,88	87,12	87,59
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,04	2,81	2,85
Viscosidade, dm ³ /kg	833,9	-	-	-	802,3	781,7	765,3

Quadro 7A. Resultados médios da otimização da Pré-O₂ para temperatura de 95 °C dosagem de 15kg /odt de NaOH e com adição de 6kg/odt MgSO₄.7H₂O na Pré-O₂.

Condições e Resultados	Avaliação do Mg - 6 kg MgSO ₄ .7H ₂ O / odt na Pré-O ₂						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	9,5	9	9	10	10	10	10
Temperatura, 0C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	17,9	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,98		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3	-	-	-
NaOH, kg/odt	15	-	2	10	0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6	-	-	3	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,67	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,055	0,9	0,6	0,6
Final pH	11,00	6,28	2,97	10,68	4,50	4,30	4,40
Reagente Consumido, %	-	-	100	100	100	97,59	97,21
¹ Alvura, % ISO	46,00	48,58	70,10	80,68	88,98	89,93	90,40
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	85,88	87,12	87,59
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,10	2,81	2,81
Viscosidade, dm ³ /kg	853,7	-	-	-	820,3	805,8	790,0

Quadro 8A. Resultados do conteúdo de metais na polpa, sendo: amostra original coletada após o último lavador de massa marrom; Estágio Q a pH 10,8 tal qual a realidade operacional da planta de branqueamento referencia; e a Estágio Q a pH 6,2 refere-se a polpa que teve seu pH ajustado com ácido sulfúrico.

AMOSTRAS	REPETIÇÕES	Ca(mg/kg)	Fe(mg/kg)	Mn(mg/kg)	Mg(mg/kg)	Cu(mg/kg)
Original	A	777,0	8,5	26,6	155,1	1,90
	B	775,0	8,5	26,0	158,4	2,09
	Média	776,0	8,5	26,3	156,8	2,00
Q (pH 6,2)	A	523,3	5,2	1,3	214,2	1,02
	B	527,3	5,2	1,3	214,8	1,02
	Média	525,3	5,2	1,3	214,5	1,02
Q (pH 10,8)	A	598,0	6,3	1,6	310,3	1,63
	B	607,5	6,3	1,6	306,4	1,64
	Média	602,8	6,3	1,6	308,3	1,64

Quadro 9A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,28, a 60°C, e pH3.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,28; 60 °C; pH3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,8		
ClO ₂ total, kg/odt					16,9		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,1	0,9	0,7	0,7
Final pH	11,1	6,2	3,0	10,7	4,6	4,6	4,7
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	97,2	97,0
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,1	80,7	89,0	89,9	90,4
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	85,9	87,1	87,6
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,1	2,8	2,8
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	820,4	805,6	790,2

Quadro 10A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,32, a 60 °C, e pH3.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,32; 60 °C; pH3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,32	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	12,7	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	4,6		
ClO ₂ total, kg/odt	-	-	17,3				
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	3,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,7	0,8	0,6	0,6
Final pH	11,1	6,2	2,8	10,8	4,5	4,6	4,7
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	97,2	97,0
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	71,3	81,9	89,7	90,4	90,7
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	87,0	87,1	87,6
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,7	2,4	2,2
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	810,6	794,3	781,3

Quadro 11A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,36, a 60 °C, e pH3.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,36; 60 °C; pH3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	2,7		
ClO ₂ total, kg/odt				16,9			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	4,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,5	0,6	0,5	0,5
Final pH	11,1	6,2	2,9	10,8	4,5	4,4	4,6
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	97,9	96,9
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	72,2	82,7	90,3	90,7	91,6
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	87,4	87,9	88,9
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,8	2,8
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	792,9	780,6	765,6

Quadro 12A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,28, a 60 °C, e pH 4.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,28; 60 °C; pH4						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	6,0		
ClO ₂ total, kg/odt				17,1			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	4,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,2	0,6	0,4	0,5
Final pH	11,1	6,2	3,5	10,6	4,5	4,6	4,7
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	98,5	96,1	95,2
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	72,4	80,8	89,0	89,9	90,5
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,2	87,1	87,7
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,8	2,8	2,8
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	810,9	801,3	786,8

Quadro 13A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,32, a 60 °C, e pH 4.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,32; 60 °C; pH4						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,32	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	12,7	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISSO	-	-	-	-	4,7		
ClO ₂ total, kg/odt				17,4			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	5,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,0	0,5	0,4	0,5
Final pH	11,1	6,2	3,9	10,7	4,5	4,5	4,7
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	97,4	96,6
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	73,2	82,4	89,8	90,2	90,7
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	87,0	87,8	88,2
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,8	2,5	2,5
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	799,9	792,8	780,0

Quadro 14A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,36, a 60 °C, e pH 4.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,36; 60 °C; pH4						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	3,5		
ClO ₂ total, kg/odt				17,7			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	6,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,7	0,3	0,3	0,2
Final pH	11,1	6,2	4,1	10,8	4,6	4,5	4,7
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	97,4	96,6
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	74,2	81,2	90,1	90,6	90,7
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	87,2	87,9	88,0
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,7	2,7
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	788,4	775,1	770,1

Quadro 15A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,28, a 60 °C, e pH 5.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,28; 60 °C; pH5						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min..	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	6,5		
ClO ₂ total, kg/odt					17,6		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	6,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,6	0,6	0,5	0,4
Final pH	11,1	6,2	5,0	10,9	4,7	4,4	4,6
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	97,5	95,5
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	75,6	80,2	88,7	89,6	90,0
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	85,9	86,9	87,5
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,8	2,7	2,5
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	782,3	767,8	749,8

Quadro 16A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,32, a 60 °C, e pH 5.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,32; 60 °C; pH 5						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,32	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	12,7	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	4,8		
ClO ₂ total, kg/odt				17,5			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	7,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,0	0,5	0,5	0,5
Final pH	11,1	6,2	4,9	10,9	4,3	4,4	4,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	96,9	95,2
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	76,6	81,1	89,8	90,2	90,5
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,9	87,6	88,0
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,6	2,5
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	780,6	765,8	746,6

Quadro 17A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,36, a 60 °C, e pH 5.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,36; 60 °C; pH 5						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-		3,6		
ClO ₂ total, kg/odt				17,8			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	8,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,8	0,5	0,4	0,5
Final pH	11,1	6,2	5,1	10,8	4,5	4,5	4,6
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	97,0	95,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	77,9	81,9	90,0	90,4	90,7
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	87,3	87,8	88,1
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,7	2,6	2,6
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	779,2	763,9	740,5

Quadro 17A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,28, a 75 °C, e pH 3.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,28; 75 °C; pH 3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	6,0		
ClO ₂ total, kg/odt				17,1			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,9	0,6	0,6	0,6
Final pH	11,1	6,2	2,9	10,8	4,5	4,8	4,6
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	97,0	95,2
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	68,2	79,3	89,2	89,9	90,2
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,2	87,0	87,3
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,0	2,9	2,8
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	770,1	754,7	743,8

Quadro 18A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,32, a 75 °C, e pH 3.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,32; 75 °C; pH 3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,32	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	12,7	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,1		
ClO ₂ total, kg/odt				17,8			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	3,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,7	0,6	0,5	0,6
Final pH	11,1	6,2	2,8	10,8	4,5	4,2	4,6
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	97,3	95,3
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	67,7	80,4	89,5	90,2	90,4
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,6	87,6	87,8
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,6	2,6
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	768,3	752,4	741,9

Quadro 19A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,36, a 75 °C, e pH 3.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,36; 75 °C; pH 3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	4,2		
ClO ₂ total, kg/odt				18,4			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	4,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,5	0,5	0,4	0,5
Final pH	11,1	6,2	2,8	11,2	4,3	4,4	4,5
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	96,4	95,3
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,4	82,4	89,8	90,9	91,1
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	87,0	88,5	88,7
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,7	2,4	2,3
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	765,8	747,3	737,9

Quadro 20A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,28, a 75 °C, e pH 4.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,28; 75 °C; pH 4						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	7,5		
ClO ₂ total, kg/odt				18,6			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	4,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,0	0,4	0,4	0,4
Final pH	11,1	6,2	4,0	11,1	4,5	4,5	4,5
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	96,6	94,4
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	68,7	80,1	88,7	89,5	90,0
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	85,8	86,9	87,7
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,6	2,3
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	772,9	765,7	755,3

Quadro 21A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,32, a 75 °C, e pH 4.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,32; 75 °C; pH 4						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,32	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	12,7	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,2		
ClO ₂ total, kg/odt				17,9			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	5,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,8	0,4	0,4	0,3
Final pH	11,1	6,2	4,0	11,1	4,6	4,3	4,9
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	98,1	96,7
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	69,9	81,3	89,4	90,2	90,5
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,5	87,6	88,0
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,6	2,5
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	770,2	760,6	746,9

Quadro 22A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,36, a 75 °C, e pH 4.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,36; 75 °C; pH 4						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	4,4		
ClO ₂ total, kg/odt				18,6			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	6,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,7	0,5	0,4	0,4
Final pH	11,1	6,2	4,2	11,3	4,5	4,4	4,7
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	96,6	95,5
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	71,8	81,1	90,0	90,1	90,5
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	87,0	87,3	87,7
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,0	2,8	2,8
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	767,8	758,4	743,6

Quadro 23A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,28, a 75 °C, e pH 5.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,28; 75 °C; pH 5						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	8,0		
ClO ₂ total, kg/odt				19,1			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	6,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,2	0,6	0,4	0,4
Final pH	11,1	6,2	5,0	11,2	4,5	4,5	4,5
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	97,2	96,0
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	72,1	81,7	88,5	89,4	89,9
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	85,7	86,7	87,2
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,8	2,7	2,7
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	756,1	743,3	729,3

Quadro 24A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,32, a 75 °C, e pH 5.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,32; 75 °C; pH 5						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,32	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	12,7	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,7		
ClO ₂ total, kg/odt				18,4			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	7,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,1	0,4	0,4	0,4
Final pH	11,1	6,2	5,1	11,0	4,6	4,2	4,3
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	96,5	95,8
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	73,4	82,3	89,6	90,0	90,2
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,7	87,3	87,8
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,7	2,4
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	748,4	720,3	696,4

Quadro 25A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,36, a 75 °C, e pH 5.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,36; 75 °C; pH 5						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	4,8		
ClO ₂ total, kg/odt				19,0			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	8,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,0	0,7	0,5	0,5
Final pH	11,1	6,2	5,0	11,2	4,5	4,7	4,5
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	96,9	96,0
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	76,1	82,7	89,8	90,2	90,4
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	87,0	87,6	88,0
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,8	2,6	2,4
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	722,7	708,6	690,6

Quadro 26A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,28, a 90 °C, e pH 3.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,28; 90 °C; pH 3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	7,5		
ClO ₂ total, kg/odt					18,6		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,7	0,6	0,4	0,4
Final pH	11,1	6,2	2,9	11,3	4,5	4,7	4,7
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	99,0	98,2
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	64,4	78,8	89,6	89,8	90,0
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,5	86,7	87,5
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,1	3,0	2,5
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	730,1	715,3	703,3

Quadro 27A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,32, a 90 °C, e pH 3.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,32; 90 °C; pH 3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,32	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	12,7	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	6,4		
ClO ₂ total, kg/odt				19,1			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	3,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,5	0,6	0,6	0,5
Final pH	11,1	6,2	3,1	11,1	4,5	4,5	4,7
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	99,0	98,0
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	66,2	80,3	89,6	89,9	90,4
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,4	86,7	87,3
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,3	3,2	3,1
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	722,8	705,2	690,1

Quadro 28A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,36, a 90 °C, e pH 3.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,36; 90 °C; pH 3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	4,8		
ClO ₂ total, kg/odt				19,0			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	4,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,5	0,6	0,5	0,4
Final pH	11,1	6,2	2,8	11,1	4,2	4,4	4,7
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	99,0	98,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	67,9	83,4	89,9	90,1	90,7
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,7	87,3	87,9
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,2	2,8	2,8
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	720,3	702,9	688,3

Quadro 29A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,28, a 90 °C, e pH 4.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,28; 90 °C; pH 4						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	8,2		
ClO ₂ total, kg/odt				19,3			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	4,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,9	0,6	0,6	0,5
Final pH	11,1	6,2	4,0	11,0	4,5	4,4	4,6
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	99,1	98,2
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	66,6	78,5	88,4	89,4	89,9
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	85,6	86,8	87,3
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,8	2,6	2,6
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	725,6	713,9	687,9

Quadro 30A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,32, a 90 °C, e pH 4.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,32; 90 °C; pH 4						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,32	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	12,7	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	6,5		
ClO ₂ total, kg/odt				19,2			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	5,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,7	0,3	0,3	0,3
Final pH	11,1	6,2	3,9	11,1	4,5	4,6	4,8
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	99,1	98,3
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	67,8	80,6	89,3	89,8	90,3
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,3	87,1	87,5
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,0	2,7	2,8
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	718,1	694,7	683,5

Quadro 31A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,36, a 90 °C, e pH 4.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,36; 90 °C; pH 4						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,2		
ClO ₂ total, kg/odt				19,4			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	6,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,6	0,3	0,2	0,2
Final pH	11,1	6,2	4,2	10,8	4,4	4,7	4,5
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	99,2	98,0
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	69,7	81,7	89,8	90,1	90,3
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,8	87,4	87,6
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,0	2,7	2,7
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	708,7	687,6	675,2

Quadro 32A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,28, a 90 °C, e pH 5.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,28; 90 °C; pH 5						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	8,4		
ClO ₂ total, kg/odt					19,5		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	6,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,2	0,1	0,1	0,1
Final pH	11,1	6,2	5,0	11,1	4,2	4,6	4,6
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	98,8	98,0
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,8	79,5	88,1	89,0	89,7
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	85,3	86,4	87,3
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,8	2,6	2,4
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	716,1	704,5	681,9

Quadro 33A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,32, a 90 °C, e pH 5.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,32; 90 °C; pH 5						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,32	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	12,7	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	7,0		
ClO ₂ total, kg/odt				19,7			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	7,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	2,0	0,3	0,2	0,1
Final pH	11,1	6,2	5,2	11,2	4,5	4,2	4,3
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	98,9	97,8
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	72,8	80,4	89,4	89,8	90,1
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,5	87,0	87,7
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,8	2,4
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	708,2	695,8	676,2

Quadro 34A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*), sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,36, a 90 °C, e pH 5.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,36; 90 °C; pH 5						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	120	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,3		
ClO ₂ total, kg/odt				19,5			
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	8,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	4,0	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	-	-	1,8	0,3	0,3	0,1
Final pH	11,1	6,2	5,0	10,8	4,5	4,5	4,6
Reagente Consumido, %	-	-	99,9	100,0	100,0	97,6	95,2
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	72,9	81,9	89,5	90,1	90,3
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,5	87,4	87,8
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,0	2,8	2,5
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	-	-	-	701,1	689,8	666,7

Quadro 35A. Resultado médio da Amostra 1 da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*) sem ajuste do pH no estágio de quelante (Q) sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,28, a 60 °C, e pH 3.

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,28; 60 °C; pH 3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	10	9	9	9	9,5	9,5	9,5
Temperatura, °C	95	80	60	90	57	57	57
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	200	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	3,8	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	1,5	3,0	4,5
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	7,8	-	-	,
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	-	-	-
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	3,4	2,1	0,8
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,7	1,7	0,8	0,5	0,6
Final pH	11,1	9,1	2,9	10,8	3,5	3,0	3,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	61,1	100,0	97,6	88,5
¹ Alvura, % ISO	46,0	49,6	66,0	85,0	88,4	88,6	89,2
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	85,5	86,1	87,0
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,5	2,2
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	830,5	750,3	720,8	710,4	699,6

Quadro 36A. Resultado médio da Amostra 21 da otimização do estágio de dióxido de cloro a quente (D*) sem ajuste do pH no estágio de quelante (Q) sendo avaliadas as seguintes variáveis: Fator Kappa 0,36, a 90 °C, e pH 3. (Condição comparável a planta operacional de referencia)

Condições e Resultados	Avaliação do D* - Fator Kappa 0,36; 90 °C; pH 3						
	O	Q	D*	(OP)	D1	D2	D3
Consistência, %	9,5	9	9	9	9,5	9,5	9,5
Temperatura, °C	95	80	90	90	57	57	57
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	200	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	3,8	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	1,5	3,0	4,5
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	7,8	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	3,0	11,4	-	-	-
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6	-	-	3	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	3,4	2,1	0,8
DTPA, kg/odt	-	1,67	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	2,8	1,1	0,6	0,6	0,5
Final pH	11,1	6,2	2,8	10,8	3,2	3,0	3,6
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	68,9	100,0	97,3	88,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	49,6	67,0	86,4	88,7	89,3	89,7
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	85,3	86,1	86,7
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,4	3,2	3,0
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	852,0	765,6	690,7	624,2	621,5	614,4

Quadro 37A. Resultado médio da otimização do estágio de extração com peróxido pressurizado e oxigênio (OP) sendo avaliadas a as seguintes variáveis: 75 °C; 3 kg H₂O₂; 0 kg MgSO₄.7H₂O .

Condições e Resultados	Avaliação do (OP) - (75 °C; 3 kg H ₂ O ₂ ; 0 kg MgSO ₄ .7H ₂ O)						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	6,7		
ClO ₂ total, kg/odt	-	-	17,8				
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	2,1	0,7	0,4	0,3
Final pH	11,1	8,9	2,9	11,2	4,6	4,6	4,5
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	97,3	95,5
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	80,7	88,1	89,7	90,2
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	85,7	87,6	88,2
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,4	2,2	2,1
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	792,2	762,2	747,7	737,2

Quadro 38A. Resultado médio da otimização do estágio de extração com peróxido pressurizado e oxigênio (OP) sendo avaliadas a as seguintes variáveis: 75 °C; 6 kg H₂O₂; 0 kg MgSO₄.7H₂O.

Condições e Resultados	Avaliação do (OP) - (75 °C; 6 kg H ₂ O ₂ ; 0 kg MgSO ₄ .7H ₂ O)						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,4		
ClO ₂ total, kg/odt					16,5		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	2,0	0,4	0,4	0,3
Final pH	11,1	8,9	2,9	11,2	4,5	4,4	4,5
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	65,6	100,0	97,4	95,8
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	83,3	88,8	90,2	90,8
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	86,0	87,6	88,4
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,8	2,7	2,4
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	828,2	764,6	745,3	736,6	724,7

Quadro 39A. Resultado médio da otimização do estágio de extração com peróxido pressurizado e oxigênio (OP) sendo avaliadas a as seguintes variáveis: 75 °C; 3 kg H₂O₂; 3 kg MgSO₄.7H₂O.

Condições e Resultados	Avaliação do (OP) - (75 °C; 3 kg H ₂ O ₂ ; 3 kg MgSO ₄ .7H ₂ O)						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	6,6		
ClO ₂ total, kg/odt					17,7		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	2,1	0,5	0,4	0,3
Final pH	11,1	8,9	2,9	11,2	4,5	4,3	4,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	97,9	95,5
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	80,5	88,9	89,8	90,3
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,1	87,2	87,9
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,7	2,6	2,4
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	808,5	771,3	756,5	743,5

Quadro 40A. Resultado médio da otimização do estágio de extração com peróxido pressurizado e oxigênio (OP) sendo avaliadas a as seguintes variáveis: 75 °C; 3 kg H₂O₂; 3 kg MgSO₄.7H₂O.

Condições e Resultados	Avaliação do (OP) - (75°C; 6 kg H ₂ O ₂ ; 3 kg MgSO ₄ .7H ₂ O)						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,3		
ClO ₂ total, kg/odt					16,4		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	2,0	0,5	0,3	0,2
Final pH	11,1	8,9	2,9	11,0	4,5	4,4	4,5
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	77,1	100,0	97,9	95,8
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	82,8	88,7	90,3	90,9
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,3	88,1	88,6
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,4	2,3	2,2
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	795,0	767,5	751,7	740,5

Quadro 41A. Resultado médio da otimização do estágio de extração com peróxido pressurizado e oxigênio (OP) sendo avaliadas a as seguintes variáveis: 90 °C; 3 kg H₂O₂; 0 kg MgSO₄.7H₂O.

Condições e Resultados	Avaliação do (OP) - (90 °C; 3kg H ₂ O ₂ ; 0 kg MgSO ₄ .7H ₂ O)						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	90	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,5		
ClO ₂ total, kg/odt					16,6		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,9	0,6	0,3	0,2
Final pH	11,1	8,9	2,9	11,0	4,6	4,7	4,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	97,9	95,5
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	82,3	88,9	90,1	90,3
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,6	87,9	88,1
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,4	2,2	2,2
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	764,6	746,5	734,5	724,0

Quadro 42A. Resultado médio da otimização do estágio de extração com peróxido pressurizado e oxigênio (OP) sendo avaliadas a as seguintes variáveis: 90 °C; 6 kg H₂O₂; 0 kg MgSO₄.7H₂O.

Condições e Resultados	Avaliação do (OP) - (90 °C; 6 kg H ₂ O ₂ ; 0 kg MgSO ₄ .7H ₂ O)						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	90	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	4,7		
ClO ₂ total, kg/odt					15,8		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,4	0,3	0,2
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	4,5	4,3	4,5
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	78,9	100,0	96,9	95,3
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,7	89,6	90,5	90,9
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	87,0	88,3	88,8
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,6	2,2	2,0
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	716,2	702,0	694,4	689,6

Quadro 43A. Resultado médio da otimização do estágio de extração com peróxido pressurizado e oxigênio (OP) sendo avaliadas a as seguintes variáveis: 90 °C; 3 kg H₂O₂; 3 kg MgSO₄.7H₂O.

Condições e Resultados	Avaliação do (OP) - (90 °C; 3 kg H ₂ O ₂ ; 3 kg MgSO ₄ .7H ₂ O)						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	90	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	5,4		
ClO ₂ total, kg/odt					16,5		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	2,0	0,4	0,3	0,2
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,9	4,5	4,3	4,2
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	100,0	100,0	97,0	95,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	81,0	88,7	90,2	90,7
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,5	88,2	88,7
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,2	2,0	1,9
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	783,3	760,4	745,1	736,2

Quadro 44A. Resultado médio da otimização do estágio de extração com peróxido pressurizado e oxigênio (OP) sendo avaliadas as seguintes variáveis: 90 °C; 3 kg H₂O₂; 3 kg MgSO₄.7H₂O.

Condições e Resultados	Avaliação do (OP) - (90°C; 6 kg H ₂ O ₂ ; 3 kg MgSO ₄ .7H ₂ O)						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	90	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	3,6		
ClO ₂ total, kg/odt					14,7		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	10,0	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,4	0,3	0,2
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	4,4	4,3	4,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	100,0	97,1	95,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	90,1	91,1	91,2
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	88,0	89,0	89,3
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,1	2,1	2,0
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	738,4	729,3	717,7

Quadro 45A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro (D) sendo avaliado o pH final de reação igual a 3,5.

Condições e Resultados	Avaliação do estágio D - 3,5 pH						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	6,8		
ClO ₂ total, kg/odt	-	-	17,9				
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	-	-	-
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	1,5	0,8	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,3	0,2	0,2
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	3,4	3,4	3,5
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	100,0	100,0	99,6
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,5	89,6	90,3
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	85,7	87,0	88,0
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,6	2,3
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	746,6	733,5	724,2

Quadro 46A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro (D) sendo avaliado o pH final de reação igual a 4,5.

Condições e Resultados	Avaliação do estágio D - 4,5 pH						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	4,3		
ClO ₂ total, kg/odt					15,4		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,0	1,5	2,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,4	0,3	0,2
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	4,5	4,4	4,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	100,0	97,1	95,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	89,8	90,5	90,8
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,9	87,7	88,2
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	2,9	2,7	2,6
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	738,4	729,2	717,8

Quadro 47A. Resultado médio da otimização do estágio de dióxido de cloro (D) sendo avaliado o pH final de reação igual a 5,5.

Condições e Resultados	Avaliação do estágio D - 5,5 pH						
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	D ₂	D ₃
Consistência, %	10	9	9	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	90	70	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	120	120
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8	5,7	7,6
ClO ₂ , kg/odt para alvura 90% ISO	-	-	-	-	3,7		
ClO ₂ total, kg/odt					14,8		
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	-	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	1,2	2,3	3,4
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,4	0,3	0,2
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	5,6	5,6
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	93,0	86,3	79,6
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	90,1	91,0	91,4
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,9	88,2	88,7
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,1	2,8	2,7
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	725,2	715,3	703,7

Quadro 48A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados : pH 7,5; 45 °C e 1kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	45
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt	-	-	13,7		-	-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	1,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	0,3
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	1,5	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,6
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	7,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	68,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	88,3
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,3	85,3
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,1
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	736,7

Quadro 49A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados: pH 9; 45 °C e 1kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	45
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt				13,7		-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	1,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	0,7
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,5
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	9,3
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	69,9
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	88,4
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	86,3	85,1
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,3
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	736,6

Quadro 50A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados : pH 7,5; 70 °C e 1kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt	-	-	13,7			-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	1,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	0,7
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	1,5	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,5
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	7,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	77,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	88,6
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,3	85,5
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,1
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	674,5

Quadro 51A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados : pH 9; 70 °C e 1kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt				13,7		-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	1,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	1,2
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,5
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	9,3
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	78,8
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	88,6
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,3	85,5
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,1
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	689,1

Quadro 52A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados : pH 7,5; 45 °C e 2kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	45
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt	-	-	13,7			-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	2,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	0,7
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	1,5	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,5
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	7,2
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	64,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	88,7
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	86,3	85,4
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,3
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	719,8

Quadro 53A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados: pH 9; 45 °C e 2kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	45
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt				13,7		-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	2,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	1,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,5
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	9,0
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	66,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	88,7
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	86,3	85,4
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,3
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	722,5

Quadro 54A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados: pH 7,5; 70 °C e 2kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt	-	-	13,7		-	-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	2,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	1,0
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	1,5	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,5
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	7,6
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	73,0
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	88,8
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	86,3	85,3
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,5
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	619,1

Quadro 55A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados: pH 9; 70 °C e 2kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt				13,7		-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	2,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	3,0
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,4
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	9,2
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	74,9
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	88,8
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,3	85,6
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,2
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	622,2

Quadro 56A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados: pH 9; 70 °C e 2kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	45
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt	-	-	13,7			-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	3,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	1,2
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	1,5	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,5
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	7,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	57,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	89,7
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,3	86,5
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,3
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	705,4

Quadro 57A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados: pH 7,5; 45 °C e 3kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	45
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt	-	-	13,7			-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	3,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	1,2
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	1,5	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,5
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	7,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	57,1
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	89,7
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	86,3	86,5
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,3
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	705,4

Quadro 58A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados: pH 9; 45 °C e 3kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	45
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt				13,7		-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	3,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	3,0
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,50
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	9,2
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	62,2
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	89,8
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,3	86,7
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,1
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	709,8

Quadro 59A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados: pH 7,5; 70 °C e 3kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt	-	-	13,7			-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	3,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	1,5
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	1,5	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,4
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	7,4
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	68,9
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	89,8
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,3	86,4
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,5
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	596,7

Quadro 60A. Resultado médio da otimização da Torre de Alta Densidade (TAC), sendo avaliados: pH 9; 70 °C e 3kg de H₂O₂.

Condições e Resultados	Avaliação da TAC					
	O	Q	D*	(OP)	D ₁	TAC
Consistência, %	10	9	9	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	75	75	70	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120	240
Pressão, kPa	350	-	-	500	-	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	4	-	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	2,6	-
ClO ₂ total, kg/odt				13,7		-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-	3,0
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	0,5	4,0
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,1	1,8	0,6	0,4
Final pH	11,1	8,9	2,9	10,8	5,5	9,3
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	95,7	72,7
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,5	84,5	88,0	89,9
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	86,3	86,6
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	1,6	3,3
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	826,1	752,9	740,7	609,5

Quadro 61A. Resultado médio da sequência considerada ótima – Condição Aperfeiçoada

Condições e Resultados	Condição Otimizada				
	O	Q	D*	(OP)	D1
Consistência, %	10	9	9	10	10
Temperatura, °C	95	80	60	90	70
Tempo, min.	60	30	120	60	120
Pressão, kPa	350	-	-	200	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	3,8	-
Fator Kappa	-	-	0,28	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	11,1	-	3,8
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	6,0	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	2,0	11,4	1,2
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	6,0	-	-	3,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	-
DTPA, kg/odt	-	1,7	-	-	-
Kappa	10,4	10,3	3,5	1,8	0,45
Final pH	11,1	8,7	2,9	10,8	5,5
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	81,4	92,9
¹ Alvura, % ISO	46,0	48,6	70,1	84,5	90,1
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	87,0
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	3,1
Viscosidade, dm ³ /kg	853,0	850,0	832,8	780,5	757,3

Quadro 63A. Resultado médio do branqueamento da sequência referência.

Condições e Resultados	Condição Referência				
	O	Q	D*	(OP)	D1
Consistência, %	9,5	9	9	9	9,5
Temperatura, °C	90	80	88	90	57
Tempo, min.	60	30	120	60	120
Pressão, kPa	350	-	-	200	-
O ₂ , kg/odt	18	-	-	3,8	-
Fator Kappa	-	-	0,36	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	-	14,2	-	3,0
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	-	7,8	-
NaOH, kg/odt	15,0	-	3,0	11,4	-
MgSO ₄ .7H ₂ O, kg/odt	3	-	-	3,0	-
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	-	-	-	3,4
DTPA, kg/odt	-	1,67	-	-	-
Kappa	10,6	10,3	2,7	1,1	0,53
Final pH	11,6	10,2	2,8	10,7	3,2
Reagente Consumido, %	-	-	100,0	73,6	89,5
¹ Alvura, % ISO	46,6	47,0	68,2	84,0	89,8
² Reversão de Alvura, % ISO	-	-	-	-	85,3
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	4,4
Viscosidade, dm ³ /kg	833,0	831,0	765,8	684,4	612,2

Apêndice B

Quadro 1B. Resultado dos testes físico-mecânicos das polpas branqueadas pela Condição Referência, Condição Aperfeiçoada e Condição da Torre de Alta Densidade.

Amostras	Revolução	Consumo Energia Wh	°SR	Espes-sura µm	Peso Exp.Aparente Kg/m ³	Vol.Esp. Aparente cm ³ /g	T.E.A.J/m ²	M.O.E. MNm/kg	índice de Tração N.m/g	Índice Arreb. kPa.m ² /g	Índice Rasgo mN.m ² /g	Alongamento, %	Opacidade %	Coef. Disp. Luz m ² /kg	Resist. P. Ar s/100cm ³
Referência	0	0	15	151	415,29	2,41	10,12	2,95	16,71	0,8	6,56	1,29	78,47	43,4	0,55
	2000	29	25	98	643,16	1,55	70,1	5,45	51,77	3,09	9,61	2,96	72,13	31,6	4,35
	3000	42	33	90	700,11	1,43	75,26	6,23	57,82	3,6	10,57	2,85	71,78	31,1	12,57
	4000	57	44	85	745,06	1,34	71,51	6,29	58,65	3,74	9,56	2,67	70,19	29,29	33,33
Condição Aperfeiçoada	0	0	16	156	408,4	2,45	12,14	2,49	15,9	0,8	7,04	1,58	78,11	41,73	0,54
	2000	27	28	95	679,05	1,47	65,28	5,6	54,11	3,27	10,73	2,69	72,81	32,27	7,32
	3000	41	39	90	714,67	1,4	75,64	6,46	63,03	4,21	11,25	2,7	70,37	29,18	24,26
	4000	53	50	85	752,71	1,33	92,21	6,61	68,06	4,64	10,16	3,01	69,04	27,02	61,33
Condição da Torre de Alta Densidade	0	0	17	150	421,36	2,37	11	2,76	16,54	0,88	7,91	1,42	78,33	42	0,56
	2000	27	28	100	629,15	1,59	68,5	5,82	54,62	3,47	10,44	2,7	72,52	31,85	6
	3000	40	40	95	669,7	1,49	76,81	6,5	60,62	4,26	10,42	2,72	71	30,48	22,9
	4000	53	50	90	727,47	1,37	91,99	6,63	66,69	4,8	9,48	3,03	69,53	28,53	63,91