

CLAUDIA MARCIA GOMES

**TRATABILIDADE DOS EFLUENTES DE BRANQUEAMENTO DE POLPA
KRAFT DE EUCALIPTO COM TECNOLOGIAS DE HIDRÓLISE
ÁCIDA/DIÓXIDO DE CLORO À QUENTE**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2006

CLAUDIA MARCIA GOMES

**TRATABILIDADE DOS EFLUENTES DE BRANQUEAMENTO DE POLPA
KRAFT DE EUCALIPTO COM TECNOLOGIAS DE HIDRÓLISE
ÁCIDA/DIÓXIDO DE CLORO À QUENTE**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 21 de fevereiro de 2006.

Prof. Cláudio Mudado Silva
(Co-Orientador)

Prof^a. Ann Honor Munteer
(Co-Orientador)

Dr. Marcelo Rodrigues da Silva

Prof^a.Ana Márcia M. L. Carvalho

Prof. Jorge Luiz Colodette
(Orientador)

DEDICATÓRIA

*Ao meu amado filho Davi...
Uma alegria na minha vida.*

*A minha amada mãe Carminha...
Um porto seguro na minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A sabedoria do poder superior, por ter me conduzido até este caminho.

Aos professores José Lívio Gomide, Jorge Luiz Colodette, Rubens Chaves de Oliveira, Cláudio Mudado Silva que se dedicam e trabalham para que possamos usufruir de uma estrutura física e qualidade de ensino de altíssimo nível no LCP/UFV.

Ao professor Jorge Luiz Colodette pelos valiosos ensinamentos acadêmicos no decorrer dos anos nos quais desenvolvi atividades no laboratório de celulose e papel sob a sua orientação.

Aos professores Cláudio Mudado Silva e Ann Honor Munteer pelos ensinamentos e sugestões no decorrer deste trabalho.

Ao Nelson Del'Antônio pela grande interesse e dedicação durante a condução dos experimentos em laboratório e pela compreensão e gentileza ao auxiliar-me (grávida) nas atividades de laboratório. Valeu mesmo!

A professora Ana Márcia e ao Eng. Marcelo Rodrigues da Silva pelas sugestões e orientações no decorrer deste trabalho.

A minha mãe, meu pai e meus irmãos Cristiane, Adriana e Douglas pela compreensão, paciência e pelo carinho e cuidado especial ao meu filho, o Davi.

A minha mãe, muito obrigada por cuidar tão bem do meu filho, o que me proporcionava uma tranquilidade imprescindível para a condução dos meus trabalhos.

Ao meu filho Davi, por você ter surgido na minha vida durante o desenvolvimento deste trabalho, trazendo uma inesgotável fonte de inspiração e força. Muito obrigada por ter compartilhado esta maratona de aulas, provas, seminários, experimentos, etc comigo, no meu ventre e pela compreensão nos momentos de ausência no restante do curso.

Às pessoas que fizeram parte da minha caminhada no LCP e tornaram-se especiais e eu sei que apesar de estarem longe, torceram e enviaram energias positivas que contribuíram para o meu sucesso.

Aos amigos que estão longe, pela torcida e aos que estão perto por compartilharem comigo as angústias e alegrias desta fase.

Ao Frederico, Onel, Lívia, Roberta, Flaviana e Valéria, pelo auxílio nas análises.

Ao Bola (Oldair) pela convivência, pelo ótimo humor e grande coração e pelas valiosas sugestões e auxílio durante as atividades no laboratório.

A Ana Márcia, por estar sempre pronta a ajudar, escutar, e pela amizade.

A Prof. Silvana e a Adriana pelo auxílio nas análises estatísticas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal Rita, Ritinha, Frederico, Jamile e Chiquinho por estarem sempre prontos a servir.

Aos funcionários e estagiários do Laboratório de Celulose e Papel; Juliana, Dora, Cláudio, D. Conceição, Sr. Juca, Juliana, Oldair, Edinho, Cirinho, Cássio, Tião, Carlinhos, Carla, Jésus, etc por compartilhar o dia-a-dia, pelos papos na cantina, pelos momentos de descontração, pelos auxílios, etc, por tudo.

Aos colegas de curso pela convivência e companheirismo.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade oferecida e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

BIOGRAFIA

CLAUDIA MARCIA GOMES, filha de Jorge Justino Gomes e Maria do Carmo Ladeira Gomes, nasceu no dia 9 de maio de 1975, em Teixeira-MG.

Em março de 1997, iniciou o curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa-MG, diplomando-se, em agosto de 2003. Paralelo ao curso, desenvolveu trabalhos de iniciação científica, tendo como orientador o professor Jorge Luiz Colodette.

Em março de 2004, iniciou o Programa de Mestrado em Ciência Florestal, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo tese em fevereiro de 2006.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Reatividade da Lignina e do HexA's durante a Hidrólise Ácida.....	10
2.2. Reatividade da Lignina e dos HexA's durante o Estágio de Dióxido de Cloro.....	12
2.3. Efluentes do Branqueamento com as Tecnologias D, D*A/D* e AD.....	15
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1. Material.....	21
3.2. Métodos.....	21
3.2.1. Etapa I: Branqueamento das Polpas e Geração de Efluentes	22
3.2.2. Etapa II: Avaliação do Branqueamento.....	26
3.2.3. Etapa III: Caracterização dos Efluentes.....	28
3.2.4. Etapa IV: Tratamento Biológico dos Efluentes.....	29
3.2.5. Análises Estatísticas.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31

4.1. Branqueamento.....	32
4.1.1. Consumo e Custo dos Reagentes Químicos.....	31
4.1.2. Estabilidade de Alvura da Polpa Branqueada.....	35
4.1.3. Viscosidade Final da Polpa Branqueada.....	37
4.1.4. Número Kappa e Teor de HexA's da polpa.....	38
4.2. Filtrados e Efluentes Combinados do Branqueamento.....	39
4.2.1. Filtrados do Pré-Branqueamento.....	39
4.2.1.1. Efeito do Peróxido.....	40
4.2.2. Características e Eficiência do Tratamento Biológico dos Efluentes Combinados do Pré-branqueamento...	41
4.2.2.1. DQO.....	42
4.2.2.2. DBO ₅	43
4.2.2.3. COT.....	45
4.2.2.4. AOX.....	46
4.2.2.5. Cor	47
4.2.3. Características dos Efluentes Combinados da Seqüência de Branqueamento Inteira e Tratamento biológico.....	49
4.2.3.1. DQO.....	49
4.2.3.2. DBO ₅	51
4.2.3.3. COT.....	53
4.2.3.4. AOX.....	54
4.2.3.5. Cor.....	58
5. CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
APÊNDICE A.....	73
APÊNDICE B.....	83
APÊNDICE C.....	85
APÊNDICE D.....	95
APÊNDICE E.....	105
APÊNDICE F.....	114
APÊNDICE G.....	124
APÊNDICE H.....	134
APÊNDICE I.....	143
APÊNDICE J.....	148
APÊNDICE L.....	153

LISTA DE QUADROS

	Página
1 DQO e COT do efluente combinados no processo de branqueamento pelas tecnologias D e D* (EIRAS, COLODETTE, 2003).....	16
2 DQO e DBO ₅ do efluente combinados no processo de branqueamento pelas tecnologias D, D* e AD (COSTA, 2001).....	17
3 Características iniciais das polpas.....	21
4 Preços dos reagentes utilizados no branqueamento.....	28
5 Efluentes combinados dos pré-branqueamentos e combinados das seqüências de branqueamentos inteiras.....	28
6 Necessidade de reagentes químicos para branqueamento de polpa com baixa e alta DQO, pelas seqüências iniciadas com estágio D, D*, A/D* e AD.....	33
7 Alvura e estabilidade de alvura das polpas de baixa e alta DQO, branqueadas pelas seqüências iniciadas com estágio D, D*, A/D* e AD.....	36
8 Número kappa, viscosidade e teor de HexA's da polpa com baixa e alta DQO, após branqueamento pelas seqüências iniciadas com estágio D, D*, A/D* e AD.....	38
9 Caracterização dos filtrados do pré-branqueamento, estágio por estágio, para polpa de alta DQO, para seqüências com extrações simples (E) e reforçada com peróxido (Ep).....	41

10	DQO (kg O ₂ /t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção da DQO (%), para polpas de baixa e alta DQO.....	43
11	DBO ₅ (kg O ₂ /t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção da DBO ₅ (%), para polpas de baixa e alta DQO.....	44
12	Biodegradabilidade da matéria orgânica dos efluentes combinados do pré-branqueamento.....	45
13	COT (kg C/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção do COT (%), para polpas de baixa e alta DQO.....	46
14	AOX (kg Cl ⁻ /t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção do AOX (%), para polpas de baixa e alta DQO.....	47
15	Cor (kg Pt/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção da cor (%), para polpas de baixa e alta DQO.....	48
16	DQO (kg O ₂ /t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoção da DQO (%), para polpas de baixa e alta DQO.....	51
17	DBO ₅ (kg O ₂ /t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoção da DBO ₅ (%), para polpas de baixa e alta DQO.....	53
18	COT (kg C/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoção do COT (%), para polpas de baixa e alta DQO.....	54
19	AOX (kg Cl ⁻ /t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoção de AOX (%), para polpas de baixa e alta DQO.....	57
20	Cor (kg Pt/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção de cor (%), para polpas de baixa e alta DQO.....	59

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Representação esquemática da instalação da tecnologia AD industrial.....	7
2 Representação esquemática da instalação da tecnologia A/D* industrial.....	7
3 Representação esquemática da instalação da tecnologia D* industrial.....	8
4 Grupos funcionais dos HexA's (JIANG; LIEROP; BERRY, 2000).....	10
5 Mecanismo proposto por Teleman et al. (1996) para a degradação ácida dos ácidos hexenurônicos em ácidos fórmico, 2-furóico e 5-formil 2-furóico.....	11
6 Reação com o cloro e dióxido de cloro, em que A – substituição aromática; B – deslocamento eletrofílico; e C – oxidação (SPENGEL et al., 1994).....	13
7 Produtos da reação do dióxido de cloro com os ácidos hexenurônicos (VUORINEN et al., 1997).....	14
8 Representação esquemática do sistema de lodos ativados em batelada laboratorial.....	29
9 Demanda de cloro ativo total para branqueamento de polpa com baixa DQO por várias seqüências.....	33
10 Demanda de cloro ativo total para branqueamento de polpa com alta DQO por várias seqüências.....	33

11	Custo dos reagentes químicos para branqueamento de polpa com baixa DQO por várias seqüências.....	35
12	Custo dos reagentes químicos para branqueamento de polpa com alta DQO por várias seqüências.....	35
13	Reversão de alvura da polpa de baixa DQO, branqueada por várias seqüências.....	37
14	Reversão de alvura da polpa de alta DQO, branqueada por várias seqüências.....	37
15	Viscosidade da polpa de baixa DQO, branqueada por várias seqüências.....	38
16	Viscosidade da polpa de alta DQO, branqueada por várias seqüências.....	38

RESUMO

GOMES, Claudia Marcia, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2006. **Tratabilidade dos efluentes de branqueamento de polpa kraft de eucalipto com tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro à quente.** Orientador: Jorge Luiz Colodette. Co-Orientadores: Ann Honor Mounteer e Cláudio Mudado Silva.

O objetivo desse estudo foi avaliar o impacto das tecnologias D, D*, A/D* e AD no custo de branqueamento, qualidade da polpa e nas características e eficiência do tratamento dos efluentes do branqueamento ECF de polpas Kraft de eucalipto, de alta e baixa DQO, a 89-90% ISO de alvura. Duas amostras de polpa kraft de eucalipto pré-deslignificadas com oxigênio, uma bem lavada com DQO de 6,4 kg O₂/t.a.s. e outra mal lavada com DQO de 25,5 kg O₂/t.a.s., foram tratadas no primeiro estágio de branqueamento pelas tecnologias D, D*, A/D* e AD, e, subsequentemente, branqueadas até 89 e 90% ISO, com as seqüências EpDD e EpD, respectivamente. Foram determinadas a branqueabilidade e a qualidade da polpa branqueada. Os efluentes do branqueamento foram caracterizados quanto aos valores de DQO, DBO₅, COT AOX e cor e tratados biologicamente num sistema de lodos ativados laboratorial. A eficiência do tratamento biológico foi determinada pela remoção dos parâmetros avaliados. Chegou-se à conclusão de que a polpa de alta DQO apresenta baixa branqueabilidade em relação a de alta DQO. As polpas de alta DQO branqueadas pelas várias tecnologias apresentaram reversão de alvura

cerca de 2,5 vezes maior que as de baixa DQO. As tecnologias contendo estágio ácido / dióxido de cloro em alta temperatura (D^* , A/D^* , AD) resultaram em polpas branqueadas com maior estabilidade de alvura, menor viscosidade, menor kappa e menor teor de HexA's que a de referência (D), tendo sido o impacto mais significativo para a polpa de alta DQO. Com relação a branqueabilidade e custos de reagentes, a única tecnologia ao estágio D_0 convencional que se justifica é o estágio D^* , assim mesmo para polpa de baixa DQO. A tecnologia AD é eficiente quando a lavagem da polpa é deficiente, no entanto deve ser evitada, pois requer alto custo de capital. A tecnologia A/D^* não é recomendada para o branqueamento de polpa kraft de eucalipto, pois apresenta o maior custo de reagentes, para polpa de baixa e alta DQO. Os efluentes do branqueamento da polpa de alta DQO apresentaram valores de DQO, DBO_5 e AOX substancialmente mais altos que os da polpa de baixa DQO, porém a tratabilidade dos dois efluentes, medida pelas percentagens de remoção desses parâmetros no tratamento biológico, foi similar entre si. A maior parte da carga orgânica e de halógenos orgânicos do efluente da polpa de baixa DQO (65-99%) é gerada no pré-branqueamento. As tecnologias D^* , A/D^* e AD aumentam a carga orgânica do efluente, porém é de fácil tratabilidade, apesar de maior custo de tratamento. A descarga de AOX no efluente devido a tecnologia D^* é menor em relação ao D convencional, porém esse benefício desaparece no efluente tratado. Na prática, nenhuma justificativa alternativa ao estágio D se justifica para reduzir o teor de AOX no efluente. As tecnologias D^* , A/D^* e AD resultam em efluentes mais coloridos que o D convencional e o tratamento biológico acentua a cor do efluente.

ABSTRACT

GOMES, Claudia Marcia, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2006. **Treatability of effluents from eucalyptus kraft pulp bleaching with acid hydrolysis/hot chlorine dioxide technologies.** Adviser: Jorge Luiz Colodette. Co-Advisers: Ann Honor Munteer and Cláudio Mudado Silva.

The aim of this study was to evaluate the impact of D, D*, A/D* and AD technologies on characteristics and treatabilities of eucalyptus kraft pulp ECF bleaching effluents, of low and high COD, and a full brightness 89-90% ISO. Two samples of eucalyptus kraft pulp pre-delignified in oxygen, a well washed one with COD 6,4 kg/t.a.s. and another not well washed with COD 25,5 kg/t.a.s., were treated, in a first bleaching stage, using the technologies D, D*, A/D* and AD, and subsequently bleached up to 89 and 90% ISO, with the sequences EpDD e EpD, respectively. It was determined the bleachability and quality of fully bleached pulp. The bleaching effluents were characterized as for color, TOC, COD, BOD₅ and AOX loads and biologically treated in an activated sludge system. The efficiency of the biological treatment was certain for the removal of the appraised parameters. It was concluded that the pulp of high COD shows low bleachability in relation to the high COD. The pulps of high COD bleached by the various technologies showed brightness reversion about 2,5 times bigger than those of low COD. The technologies containing acid / hot chlorine dioxide stage (D*, A/D*, AD) resulted in bleached pulps with greater brightness stability, less viscosity,

minor kappa and HexA's tenor than the reference (D), being the impact more significant for the pulp of high COD. Regarding the bleaching and reagents costs, the only technology to the conventional stage D that justifies is the stage D *, even so for pulp of low COD. The technology AD is efficient when the wash of the pulp is deficient, however it should be avoided, therefore it requests high capital cost. The technology A/D * is not recommended for the kraft pulp of eucalyptus, because it presents the largest reagents cost, for pulp with low and high COD. The bleaching effluents of high COD pulp presented substantially higher values of COD, BOD₅ and AOX than those of pulp of low DQO, but the treatability of the two effluents, measured by the removal percentages of these parameters in the biological treatment, was similar. The greatest part of organic load and organic allogenous from the pulp effluent of low COD (65-99%) is generated during pre-bleaching. The technologies D *, A/D * and AD increase the organic load of the effluent, however it is easy to treat, in spite of larger treatment cost. The discharge of AOX in the effluent due to technology D * it is smaller in relation to conventional D, however that benefit disappears in the treated effluent. In practice, any alternative justification to the stage D is justified to reduce the tenor of AOX in the effluent. The technologies D *, A/D * and AD result in more colored effluents than conventional D and the biological treatment accentuates the effluent color.

1. INTRODUÇÃO

Independentemente do processo de fabricação utilizado, os efluentes da indústria de celulose são misturas complexas, constituídas de vários compostos químicos derivados de materiais extraídos da madeira e de reagentes utilizados no processo (NOLASCO, 1997).

As principais fontes desses efluentes incluem: os efluentes líquidos gerados no pátio de madeira, como a água utilizada para lavagem das toras durante o descascamento; derrames de condensados e licor negro durante a etapa de polpação e evaporação; efluentes da etapa de depuração e lavagem da polpa marrom; vazamentos de água de selagem de bombas; e, por fim, o efluente do branqueamento, sendo este responsável pela maior carga percentual de matéria orgânica do efluente geral (LAFLEUR, 1996).

O efluente de branqueamento representa 65-85% do volume total do efluente total de uma indústria moderna de polpa kraft branqueada (SPRINGER, 1993). Portanto, ele é responsável pela maioria da carga orgânica do efluente total da indústria de celulose. Além disso, em 1985, a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA) constatou a presença de halógenos orgânicos, incluindo dioxinas cloradas, nos efluentes da indústria de celulose (“National Bioaccumulation Study”, USEPA, 1987). Esses compostos são gerados durante a etapa de branqueamento da polpa com cloro ou compostos de cloro (dióxido de cloro, hipoclorito).

A indústria de celulose tem modificado o seu processo, visando reduzir o impacto negativo dos efluentes do branqueamento sobre o meio

ambiente. As principais modificações do processo incluem a redução da quantidade de lignina residual da polpa que entra no branqueamento (ex: cozimentos modificados ou com aditivos e pré deslignificação com oxigênio) e a conversão do branqueamento convencional para processos isentos de cloro gás – tecnologia ECF (*elemental chlorine free*), e isentos de reagentes à base de cloro – tecnologia TCF (*totally chlorine free*) (TANA; LEHTINEN, 1996)

Apesar da significativa melhoria na qualidade do efluente, a indústria de celulose ainda tem grande interesse em reduzir o consumo de dióxido de cloro durante o branqueamento ECF, devido às novas legislações ambientais, cada vez mais rígidas e aos altos custos de instalação da planta de produção de dióxido de cloro.

Recentemente, descobriu-se que os ácidos hexenourônicos (HexA's) são responsáveis por significativo consumo de dióxido de cloro durante o branqueamento de polpa kraft de fibra curta (JIANG; LIEROP; BERRY, 2000).

Os ácidos hexenourônicos são formados durante o cozimento kraft pela conversão parcial dos grupos de ácido 4-O-metil-D-glicourônico em grupos de ácido 4-deoxihex-4-enurônico (ácidos hexenourônicos - HexA's), via β -eliminação de metanol (BUCHERT et al., 1997). Portanto, a remoção destes ácidos da polpa resulta em uma redução do consumo de dióxido de cloro durante o branqueamento (VUORINEN et al., 1996), proporcional ao teor de HexA's removido.

Os HexA's são degradados indiretamente durante o branqueamento com dióxido de cloro pelo ácido hipocloroso gerado *in situ* (COSTA; COLODETTE, 2001).

Duas tecnologias para remoção de HexA's emergentes nas indústrias são a hidrólise ácida (tecnologia A) e o dióxido de cloro em alta temperatura (tecnologia D*) (RAGNAR, 2004). A hidrólise ácida tem sido sugerida antes do estágio inicial de dióxido de cloro convencional com lavagem intermediária da polpa (tecnologia AD) ou antes do estágio inicial de dióxido de cloro em alta temperatura sem lavagem intermediária da polpa (tecnologia A/D*).

As tecnologias para a remoção dos HexA's têm sido intensamente estudadas na última década (COSTA, 2001; RAGNAR, 2002, RAGNAR et al., 2002; EIRAS et al., 2003; RAGNAR; LINDSTROM, 2004; VENTORIM; COLODETTE; EIRAS, 2005). Nestes estudos, o foco principal tem sido o efeito dessas tecnologias na estabilidade da alvura e na redução dos reagentes químicos e dos custos de branqueamento. Pouca atenção foi voltada ao impacto dessas tecnologias na qualidade e tratabilidade do efluente gerado. As informações existentes são esparsas e não permitem conclusões definitivas.

O objetivo desse estudo foi avaliar o impacto das tecnologias D, D*, A/D* e AD no custo de branqueamento, qualidade da polpa e nas características e eficiência do tratamento dos efluentes do branqueamento ECF de polpas Kraft de eucalipto, de alta e baixa DQO, a 89-90% ISO de alvura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O branqueamento ECF (*Elemental Chlorine Free*) com primeiro estágio de dióxido de cloro convencional (tecnologia D) é processo padrão nas indústrias de celulose. As condições operacionais desse estágio variam em torno de 60 °C de temperatura, 30 minutos de reação e pH 3,0. A substituição do cloro por dióxido de cloro no primeiro estágio de branqueamento foi um modo eficaz de reduzir a carga poluidora do efluente no processo de branqueamento. A redução da carga poluidora é caracterizada pela diminuição da emissão de cor, acidez, teores de cloretos, sólidos suspensos, demanda química de oxigênio (DQO), demanda biológica de oxigênio (DBO), cloro orgânico total (TOCl), toxidez e mutagenicidade do efluente (KUTNEY; HOLTON; MANOIR, 1984). Segundo McKague, Shen e Reeve (1998), a concentração de AOX no branqueamento de polpas de fibra longa com cloro e dióxido de cloro varia entre 3,7-6,8, e 0,9-1,7 kg/t.a.s., respectivamente.

A deslignificação com oxigênio objetiva reduzir o teor de lignina residual da polpa antes da entrada no branqueamento, resultando em menor consumo de cloro ativo. O efluente da deslignificação é enviado para o ciclo de recuperação do licor negro, resultando em menor carga orgânica no efluente que vai para a estação de tratamento. A deslignificação com oxigênio é vista como uma das melhores alternativas para reduzir a carga poluente de uma planta de branqueamento. Germgard e Larsson (1983) observaram que a utilização do estágio com oxigênio conseguiu reduzir

aproximadamente 50% da DQO destinada ao tratamento externo; essa carga reduziu de 29 kg O₂/t.a.s. para 18 kg O₂/t.a.s., para polpas de fibra curta.

Apesar da significativa melhoria na qualidade do efluente, a indústria de celulose ainda tem grande interesse em reduzir o consumo de dióxido de cloro durante o branqueamento ECF, devido às novas legislações ambientais, cada vez mais rígidas e aos altos custos de instalação da planta de produção de dióxido de cloro.

Recentemente, descobriu-se que os ácidos hexenourônicos (HexA's) são responsáveis por significativo consumo de dióxido de cloro durante o branqueamento de polpa kraft de fibra curta (JIANG; LIEROP; BERRY, 2000).

Os ácidos hexenourônicos são formados durante o cozimento kraft pela conversão parcial dos grupos de ácido 4-O-metil-D-glucurônico em grupos de ácido 4-deoxihex-4-enurônico (ácidos hexenourônicos - HexA's), via β-eliminação de metanol (BUCHERT et al., 1997). Portanto, a remoção destes ácidos da polpa resulta em uma redução do consumo de dióxido de cloro durante o branqueamento (VUORINEN et al., 1996), proporcional ao teor de HexA's removido. Jiang, Lierop e Berry (2000) verificaram que cerca de 5,5 mmol/100g de HexA's seriam responsáveis pelo consumo de 11 mmol ClO₂/100g de polpa kraft convencional de bétula. Costa (2001), estudando o consumo de dióxido de cloro devido a cada fração do número kappa no branqueamento de polpa kraft de eucalipto pela seqüência DEDD, verificou que 42,3% do dióxido é consumido pelo HexA's e 41,7%, pelo complexo lignina carboidrato e lignina residual. Logo, as indústrias de celulose kraft branqueada de eucalipto têm grande interesse nos estudos sobre tecnologias industriais para a remoção de HexA's.

A hidrólise ácida é a principal alternativa comercial para reduzir o teor de ácidos hexenourônicos da polpa antes do branqueamento (VUORINEN et al., 1996, 1999; HENRICSON, 1997; RATINIEKS et al., 1997).

Henricson (1997) indica a condição de pH= 3,0-3,5, 120 min e 90-95 °C como adequada para remover os ácidos hexenourônicos da polpa de celulose num estágio designado de hidrólise ácida (A).

Silva (2001), estudando a otimização da hidrólise ácida, concluiu que

as condições ideais para se realizar o estágio de hidrólise ácida em um único estágio para a polpa kraft de eucalipto estudada são pH 3,0, 95 °C e 120 minutos.

Inicialmente, a hidrólise ácida foi sugerida no início da seqüência de branqueamento seguida de lavagem da polpa.

A hidrólise ácida seguida de lavagem da polpa no início da seqüência ECF com estágio inicial de dióxido de cloro convencional caracterizou a tecnologia AD. O efeito da inclusão da hidrólise ácida antes do estágio inicial de dióxido de cloro convencional com lavagem intermediária (tecnologia AD) na redução do consumo de dióxido de cloro está muito bem registrado na literatura (VUORINEN et al., 1996; FURTADO; EVTUGUIN; GOMES, 2000; COSTA, 2001).

Vuorinen et al. (1996) reportaram que o branqueamento de polpa kraft-O₂ de bétula pelas seqüências DED e ADED consumiu 16 e 10,3 kg ClO₂/ t.a.s. polpa, respectivamente. Furtado; Evtuguin; Gomes (2000) citaram que para o branqueamento de polpa kraft de *Eucalyptus globulus* pela seqüência DEDED, a inclusão da hidrólise ácida no início da seqüência resultou em redução de 6,0 kg ClO₂/t.a.s. de polpa. Costa (2001) reportou que a inclusão da hidrólise ácida no início da seqüência D(EOP)D(PO) reduziu o consumo em 5,64 kg ClO₂/t.a.s.de polpa.

No entanto, a lavagem entre os estágios A e D é considerada desnecessária devido à baixa reatividade entre o dióxido de cloro e os produtos da hidrólise ácida (VOURINEN et al., 1997) e ao fato de a lavagem não reduzir a demanda de reagentes químicos ou aumentar a branqueabilidade da polpa (HENRICSON, 1997). Adicionalmente, a inclusão da lavagem resulta em maior custo de investimento, pois requer uma torre e um lavador adicional, conforme ilustra a Figura 1.

Baseado nesses princípios, foi sugerido que o dióxido de cloro poderia ser adicionado ao final do estágio de hidrólise ácida, caracterizando a tecnologia A/D* - hidrólise ácida seguida de dióxido de cloro em alta temperatura sem lavagem intermediária da polpa, com o tempo de reação total do estágio de hidrólise ácida dividido entre A =90min e D*= 30 min (HENRICSON, 1997; VUORINEN et al.,1996).

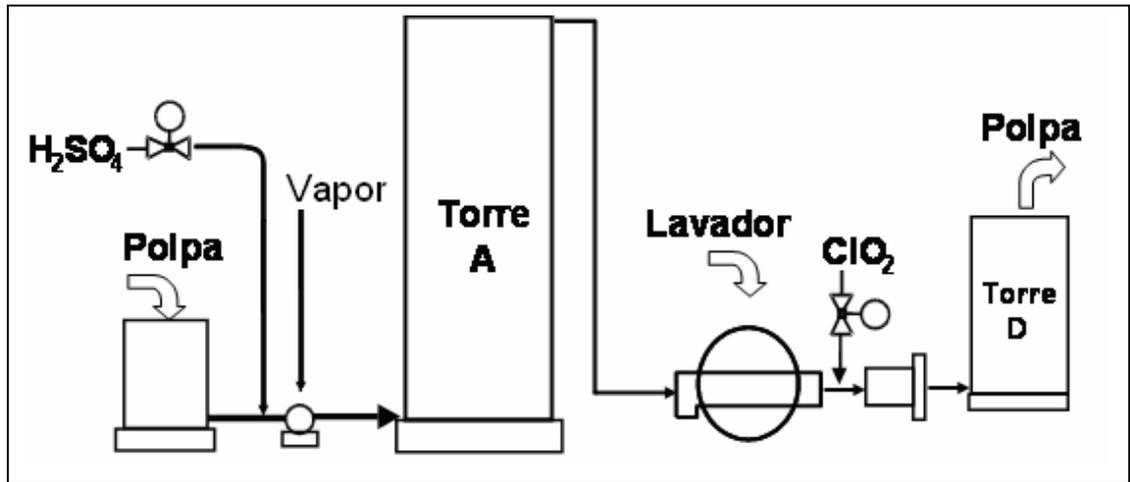


Figura 1 – Representação esquemática da instalação da tecnologia AD industrial

A tecnologia A/D* possui menor custo de instalação, quando comparada com a AD, pois não requer um lavador entre as torres do estágio de hidrólise ácida e de dióxido de cloro em alta temperatura, conforme ilustra a Figura 2.

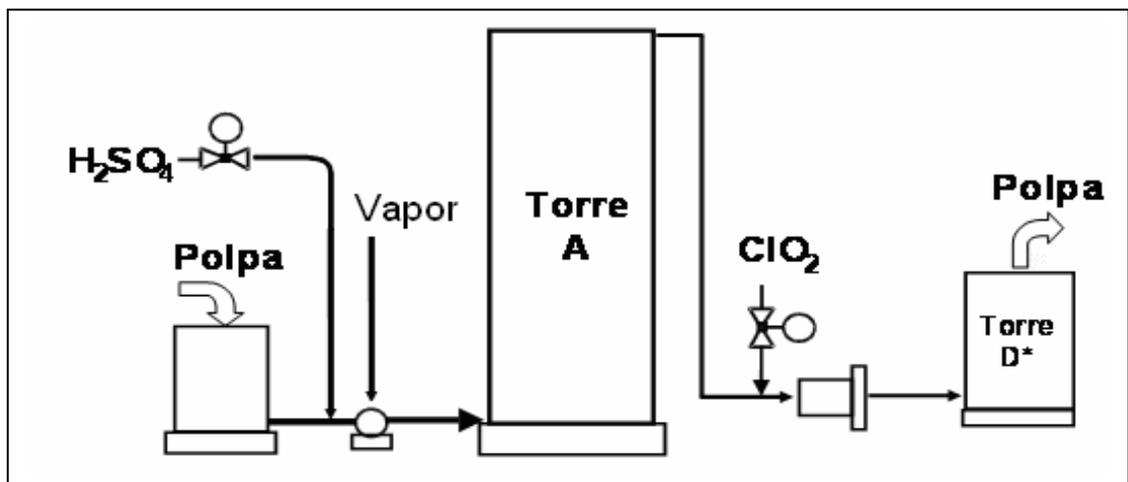


Figura 2 – Representação esquemática da instalação da tecnologia A/D* industrial

Henricson (1997), comparando os tratamentos A/D* e AD, verificou que a lavagem entre os estágios não afetou o consumo de reagentes, nem a

branqueabilidade da polpa, além de resultar em maior custo de investimento, pois requer um lavador. O autor afirma que o material orgânico formado no estágio ácido não consome dióxido de cloro. Esta afirmação é contrária à de Eiras (2002) que, realizando teste de reatividade do filtrado do estágio ácido (sem polpa) com o dióxido de cloro, concluiu que uma fração significativa do dióxido é consumida em reações com os produtos da hidrólise ácida.

Posteriormente, foi sugerido que o dióxido de cloro poderia ser adicionado no início do estágio de hidrólise ácida, caracterizando o estágio de dióxido de cloro em alta temperatura (tecnologia D*), com tempo de reação do estágio D*=120 min (LACHENAL, CHIRART, VIARDIN, 1998 e CHIRAT, 1999). A tecnologia D* baseia-se no princípio de a reação do dióxido com a lignina ser mais rápida do que com os ácidos hexenourônicos (LACHENAL; CHIRART; VIARDIN, 1998). Portanto, após a reação do dióxido de cloro com a lignina nos primeiros minutos, os HexA's são removidos por hidrólise ácida a quente no longo tempo remanescente (EIRAS, 2001). Esta tecnologia possui menor custo de instalação em relação às AD e A/D*, pois requer apenas uma torre de branqueamento, conforme ilustra a Figura 3.

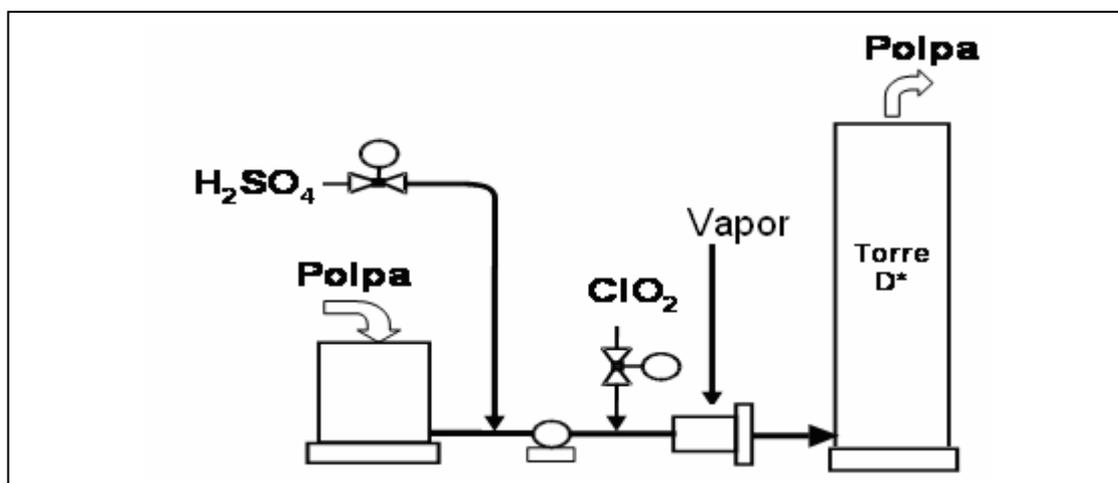


Figura 3 – Representação esquemática da instalação da tecnologia D* industrial

Ragnar (2004), comparando as seqüências de branqueamento D(OP)D, A/D*(OP)D, D*(OP)D e AD(OP)D, concluiu que a presença do ácido 2-furóico entre outros produtos similares provenientes da hidrólise dos HexA's é prejudicial ao branqueamento com dióxido de cloro, pois eles consomem parte do dióxido de cloro, formando estruturas organocloradas. Um modo de resolver este problema é lavar a polpa entre o estágio A e D (tecnologia AD) ou operar os dois processos simultaneamente (tecnologia D*).

Ragnar e Lindstrom (2004), comparando o tratamento ácido e a dioxidação em alta temperatura, reportaram que o tratamento ácido seguido de estágio de dioxidação convencional com lavagem intermediária da polpa (tecnologia AD) é uma excelente alternativa para economizar dióxido. Porém, o estágio de dióxido de cloro em alta temperatura (D*) consome menos ClO_2 que a tecnologia AD, além de resultar em polpa com maior estabilidade de alvura e efluente com menor teor de AOX. Previamente, Costa e Colodette (2001) e Eiras e Colodette (2003) já haviam reportado que o efluente do D* contém cerca da metade do AOX encontrado no estágio D convencional.

Eiras (2002), comparando as seqüências de branqueamento D Eop(DnD), A/D*Eop(DnD), D* Eop(DnD) e AD Eop(DnD), observaram que a economia de ClO_2 no estágio D* foi de 11% e no AD foi de 20,75% em relação ao estágio D convencional. Os autores concluíram que a reduzida economia de ClO_2 no D* foi causada pelo consumo de ClO_2 pelos produtos da hidrólise de HexA's.

Ventorim (2004) afirma que a realização do estágio ácido na presença de dióxido de cloro (tecnologia D*) é pouco efetiva do ponto de vista da cinética química, pois o dióxido de cloro reage primeiro e rapidamente com os ácidos hexenourônicos, diminuindo o benefício da hidrólise ácida que ocorre simultaneamente. A tecnologia AD é aparentemente mais atrativa, visto que o dióxido de cloro não reage com os ácidos hexenourônicos, pois estes já foram hidrolisados pelo ácido sulfúrico e removidos pela lavagem. Entretanto, se a tecnologia AD for praticada como tem sido sugerido, sem lavagem intermediária (A/D*), o dióxido de cloro termina por reagir com a matéria orgânica proveniente do estágio de hidrólise ácida, apresentando

resultados de branqueamento também pouco favoráveis. Contudo, caso haja uma lavagem intermediária entre o estágio de hidrólise ácida e uma dioxidação, AD, o resultado do branqueamento torna-se atrativo, acompanhando a projeção da cinética química

2.1. Reatividade da lignina e do HexA's durante a hidrólise ácida

Os ácidos hexenourônicos contêm grupos funcionais de enol-éter ou de ácidos carboxílicos alfa, beta-insaturados, em destaque na Figura 4, que influenciam sua estabilidade e reatividade (JIANG; LIEROP; BERRY, 2000).

Em geral, ambos os grupos são inertes sob condições ligeiramente ácidas. Sob fortes condições ácidas, os grupos de enol-éter sofrem hidrólise rápida, levando à formação de aldeído ou cetona e álcool. Os grupos dos ácidos hexenourônicos são também alvos tanto do ataque eletrofílico como do nucleofílico (Volhardt; Schore, 1994; citados por JIANG; LIEROP; BERRY, 2000).

Henricson (1997), avaliando o efeito do pH da hidrólise ácida, observou que a remoção de ácidos hexenourônicos aumenta com a redução do pH, atingindo um nível máximo em 3,0.

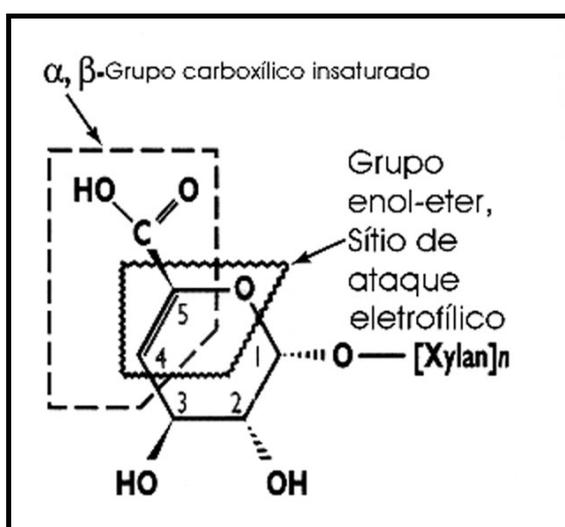


Figura 4 - Grupos funcionais dos HexA's (JIANG; LIEROP; BERRY, 2000).

Os produtos da degradação ácida dos ácidos hexenourônicos são os ácidos 2-furóico, fórmico e 5-formil-2-furóico, que são apresentados na Figura 5, sendo a constante de formação de ácido 2-furóico sete vezes maior que a de formação de ácido 5-formil-2-furóico (TELEMAN et al., 1996).

Vuorinen et al. (1996) verificaram que os dois principais produtos identificados nos filtrados de um estágio ácido foram o ácido 2-furóico e 5-formil-2-furóico, derivados da degradação dos HexA's. Não foram identificados produtos de degradação da lignina, confirmando que a queda do número kappa durante a hidrólise ácida, causada pela degradação dos HexA's presentes nas xilanas, e não pela remoção da lignina. A quantidade de derivados furanos produzidos durante a hidrólise ácida da polpa correspondeu diretamente à diminuição do número kappa, tanto nas polpas marrons quanto nas polpas pré-deslignificadas com O₂. No entanto, durante a hidrólise ácida, ocorre modificação da lignina.

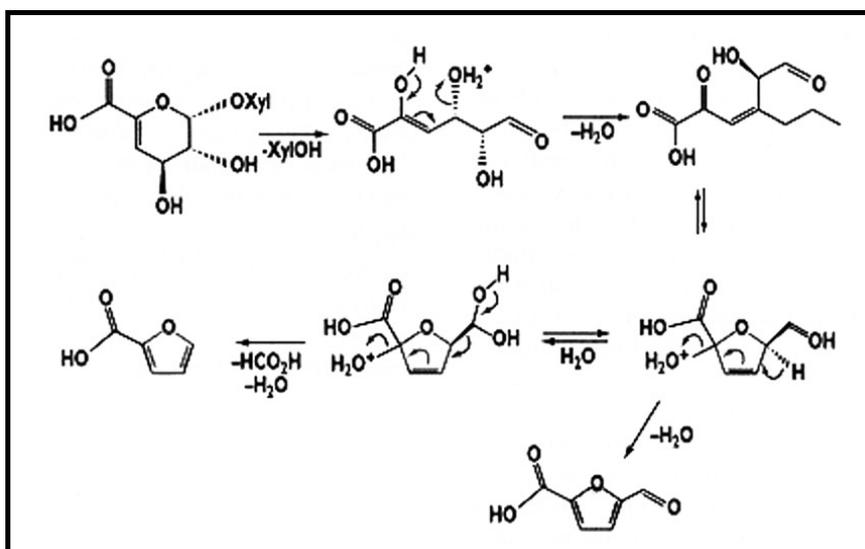


Figura 5 – Mecanismo proposto por Teleman et al. (1996) para a degradação ácida dos ácidos hexenourônicos em ácidos fórmico, 2-furóico e 5-formil 2-furóico.

Furtado; Evtuguin; Gomes (2000) relataram que a redução da branqueabilidade da polpa era atribuída às reações de condensação da lignina em meio ácido.

Uchida, Miura e Iwasaki. (1999) relataram que a hidrólise ácida da polpa aumenta o conteúdo de grupos fenólicos livres da lignina residual presente na polpa. Em razão dessa alteração química da lignina, a polpa pré-tratada com ácido responde melhor ao branqueamento com dióxido de cloro.

Ventorim (2004), estudando a reatividade da lignina e dos HexA's com o ácido sulfúrico, verificou que na polpa marrom, a velocidade da reação do ácido sulfúrico com a lignina foi 1,2 vezes maior que com os ácidos hexenourônicos, enquanto na polpa deslignificada com oxigênio foi 2,44 vezes maior. Segundo o autor, esse resultado é surpreendente, já que o estágio de hidrólise ácida possui como principal função a remoção dos ácidos hexenourônicos.

2.2. Reatividade da lignina e dos HexA's durante o estágio de dióxido de cloro

O dióxido de cloro reage com a lignina por oxidação, tendo como resultado a formação de ácidos carboxílicos que são altamente hidrofílicos, sendo removidos na etapa posterior de extração (Figura 6) (SPENGEL et al., 1994). Entretanto, durante a reação do dióxido com a polpa, há a formação de ácido hipocloroso (HClO), o qual é parcialmente convertido em cloro elementar (Cl_2) por hidrólise. A formação de HClO está diretamente relacionada com o valor de pH, pois, quanto menor for este valor, maior será a sua presença e, conseqüentemente, maior a quantidade de Cl_2 .

O cloro elementar reage com a lignina através de reações de substituição aromática, deslocamento eletrofílico e oxidação. Na reação de substituição aromática durante a etapa de cloração, podem ocorrer até quatro unidades de cloro por unidade fenólica de lignina, no caso de ligninas do tipo p-hidroxifenil propano (Figura 6 - modelo I). Já a reação de deslocamento eletrofílico ocorre durante a cloração no carbono 1, havendo separação das porções aromáticas e alifáticas da lignina, levando à

formação de aldeídos de dois ou três átomos de carbono, cetonas e ácidos carboxílicos. Na reação de oxidação, podem ocorrer até três unidades de cloro por unidade fenólica de lignina, como no caso da lignina do tipo siringila (Figura 6 - modelo III), presente nas madeiras de folhosas. Essa reação de oxidação ocasiona formação de uma ortobenzoquinona instável, que pode ser reduzida, formando o respectivo catecol, ou então oxidada, para formar ácidos dicarboxílicos.

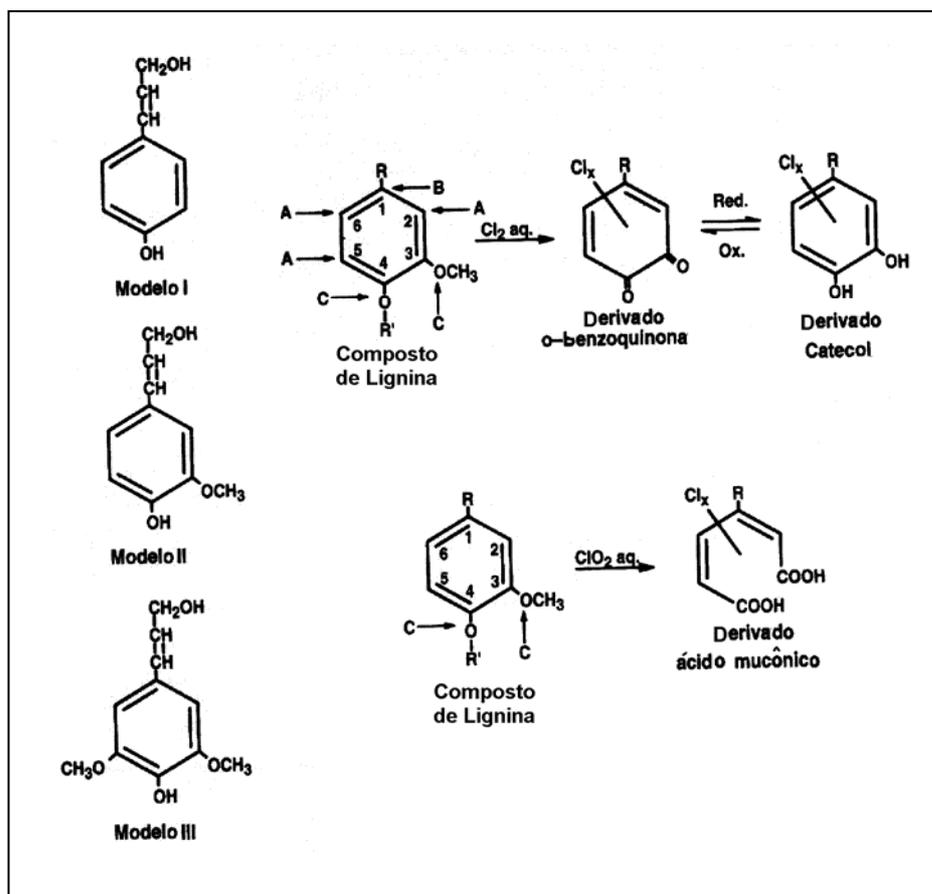


Figura 6 - Reação com o cloro e dióxido de cloro, em que A – substituição aromática; B – deslocamento eletrofilico; e C – oxidação (SPENGEL et al.,1994).

Estudos conduzidos por Bergnor-Gidnert; Tomani; Dahlman (1998) demonstram que no branqueamento com dióxido de cloro ocorre hidrólise de

HexA's das xilanas presentes na superfície e no interior das paredes das fibras.

Os ácidos hexenourônicos são degradados pelo dióxido de cloro (BUCHERT et al. 1995; TÖRNGREN; GELLERSTEDT, 1997), porém, de maneira indireta, pois o dióxido dá origem ao cloro e ao ácido hipocloroso durante o branqueamento. Estes últimos oxidam os HexA's, dando origem a produtos tais como ácidos dicarboxílicos clorados e não-clorados. Os principais são os ácidos tetrárico, pentárico, 2-cloro-2-deoxipentárico e 3-deoxi-3,3-dicloro-2-oxohexárico (VUORINEN et al., 1997), conforme apresentado na Figura 7. De forma geral, a soma desses compostos corresponde, estequiometricamente, à quantidade de HexA's consumida durante a reação com o dióxido de cloro.

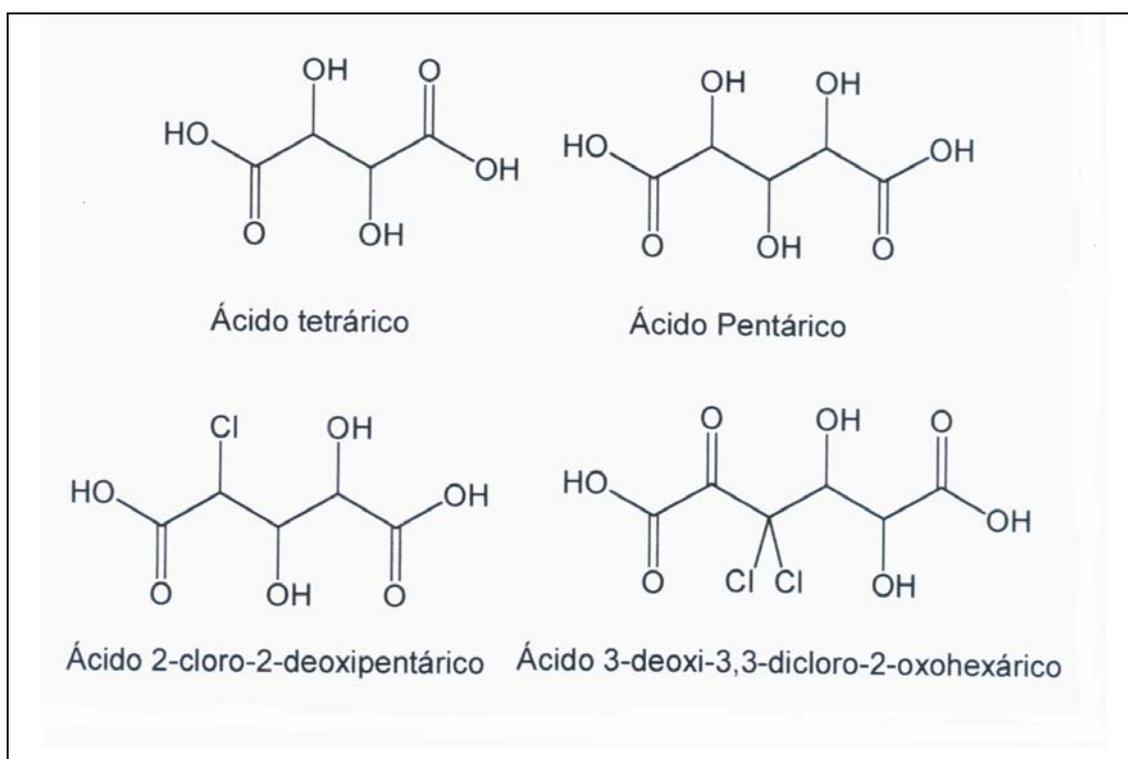


Figura 7 – Produtos da reação do dióxido de cloro com os ácidos hexenourônicos (VUORINEN et al., 1997).

Os ácidos dicarboxílicos clorados são formados comumente em valores mais baixos de pH, típicos do primeiro estágio de dioxidação. O alto

pH favorece a hidroxilação em detrimento da cloração. O aumento do pH não somente decresce o conteúdo total de ácidos dicarboxílicos, como também reduz a proporção de produtos diclorados e monoclorados (VUORINEN et al., 1997).

Törngren e Ragner (2002) concluíram que o dióxido de cloro apresenta certa reatividade com os HexA's, mas esta reação é cineticamente impossível no estágio D₀, pois a taxa de reação do dióxido de cloro com a lignina é mais rápida do que com os HexA's. Nos estágios D₁ e D₂, devido ao menor conteúdo de lignina, ocorre eficiente degradação dos HexA's pelo dióxido de cloro

Esta conclusão não está inteiramente de acordo com Ventorim (2004), que relatou ser a velocidade de reação do dióxido de cloro (no estágio de dioxidação convencional) com a lignina apenas 2,2 e 2,05 vezes maior que com os HexA's, para polpas de eucalipto marrom e deslignificada com oxigênio, respectivamente. Segundo o autor, assumindo-se que o dióxido de cloro como tal não reaja diretamente com os ácidos hexenourônicos, era esperada maior diferença de velocidade entre a lignina e os ácidos hexenourônicos. Aparentemente, uma fração muito significativa do dióxido de cloro é convertida em cloro e ácido hipocloroso no estágio de dioxidação, os quais reagem indiscriminadamente com a lignina e com os ácidos hexenourônicos.

2.3. Efluentes do branqueamento com as tecnologias D, D*A/D* e AD

Em razão de as tecnologias de branqueamento com hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura serem recentes, existem poucos estudos sobre seu impacto nos efluentes líquidos do branqueamento no que tange ao aumento ou não da carga poluente e em relação à tratabilidade. As informações existentes são esparsas e não permitem conclusões definitivas (SOUZA, 2001; SOUZA et al., 2002; EIRAS; COLODETTE, 2003; COSTA, 2001; RAGNAR, 2004; VENTORIM; COLODETTE; EIRAS, 2005)

O branqueamento é a principal fonte de poluição hídrica na indústria de celulose, podendo atingir valores superiores a 60% da carga orgânica do efluente da indústria. A matéria orgânica proveniente do branqueamento

consiste da degradação e dissolução da lignina residual, das hemiceluloses e dos extrativos (HEIMBURGER, 1988).

A carga de poluidora do efluente do branqueamento é avaliada por procedimentos padronizados para quantificar a demanda química de oxigênio, a demanda bioquímica de oxigênio, o carbono orgânico total (COT), os halógenos orgânicos adsorvidos em carvão ativado (AOX) e a cor do efluente.

As tecnologias para a remoção dos HexA's têm sido intensamente estudadas na última década (COSTA, 2001; RAGNAR, 2002; EIRAS; COLODETTE, 2003; RAGNAR; LINDSTROM, 2004; RAGNAR, 2004). Nestes estudos, o foco principal tem sido o efeito dessas tecnologias na estabilidade da alvura e na redução dos reagentes químicos e dos custos de branqueamento. Pouca atenção foi dedicada à caracterização e tratabilidade do efluente.

O COT indica a quantidade de matéria orgânica no efluente através de uma medição direta. A DQO representa o teor de matéria orgânica total, sendo que a diferença entre o valor da DQO e DBO representa o teor de matéria orgânica resistente à biodegradação. O efluente das seqüências com hidrólise ácida e dióxido de cloro em alta temperatura possui maior carga orgânica em relação ao dióxido de cloro convencional (EIRAS; COLODETTE, 2003; COSTA, 2001), conforme pode ser observado nos Quadros 1 e 2.

Quadro 1 – DQO e COT do efluente combinados no processo de branqueamento pelas tecnologias D e D* (EIRAS; COLODETTE, 2003)

Características/ Seqüências	DQO, kg O₂/t.a.s. polpa	COT, kg C/ t.a.s. polpa
DEopD	8,15	14,0
D*EopD	11,04	17,4

Quadro 2 – DQO e DBO₅ do efluente combinados no processo de branqueamento pelas tecnologias D, D* e AD (COSTA, 2001)

Características/ Sequências	DQO, kg O₂/t	DBO₅, kg O₂/t	DBO₅/DQO Biodegradabilidade
D(EOP)D(PO)	37,7	10,4	0,27
D*(EOP)D(PO)	38,1	16,8	0,44
AD(EOP)D(PO)	44,5	14,8	0,33

Segundo Lachenal, Chirart e Viardin (1998) e Ragnar (2004), as condições de longo tempo e alta temperatura do estágio D* permitem degradar parte dos ácidos hexenourônicos, como também afetam parte da estrutura da lignina. De fato, os produtos da degradação ácida dos HexA's são ácidos orgânicos que podem ser quantificados pela análise de DQO, DBO₅ ou COT.

Souza (2001) observou que o efluente do A* possui carga orgânica mais elevada que o do D*, devido à maior eficiência de remoção de HexA's no estágio A em relação ao D*.

A biodegradabilidade ou tratabilidade biológica de um efluente pode ser indicada em termos da relação DBO₅/DQO. Quando esta relação se aproxima de um, mais fácil é a tratabilidade biológica do efluente em questão. Normalmente, quando a relação DBO₅/DQO de um efluente é menor que 0,3, a eficiência do tratamento biológico pode ser comprometida (METCALF & EDDY, 2003).

Costa (2001) encontrou maior biodegradabilidade nos efluentes das seqüências com hidrólise ácida e dióxido de cloro em alta temperatura em relação ao dióxido de cloro convencional, conforme pode ser observado no Quadro 2. A tratabilidade biológica de efluentes da indústria de celulose kraft (DBO₅/DQO) normalmente varia entre 0,3 e 0,6. Evidentemente, para os efluentes tratados por processo biológico, esta relação decresce consideravelmente, chegando a valores de 0,03, ou seja, ocorrem valores de DQO 30 vezes maiores do que os de DBO₅ (SPRINGER, 1993).

Os sistemas de tratamento biológico de fábricas de celulose kraft conseguem atingir reduções médias acima de 90% da DBO₅, mas apenas uma eficiência de 40 a 70% para a remoção da DQO é conseguida. Estas menores eficiências na redução da DQO acontecem justamente porque uma fração significativa do material orgânico presente nos efluentes das fábricas de celulose kraft não é biodegradável (HEIMBURGER, 1998; BRYANT, 1992; HALL; RANDLE, 1992; GRAVES; JOYCE, 1994).

Souza (2001) verificou que o efluente bruto da mistura D*(EOP)DP e A(EOP)D(PO) apresentou menor DQO e pior tratabilidade que o D(EOP)DD.

A quantidade de organoclorados total no efluente, medida pelo AOX, é um parâmetro de controle de operações em plantas de branqueamento. No entanto, com exceção dos compostos clorofenólicos com alto grau de substituição com cloro, como a dioxina (2,3,7,8 tetraclorodibenzo-p-dioxina), poucos outros compostos, entre os mais de 400 já identificados, presentes nos efluentes de branqueamento, são comprovadamente tóxicos (McKAGUE; CARLBERG, 1996; McDONOUGH, 1998).

A redução do AOX no efluente das seqüências de branqueamento com hidrólise ácida e dióxido de cloro em alta temperatura tem sido reportada na literatura (COSTA, 2001; RAGNAR, 2004; EIRAS, 2002). No branqueamento de polpa kraft-O₂ de eucalipto por seqüências com as tecnologias D* e AD, o teor de AOX no efluente combinado foi de aproximadamente 35,9 e 11,3% menor (COSTA, 2001) ou 49,2 e 15,3% menor (RAGNAR, 2004), respectivamente, em relação ao branqueamento com a tecnologia D.

Eiras (2002) encontrou teor de AOX no efluente de branqueamento de polpa kraft-O₂ de eucalipto pela seqüência D*EOPD 36,4% menor em relação à seqüência DEOPD.

Nas condições de longo tempo e alta temperatura do estágio D*, parte do AOX formado é degradado. A diferença entre D*(EOP)D e (AD)*(EOP)D é causada pelo tempo mais longo de degradação dos organoclorados no D*(120 min.) que no (AD)* (30 min.) (RAGNAR, 2004; VENTORIM; COLODETTE; EIRAS, 2005).

Souza (2001) verificou que o efluente bruto da mistura D*(EOP)DP e A(EOP)D(PO) apresentou menor teor de AOX e pior tratabilidade que o D(EOP)DD.

Segundo Springer (1993), o grau de eficiência para remoção de compostos organoclorados em sistemas de tratamento secundário pode ficar entre 50 e 100%. A fração de AOX com $MM < 1000$ é mais rapidamente degradada do que a fração com $MM > 1000$ (BRYANT, 1992; DAHLMAN et al., 1995).

A remoção de AOX é obtida por adsorção no lodo, hidrólise de moléculas grandes, biodegradação microbiana e oxidação por ar. A volatilização e oxidação por ar são consideradas independentes do contato celular. A maioria do AOX presente no efluente bruto é rapidamente absorvida após entrar em contato com o lodo. O restante do AOX é então, gradualmente removido do efluente bruto por oxidação por ar e por biodegradação. Supõe-se que na planta de tratamento uma parte do AOX absorvido é oxidado pelos microrganismos, e o restante removido junto ao excesso de lodo, representando o AOX removido por absorção (NOLASCO, 1997).

O AOX de alto peso molecular resiste ao tratamento biológico e é considerado não tóxico, por não ser absorvido por organismos aquáticos. Este material pode ser degradado ou se precipita no corpo d'água, onde persiste nos sedimentos (PAASIVIRTA et al., 1998). A degradação microbiana do material organoclorado de alto peso molecular pode gerar veratróis e anisóis clorados que são rapidamente absorvidos nos tecidos de organismos aquáticos. As dioxinas persistem nos sedimentos, mas os níveis lançados nos corpos receptores pela indústria de celulose atualmente são muito inferiores aos de outras fontes industriais (USEPA, 2000).

A cor do efluente se deve à presença de material polimerizado e refratário à biodegradação, principalmente derivados da lignina (SPRINGER, 1993). Além do aspecto estético, a cor pode ser prejudicial à biota do corpo receptor pela redução da transmissão de luz na coluna d'água (McKAGUE; CARLBERG, 1996).

O efluente do branqueamento de polpa kraft de eucalipto pela seqüência D*EopD (35,1 kg Pt/t) apresentou cor 19,5% mais nítida em relação ao DEopD (14,0 kg Pt/t) (EIRAS, 2002).

O efluente do branqueamento de polpa kraft de eucalipto pelas seqüências AD(EOP)D (35,1 kg Pt/t) apresentou cor 12,5% mais nítida em relação ao D(EOP)DD (30,7 kg Pt/t) (COSTA, 2001).

O efluente do branqueamento de polpa kraft de eucalipto pelas seqüências D*(EOP)D(PO) (33,8 kg Pt/t) AD(EOP)D(PO) (51,4 kg Pt/t). apresentou cores 19,2 e 46,9% mais nítidas, respectivamente, em relação ao D(EOP)D(PO) (27,3 kg Pt/t) (COSTA, 2001).

A cor do efluente normalmente permanece inalterada ou pode até aumentar sua concentração no tratamento, em razão da formação de novos cromóforos resultantes da oxidação parcial da matéria orgânica (SPRINGER, 1993; McKAGUE; CARLBERG, 1996).

A distribuição da massa molecular da matéria orgânica é uma característica importante do efluente, uma vez que tem-se observado que os compostos orgânicos de AMM, sobretudo aqueles com peso superior a 1000 Daltons (como as cloroligninas), constituem a principal fonte de DQO, AOX e cor dos efluentes tratados pelos processos biológicos convencionais (ARCHIBALD; ARCAND, 1995, KRINGSTAD; LINDSTROM, 1984, LEUENBERGER et al., 1985). Já uma grande parte da matéria orgânica de BMM é removida dos efluentes através do tratamento biológico (SPENGEL et al., 1994; ARCHIBALD; ARCAND, 1995).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

Foram utilizadas duas polpas kraft de eucalipto pré-deslignificadas com oxigênio (kraft-O₂), provenientes de duas indústrias. A polpa com DQO igual a 6,4 kg O₂/t.a.s. foi designada polpa de baixa DQO e a polpa com DQO igual a 25,5 kg O₂/t.a.s. foi designada polpa de alta DQO. As principais características das polpas são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Características iniciais das polpas

Parâmetros	Polpa Baixa DQO	Polpa Alta DQO
DQO, kg O ₂ /t.a.s. polpa	6,4	25,5
Nº kappa	10,5	11,9
Viscosidade, cP	16,4	23,3
Alvura, % ISO	56,6	36,7
HexA, mmol/kg	45,7	45,0

3.2. Métodos

O plano experimental seguiu as etapas seguintes: (I) branqueamento das polpas e a geração dos filtrados; (II) avaliação do branqueamento;

(III) caracterização dos efluentes estágio por estágio do pré-branqueamento e combinados do pré-branqueamento e da seqüência inteira do branqueamento; (IV) tratamento biológico dos efluentes e avaliação da eficiência do tratamento.

3.2.1. Etapa I: Branqueamento das Polpas e Geração dos Filtrados

As polpas de baixa e alta DQO foram branqueadas até 90% ISO pelas seqüências DEpD, D*EpD, A/D*EpD e ADEpD e até 89% ISO pelas seqüências DEpDD, D*EpDD, A/D*EpDD e ADEpDD, respectivamente. O teto de alvura foi conseguido pela otimização da dosagem de dióxido de cloro aplicada no último estágio de dioxidação das várias seqüências. Foram coletadas amostras combinadas de efluentes dos estágios DEp, D*Ep, A/D*Ep e ADEp e das seqüências completas para estudos de caracterização e tratamento biológico.

As condições operacionais utilizadas nos vários estágios de branqueamento são apresentadas nos Quadros de Condições e Resultados, do Apêndice A. As quatro tecnologias aplicadas ao primeiro estágio de branqueamento diferem entre si quanto ao tempo e temperatura de reação:

(1) Tecnologia D – estágio de dióxido de cloro convencional (60 °C e 30 min); (2) Tecnologia D* - estágio de dióxido de cloro em alta temperatura (95 °C e 120 min); (3) Tecnologia A/D* - estágio de hidrólise ácida seguido de dióxido de cloro em alta temperatura, sem lavagem intermediária da polpa (A: 95 °C e 120 min; D*: 90 °C e 15 min); e (4) Tecnologia AD - estágio de hidrólise ácida seguido de dióxido de cloro convencional, com lavagem intermediária da polpa (A: 95 °C e 120 min; D: 60 °C e 30 min).

Após cada um dos estágios, o filtrado foi extraído até a polpa atingir consistência de 35,0%. Foram medidos o pH final e o residual dos reagentes, e os filtrados foram armazenados à temperatura de 4 °C para posterior caracterização e tratamentos. Em seguida a polpa foi lavada com 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa seca e centrifugada até atingir consistência de 33,0%, o que corresponde a um fator de diluição igual a 6,97 m³/t.

Após o estágio Ep e ao final do processo, foram avaliados o número kappa, a viscosidade e a alvura da polpa. Ao final da seqüência de branqueamento, as polpas branqueadas foram avaliadas quanto à reversão de alvura e teor de ácidos hexenourônicos.

- **Hidrólise Ácida**

O estágio de hidrólise ácida foi efetuado em sacos de polietileno, com amostras de 300 g a.s. de polpa. Após a adição de água para ajuste da consistência e de ácido sulfúrico suficiente para ajuste do pH, a suspensão foi misturada manualmente, pré-aquecida em forno de microondas até a temperatura desejada e transferida para um banho de vapor termostatizado. Terminado o tempo de reação, o filtrado foi extraído por centrifugação da polpa e, em seguida, a polpa foi lavada com 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa seca e centrifugada até atingir consistência de 33,0%, o que corresponde a um fator de diluição igual a 6,97 m³/t.. Uma amostra do filtrado foi coletada para análise de pH e o restante foi armazenado em frascos de PET (polietileno tereftalato) sob refrigeração, à temperatura de 4 °C .

- **Branqueamento com Dióxido de Cloro Convencional (D₀, D₁ e D₂)**

Este estágio foi efetuado em sacos de polietileno com amostras de 300 (D₀) ou 250g a.s. de polpa (D₁ e D₂). Após a adição de água para ajuste da consistência e de suficiente ácido sulfúrico ou hidróxido de sódio para ajuste do pH, foi adicionada uma carga de dióxido de cloro pré-estabelecida. A necessidade de ácido sulfúrico ou hidróxido de sódio para controle de pH foi determinada em estudo prévio com mini-amostras de polpa. Após mistura manual, a amostra foi pré-aquecida em forno de microondas até a temperatura desejada e transferida para um banho de vapor termostatizado. Terminado o tempo de reação, o filtrado foi extraído da polpa por centrifugação e, em seguida, a polpa foi lavada com 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa seca e centrifugada até atingir consistência de 33,0%, o que corresponde a um fator de diluição igual a 6,97 m³/t.. Uma amostra do

filtrado foi coletada para análise de pH e residual de dióxido de cloro, e o restante foi armazenado em frascos de PET sob refrigeração, à temperatura de 4 °C.

- **Estágio de Hidrólise Ácida seguida de Dióxido de Cloro em Alta Temperatura (A/D*)**

Este estágio foi efetuado em sacos de polietileno com amostras de 300 g a.s. de polpa. Após a adição de água para ajuste da consistência e de suficiente ácido sulfúrico para ajuste do pH, a suspensão foi misturada manualmente, pré-aquecida em forno de microondas e transferida para um banho de vapor termostatizado. Terminado o tempo de reação da hidrólise ácida, foi adicionado hidróxido de sódio para ajuste do pH e pré-estabelecida a carga de dióxido de cloro. Terminado o tempo total de reação, o filtrado foi extraído por centrifugação da polpa e, em seguida, a polpa foi lavada com 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa absolutamente seca e centrifugada até atingir consistência de 33,0%, o que corresponde a um fator de diluição igual a 6,97 m³/t.a.s. Uma amostra do filtrado foi coletada para análise de pH e residual de dióxido de cloro, e o restante foi armazenado em frascos de PET sob refrigeração, à temperatura de 4 °C .

- **Branqueamento com Dióxido de Cloro em Alta Temperatura (D*)**

Este estágio foi efetuado em sacos de polietileno com amostras de 300 g a.s. de polpa. O pH inicial foi previamente ajustado com ácido sulfúrico e, posteriormente, foi adicionada uma carga dióxido de cloro pré-estabelecida. Após mistura manual, a amostra foi pré-aquecida em forno de microondas até a temperatura desejada e transferida para um banho de vapor termostatizado. Terminado o tempo de reação, o filtrado foi extraído por centrifugação da polpa e, em seguida, a polpa foi lavada com 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa absolutamente seca e centrifugada até atingir consistência de 33,0%, o que corresponde a um fator de diluição igual a 6,97 m³/t.a.s. Uma amostra do filtrado foi coletada para análise de pH e

residual de dióxido de cloro, sendo o restante armazenado em frascos de PET sob refrigeração à temperatura de 4 °C .

- **Extração Alcalina Simples (E)**

O estágio de extração alcalina simples foi feito em sacos de polietileno com amostras de 280 g a.s. de polpa. O licor de branqueamento, contendo água e hidróxido de sódio, foi adicionado à polpa. Após mistura manual, a polpa foi pré-aquecida em forno de microondas até a temperatura desejada e transferida para um banho de vapor termostatizado. Terminado o tempo de reação, o filtrado foi extraído por centrifugação da polpa e, em seguida, a polpa foi lavada com 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa absolutamente seca e centrifugada até atingir consistência de 33,0%, o que corresponde a um fator de diluição igual a 6,97 m³/t.a.s. Uma amostra do filtrado foi coletada para análise de pH, e o restante armazenado em frascos de PET sob refrigeração, à temperatura de 4 °C .

- **Extração Alcalina Reforçada com Peróxido de Hidrogênio(Ep)**

Este estágio foi realizado em sacos de polietileno com amostras de 280 g a.s. de polpa. O licor de branqueamento, contendo peróxido de hidrogênio, água e hidróxido de sódio, foi adicionado à polpa. Após mistura manual, a polpa foi pré-aquecida em forno de microondas até a temperatura desejada e transferida para um banho de vapor termostatizado. Terminado o tempo de reação, o filtrado foi extraído por centrifugação da polpa e, em seguida, a polpa foi lavada com 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa absolutamente seca e centrifugada até atingir consistência de 33,0%, o que corresponde a um fator de diluição igual a 6,97 m³/t.a.s. Uma amostra do filtrado foi coletada para análise de pH e residual de peróxido de hidrogênio, sendo o restante armazenado em frascos de PET sob refrigeração, à temperatura de 4 °C .

3.2.2. Etapa II: Avaliação do Branqueamento

- **Número kappa, Viscosidade e Alvura da Polpa**

A formação da folha para posterior determinação do número kappa, viscosidade e alvura seguiram os procedimentos analíticos da TAPPI (2002), conforme descritos a seguir:

Formação de folhas manuais.....	TAPPI T218 om 91
Número kappa.....	TAPPI um 245
Viscosidade.....	TAPPI T230 om 82
Alvura.....	TAPPI T525 om 86

- **Reversão da Alvura**

O valor de reversão da alvura foi determinado 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). Foi também calculado o número de cor posterior (NCP), conforme TAPPI TIS 017-10.

- **Conteúdo de Ácidos Hexenourônicos (HexA's)**

Realizou-se o preparo da amostra, conforme procedimento adaptado de Vuorinen et al. (1999).

A amostra de polpa, previamente acondicionada em sala com temperatura e umidade relativa constantes até atingir uma consistência de aproximadamente 90%, foi moída em moinho do tipo Willey e peneirada em peneira ASTM com tela de 40 meshes O material retido na peneira foi acondicionado em sala com temperatura e umidade relativa constantes.

Foram pesados 300 mg de amostra de polpa absolutamente seca, com precisão de 0,1 mg. Essa amostra foi transferida, quantitativamente, para um tubo de ensaio de cerca de 60 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro. Foram adicionados à polpa 3 mL de ácido fórmico 0,01N e pH3,5, previamente resfriado até a temperatura de 10-15 °C. Em seguida, a mistura

foi mantida em banho-maria à temperatura de $30 \pm 0,2$ °C por 60 minutos, sendo agitada freqüentemente com bastão de vidro. Terminado o tempo de reação, a mistura foi transferida, quantitativamente, para um frasco fechado hermeticamente. Os frascos foram transferidos para uma autoclave e mantidos à temperatura de 118 °C e pressão de 27 psi por 60 minutos. Terminado o tempo de reação, a mistura foi filtrada em membrana de celulose regenerada com porosidade de 0,45 µm. Em seguida, o filtrado foi transferido quantitativamente para um balão volumétrico de 250 mL e aferido.

A amostra, previamente preparada, foi analisada no espectrofotômetro de Ultra Violeta Visível, marca Varian, modelo Cary 50 Probe. Os HexA's foram determinados indiretamente pela medição dos ácidos 2-furóico no comprimento de onda de 245 nm da região UV do espectro.

Foi utilizado um padrão de ácido furóico como referência. A curva de calibração foi construída com ácido 2-furóico nas concentrações de 1, 5, 10, 40 e 60 µmol/L. A concentração do ácido hexenourônico foi calculada conforme a equação [1] apresentada a seguir.

$$[\text{HexA's, mmol/kg}] = (C/0,01076) * 0,9259 \quad [1]$$

em que:

C = concentração em µmol/L de ácido 2-furóico; e

0,01076 = declividade da curva

Fator 0,9259 = é o fator de transformação de µmol/L de ácido 2-furóico para mmol (HexA's)/kg de polpa.

- **Custo dos Reagentes Químicos**

O custo dos reagentes químicos foi calculado a partir das dosagens de reagentes aplicadas em cada estágio das várias seqüências, em kg/t.a.s de polpa branqueada, e nos preços de cada reagente em R\$ (Quadro 4).

Quadro 4 - Preços dos reagentes utilizados no branqueamento

Reagente Químico	Preço, R\$/kg
ClO ₂	2,73
H ₂ O ₂	2,00
NaOH	1,46
H ₂ SO ₄	0,32

3.2.3. Etapa III: Caracterização dos Efluentes

A partir dos filtrados de cada estágio do branqueamento, foram preparados os efluentes combinados do pré-branqueamento e combinados da seqüência inteira de branqueamento, conforme apresentados no Quadro 5. Os efluentes combinados foram misturados, levando-se em consideração a consistência do estágio. Todos os estágios foram realizados na consistência de 10 %. A única exceção foi o estágio A/D*, que, apesar de ter sido iniciado com consistência igual a 10% (estágio A), teve a média final de consistência de 7,8%, devido à adição de hidróxido de sódio e dióxido de cloro após 90 min de reação (estágio D*). Portanto, foram tomados volumes iguais dos filtrados de cada estágio para compor os efluentes combinados, exceto pelo efluente do estágio A/D*, para o qual tomou-se um volume 31% maior que o volume dos demais estágios (Quadros 1L e 2L, do Apêndice L).

Quadro 5 – Efluentes combinados dos pré-branqueamentos e combinados das seqüências de branqueamentos inteiras

Polpa Baixa DQO		Polpa Alta DQO	
Pré-branqueamento	Seqüência Inteira	Pré-branqueamento	Seqüência Inteira
DEp	DEpD	DE	DEpDD
D*Ep	D*EpD	D*E	D*EpDD
A/D*Ep	A/D*EpD	A/D*E	A/D*EpDD
ADEp	ADEpD	ADE	ADEpDD

As análises físico-químicas dos efluentes provenientes de cada estágio do pré-branqueamento, combinados do pré-branqueamento e combinados da seqüência inteira do branqueamento foram feitas seguindo os procedimentos analíticos descritos a seguir:

COT.....	Standard Methods, 2000.
DQO.....	Standard Methods, 2000.
DBO ₅	Standard Methods, 2000.
Cor.....	Standard Methods, 2000.
SSV.....	Standard Methods, 2000.
AOX.....	SCAN-W9:89

3.2.4. Etapa IV: Tratamento Biológico dos Efluentes

Os efluentes combinados do pré-branqueamento e combinados da seqüência inteira do branqueamento foram tratados em um sistema de lodos ativados em batelada laboratorial.

Os biorreatores foram constituídos de frascos de PET de 1000 mL, com um volume útil de 500 mL, submersos em banho termostaticado de água à temperatura de 28 ± 1 °C e equipados com difusores de ar para manter o oxigênio dissolvido entre 2-5 mg/L, conforme ilustra a Figura 8.

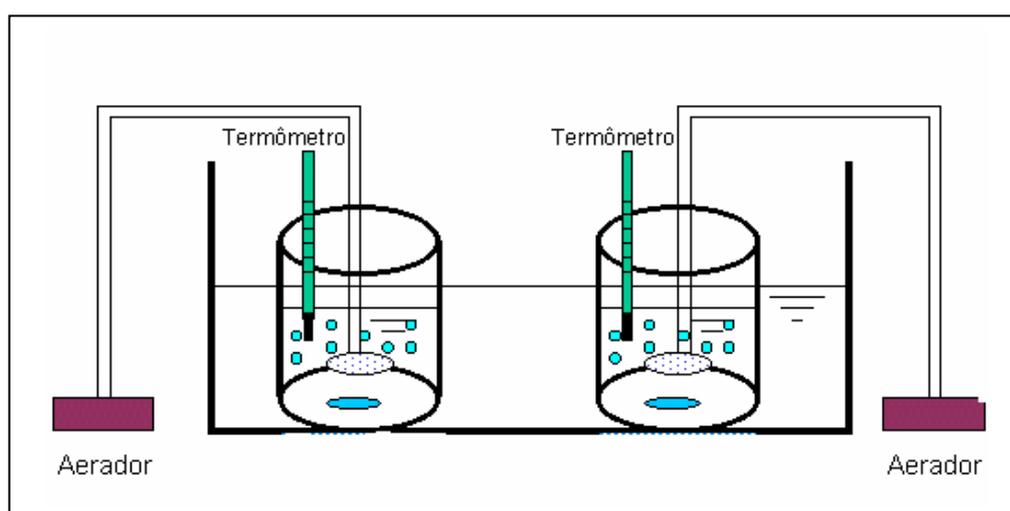


Figura 8 - Representação esquemática do sistema de lodos ativados em batelada laboratorial

Inicialmente, foi adicionado ao efluente, à temperatura ambiente, NaOH/H₂SO₄ para ajuste do pH entre 6,8 - 7,2 e (NH₂)₂CO/(NaH₂PO₄) como fonte de nitrogênio e fósforo, respectivamente, na proporção de DBO:N:P igual a 100:5:1.

Após aclimatação do lodo no laboratório, iniciou-se o tratamento dos filtrados. A quantidade decantada de filtrado e lodo, suficiente para manter a relação alimento/microrganismo (A/M) em torno de 0,30 mg DQO/mg SSV, foi transferida para o reator e mantida sob aeração e agitação constante por 22 horas. Terminado o tempo de reação, foram retiradas amostras da mistura para análises de DQO e SSV e descarte do lodo biológico. A mistura foi transferida para o decantador e permaneceu em sedimentação por 2 horas. Terminado o tempo de sedimentação, o efluente tratado foi coletado para análises de pH, DQO, DBO₅, COT, AOX e cor, e o lodo decantado foi transferido para o biorreator. Estas etapas caracterizam um ciclo de tratamento com duração de 24 horas. Os efluentes provenientes da polpa de baixa e alta DQO foram tratados em 13 e 10 ciclos, respectivamente. A eficiência do tratamento foi expressa pela remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e cor.

3.2.5. Análises Estatísticas

Os parâmetros avaliados no efluente foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Para os casos onde foram constatados a existência de diferença significativa ($P < 0,05$) entre as médias dos tratamentos, utilizou-se o Teste Tukey para testar todo e qualquer contraste entre as médias com nível de significância de 5%. Nos Quadros de resultados médios, em cada coluna, médias com a mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Branqueamento

Nos Quadros 1A-9A do Apêndice A, são mostradas as condições e os resultados experimentais (A e B) e médios dos branqueamentos de polpas de baixa (Quadros 1A-4A) e alta DQO (Quadros 5A-8A) pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD.

4.1.1. Consumo e Custo dos Reagentes Químicos

No Quadro 6 e nas Figuras 9 e 10 são apresentados os resultados de consumo dos reagentes químicos utilizados para o branqueamento das polpas de baixa e alta DQO pelas seqüências iniciadas com estágios D, D*, A/D* e AD, até a alvura de 89-90% ISO. Esse teto de alvura foi conseguido pela otimização da carga de ClO_2 aplicada no último estágio de dioxidação das várias seqüências. A demanda exata de cloro ativo total foi determinada por interpolação ou extrapolação, conforme apresentado nas Figuras 9 e 10.

A carga total de cloro ativo (CAT) utilizada para se obter a alvura desejada variou de 45,7-54,5 e 58,5-86,2 kg/t.a.s. para as polpas de baixa e alta DQO, respectivamente.

Para polpas com alta ou baixa DQO, comparando-se as seqüências iniciadas com D e AD, observa-se que o estágio de hidrólise ácida antes no início do branqueamento resulta em redução no CAT utilizado para se atingir a alvura desejada. Esta redução foi de 8,7% e 19,1% para as polpas de

baixa e alta DQO, respectivamente. Tal resultado é explicado pela remoção parcial dos HexA's da polpa pelo tratamento ácido e, no caso da polpa de alta DQO, também pela remoção parcial de DQO, pela dissolução de materiais orgânicos solúveis em meio ácido, especialmente aqueles ligados ao cálcio.

Comparando-se as seqüências iniciadas com AD e A/D*, observa-se que a omissão da lavagem intermediária da polpa resulta em aumento da demanda de CAT. Este aumento foi de 15,8% e 30,1% para polpas de baixa e alta DQO, respectivamente. Portanto, neste estudo, a lavagem intermediária entre os estágios A e D teve efeito positivo na minimização do consumo de reagentes químicos de branqueamento. Nota-se também que o estágio ácido (A) se torna prejudicial quando não se faz a lavagem da polpa, pois os consumos obtidos com o tratamento A/D* foram sempre maiores que os do tratamento de referência (D).

Para o branqueamento de polpas com baixa DQO, as seqüências iniciadas com estágio D* e AD apresentaram as menores demandas de CAT, 45,7 e 45,9 kg/t.s.a. de polpa, respectivamente, enquanto a seqüência iniciada com o A/D* apresentou a maior carga de CAT (54,5 kg/t.s.a polpa). Esta mesma tendência não ocorreu para polpa com alta DQO, em que a seqüência iniciada com AD apresentou a menor carga de CAT (58,5 kg/t.s.a. polpa), enquanto as seqüências iniciadas com D* e A/D* apresentaram as maiores demandas de CAT (86,2 e 83,7 kg/t.s.a., respectivamente). Estes resultados mostram que a remoção dos produtos da hidrólise ácida (A) antes do estágio de dioxidação é condição necessária para o bom funcionamento desta etapa. No caso das seqüências iniciadas com estágio AD, ocorreu uma remoção dos produtos da hidrólise ácida por lavagem, tornando essa seqüência mais eficiente. No caso da seqüência iniciada com estágio D*, os produtos da hidrólise ácida têm menos efeito no consumo de ClO₂, já que este oxidante é consumido rapidamente antes mesmo de os produtos da hidrólise ácida serem gerados. Em outras palavras, a taxa de reação do ClO₂ com a lignina é muito mais rápida que com os HexA's.

Para a polpa de alta DQO, o benefício adicional do estágio AD em relação ao D* derivou da lavagem intermediária que, além de minimizar o

consumo de cloro pelos produtos da hidrólise ácida, reduziu também o consumo de ClO_2 causado pela alta DQO da polpa.

Quadro 6 – Necessidade de reagentes químicos para branqueamento de polpa com baixa e alta DQO, pelas seqüências iniciadas com estágio D, D*, A/D* e AD

Parâmetros	¹ Polpa Baixa DQO				² Polpa Alta DQO			
	DEp D	D Ep D	A/D Ep D	ADEp D	DEp DD	D Ep DD	A/D*Ep DD	ADEp DD
³ ClO_2 c/ Cl_2 , kg/t.a.s. polpa	39,9	35,3	44,0	35,4	61,9	75,8	73,3	48,1
H_2O_2 , kg/t.a.s. polpa	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
H_2SO_4 , kg/t.a.s. polpa	0,5	0,5	6,0	6,5	7,0	6,5	14,1	14,1
NaOH, kg/t.a.s. polpa	11	11	15	15	12	10,5	22	15
⁴ CAT, kg/ t.a.s. polpa	50,3	45,7	54,5	45,9	72,3	86,2	83,7	58,5
⁵ Custo, R\$/t.a.s. polpa	67,6	62,9	79,5	70,7	94,0	106,1	122,7	86,3

¹ Características iniciais: Polpa kraft- O_2 com DQO=6,4 kg O_2 /t.a.s. /t; N° kappa=10,5; Visc.=16,4 cP e HexA's=45,7 mmol/kg.

² Carac. iniciais: Polpa kraft- O_2 com DQO=25,5 kg O_2 /t.a.s. /t; N° kappa=11,9; Visc.=23,3 cP e HexA's=45,0mmol/kg.

³ Calculado para alvura de 90% ISO (polpa baixa DQO) e 89% ISO (polpa alta DQO).

⁴ CAT, kg/t.a.s. polpa (Cloro Ativo Total) = ClO_2 c/ Cl_2 + (H_2O_2 * 2,09).

⁵ Custo, R\$/t.a.s. polpa = kg /t.a.s. de reagente * custo de reagente (R\$/kg), conforme Quadro 2

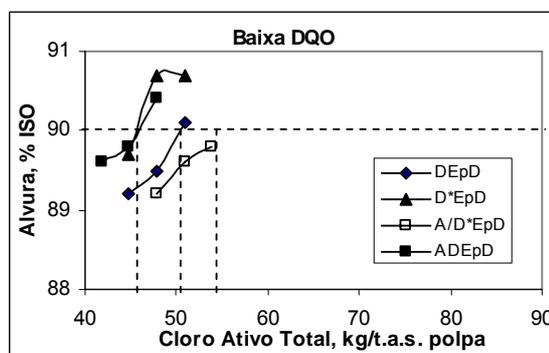


Figura 9 – Demanda de cloro ativo total para branqueamento de polpa com baixa DQO por várias seqüências

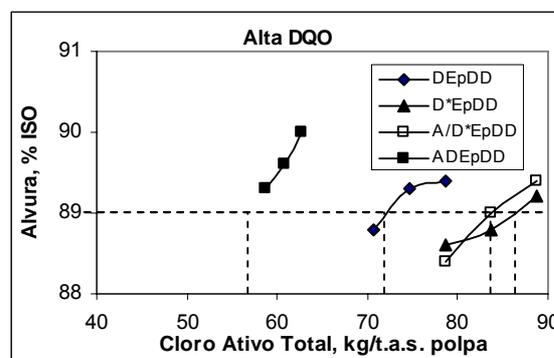


Figura 10 – Demanda de cloro ativo total para branqueamento de polpa com alta DQO por várias seqüências

No Quadro 6 e nas Figuras 11 e 12 são apresentados os valores médios de custo dos reagentes para o branqueamento de polpa com baixa e alta DQO pelas seqüências iniciadas com estágio D, D*, A/D* e AD, até

alvura de 89-90 %ISO. O custo dos reagentes químicos para obter o teto de alvura desejado variou de 62,9-70,7 e 86,3-122,7 R\$/t.a.s. para polpa com baixa e alta DQO, respectivamente. As seqüências iniciadas com A/D* apresentaram os maiores custos de reagentes químicos para as duas polpas estudadas. Este resultado é reflexo das altas dosagens de ClO₂, H₂SO₄ e NaOH utilizadas pela tecnologia em questão. A ausência da lavagem entre os estágios A e D aumenta, significativamente, as quantidades de H₂SO₄ e NaOH necessárias aos ajustes de pH nesses estágios.

As seqüências iniciadas com D* e AD apresentaram os menores custos de reagentes químicos para as polpas com baixa e alta DQO, respectivamente. Este resultado mostra o efeito positivo no custo dos reagentes químicos de branqueamento oriundos de uma lavagem intermediária, especialmente para a polpa com alta DQO. Também reflete a boa eficiência do estágio D*, que consome menos ClO₂, H₂SO₄ e NaOH que o estágio A/D*.

Nota-se que para as polpas com baixa DQO, apesar de as seqüências iniciadas com D* e AD demandarem cargas similares de cloro ativo, a seqüência iniciada com AD requer maiores cargas de NaOH e H₂SO₄, elevando o seu custo de branqueamento. Vale ressaltar ainda que a tecnologia AD apresenta maior custo de capital em relação à tecnologia D*, pois necessita de um misturador, uma bomba MC (média consistência), uma torre e um lavador adicional.

Em geral, a melhor forma de se avaliar a eficiência de qualquer processo de branqueamento é através do custo total dos reagentes para se alcançar o teto de alvura desejado. Numa avaliação geral dos resultados de custo dos reagentes apresentados no Quadro 6 e nas Figuras 11-12, infere-se que a boa lavagem da polpa antes do branqueamento é condição obrigatória para reduzir o custo de branqueamento.

Verificou-se que a tecnologia D* pode ser eficiente ou deficiente, dependendo do grau de lavagem da polpa. Para a polpa de alta DQO, mal lavada, a tecnologia D* não é recomendada, visto aumentar o custo do branqueamento em cerca de R\$12,0/t.a.s. em relação à referência (D), enquanto para a polpa de baixa DQO, bem lavada, o estágio D* resulta em decréscimo do custo em R\$5,0/t.a.s.

A tecnologia A/D* mostrou-se deficiente, independentemente do grau de lavagem da polpa, sendo seu custo R\$12/t.a.s. e R\$29/t.a.s. mais alto que o da referência(D), para polpas de baixa e alta DQO, respectivamente. Portanto, a tecnologia A/D* não é recomendada para o branqueamento de polpa kraft de eucalipto.

A tecnologia AD mostrou-se mais eficiente que a referência (D) para polpa de alta DQO, decrescendo o custo dos reagentes em R\$8,0/t.a.s., porém mostrou-se ineficiente para a polpa de baixa DQO, tendo aumentado o custo dos reagentes em R\$3,0/t.a.s. Nesse contexto, a tecnologia AD só se justifica quando a lavagem pré-branqueamento é muito deficiente. Esta tecnologia requer alto custo de capital e deve ser evitada. Resumindo, pode-se afirmar que a única tecnologia alternativa ao estágio D₀ convencional que se justifica é o estágio D*, assim mesmo para polpa de baixa DQO.

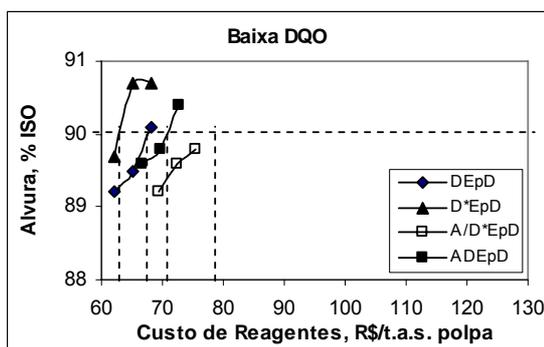


Figura 11 – Custo dos reagentes químicos para branqueamento de polpa com baixa DQO por várias seqüências

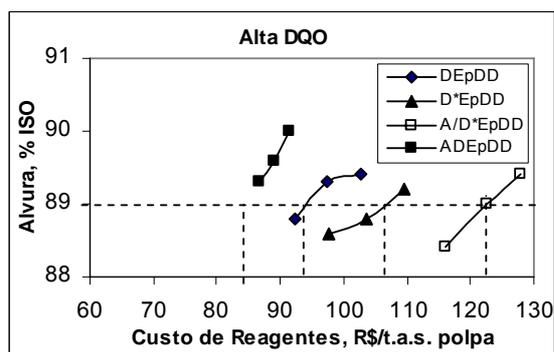


Figura 12 – Custo dos reagentes químicos para branqueamento de polpa com alta DQO por várias seqüências

4.1.2. Estabilidade de Alvura da Polpa Branqueada

No Quadro 7 e nas Figuras 13 e 14 são apresentados os resultados da estabilidade de alvura das polpas de baixa e alta DQO, branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD.

A estabilidade da alvura foi medida pela reversão e NCP (Número de Cor Posterior), que apresentaram igual tendência, portanto apenas os valores de reversão de alvura foram utilizados na discussão dos resultados.

Nota-se que a polpa de alta DQO resultou em altos níveis de reversão de alvura em relação à de baixa DQO, independentemente da tecnologia de branqueamento empregada. O fato de polpas lavadas deficientemente apresentarem baixa estabilidade de alvura já foi previamente relatado (CHIRART et al., 1997), sendo explicado pelo arraste de subestruturas de extrativos e ligninas que iniciam o processo de amarelecimento da polpa.

As polpas branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D*, AD e A/D* apresentaram menor reversão de alvura que a referência, independentemente do nível de DQO de entrada.

Para polpas de baixa DQO, a menor reversão foi 23% menor que a da referência (2,0 %ISO), obtida com as tecnologias A/D* (1,5 %ISO) e AD (1,5 %ISO). A polpa branqueada com a tecnologia D* (1,8 %ISO) apresentou reversão 10% menor que a da referência.

Para polpas de alta DQO, a menor reversão foi 29,1% menor que a referência (5,5 % ISO), obtida com a tecnologia D* (3,9 %ISO). A polpa branqueada com as tecnologias AD (4,2 %ISO) e A/D* (5,5 %ISO) apresentaram níveis de reversão de alvura 23,6% e 5,5% mais baixos que os da referência.

Quadro 7 – Alvura e estabilidade de alvura das polpas de baixa e alta DQO, branqueadas pelas seqüências iniciadas com estágio D, D*, A/D* e AD

Parâmetros	¹ Polpa Baixa DQO				² Polpa Alta DQO			
	DEp	D Ep	A/D Ep	ADEp	DEp	D Ep	A/D*Ep	ADEp
	D	D	D	D	DD	DD	DD	DD
Alvura, % ISO	90,1	89,7	89,8	89,8	88,8	88,8	89	89,3
Alvura revertida, % ISO	88	87,9	88,3	88,3	83,3	84,9	83,8	85,1
Reversão, %ISO	2,0	1,8	1,5	1,5	5,5	3,9	5,2	4,2
NCP	0,253	0,241	0,196	0,196	0,968	0,637	0,886	0,663

¹ Características iniciais: Polpa kraft-O₂ com DQO=6,4 kg O₂/t.a.s. /t; N^o kappa=10,5; Visc.=16,4 cP e HexA's=45,7 mmol/kg.

² Características iniciais: Polpa kraft O₂ com DQO=25,5 kg O₂/t.a.s. /t; N^o kappa=11,9; Visc.=23,3 cP e HexA's=45,0 mmol/kg.

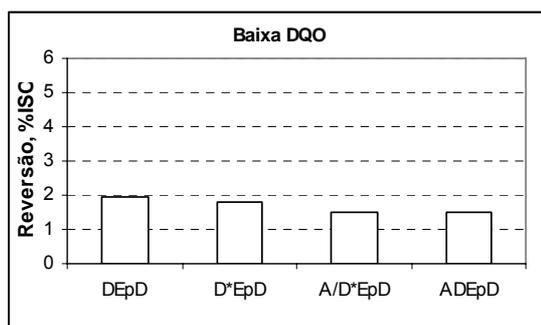


Figura 13 – Reversão de alvura da polpa de baixa DQO, branqueada por várias seqüências

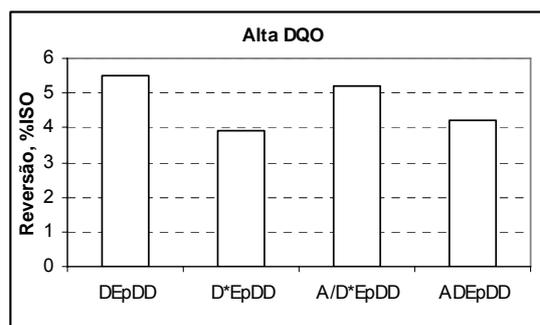


Figura 14 – Reversão de alvura da polpa de alta DQO, branqueada por várias seqüências

4.1.3. Viscosidade Final da Polpa Branqueada

No Quadro 8 e nas Figuras 15 e 16 são apresentados os resultados de viscosidade das polpas de baixa e alta DQO, branqueadas pelas seqüências iniciadas com estágio D, D*, A/D* e AD.

As polpas com baixa DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas com hidrólise ácida e/ou dióxido de cloro em alta temperatura apresentaram viscosidade menor ou similar à da referência. A maior redução da viscosidade em relação à referência (12,9 cP) foi de 9,1%, encontrada na seqüência iniciada com D* (12,5 cP). Para todos os efeitos práticos, não houve diferenças significativas entre a viscosidade final das polpas branqueadas pelas várias tecnologias. Porém, as polpas de alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas com hidrólise ácida e/ou dióxido de cloro em alta temperatura apresentaram viscosidade menor que as da referência. A maior redução da viscosidade em relação à referência (16,2 cP) foi de 24,7%, encontrada para a seqüência iniciada com D* (12,2 cP). A maior redução de viscosidade na polpa com alta DQO foi causada pela elevada carga de CAT exigida para o branqueamento desta polpa até a alvura desejada (Quadro 6).

Quadro 8 – Número kappa, viscosidade e teor de HexA's da polpa com baixa e alta DQO, após branqueamento pelas seqüências iniciadas com estágio D, D*, A/D* e AD

Parâmetros	¹ Polpa Baixa DQO				² Polpa Alta DQO			
	DEp D	D*Ep D	A/D*Ep D	ADEp D	DEp DD	D*Ep DD	A/D*Ep DD	ADEp DD
^{3,4} CAT, kg/ t.a.s. polpa	50,35	45,75	54,5	45,9	72,3	86,2	83,7	58,5
Viscosidade, cP	12,9	12,5	12,7	12,9	16,2	12,2	12,6	13,5
Número kappa final	0,70	0,50	0,60	0,63	0,60	0,60	0,70	0,40
Hex-A, mmol/kg	4,29	2,04	2,22	2,83	3,05	2,80	2,70	2,43

¹Características iniciais: Polpa kraft-O₂ com DQO=6,4 kg O₂/t.a.s. /t; N^o kappa=10,5; Visc.=16,4 cP e HexA's=45,7 mmol/kg.

² Características iniciais: Polpa kraft O₂ com DQO=25,5 kg O₂/t.a.s. /t; N^o kappa=11,9; Visc.=23,3 cP e HexA's=45,0mmol/kg.

³Calculado para 90% ISO (polpa baixa DQO) e 89% ISO (polpa alta DQO).

⁴ CAT(Cloro Ativo Total), kg/t.a.s. polpa = ClO₂ c/Cl₂+(H₂O₂*2,09).

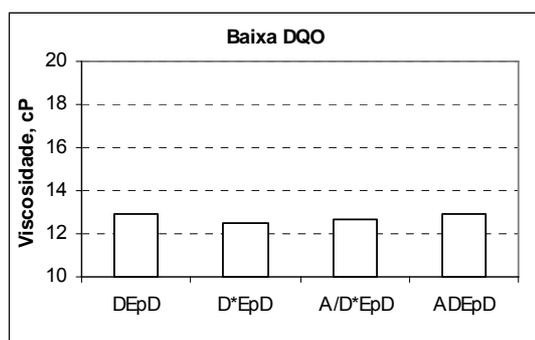


Figura 15 – Viscosidade da polpa de baixa DQO, branqueada por várias seqüências

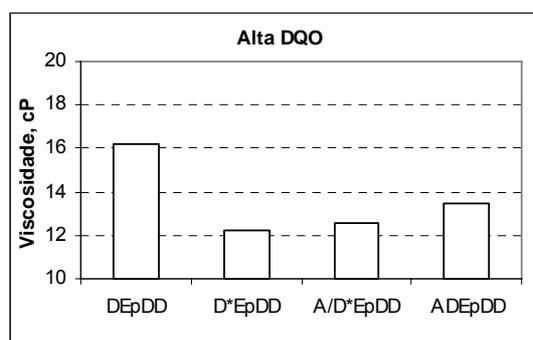


Figura 16 – Viscosidade da polpa de alta DQO, branqueada por várias seqüências

4.1.4. Número Kappa e Teor de HexA's da Polpa

No Quadro 8, são apresentados os valores do número kappa e o conteúdo de HexA's das polpas de baixa e alta DQO, branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD.

A lignina residual e os HexA's são quantificados na análise do número kappa, não tendo havido, porém, uma boa correlação entre o número kappa e o teor de HexA's da polpa.

Os valores do número kappa final da polpa branqueada foram muito baixos para polpas de alta e baixa DQO. Em geral, as diferentes tecnologias

de branqueamento não tiveram efeito substancial no kappa final. Por outro lado, não houve também um impacto substancial da DQO da polpa, pois esta foi compensada pelo uso de mais dosagem de cloro ativo.

Os conteúdos de HexA's das polpas branqueadas pelas seqüências iniciadas com hidrólise ácida e/ou dióxido de cloro em alta temperatura foram menores que os da referência, para ambas as polpas avaliadas. Estes resultados eram esperados, pois os estágios ácidos em alta temperatura removem HexA's (VUORINEN et al., 1996; HENRICSON, 1997).

Para polpas de baixa DQO, a maior redução foi de 52,4% (D*), seguida de 48,2% (A/D*) e 34,0% (AD) em relação à referência (HexA's=4,29 mmol/kg). Para polpas de alta DQO, a maior redução foi de 20,3% (AD), seguida de 11,5% (A/D*) e 8,2% (D*) em relação à referência (HexA's=3,05 mmol/kg).

O menor impacto das tecnologias D*, A/D* e AD no conteúdo de HexA's para a polpa de alta DQO em relação à de baixa DQO, foi causado pelo excesso de cloro utilizado no branqueamento da primeira. O excesso de cloro ativo é eficiente na remoção de HexA's, mesmo quando se utiliza tecnologia convencional (D₀).

4.2. Filtrados e Efluentes Combinados do Branqueamento

4.2.1. Filtrados do Pré-Branqueamento

Visando isolar o efeito da adição de peróxido na extração, os filtrados obtidos foram analisados após cada estágio do pré-branqueamento com as tecnologias D, D*, A/D* e AD, seguidos de extração simples (E) e extração reforçada com peróxido (Ep). Este estudo foi realizado somente com a polpa de alta DQO.

No Quadro 10A, do Apêndice A, são apresentadas as condições e resultados médios do pré-branqueamento. Nos Quadros 1B-2B do Apêndice B (resultados em kg/t.a.s. de polpa) e 1C-2C do Apêndice C (resultados em mg/L de filtrado) são mostrados os resultados experimentais (A e B) e médios da caracterização dos filtrados, estágio por estágio, do pré-branqueamento, para polpa de alta DQO.

4.2.1.1. Efeito do Peróxido

Os resultados médios das características dos filtrados do pré-branqueamento, estágio por estágio, para polpa de alta DQO, são mostrados no Quadro 9.

A adição de peróxido na extração após os estágios D, D* e AD, não teve efeito significativo na DQO. Por outro lado, após o estágio (A/D*) resultou na redução de 29% da DQO. Uma possível explicação para este fato é que após o estágio de hidrólise ácida a concentração de dióxido disponível para oxidar a matéria orgânica é menor, visto que a matéria orgânica proveniente da degradação dos HexA's também é oxidada pelo dióxido. Portanto, no estágio de extração terá mais matéria orgânica parcialmente oxidada para ser oxidada pelo peróxido. Note que no estágio AD a lavagem remove os produtos da degradação do HexA's.

Menos dióxido disponível para oxidar a matéria orgânica. Portanto o peróxido mais matéria orgânica parcialmente oxidada para o peróxido oxidar.

No entanto, independentemente da tecnologia utilizada no primeiro estágio, a adição de peróxido reduziu a DBO₅ do filtrado. O peróxido oxida a matéria orgânica biodegradável, que é mais fácil de ser oxidada, tornando o efluente mais difícil de ser tratado pelo sistema biológico. De fato, a biodegradabilidade, expressa pela relação DBO₅/DQO, é menor no filtrado da extração com adição de peróxido (Ep) em relação ao da extração simples (E).

Com relação ao AOX, a adição de peróxido na extração, após os estágios com hidrólise ácida /dióxido de cloro em alta temperatura, reduz o AOX do efluente e após o estágio com dióxido de cloro convencional, ele não tem efeito no AOX. A redução de AOX no filtrado Ep foi de 16,7% (D*), 33,3% (A/D*) e 42,9% (AD) em relação ao filtrado E. A presença de peróxido oxida parte da matéria orgânica ligada ao cloro, liberando cloreto.

A adição de peróxido na extração reduz a cor, independentemente do estágio inicial de branqueamento, pois ocorre oxidação dos grupos cromóforos existentes no filtrado (DENCE; REEVE, 1996). A redução da cor no filtrado Ep foi de 81,3% (D), 74,5% (D*), 61,4% (A/D*) e 73,2% (AD) em relação ao filtrado E.

A adição de peróxido na extração resultou em aumento de 1,4% (D*) e 11,1% (AD) ou redução de 8,2% (D) e 30,2% (A/D*) no COT do filtrado. Portanto, o efeito mais acentuado do peróxido no TOC do efluente da extração foi após o estágio A/D*, pois o efluente deste estágio terá mais matéria orgânica parcialmente oxidada passível de ser oxidada pelo peróxido até carbono inorgânico.

Quadro 9 – Caracterização dos filtrados do pré-branqueamento, estágio por estágio, para polpa de alta DQO, para seqüências com extrações simples (E) e reforçada com peróxido (Ep)

Sequências Filtrados/ Características	DE e DEp			D*E e D*Ep			A/D*E e A/D*Ep			ADE e ADEp			
	D	Extração		D*	Extração		A/D*	Extração		A	D	Extração	
		E	Ep		E	Ep		E	Ep			E	Ep
pH	2,9	11,2	11,2	3,0	11,2	10,9	2,8	10,9	11,0	3,2	3,0	11,2	10,9
DQO, kg O ₂ /t.a.s.	22,9	8,1	8,67	25,4	9,60	9,66	23,4	12,3	8,73	17,5	9,9	8,5	7,3
DBO, kg O ₂ /t.a.s.	11,6	2,7	2,04	13,8	4,29	2,93	10,8	4,59	2,84	11,0	4,99	3,81	1,25
DBO/DQO	0,51	0,33	0,24	0,54	0,45	0,30	0,46	0,37	0,32	0,63	0,50	0,45	0,17
COT, kg C/t.a.s.	9,33	3,05	2,8	11,4	3,6	3,65	8,21	4,50	3,14	6,78	5,34	2,96	3,33
AOX, kg Cl ⁻ /t.a.s.	0,58	0,05	0,05	0,33	0,06	0,05	0,45	0,06	0,04	0,02	0,12	0,07	0,04
Cor, kg Pt/t.a.s.	32,4	30,3	5,67	18,8	30,7	7,82	28,1	19,4	7,49	28,5	11,1	12,3	3,29

4.2.2. Características e Eficiência do Tratamento Biológico dos Efluentes Combinados do Pré-branqueamento

Os filtrados provenientes de cada estágio do pré-branqueamento foram misturados, levando-se em consideração a consistência de cada estágio, e constituíram os efluentes combinados do pré-branqueamento.

Nos Quadros 1C-10C, do Apêndice C (resultados em kg/t.a.s. de polpa) e 1D-10D, do Apêndice D (resultados em mg/L de efluente) são mostrados os resultados experimentais (2, 10 ou 13 repetições) e médios da caracterização dos efluentes combinados, brutos e tratados, do pré-branqueamento das polpas de baixa e alta DQO com as tecnologias D, D*, A/D* e AD. Nos Quadros 1E-10E, do Apêndice E, são mostrados os resultados experimentais (10 ou 13 repetições) e médios de eficiência do

tratamento (% de remoção de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor) dos efluentes combinados do pré-branqueamento, por um sistema de lodos ativados de bancada laboratorial.

Nas Figuras 11-10I, do Apêndice I são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados do pré-branqueamento quanto à DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor e a eficiência do tratamento biológico (% de remoção de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor) dos efluentes combinados do pré-branqueamento, por um sistema de lodos ativados de bancada laboratorial.

O efluente combinado do pré-branqueamento é proveniente do branqueamento das polpas pelas tecnologias D, D*, A/D* e AD seguidas de extração alcalina reforçada com peróxido (Ep), para polpa de baixa DQO, e de extração alcalina simples (E), para polpa de alta DQO.

4.2.2.1. DQO

No Quadro 10 são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados do pré-branqueamento quanto à DQO (kg O₂/t.a.s.) e a eficiência do tratamento biológico medida pela remoção da DQO (%), para polpas de baixa e alta DQO.

Para a polpa de baixa DQO, o branqueamento pelas seqüências iniciadas com as tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu efluentes com DQO igual (D*) ou maior (A/D* e AD) que a referência (D), seguindo a tendência $DEp = D^*Ep < A/D^*Ep < ADEp$. O tratamento biológico removeu entre 64,5-73,8% da DQO. Após o tratamento, o efluente ADEp continuou apresentando DQO maior que a referência. O efluente do D*Ep apresentou DQO maior que a referência após o tratamento, apesar de igual antes do mesmo. O efluente do A/D*Ep apresentou DQO igual à referência após o tratamento, apesar de ter sido maior no efluente bruto. Este resultado mostra que, entre as tecnologias D*, A/D* e AD, o efluente D* é mais difícil de ser tratado, apesar de apresentar menor DQO no efluente bruto.

Para a polpa de alta DQO, o branqueamento pelas seqüências iniciadas com as tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu efluentes com DQO iguais a referência. Porém, após o tratamento, os efluentes das tecnologias D* e AD apresentaram DQO maior que a referência (D). O tratamento biológico removeu entre 62,1-69,6% da DQO.

As reduções de DQO encontradas são típicas de sistemas de tratamento biológico de fábricas de celulose kraft, que variam entre 40-70% (SPRINGER, 1993).

Quadro 10 – DQO (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção da DQO (%), para polpas de baixa e alta DQO

Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
Sequências	DQO dos efluentes, kg O ₂ /t.a.s.		Remoção de DQO, %	Sequências	DQO dos efluentes, kg O ₂ /t.a.s.		Remoção de DQO, %
	Bruto	Tratado			Bruto	Tratado	
DEp	18,10 c	5,18 b	70,8 a	DE	32,63 ab	9,89 b	69,6 a
D*Ep	18,39 c	6,51 a	64,5 b	D*E	34,88 a	11,10 a	68,1 a
A/D*Ep	21,18 b	5,55 b	73,8 a	A/D*E	28,15 b	10,81 ab	62,1 a
ADEp	23,15 a	6,54 a	71,8 a	ADE	35,04 a	12,74 a	63,8 a

Em cada coluna médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t (P>0,05)

4.2.2.2. DBO₅

No Quadro 11 são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados do pré-branqueamento quanto à DBO₅ (kg O₂/t.a.s.) e a eficiência do tratamento biológico medida pela remoção da DBO₅ (%), para polpas de baixa e alta DQO.

Para a polpa de baixa DQO, o branqueamento pelas seqüências iniciadas com as tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu efluentes com DBO₅ igual (D* e A/D*) ou maior (AD) que a referência (D). E, esta tendência não foi alterada após o tratamento biológico. O tratamento biológico removeu entre 90,3-92,9% da DBO₅.

Para a polpa de alta DQO, o branqueamento pelas seqüências iniciadas com as tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu efluentes com DBO₅ iguais a referência (D). E, esta tendência não foi alterada após o tratamento biológico. O tratamento biológico removeu entre 93,4-94,9% da DBO₅.

A remoção de DBO₅ foi acima de 90% para todos os efluentes avaliados. Estas eficiências de tratamentos são típicas de sistemas de tratamentos biológicos industriais bem operados (SPRINGER, 1993).

Quadro 11 – DBO₅ (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção da DBO₅ (%), para polpas de baixa e alta DQO

Sequências	Polpa de Baixa DQO			Sequências	Polpa de Alta DQO		
	DBO ₅ dos efluentes, kg O ₂ /t.a.s.		Remoção de DBO ₅ , %		DBO ₅ dos efluentes, kg O ₂ /t.a.s.		Remoção de DBO ₅ , %
	Bruto	Tratado			Bruto	Tratado	
DEp	7,31 b	0,61 b	91,7 a	DE	15,38 ab	0,78 a	94,9 a
D*Ep	7,45 b	0,53 b	92,9 a	D*E	18,15 a	0,93 a	94,9 a
A/D*Ep	8,33 ab	0,69 ab	91,7 a	A/D*E	13,98 b	0,93 a	93,4 a
ADEp	9,83 a	0,96 a	90,3 a	ADE	14,99 ab	0,91 a	93,9 a

Em cada coluna médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t (P>0,05)

A tratabilidade do efluente industrial é freqüentemente estimada pela biodegradabilidade da matéria orgânica (DBO/DQO) presente (METCALF & EDDY, 2003). Para a polpa de alta DQO, a biodegradabilidade dos efluentes provenientes das seqüências sem estágio ácido foi maior que a das seqüências correspondentes contendo estágios ácidos, conforme apresentados do Quadro 12. Porém, esta tendência não foi encontrada para polpa de baixa DQO. No entanto, vale ressaltar que para a polpa de baixa DQO a extração foi realizada com adição de peróxido e o residual pode ter interferido na quantificação da biodegradabilidade do efluente.

Quadro 12 – Biodegradabilidade da matéria orgânica dos efluentes combinados do pré-branqueamento

Efluentes	Polpa Baixa DQO				Polpa Alta DQO			
	DEp	D [*] Ep	A/D [*] Ep	ADEp	DE	D [*] E	A/D [*] E	ADE
DBO ₅ /DQO	0,40	0,40	0,39	0,43	0,47	0,52	0,49	0,43

4.2.2.3. COT

No Quadro 13 são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados do pré-branqueamento quanto ao COT (kg C/t.a.s.) e a eficiência do tratamento biológico medida pela remoção da COT (%), para polpas de baixa e alta DQO.

Para polpa de baixa DQO, o branqueamento pelas tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu efluente com COT maior que a referência (D), e essa tendência não foi alterada após o tratamento biológico. O tratamento biológico reduziu o COT do efluente em 76,3%-80,2%, tendo o mesmo apresentado alta correlação com a DQO (0,93) e DBO₅ (0,91) antes do tratamento, porém uma baixa correlação com a DQO (0,70) e DBO₅ (0,29) após o mesmo. Portanto, não é um parâmetro confiável para a avaliação da carga orgânica do efluente.

Para a polpa de alta DQO, o branqueamento pelas tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu efluente com COT igual (A/D^{*}) ou maior (AD ou D^{*}) que a referência (D), seguindo a tendência $DE=A/D^*E < D^*E < ADE$. Porém, após o tratamento biológico os efluentes provenientes das tecnologias alternativas apresentaram COT significativamente menor (A/D^{*}) ou maior (D^{*} e AD) que a referência (D). Em contrapartida, o COT apresentou correlação negativa com a DQO (-0,49) e DBO₅ (-0,77) após o tratamento. Antes do tratamento, o COT apresentou baixa correlação com a DQO (0,77) e DBO₅ (0,20). Portanto, não é possível estimar o impacto ambiental desses efluentes no meio ambiente por simples análise dos valores de COT, em razão das baixas ou negativas correlações deste parâmetro com a DQO e DBO₅, após o tratamento.

Quadro 13 – COT (kg C/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção do COT (%), para polpas de baixa e alta DQO.

Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
Sequências	COT dos efluentes, kg C/t.a.s.		Remoção de COT, %	Sequências	COT dos efluentes, kg C/t.a.s.		Remoção de COT, %
	Bruto	Tratado			Bruto	Tratado	
DEp	7,72	1,78 b	76,9 a	DE	12,60	5,55 a	56,0 a
D*Ep	8,93	2,12 a	76,3 a	D*E	14,60	4,92 a	66,3 a
A/D*Ep	9,75	2,06 a	78,9 a	A/D*E	12,60	3,66 b	74,7 a
ADEp	10,60	2,10 a	80,2 a	ADE	16,90	4,25 ab	74,8 a

Em cada coluna médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t (P<0,05)

¹COT do efluente bruto foi analisada sem repetição

4.2.2.4. AOX

No Quadro 14 são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados do pré-branqueamento quanto ao AOX (kg Cl⁻/t.a.s.) e a eficiência do tratamento biológico medida pela remoção da AOX (%), para polpas de baixa e alta DQO.

Para polpa de baixa DQO, o branqueamento pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D* resultou em AOX menor que a referência, enquanto as tecnologias A/D* e AD resultaram em AOX iguais a referência. Após o tratamento biológico, os efluentes das seqüências com as tecnologias D*Ep, A/D*Ep e ADEp apresentaram AOX maiores que a referência. A remoção de AOX variou entre 55,6-75,1%. A menor remoção foi encontrada no efluente do D*Ep, que apresentou o menor AOX antes do tratamento.

Para polpa de alta DQO, os níveis de AOX do efluente do pré-branqueamento sequeam a tendência D*E < ADE = A/D*E = DE(ref.). A descarga de AOX do efluente do pré-branqueamento pela tecnologia D*E(0,304 kg Cl⁻/t) foi 36% menor que a referência (0,475 kg Cl⁻/t). Após o tratamento biológico, os efluentes do A/D*E e ADE continuaram apresentando AOX menores que a referência. Por outro lado, o AOX do efluente D*E, que antes do tratamento foi menor que o da referência, passou a ser igual após o tratamento. O tratamento biológico reduziu entre 41,3-68,2% a taxa de AOX do efluente.

Os teores de AOX dos efluentes do pré-branqueamento não se correlacionaram com sua biodegradabilidade, provavelmente devido aos seus baixos níveis de AOX (<0,507 kg Cl⁻/t). Por outro lado, a remoção apresentou alta correlação com a carga inicial de AOX no efluente para polpa de baixa DQO (0,85) e alta DQO (0,94). Isto significa que os efluentes com menor carga inicial de AOX apresentaram menor remoção no tratamento.

Menores cargas de AOX foram encontradas nos efluentes do branqueamento com D*. O efeito positivo da tecnologia D* na redução de AOX do efluente foi reportado previamente (EIRAS; COLODETTE, 2003; COSTA; COLODETTE, 2001; RAGNAR; LINDSTROM, 2004). No entanto, este efeito positivo do D* no teor de AOX do efluente bruto desaparece após o tratamento biológico. Nesse contexto, em termos práticos, a justificativa ambiental para o uso da tecnologia D* não procede.

Quadro 14 – AOX (kg Cl⁻/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção do AOX (%), para polpas de baixa e alta DQO.

Sequências	Polpa de Baixa DQO			Polpa de Alta DQO			
	AOX dos efluentes, kg Cl ⁻ /t.a.s.		Remoção de AOX, %	AOX dos efluentes, kg Cl ⁻ /t.a.s.		Remoção de AOX, %	
	Bruto	Tratado		Bruto	Tratado		
DEp	0,49 a	0,12 c	75,1 a	DE	0,48 a	0,17 a	64,3 a
D*Ep	0,31 b	0,14 b	55,6 c	D*E	0,28 b	0,18 a	41,3 b
A/D*Ep	0,42 ab	0,15 a	64,2 bc	A/D*E	0,45 ab	0,15 b	67,0 a
ADEp	0,51 a	0,17 a	66,2 ab	ADE	0,44 ab	0,14 b	68,2 a

Em cada coluna médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t (P>0,05)

4.2.2.5. Cor

No Quadro 15 são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados do pré-branqueamento quanto a Cor (kg Pt/t.a.s.) e a eficiência do tratamento biológico medida pela remoção da Cor (%), para polpas de baixa e alta DQO.

O branqueamento de polpa com baixa DQO pelas seqüências iniciadas com hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu

efluente do pré-branqueamento com cor mais acentuada que a referência, seguindo a tendência $DEp < A/D*Ep = ADEp < D*Ep$. Essa tendência não foi alterada após o tratamento biológico. O tratamento biológico acentuou a cor do efluente entre 40,2-77,6%.

Os branqueamentos de polpa com alta DQO pelas seqüências iniciadas com hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziram efluentes do pré-branqueamento com cor mais acentuada (D^* e AD) ou menos acentuada (A/D^*) que a referência, seguindo a tendência $A/D^*E < DE < ADE < D^*E$. Essa tendência também não foi alterada após o tratamento biológico. O tratamento biológico resultou em pequena desacentuação (4,33-15,2%) na cor do efluente.

O tratamento biológico não é eficiente para remover cor, que está relacionada principalmente com a fração de alta massa molecular. Em alguns casos, pode até acentuar a cor do efluente, estando relacionada com a formação de novos grupos cromóforos a partir dos compostos com alta massa molecular (SOUZA et al., 2002).

O efluente proveniente da tecnologia D^* apresentou cor mais acentuada antes e após o tratamento biológico, independentemente da DQO inicial da polpa. Portanto, a menor acentuação da cor na polpa de baixa DQO e a maior remoção na polpa de alta DQO durante o tratamento biológico não foram suficientes para compensar os altos valores iniciais de cor desses efluentes.

Quadro 15 – Cor (kg Pt/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção da cor (%), para polpas de baixa e alta DQO

Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
Seqüências	Cor dos efluentes, kg Pt/t.a.s.		Remoção de Cor, %	Seqüências	Cor dos efluentes, kg Pt/t.a.s.		Remoção de Cor, %
	Bruto	Tratado			Bruto	Tratado	
DEp	4,41 c	7,31 c	-66,1 b	DE	47,84 c	44,72 c	6,48 a
D^*Ep	7,58 a	10,61 a	-40,2 d	D^*E	71,81 a	60,92 a	15,2 a
A/D^*Ep	5,40 b	9,60 ab	-77,6 a	A/D^*E	40,59 d	37,42 d	7,74 a
ADEp	5,97 b	9,29 b	-55,9 c	ADE	49,28 b	47,15 b	4,33 a

Em cada coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t ($P > 0,05$).

4.2.3. Características dos Efluentes Combinados da Seqüência de Branqueamento Inteira e Tratamento Biológico

Os filtrados provenientes de cada estágio da seqüência de branqueamento inteira foram misturados, levando-se em consideração a consistência do estágio, constituindo-se nos efluentes combinados da seqüência de branqueamento inteira.

Nos Quadros 1F-10F, do Apêndice F (resultados em kg/t polpa), 1G-10G, do Apêndice G (resultados em mg/L de efluente), são apresentados os resultados experimentais (repetições A e B) e médios de caracterização dos efluentes combinados brutos e tratados da seqüência de branqueamento inteira, para polpas de baixa e alta DQO. Nos Quadros 1H-9H, do Apêndice H, são apresentados os resultados experimentais (10 repetições) e médios de eficiência do tratamento (% de remoção de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor) dos efluentes combinados da seqüência de branqueamento inteira, por um sistema de lodos ativados laboratorial de bancada.

Nas Figuras 1F-10F, do Apêndice F são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados do pré-branqueamento quanto à DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor e a eficiência do tratamento biológico (% de remoção de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor) dos efluentes combinados do pré-branqueamento, por um sistema de lodos ativados de bancada laboratorial.

4.2.3.1. DQO

No Quadro 16 são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados da seqüência de branqueamento inteira quanto a DQO (kg O₂/t.a.s.) e a eficiência do tratamento biológico medida pela remoção da DQO (%), para polpas de baixa e alta DQO.

O branqueamento da polpa de baixa DQO produz efluente com menor DQO que o correspondente da polpa de alta DQO. A DQO dos efluentes brutos da seqüência de branqueamento inteira varia entre 22,1-23,8 kg O₂/t.a.s., para polpa de baixa DQO, e entre 40,9-50,7 kg O₂/t.a.s., para polpa

de alta DQO. Portanto, polpa mal lavada resulta em maior custo de tratamento, pois maior carga orgânica requer mais oxigênio, nutrientes e possivelmente um maior tempo de retenção para estabilização biológica.

Para a polpa de baixa DQO, o branqueamento pelas seqüências iniciadas com as tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu efluentes com DQO maior que a referência (D). Este resultado está de acordo com a literatura (EIRAS, 2002; SOUZA, 2001) e tem sido verificado também a nível industrial. Por outro lado, para a polpa de alta DQO os efluentes das tecnologias D* e A/D* apresentaram DQO iguais e da AD maior que a referência. Portanto, a lavagem contribuiu para o aumento da carga orgânica do efluente.

Após o tratamento biológico, o efluente da tecnologia AD continuou apresentando DQO maior que a referência (D), enquanto os efluentes das tecnologias D* e A/D* passaram a apresentar DQO iguais à mesma. Com exceção do efluente da polpa de alta DQO branqueada pela tecnologia AD (DQO=17,9 kg O₂/t), todos os efluentes, após o tratamento, apresentam DQO menor que 15 kg/t, limite estabelecido pelo Banco Mundial (1998) para o financiamento de novas fábricas de celulose.

O tratamento biológico reduziu a DQO entre 71,6-73,6%, para a polpa de baixa DQO, e entre 60,8-67,2%, para polpa de alta DQO. Estes níveis de remoção estão entre os reportados na literatura (HEIMBURGER, 1998; BRYANT, 1992; HALL; RANDLE, 1992; GRAVES; JOYCE, 1994).

Os resultados apresentados mostram que a lavagem entre A e D tem efeito negativo na qualidade do efluente, como previamente reportado (VOURINEN et al., 1996; HENRICSON, 1997), bem como na sua tratabilidade. As polpas de baixa e alta DQO, branqueadas com a tecnologia AD, apresentaram efluentes com DQO em torno de 10% e 20%, respectivamente, maiores que a referência (D), independentemente, de serem brutos ou tratados. Portanto, o efeito negativo da lavagem entre A e D foi mais acentuado no efluente da polpa de alta DQO. Nesta polpa, a lavagem após o estágio ácido retira, além dos produtos da hidrólise ácida, a matéria orgânica arrastada do estágio de pré-deslignificação com oxigênio, a qual vai para o tratamento de efluente sem qualquer tratamento oxidativo, resultando em alta DQO.

O que efetivamente importa do ponto de vista prático é a qualidade do material tratado, pois este é o que será enviado ao meio ambiente. O efeito negativo dos estágios de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura na DQO do efluente desaparece após o tratamento biológico, enquanto o efeito negativo da lavagem entre A e D na DQO do efluente permanece após o citado biológico. Conclui-se, portanto, que a lavagem entre os estágios A e D (tecnologia AD) não é interessante do ponto de vista ambiental, a menos que o efluente do estágio A seja de alguma forma reutilizado e não lançado no tratamento de efluentes. Potencialmente, o efluente do estágio A pode ser reutilizado, já que não contém cloretos.

Quadro 16 – DQO (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoção da DQO (%), para polpas de baixa e alta DQO

Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
Seqüências	DQO dos efluentes, kg O ₂ /t.a.s.		Remoção de DQO, %	Seqüências	Cor dos efluentes, kg O ₂ /t.a.s.		Remoção de DQO, %
	Bruto	Tratado			Bruto	Tratado	
DEpD	22,09 c	5,90 b	73,3 a	DEpDD	40,87 b	14,32 b	65,3 a
D*EpD	23,19 b	6,30 ab	72,7 a	D*EpDD	43,83 b	13,76 b	60,8 a
A/D*EpD	23,14 b	6,11 ab	73,6 a	A/D*EpDD	43,77 b	14,27 b	67,2 a
ADEpD	23,77 a	6,73 a	71,6 a	ADEpDD	50,69 a	17,92 a	64,8 a

Em cada coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t (P>0,05).

4.2.3.2. DBO₅

No Quadro 17 são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados da seqüência de branqueamento inteira quanto a DBO₅ (kg O₂/t.a.s.) e a eficiência do tratamento biológico medida pela remoção da DBO₅ (%), para polpas de baixa e alta DQO.

O branqueamento da polpa de baixa DQO produz efluente com menor DBO₅ que o correspondente da polpa de alta DQO. A DBO₅ dos efluentes da seqüência de branqueamento inteira varia entre 10,0-11,4 kg O₂/t.a.s., para polpa de baixa DQO, e entre 16,9-18,5 kg O₂/t.a.s., para polpa de alta DQO.

Para a polpa de baixa ou alta DQO, o branqueamento pelas seqüências iniciadas com as tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu efluente com DBO_5 igual ao da referência (D).

Após o tratamento biológico, esta tendência não foi alterada para polpa de baixa DQO branqueada pelas tecnologias D^* e A/D^* e para polpa de alta DQO branqueada pelas tecnologias D^* e AD. No entanto, o efluente da polpa de baixa DQO branqueada pela tecnologia AD apresentou DBO 52,7% mais elevada que a referência, após o tratamento biológico, apesar de ser apenas 7,9% mais elevada no efluente bruto. Para polpa de alta DQO, o efluente do branqueamento pela tecnologia A/D^* apresentou DBO 45,5% mais elevada que a referência após o tratamento biológico, apesar de ser 5,5% menos elevada no efluente bruto. Este resultado mostra a menor biodegradabilidade do efluente contendo estágio ácido que o similar sem estágio ácido.

A biodegradabilidade e ou a tratabilidade biológica de um efluente podem ser indicadas em termos da relação DBO_5/DQO . Quanto mais esta relação se aproxima de um, mais fácil é a tratabilidade biológica do efluente em questão. Normalmente, quando a relação DBO_5/DQO de um efluente é menor que 0,3, a eficiência do tratamento biológico pode estar comprometida (METCALF & EDDY, 2003). Porém, em todos os efluentes estudados, a relação DBO_5/DQO foi maior que 0,3.

A remoção de DBO_5 foi acima de 90% para todos os efluentes avaliados. A única exceção foi para o efluente da polpa de alta DQO branqueada pela tecnologia A/D^* , que foi de 86,7%. Esta eficiência de tratamentos é típica de sistemas de tratamentos biológicos industriais bem operados (SPRINGER, 1993).

Quadro 17 – DBO₅ (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoção da DBO₅ (%), para polpas de baixa e alta DQO

Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
Seqüências	DBO ₅ dos efluentes, kg O ₂ /t.a.s.		Remoção de DBO ₅ , %	Seqüências	DBO ₅ dos efluentes, kg O ₂ /t.a.s.		Remoção de DBO ₅ , %
	Bruto	Tratado			Bruto	Tratado	
DEpD	10,53 a	0,51 b	95,1 a	DEpDD	17,68 ab	1,19 bc	93,3 a
D*EpD	9,97 a	0,51 b	94,9 a	D*EpDD	18,47 a	1,44 ab	92,2 a
A/D*EpD	10,66 a	0,56 ab	94,7 a	A/D*EpDD	16,90 b	2,25 a	86,7 a
ADEpD	11,38 a	1,06 a	90,7 a	ADEpDD	18,14 ab	1,13 bc	93,8 a

Em cada coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t (P>0,05).

4.2.3.3. COT

No Quadro 18 são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados da seqüência de branqueamento inteira quanto a COT (kg C/t.a.s.) e a eficiência do tratamento biológico medida pela remoção da COT(%), para polpas de baixa e alta DQO.

O branqueamento da polpa de baixa DQO produz efluente com menor COT que o correspondente da polpa de alta DQO. Os valores de COT dos efluentes da seqüência de branqueamento inteira variam entre 5,3-8,5 kg C/t.a.s., para polpa de baixa DQO, e entre 30,4-46,2 kg C/t.a.s., para polpa de alta DQO.

Para polpa de baixa DQO, o branqueamento pelas tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu efluente combinado bruto e tratado da seqüência de branqueamento inteira com COT similar à referência (D). O tratamento biológico reduziu o COT do efluente em 65,3%-77,3%.

O COT apresentou alta correlação com a DQO (0,95) e boa com a DBO (0,80) após o tratamento. Por outro lado, o COT apresentou baixa correlação com a DQO (0,53) e boa com DBO (0,81) antes do tratamento.

Para polpa de alta DQO, o branqueamento pelas tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziu efluente combinado da seqüência de branqueamento inteira com COT maior (AD ou D*) ou menor (A/D*) que a referência (D), seguindo a tendência:

A/D* < D < D* < AD. Porém, após o tratamento biológico, os efluentes apresentaram COT similar à referência. O tratamento biológico reduziu o COT do efluente em 60,4%-64,2%. O efeito negativo das tecnologias D, D* e AD não foi encontrado no efluente após o tratamento. O COT apresentou baixa correlação com a DQO (0,55) e boa com a DBO (0,80) antes do tratamento. Por outro lado, o COT apresentou baixa correlação com a DQO (0,13) e negativa com DBO (-0,31) após o tratamento.

Estes resultados mostram que a lavagem entre os estágios A e D tem efeito negativo na qualidade do efluente, como previamente reportado (VOURINEN et al., 1996; HENRICSON, 1997). No entanto, as correlações do COT com a DQO e DBO, apesar de algumas vezes altas, são inconsistentes, indicando que o COT não é um parâmetro confiável para estimar a carga poluente do efluente.

Quadro 18 – COT (kg C/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoção do COT (%), para polpas de baixa e alta DQO

Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
Seqüências	COT dos efluentes, kg C/t.a.s.		Remoção de COT, %	Seqüências	COT dos efluentes, kg C/t.a.s.		Remoção de COT, %
	¹ Bruto	Tratado			¹ Bruto	Tratado	
DEpD	9,88	2,18 b	77,9 a	DEpDD	15,80	5,46 a	65,4 a
D*EpD	9,59	2,49 b	74,1 a	D*EpDD	17,20	6,10 a	64,5 a
A/D*EpD	10,80	2,16 b	80,0 a	A/D*EpDD	13,80	5,50 a	60,0 a
ADEpD	10,70	2,75 a	74,3 a	ADEpDD	17,60	5,81 a	67,0 a

Em cada coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t (P>0,05).

¹COT do efluente bruto foi analisada sem repetição

4.2.3.4. AOX

No Quadro 19 são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados da seqüência de branqueamento inteira quanto ao AOX (kg Cl⁻/t.a.s.) e a eficiência do tratamento biológico medida pela remoção da AOX(%), para polpas de baixa e alta DQO.

Para polpa de baixa DQO, comparando-se os Quadros 14 e 19, verifica-se que o efluente do pré-branqueamento contém 79,5-96,9% do teor de AOX do efluente da seqüência de branqueamento inteira.

Para polpa de baixa DQO, as descargas de AOX do branqueamento pelas tecnologias D*, A/D* e AD foram maiores que pela tecnologia D, seguindo a tendência $D^* < A/D^* = AD < D$ (ref.). Os níveis de AOX do efluente bruto do branqueamento pelas tecnologias D*(0,342 kg Cl⁻/t) e A/D*(0,437 kg Cl⁻/t) e AD(0,523 kg Cl⁻/t) foram, respectivamente, 43,9%, 18,3% e 14,3% menores que a referência D(0,610 kg Cl⁻/t).

A diferença entre os níveis de AOX das seqüências com estágio de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura e da referência é maior no efluente combinado da seqüência de branqueamento inteira que naquele do pré-branqueamento. Essa tendência ocorreu porque o incremento de AOX devido ao estágio D final foi menor nos efluentes resultantes do branqueamento com hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura (3-10,5%) do que naquele com dióxido de cloro convencional (20,5%). O estágio D-final nas seqüências iniciadas com D* e AD consumiu uma carga de cloro 50% menor que a referência, tendo o mesmo estágio D-final da seqüência iniciada com A/D* consumido uma carga de cloro 20% maior que a referência.

No entanto, após o tratamento biológico, os efluentes do branqueamento pelas tecnologias D*, A/D* e AD apresentam teores de AOX maiores que pela tecnologia D, seguindo a tendência $D(\text{ref.}) < A/D^* = D^* < AD$. Os níveis de AOX do efluente tratado do branqueamento pelas tecnologias AD(0,181 kg Cl⁻/t) e D*(0,156 kg Cl⁻/t) e A/D*(0,155 kg Cl⁻/t) foram, respectivamente, 23,2%, 10,9% e 10,3% maiores que a referência D(0,139kg/t). A eficiência de remoção de AOX variou entre 54%-77%, estando diretamente correlacionada (0,96) com a quantidade de AOX no efluente bruto.

Para polpa de alta DQO, os níveis de AOX do efluente da seqüência de branqueamento inteira seguem a tendência $AD < D^* = A/D^* = D$. As descargas de AOX do branqueamento pelas tecnologias AD(0,412 kg Cl⁻/t) e D*(0,514 kg Cl⁻/t) e AD(0,532 kg Cl⁻/t) foram, respectivamente, 27,2%, 9,2% e 6% menores que a referência D(0,566 kg Cl⁻/t). Para as seqüências

iniciadas com as tecnologias D* e A/D*, a alta carga de cloro necessária nos estágios finais de branqueamento resultou, proporcionalmente, na formação de mais AOX no efluente.

Após o tratamento biológico, o efluente da tecnologia AD continuou apresentando o menor AOX. Cargas de AOX iguais (0,2 kg Cl⁻/t) foram encontradas nos outros três efluentes. Portanto, a remoção de AOX no efluente da tecnologia D foi maior que a remoção das tecnologias D*, A/D* e AD.

Todos os efluentes, após o tratamento, apresentaram AOX menor que 0,2 kg Cl⁻/t, limite estabelecido pelo Banco Mundial (1998) para o financiamento de novas fábricas de celulose.

No geral, os resultados apresentados mostram o efeito positivo das tecnologias de hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura na redução da descarga de AOX do branqueamento, quando comparados com a tecnologia de dióxido de cloro convencional. Tem sido reportado que este efeito positivo é mais pronunciado no efluente da tecnologia D* em relação às tecnologias A/D* e AD (EIRAS; COLODETTE, 2003; COSTA; COLODETTE, 2001, RAGNAR; LINDSTROM, 2004), pois nas condições de tempo prolongado e de alta temperatura do estágio D*, parte do AOX formado é degradado (RAGNAR, 2004, VENTORIM; COLODETTE; EIRAS, 2005).

Esta tendência foi encontrada, neste estudo, apenas para a polpa de baixa DQO. Para polpa de alta DQO, a alta carga de matéria orgânica e de cloro necessária nos estágios finais de branqueamento, ou seja, a dificuldade para branquear essa polpa pela seqüência D*EpDD, provavelmente, tenha mascarado o efeito mais pronunciado do estágio D* na redução do AOX do efluente. Nesta polpa, a tecnologia AD resultou em menor descarga de AOX, devido à remoção da DQO e à menor carga de cloro necessária para branquear a polpa nos estágios finais de branqueamento.

Costa (2001), estudando a contribuição de cada fração do número kappa na geração de compostos organoclorados, relatou que a formação do AOX teve como principais responsáveis os HexA's e carry-over, que contribuíram com 44,3% e 31,5% do total gerado, respectivamente.

Para polpa de baixa DQO, a tecnologia A/D* apresentou descarga de AOX no efluente superior à D*. A diferença entre D* e A/D* é função do maior tempo de degradação dos organoclorados no D*(120 min.) que no (AD)* (30 min.)(RAGNAR, 2004).

Portanto, do ponto de vista da redução da descarga de AOX do branqueamento, a tecnologia mais eficiente é a D*, para polpa de baixa DQO, e a AD, para polpa de alta DQO. Todavia, o que efetivamente conta é a carga de AOX no efluente após o tratamento biológico, pois este efluente é o que será enviado ao corpo receptor. Para polpa de baixa DQO, o benefício do D* no AOX do efluente desaparece após o tratamento biológico, enquanto para polpa de alta DQO, o benefício do AD, após o tratamento biológico, permanece. Apesar de a tecnologia D* ser conhecida por apresentar metade da carga de AOX que o D convencional (EIRAS; COLODETTE, 2003; COSTA; COLODETTE, 2001, RAGNAR; LINDSTROM, 2004), na prática isso não tem nenhum benefício, pois, após o tratamento biológico, este benefício desaparece.

A única tecnologia que se justifica para a redução de AOX do efluente tratado é a AD, assim mesmo para polpa de alta DQO. Porém, todos os efluentes tratados apresentaram teor de AOX menor que 0,2 kg Cl⁻/t, limite estabelecido pelo Banco Mundial (1988) para o financiamento de novas fábricas de celulose. Em resumo, na prática, nenhuma justificativa alternativa ao estágio D se justifica para reduzir o teor de AOX no efluente.

Quadro 19 – AOX (kg Cl⁻/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoção de AOX (%), para polpas de baixa e alta DQO

Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
Seqüências	AOX dos efluentes, kg Cl ⁻ /t.a.s.		Remoção de AOX, %	Seqüências	AOX dos efluentes, kg Cl ⁻ /t.a.s.		Remoção de AOX, %
	Bruto	Tratado			Bruto	Tratado	
DEpD	0,61 a	0,14 c	77,3 a	DEpDD	0,57 a	0,20 a	64,2 a
D*EpD	0,35 c	0,16 b	54,4 c	D*EpDD	0,52 a	0,20 a	60,4 b
A/D*EpD	0,44 bc	0,16 b	64,6 b	A/D*EpDD	0,53 a	0,20 a	61,7 b
ADEpD	0,53 b	0,18 a	65,3 b	ADEpDD	0,41 b	0,16 b	61,4 b

Em cada coluna médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t (P>0,05)

4.2.3.5. Cor

No Quadro 20 são apresentados os resultados de caracterização dos efluentes combinados da seqüência de branqueamento inteira quanto a Cor (kg Pt/t.a.s.) e a eficiência do tratamento biológico medida pela remoção da Cor(%), para polpas de baixa e alta DQO.

O branqueamento da polpa de alta DQO produz efluente bruto ou tratado com cor mais acentuada que o correspondente de baixa DQO.

Para polpa de baixa DQO, a cor dos efluentes do branqueamento varia entre 5,3-8,5 kg Pt/t.s.a. polpa. Comparando-se os Quadros 15 e 20, verifica-se que o pré-branqueamento contém 80-90% da cor do efluente da seqüência de branqueamento inteira. As seqüências iniciadas com hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziram efluentes combinados da seqüência inteira mais coloridos que a referência, seguindo a tendência $D < A/D^* = AD < D^*$. Após o tratamento biológico, apesar de a cor ter-se acentuado entre 32-64,2%, essa tendência não foi alterada. O menor efeito negativo do tratamento biológico na cor do efluente ocorreu naquele proveniente do D^* , possuindo este efluente cor mais acentuada antes do tratamento.

Para polpa de alta DQO, a cor dos efluentes do branqueamento varia entre 30,4-46,2 kg Pt/t.s.a. polpa. As seqüências iniciadas com hidrólise ácida/dióxido de cloro em alta temperatura produziram efluentes combinados da seqüência de branqueamento inteira com cor mais acentuada (AD) ou iguais (D^* e A/D^*) a referência antes e após o tratamento biológico. Após o tratamento biológico a cor do efluente se acentuou para 39,7-52,2 kg Pt/t. O efluente da tecnologia AD continuou apresentando cor mais acentuada que a referência, apesar de ser uma das menores acentuações de cor ocorridas durante o tratamento biológico (13,1%). O efluente da tecnologia D^* , que antes do tratamento apresentou cor 6,3% mais acentuada que a referência, passou a apresentar cor 7,2% menos acentuada. O tratamento biológico resultou em remoção de 1,74% da cor (D^*) ou sua acentuação em até 30,4% (A/D^*).

No geral, a cor dos efluentes foi acentuada após o tratamento biológico. A única exceção foi para o efluente do branqueamento de polpa

de alta DQO pela tecnologia D*, desacentuando a cor em 1,74%. A acentuação da cor é freqüentemente relatada após o tratamento biológico, como resultado da oxidação parcial da matéria orgânica e/ou produtos solúveis do metabolismo microbiológico (BITTON, 1994; MOUNTEER; COLODETTE; SILVA, 2002) devido à carga do potencial redox do efluente (MILESTONE; FULTHORPE; STUTHRIDGE, 2004).

Quadro 20 – Cor (kg Pt/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoção de cor (%), para polpas de baixa e alta DQO

Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
Sequências	Cor dos efluentes, kg Pt/t.a.s.		Remoção de Cor, %	Sequências	Cor dos efluentes, kg Pt/t.a.s.		Remoção de Cor, %
	Bruto	Tratado			Bruto	Tratado	
DEpD	5,30 c	7,75 c	-46,4 b	DEpDD	39,60 bc	44,59 b	-12,5 b
D*EpD	8,45 a	11,15 a	-32,0 a	D*EpDD	42,09 b	41,37 b	1,74 a
A/D*EpD	5,90 bc	8,46 bc	-43,7 b	A/D*EpDD	30,43 cd	39,68 b	-30,4 c
ADEpD	6,09 b	10,01 b	-64,2 c	ADEpDD	46,17 a	52,23 a	-13,1 b

Em cada coluna médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t (P>0,05)

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo permitiram as seguintes conclusões:

- As tecnologias contendo estágio ácido / dióxido de cloro em alta temperatura (D*, A/D*, AD) resultaram em polpas branqueadas com maior estabilidade de alvura, menor viscosidade, menor kappa e menor teor de HexA's que a de referência (D), tendo sido o impacto mais significativo para a polpa de alta DQO.
- Chegou-se à conclusão de que a polpa de alta DQO apresenta baixa branqueabilidade, consumindo 21-89% mais cloro ativo total (CAT) a um custo 18-41% mais elevado para alcançar o objetivo de alvura, dependendo da tecnologia de branqueamento utilizada no primeiro estágio.
- Com relação a branqueabilidade e custos de reagentes, a única tecnologia ao estágio D₀ convencional que se justifica é o estágio D*, assim mesmo para polpa de baixa DQO. A tecnologia AD é eficiente quando a lavagem da polpa é deficiente, no entanto deve ser evitada, pois requer alto custo de capital.
- A tecnologia A/D* não é recomendada para o branqueamento de polpa kraft de eucalipto, pois apresenta o maior custo de reagentes, para polpa de baixa e alta DQO.

- Os efluentes da polpa de alta DQO apresentaram valores de DQO, DBO₅ e AOX substancialmente mais altos que os da polpa de baixa DQO, porém a tratabilidade dos dois efluentes, medida pelas percentagens de remoção desses parâmetros no tratamento biológico, foi similar entre si.
- A lavagem ineficiente da polpa resulta em maior custo de tratamento, pois maior carga orgânica requer mais oxigênio, nutrientes e possivelmente um maior tempo de retenção para estabilização biológica, embora não prejudique a eficiência do tratamento.
- A maior parte da carga orgânica e de halógenos orgânicos do efluente é gerada no pré-branqueamento.
- As tecnologias D*, A/D* e AD aumentam a carga orgânica do efluente, porém é de fácil tratabilidade, apesar de maior custo de tratamento.
- A descarga de AOX no efluente devido a tecnologia D* é menor em relação ao D convencional, porém esse benefício desaparece no efluente tratado.
- Na prática, nenhuma justificativa alternativa ao estágio D se justifica para reduzir o teor de AOX no efluente.
- As tecnologias D*, A/D* e AD resultam em efluentes mais coloridos que o D convencional e o tratamento biológico acentua a cor do efluente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Standard methods for the examination of water and wastewater of the APHA
– AWWA - WEF. 20th ed. Washington, 1998.

ARCHIBALD, F.; ARCAND, L.R. Photodegradation of high molecular weight
kraft bleachery effluent organochlorine and color. **Water Research**,
Denmark, v. 29, p. 661-669, 1995.

BERGNOR-GIDNERT, E.; TOMANI, P.E.; DAHLMAN, O. Influence on pulp
quality during the removal of hexenuronic acids. In: INTERNATIONAL
PULP BLEACHING CONFERENCE, 1998, Helsinki. **Proceedings...**,
Helsinki: Finnish Pulp and Paper Research Institute, 1998. p.185-193.

BITTON, G. **Wastewater Microbiology**. New York Wiley-Liss, 1994. 488 p.

BRYANT, C. W. The removal of chlorinated organics from conventional pulp
and paper wastewater treatment systems. **Water Science &
Technology**, London, v. 26, n. 1-2, p. 99-109, 1992.

BUCHERT, J.; TELEMANN, A.; HARJUNPAA, V.; TENKANEN, M.; VILKARI, L.; VUORINEN, T. Effect of cooking and bleaching on the structure of xylan in conventional pine kraft pulp. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 78, n. 11, p. 125-130, 1995.

BUCHERT, J.; BERGNOR, E.; LINDBLAD, G.; VILKARI, L.; EK, M. Significance of xylan and glucomannan in the brightness reversion of kraft pulps. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 80, n. 6, p. 65-171, junho 1997.

CPPA. **Technical section standard test methods of Canadian Pulp and Paper Association**. Montreal, 1986.

CHIRART, C.; CARDONA-BARRAU, D.; TURCO, H.; VIARDIN, M-T. High temperature chlorine dioxide delignification. Potential uses. In: FORUM ASSOCIATE MEMBERS, 4., 1999, Grenoble. **Proceedings...Grenoble: CTP, 1999. p. 19-23.**

CHIRART, C.; DE LA CHAPELLE, V.; GARNIER, N.; MARY G. Yellowing of bleached chemical pulps. Effect of oxidized groups. In: FORUM ASSOCIATE MEMBERS, 2, 1997, Grenoble. **Proceedings...Grenoble: CTP, 1997. p. 11-12.**

COSTA, M. M.; COLODETTE, J. L. Efeito da composição química da polpa kraft O₂ na sua branqueabilidade. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 34., 2001, São Paulo. **Anais...São Paulo: ABTCP, 2001. p. 1-17.**

COSTA, M. M. **Influência dos ácidos hexenurônicos na branqueabilidade de polpa kraft-O₂ de eucalipto.** Viçosa: UFV, 2001. 182 p. (Dissertação de Doutorado em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa).

DAHLMAN O. B.; REIMANN A. K.; DTROMBERG L. M.; MÖRCK R. E. High-molecular-weight effluent materials from modern ECF and TCF bleaching. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 78, n. 12, p. 99-109, 1995.

DENCE, C.; REEVE, D. Introduction to the principles and practice of pulp bleaching. In: DENCE, C.; REEVE, D. Pulp bleaching – principles and practice. 1996, Atlanta. **Proceedings...Atlanta: Tappi Press**, 1996. p.1-24.

EIRAS, K. M.; Influência das condições de operação no estágio D_{HT} na branqueabilidade e nas características físico-químicas da polpa e do filtrado. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 34., 2001, São Paulo. **Anais...São Paulo: ABTCP**, 2001. sessão técnica II, p. 1-19.

EIRAS, K. M.; **Otimização do estágio de branqueamento da polpa com dióxido de cloro em alta temperatura.** Viçosa: UFV, 2002. 88 p. (Dissertação de Mestrado em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa).

EIRAS, K. M.; COLODETTE, J. L. Eucalyptus kraft pulp bleaching with chlorine dioxide at high temperature. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v. 29, n. 2, p. 64-69, 2003.

EIRAS, K. M. M.; MOUNTEER, A. H.; VENTORIM, G.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L. Efecto del contenido de HexA's y de lignina lixiviable en la performance de la fase-O de una pasta. **El Papel**, Martes, v. 107, n. 10, p. 54-58, 2003.

FURTADO, F.P., EVTUGUIN, D.V., GOMES, T. M. Effect of the acid stage in ECF bleaching on *Eucalyptus globulus* kraft pulp bleachability and strength. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE, 2000, Montreal. **Proceedings...Montreal: PPTAC, 2000. v.1, p.111-114.** Poster Presentation.

GRAVES, J.W.; JOYCE T.W. A critical review of the ability of biological treatment systems to remove chlorinated organics discharged by the paper industry. **Water Research**, Copenhagen, v. 20, n. 2, p. 155-160, 1994.

HALL, E.R.; RANDLE, W.G. AOX removal from bleached kraft mill wastewater: a comparison of three biological treatment processes. **Water Science and Technology**, London, v. 26, n. 1-2, p. 3387-3396, 1992.

HEIMBURGER, S.A. Kraft mill bleach plant effluents: recent developments aimed at decreasing their environmental impact, Part 2. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 71, n. 11, p. 69-78, 1998.

HENRICSON, K. A new bleaching stage for kappa reduction and metal profile control. In: INTERNATIONAL EMERGING TECHNOLOGIES CONFERENCE AND EXHIBITION, 1997, Orlando. **Anais...**San Francisco: Miller Freeman, 1997. p. 27-31.

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

KUTNEY, G.W.; HOLTON, D.H.; MANOIR, J.R. A review of low versus high ClO₂ substitution in the C stage. Part1. Pulp quality. **Pulp & Paper Canada**, Quebec, v. 85, n. 4, p. 46-52, apr. 1984.

KRINGSTAD, K.P.; LINDSTROM, K. Spent liquors from pulp bleaching. **Environmental Science. Technology**, v. 18, p. 236A-248A, 1984.

LACHENAL, D.; CHIRART, C. VIARDIN, M-T. High temperature chlorine dioxide delignification. A breakthrough in ECF bleaching of hardwood kraft pulps. In: FORUM ASSOCIATE MEMBERS, 3., 1998, Grenoble. **Anais...** Grenoble: CTP, 1998. p.524-529.

LAFLEUR, L. E. Sources of pulping and bleaching derived chemicals in effluents. In: ENVIRONMENTAL FATE AND EFFECTS OF PULP AND PAPER MILL EFFLUENTS, 1996, Delray. **Anais...**Delray Beach: St. Lucie Press, 1996. p.21-31.

LEUENBERGER, C.; GIGER, W.; CONEU, R.; GRAUDON, J.W.;
MOLNARKUBICA, E. Persistent chemicals in pulp mill effluents. **Water
Research**, Denmark, v. 19, p. 885-894, 1985.

McDONOUGH, T. Kraft pulp yield basics. In: BREAKING THE PULP YIELD
BARRIER SYMPOSIUM, 1998, Atlanta. **Anais...**Atlanta: Tappi Press,
1998. p. 1-10.

McKAGUE, A. B.; CARLBERG, G. Effluent characteristics and composition.
In: DENCE, C., REEVE, D.W. PULP BLEACHING PRINCIPLES AND
PRACTICE. **Anais...**Atlanta: Tappi Press, 1996. p. 749-766.

McKAGUE, A.B.; SHEN, X.; REEVE, D.W., A comparison of chlorinated
organic material produced by chlorine and chlorine dioxide bleaching of
kraft pulp. In: TUROSKI: CHLORINE AND CHLORINE COMPOUNDS
IN THE PAPER INDUSTRY, 1988, Chelsea. **Proceedings...** Chelsea:
ProAnn Arbor Press, 1998. p. 247-252.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse.** 4th ed.
Minnesota, 2003. 1334 p.

MILESTONE, C. B.; FULTHORPE, R. R.; STUTHRIDGE, T. R. The
formation of color during biological treatment of pulp and paper
wastewater. **Water Science and Technology**, London, v. 50, n. 3, p.
87-94, 2004.

MOUNTEER, A. H.; COLODETTE, J. L.; SILVA, D. O. Treatment efficiency of eucalypt kraft pulp bleaching effluents: influence of dissolved organic matter. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 1, n. 2, p. 26-31, 2002.

NOLASCO, M. A. Tratamento biológico de efluentes da indústria de celulose e papel por aeração estendida modificada. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 30., 1997, São Paulo. **Anais...São Paulo: ABTCP**, 1997, p.465-474.

PAASIVIRTA, J.; KNUUTINEN, J.; MATELA, P.; PAUKKU, R.; SOIKKELI, J.; SARKKA, J. Organic chlorine compounds in lake sediments and the role of the chlorobleaching effluents. **Chemosphere**, Copenhagen, v. 17, n. 1, p.137-146, 1988.

RAGNAR, M. Modification of the D₀-stage into D* makes 2-stage bleach plant for HW kraft pulp a reality. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE (IPBC), 2002, Portland. **Proceedings ... Portland: Tappi**, 2002. oral session, p. 237-243.

RAGNAR, M. On the theoretical basis for the low bleaching chemical requirement of hot chlorine dioxide bleaching of hardwood kraft pulp. **Nordic Pulp Paper Research Journal**, Stockolm, v. 19, n. 1, p. 78-83, 2004.

RAGNAR, M.; LINDSTROM, E. A comparison of emerging technologies: hot chlorine dioxide bleaching versus hot acid treatment. **Paperi ja Puu – Paper and Timber**, Helsinki, v. 86, n. 1, p. 39-44, 2004.

RATNIEKS, E.; FOEKEL, C.; SACON, V.; SAUER, M. Improved pulp bleachability via high temperature acid extraction. In: INTERNATIONAL EMERGING TECHNOLOGIES CONFERENCE AND EXHIBITION, 1997, Orlando. **Anais...**San Francisco: Miller Freeman, 1997. p. 1-8, session 5.3.

SCAN. **Scantest Standard of Scandinavian Pulp, Paper and Board.** Stockholm, 1994.

SILVA, M. R. da **Estudo laboratorial e industrial do estágio ácido no branqueamento de polpa kraft de eucalipto.** Viçosa: UFV, 2001. 120 p. Dissertação de Doutorado em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa).

SOUZA L.C. **Tratabilidade de efluentes provenientes de duas sequências ECF de branqueamento de celulose kraft de eucalipto.** Viçosa: UFV, 2001. 74p. (Dissertação de Mestrado em Agroquímica, Universidade Federal de Viçosa).

MOUNTEER, A.H.; SILVA, C.M.; DALVI, L.C. Estudo da remoção biológica da DQO recalcitrante do efluente de branqueamento de polpa kraft de eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 35., 2002, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2002. p. 1-10.

SPENGEL, D.B. BICKNELL, B., ANDERSON, D.L.F., SMITH, M., BODIEN, D.G. A comparison of chlorinated phenolic compound concentrations and loadings in bleach-plant and treatment-system samples at eight mills. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 77, n.11, p. 155-166, 1994.

SPRINGER, A.M. **Industrial Environmental Control – Pulp and Paper Industry**. 2 ed. Atlanta: Tappi Press, 1993. 699 p.

TANA, J.; LEHTINEN, K-J. **The aquatic environmental impact of pulping and bleaching operations – an overview**. Helsinki: Finnish Environment Institute, 1996, 103 p.

TAPPI. **Standard Methods of Technical Association of the Pulp and Paper Industry**. Atlanta, 2002.

TELEMAN, A.; HARJUNPAA, V.; TENKANEN, M.; VIIKARI, L.; VUORINEN, T. Effect of cooking and bleaching on the structure of xylan in conventional pine kraft pulp. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 78, n. 11, p. 125-130, 1995.

TELEMAN, A.; HAUSALO, T.; TENKANEN, M.; VUORINEN, T. Identification of the acid and characterization of hexenuronic acid-substituted xylooligosaccharides by NRM spectroscopy. **Carbohydrate Research**, Oxford, v. 2, n. 280, p. 197-208, 1996.

TÖRNGREN, A.; GELLERSTEDT, G. The nature of organic bound chlorine from ECF-bleaching found in kraft pulp. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD AND PULPING CHEMISTRY, 9., 1997, Montreal. **Proceedings...**Montreal: CPPA, 1997. p. M2-1-M2-4.

TÖRNGREN, A.; RAGNAR, M. Ways to reduce the amount of organically bound chlorine in bleached pulp and the AOX discharges from ECF bleaching. **Nordic Pulp Paper Research Journal**, Stockolm, v. 17, n. 3, p. -239, 2002.

USEPA. **The national dioxin study, tiers 3, 5, 6 and 7.of United States Environmental Protection Agency**. Washington, D.C., 1987. EPA 440/4-87-003. Office of Water Regulations and Standards.

UCHIDA, Y.; MIURA, T.; IWASAKI, M. Acid treatment under pressurized oxygen gás. In: TAPPI PULPING CONFERENCE, 1999, Orlando. **Anais...**Orlando: Tappi, 1999. p. 317-322.

VENTORIM, G. **Estudo das reações da lignina e dos ácidos hexenurônicos em polpa kraft de eucalipto com oxigênio, dióxido de cloro, ácido sulfúrico e ozônio**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004. 173 p. (Dissertação de Doutorado em Ciência Florestal).

VENTORIM, G.; COLODETTE, J.L.; EIRAS, K. M. The fate of chlorine species during high temperature chlorine dioxide bleaching. **Nordic Pulp Paper Research Journal**, Stockolm, v. 20, n.1, p. 7-11, 2005.

VUORINEN, T.; BURCHERT, J.; TELEMAN, A.; TENKANEN, M.; FAGERSTROM, P. Selective hydrolysis of hexenuronic acid groups and its application in ECF and TCF bleaching of kraft pulps. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE, 1996, Washington, D.C. **Proceedings...** Washington, D.C.: Tappi, 1996. p. 43-51.

VUORINEN, T.; FAGERSTROM, P.; RASANEN, E.; VIKKULA, A.; HENRICSON, K.; TELEMAN, A. Selective hydrolysis of hexenuronic acid groups opens new possibilities for development of bleaching processes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD AND PULPING CHEMISTRY, 9., 1997, Montreal. **Proceedings**...Montreal: CPPA, 1997. p. M4-1-M4-4.

VUORINEN, T.; BURCHERT, J.; TELEMAN, A.; TENKANEN, M.; FAGERSTROM, P. Selective hydrolysis of hexenuronic acid groups and its application in ECF and TCF bleaching of kraft pulps. **Journal of Pulp and Paper Science**, Montreal, v. 25, n. 5, p. 155-162, 1999.

APÊNDICE A

Quadro 1A – Condições e resultados médios do branqueamento da ¹polpa de baixa DQO pela seqüência DEpD

Condições	D	Ep	D₁	D₁	D₁
Consistência, %	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	60	90	70	70	70
Tempo, min.	30	120	120	120	120
Fator kappa	0,27	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t.a.s. polpa	28,4	-	6,0	9,0	12,0
H ₂ O ₂ , kg/t.a.s. polpa	-	5,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/t.a.s. polpa	-	-	1,5	1,0	0,5
NaOH, kg/t.a.s. polpa	1,0	10,0	-	-	-
Resultados	D	Ep	D₁	D₁	D₁
Cloro Ativo Total, kg/t.a.s. polpa	-	38,9	44,9	47,9	50,9
Custo de Reagentes, R\$/t.a.s. polpa	-	-	62,2	65,2	68,2
pH final	2,9	11,2	4,2	4,1	4,0
Consumo, %	100,0	99,4	100,0	100,0	100,0
Alvura, % ISO	75,1	87,5	89,2	89,5	90,1
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	88,0
Reversão, % ISO	-	-	-	-	2,0
Número kappa	-	3,0	-	-	0,7
Viscosidade, cP	-	13,4	-	-	12,9
HexA, mmol/kg	-	-	-	-	4,29

¹Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =6,4 kg O₂/t.a.s.; N° kappa =10,5; Viscosidade =16,4 cP e HexA's =45,7 mmol/kg.

Quadro 2A – Condições e resultados médios do branqueamento da ¹polpa de baixa DQO pela seqüência D*EpD

Condições	D*	Ep	D₁	D₁	D₁
Consistência, %	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	95	90	70	70	70
Tempo, min.	120	120	120	120	120
Fator kappa	0,27	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/t.a.s.como Cl ₂	28,4	-	6,0	9,0	12,0
H ₂ O ₂ , kg/t.a.s. polpa	-	5,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/t.a.s. polpa	-	-	1,5	1,0	0,5
NaOH, kg/t.a.s. polpa	1,0	10,0	-	-	-
Resultados	D*	Ep	D₁	D₁	D₁
Cloro Ativo Total, kg/t.a.s. polpa	-	38,9	44,9	47,9	50,9
Custo de Reagentes, R\$/t.a.s.polpa	-	-	62,2	65,2	68,2
pH final	3,0	11,2	4,1	4,0	3,9
Consumo, %	100	93,0	100	100	100
Alvura, % ISO	70,0	85,6	89,7	90,7	90,7
Alvura revertida, % ISO	-	-	87,9	-	-
Reversão, % ISO	-	-	1,8	-	-
Número kappa	-	3,2	0,5	-	-
Viscosidade, cP	-	15,0	12,5	-	-
HexA, mmol/kg	-	-	2,04	-	-

¹Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =6,4 kg O₂/t.a.s.; N° kappa =10,5; Viscosidade =16,4 cP e HexA's =45,7 mmol/kg.

Quadro 3A – Condições e resultados médios do branqueamento da polpa de baixa DQO pela seqüência A/D*EpD

Condições	A/D*	Ep	D₁	D₁	D₁
Consistência, %	(10+7,8)	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	(95+90)	90	70	70	70
Tempo, min.	(120+15)	120	120	120	120
Fator kappa	0,27	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ kg/t.a.s.polpa	28,4	-	9,0	12,0	15,0
H ₂ O ₂ , kg/t.a.s. polpa	-	5,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/t.a.s. polpa	5,0	-	1,0	0,5	-
NaOH, kg/t.a.s. polpa	5,0	10,0	-	-	-
Resultados	A/D*	Ep	D₁	D₁	D₁
Cloro Ativo Total, kg/t.a.s. polpa	-	38,9	47,9	50,9	53,9
Custo de Reagentes, R\$/t.a.s.polpa	-	-	63,7	66,6	69,6
pH final	2,8	11,2	4,1	4,1	4,2
Consumo, %	100	84,7	100	100	100
Alvura, % ISO	74,2	84,6	89,2	89,6	89,8
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	88,3
Reversão, % ISO	-	-	-	-	1,5
Número kappa	-	2,5	-	-	0,6
Viscosidade, cP	-	13,3	-	-	12,7
HexA, mmol/kg	-	-	-	-	2,22

¹Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =6,4 kg O₂/t.a.s.; N^o kappa =10,5; Viscosidade =16,4 cP e HexA's=45,7 mmol/kg.

Quadro 4A – Condições e resultados médios do branqueamento da ¹polpa de baixa DQO pela seqüência ADEpD

Condições	AD	Ep	D₁	D₁	D₁
Consistência, %	(10+10)	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	(95+60)	90	70	70	70
Tempo, min.	(120+30)	120	120	120	120
Fator kappa	0,27	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ kg/t.a.s.polpa	28,4	-	3,0	6,0	9,0
H ₂ O ₂ , kg/t.a.s. polpa	-	5,0	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/t.a.s. polpa	5,0	-	2,0	1,5	1,0
NaOH, kg/t.a.s. polpa	5,0	10,0	-	-	-
Resultados	AD	Ep	D₁	D₁	D₁
Cloro Ativo Total, kg/t.a.s. polpa	-	38,9	41,9	44,9	47,9
Custo de Reagentes, R\$/t.a.s.polpa	-	-	66,7	69,7	72,6
pH final	3,1/2,9	11,1	4,0	4,1	4,3
Consumo, %	95,5	96,9	100,0	100,0	100,0
Alvura, % ISO	77,3	85,9	89,6	89,8	90,4
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	88,3	-
Reversão, % ISO	-	-	-	1,5	-
Número kappa	-	1,6	-	0,6	-
Viscosidade, cP	-	13,2	-	12,9	-
HexA, mmol/kg polpa	-	-	-	2,83	-

¹Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =6,4 kg O₂/t.a.s.; N° kappa =10,5; Viscosidade =16,4 cP e HexA's =45,7 mmol/kg.

Quadro 5A – Condições e resultados médios do branqueamento da ²polpa de alta DQO pela seqüência DEpD

Condições	D	Ep	D₁	D₂	D₂	D₂
Consistência, %	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	60	90	70	70	70	70
Tempo, min.	30	120	120	120	120	120
Fator kappa	0,28	-	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t.a.s. polpa	33,3	-	25,0	2,0	6,0	10,0
H ₂ O ₂ , kg/t.a.s. polpa	-	5,0	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/t.a.s. polpa	7,0	-	-	-	-	-
NaOH, kg/t.a.s. polpa	-	9,0	2,5	0,5	1,0	2,0
Resultados	D	Ep	D₁	D₂	D₂	D₂
Cloro Ativo Total, kg/t.a.s. polpa	-	43,8	-	45,8	49,8	53,8
Custo de Reagentes, R\$	-	-	-	92,4	97,2	102,8
pH final	2,9	11,2	3,1	4,5	4,5	4,3
Consumo, %	100,0	100,0	100,0	97,6	97,3	92,0
Alvura, % ISO	-	74,6	87,7	88,8	89,3	89,4
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	83,3	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	5,5	-	-
Número kappa	-	3,1	-	0,6	-	-
Viscosidade, cP	-	20,4	-	16,2	-	-
HexA, mmol/kg polpa	-	-	-	3,05	-	-

²Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =25,5 kg O₂/t.a.s.; N° kappa =11,9; Viscosidade =23,3 cP e HexA's =45,0 mmol/kg.

Quadro 6A – Condições e resultados médios do branqueamento da ²polpa de alta DQO pela seqüência D*EpD

Condições	D*	Ep	D₁	D₂	D₂	D₂
Consistência, %	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	95	90	70	70	70	70
Tempo, min.	120	120	120	120	120	120
Fator kappa	0,28	-	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t.a.s. polpa	33,3	-	25,0	10,0	15,0	20,0
H ₂ O ₂ , kg/t.a.s. polpa	-	5,0	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/t.a.s. polpa	6,5	-	-	-	-	-
NaOH, kg/t.a.s. polpa	-	7,0	2,0	1,0	1,5	2,0
Resultados	D*	Ep	D₁	D₂	D₂	D₂
Cloro Ativo Total, kg/t.a.s. polpa	-	43,8	-	78,8	83,8	88,8
Custo de Reagentes	-	-	-	97,6	103,5	109,4
pH final	3,0	10,9	3,3	4,5	4,4	4,5
Consumo, %	100,0	100,0	100,0	96,8	93,6	92,0
Alvura, % ISO	-	70,7	86,6	88,6	88,8	89,2
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	84,9	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	3,9	-
Nº kappa	-	2,5	-	-	0,6	-
Viscosidade, cP	-	16,3	-	-	12,2	-
HexA, mmol/kg polpa	-	-	-	-	2,8	-

²Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =25,5 kg O₂/t.a.s.; Nº kappa =11,9; Viscosidade =23,3 cP e HexA's =45,0 mmol/kg.

Quadro 7A – Condições e resultados médios do branqueamento da ²polpa de alta DQO pela seqüência A/D*EpDD

Condições	A/D*	Ep	D₁	D₂	D₂	D₂
Consistência, %	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	(95+90)	90	70	70	70	70
Tempo, min.	(120+15)	120	120	120	120	120
Fator kappa	0,28	-	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t.a.s. polpa	33,3	-	25,0	10,0	15,0	20,0
H ₂ O ₂ , kg/t.a.s. polpa	-	5,0	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/t.a.s. polpa	14,1	-	-	-	-	-
NaOH, kg/t.a.s. polpa	8,0	8,0	3,0	2,0	3,0	3,0
Resultados	A/D*	Ep	D₁	D₂	D₂	D₂
Cloro Ativo Total, kg/t.a.s. polpa	-	43,8	-	78,8	83,8	88,8
Custo de Reagentes	-	-	-	116,1	122,7	127,9
pH final	2,8	11,0	3,5	4,3	4,6	4,5
Consumo, %	100	100	100	97,0	93,1	92,0
Alvura, % ISO	-	71,7	86,2	88,4	89,0	89,4
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	83,8	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	5,2	-
Nº kappa	-	2,9	-	-	0,7	-
Viscosidade, cP	-	15,9	-	-	12,6	-
HexA, mmol/kg polpa	-	-	-	-	2,7	-

²Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =25,5 kg O₂/t.a.s.; Nº kappa =11,9; Viscosidade =23,3 cP e HexA's =45,0 mmol/kg.

Quadro 8A – Condições e resultados médios do branqueamento da ²polpa de alta DQO pela seqüência ADEpD

Condições	AD	Ep	D₁	D₂	D₂	D₂
Consistência, %	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	(95+60)	90	70	70	70	70
Tempo, min.	(120+30)	120	120	120	120	120
Fator kappa	0,28	-	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t.a.s. polpa	33,3	-	14,0	1,0	3,0	5,0
H ₂ O ₂ , kg/t.a.s. polpa	-	5,0	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/t.a.s. polpa	14,1	-	-	-	-	-
NaOH, kg/t.a.s. polpa	7,0	7,0	1,0	0,0	0,25	0,5
Resultados	AD	Ep	D₁	D₂	D₂	D₂
Cloro Ativo Total, kg/t.a.s. polpa	-	-	-	58,8	60,8	62,8
Custo de Reagentes	-	-	-	86,5	89,0	91,4
pH final	3,2/3,0	10,9	3,7	4,4	4,5	4,5
Consumo, %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,2
Alvura, % ISO	-	79,1	88,0	89,3	89,6	90,0
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	85,1	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	4,2	-	-
Nº kappa	-	1,4	-	0,4	-	-
Viscosidade, cP	-	15,3	-	13,5	-	-
HexA, mmol/kg polpa	-	-	-	2,43	-	-

²Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =25,5 kg O₂/t.a.s.; Nº kappa =11,9; Viscosidade =23,3 cP e HexA's =45,0 mmol/kg.

Quadro 9A – Resultados experimentais (A e B) e médios das polpas de baixa e alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Repetição	¹ Polpa de Baixa DQO				² Polpa de Alta DQO			
		DEpD	D*EpD	A/D*EpD	ADEpD	DEpDD	D*EpDD	A/D*EpDD	ADEpDD
Alvura após Ep, % ISO	A	87,6	85,6	84,5	85,6	74,6	70,5	71,5	79,3
	B	87,4	85,6	84,7	86,2	74,6	70,9	71,9	78,9
	Média	87,5	85,6	84,6	85,9	74,6	70,7	71,7	79,1
Número kappa após Ep	A	3,1	3,2	2,5	1,6	3,1	2,4	2,8	1,4
	B	3,0	3,1	2,4	1,6	3,1	2,5	3,0	1,4
	Média	3,0	3,2	2,5	1,6	3,1	2,5	2,9	1,4
Viscosidade após Ep, cP	A	13,4	15,0	13,1	13,2	20,2	16,4	16,1	15,5
	B	13,3	15,0	13,4	13,2	20,6	16,2	15,6	15,2
	Média	13,4	15,0	13,3	13,2	20,4	16,3	15,9	15,3
Alvura, % ISO	A	90,0	89,8	89,8	89,8	88,7	88,6	89,0	88,6
	B	90,1	89,5	89,8	89,7	88,8	88,9	89,0	88,0
	Média	90,1	89,7	89,8	89,8	88,8	88,8	89,0	89,3
Reversão, % ISO	A	1,9	1,7	1,5	1,4	5,8	4,1	4,9	4,4
	B	2,0	1,8	1,5	1,5	5,1	3,7	5,4	3,9
	Média	2,0	1,8	1,5	1,5	5,5	3,9	5,2	4,2
Viscosidade, cP	A	13,1	12,7	12,6	12,9	16,1	12,2	12,5	13,5
	B	12,7	12,3	12,7	12,9	16,2	12,2	12,7	13,4
	Média	12,9	12,5	12,7	12,9	16,2	12,2	12,6	13,5
Número kappa	A	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,4
	B	0,8	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,4
	Média	0,7	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,4
HexA, mmol/kg.a.s. polpa	A	3,83	2,15	2,40	3,4	3,5	2,5	2,9	2,5
	B	4,52	1,93	2,04	2,26	2,6	3,1	2,5	2,35
	Média	4,29	2,04	2,22	2,83	3,05	2,8	2,7	2,43

¹Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =6,4 kg O₂/t.a.s.; N° kappa =10,5; Viscosidade =16,4 cP e HexA's =45,7 mmol/kg.

²Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =25,5 kg O₂/t.a.s.; N° kappa =11,9; Viscosidade =23,3 cP e HexA's =45,0 mmol/kg.

Quadro 10A – Condições e resultados médios do pré-branqueamento da polpa de alta DQO, para seqüências com extrações simples (E) e oxidativa (Ep)

Condições	Polpa de Baixa DQO								Polpa de Alta DQO							
	D	E	D*	E	A/D*	E	AD	E	D	Ep	D*	Ep	A/D*	Ep	AD	Ep
Consistência, %	10,0	10	10,0	10	10,0	10	10,0	10	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	60	90	95	90	95+90	90	(95+60)	90	60	90	95	90	(95+90)	90	(95+60)	90
Tempo, min.	30	120	120	-	(120+15)	120	(120+30)	120	30	120	120	120	(120+15)	120	(120+30)	120
Fator kappa	0,28	-	0,28	-	0,28	-	0,28	-	0,28	-	0,28	-	0,28	-	0,28	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t.a.s. polpa	33,3	-	33,3	-	33,3	-	33,3	-	33,3	-	33,3	-	33,3	-	33,3	-
H ₂ O ₂ , kg/t.a.s. polpa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,0	-	5,0	-	5,0	-	5,0
H ₂ SO ₄ , kg/t.a.s. polpa	7,0	-	6,5	-	14,1	-	14,1	-	7,0	-	6,5	-	14,1	-	14,1	-
NaOH, kg/t.a.s. polpa	-	7,0	-	6,0	8,0	6,0	7,0	5,0	-	9,0	-	7,0	8,0	8,0	7,0	7,0
Resultados	D	E	D*	E	A/D*	E	AD	E	D	Ep	D*	Ep	A/D*	Ep	AD	Ep
pH final	2,9	11,2	3,0	11,2	2,8	10,9	3,2/3,0	11,2	2,9	11,2	3,0	10,9	2,8	11,0	3,2/3,0	10,9
Consumo, %	100	-	100	-	100	-	100	-	100	100	100	100	100	100	100	100
Alvura, % ISO	-	63,3	-	59,7	-	60,9	-	69,3	-	74,6	-	70,7	-	71,7	-	79,1
Alvura revertida, % ISO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nº kappa	-	3,4	-	2,9	-	3,4	-	1,8	-	3,1	-	2,5	-	2,9	-	1,4
Viscosidade, cP	-	23,0	-	19,9	-	20,2	-	19,8	-	20,4	-	16,3	-	15,9	-	15,3
HexA, mmol/kg.a.s. polpa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =6,4 kg O₂/t.a.s.; N° kappa =10,5; Viscosidade =16,4 cP e HexA's =45,7 mmol/kg.

²Características iniciais da polpa kraft-O₂: DQO =25,5 kg O₂/t.a.s.; N° kappa =11,9; Viscosidade =23,3 cP e HexA's =45,0 mmol/kg.

APÊNDICE B

Quadro 1B – Caracterização dos filtrados (kg/t.a.s. polpa) do pré-branqueamento, estágio por estágio, para polpa de alta DQO branqueada pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Repetição	Polpa de Alta DQO												
		D	E	Ep	D*	E	Ep	A/D*	E	Ep	A	D	E	Ep
pH	Média	2,9	11,2	11,2	3,0	11,2	10,9	2,8	10,9	11,0	3,2	3,0	11,2	10,9
DQO do efluente, kg O ₂ /t.a.s. polpa	A	21,8	8,54	8,53	25,6	9,59	9,79	23,09	12,9	8,80	17,4	11,9	8,37	6,91
	B	24,0	7,57	8,80	25,2	9,62	9,52	23,66	11,6	8,66	17,6	7,95	8,64	7,68
	Média	22,9	8,1	8,67	25,4	9,60	9,66	23,4	12,3	8,73	17,5	9,9	8,5	7,3
DBO do efluente, kg O ₂ /t.a.s. polpa	A	11,6	2,72	2,14	13,8	4,10	2,93	11,52	4,58	2,93	11,6	4,99	3,81	1,55
	B	11,6	2,72	1,94	13,8	4,49	2,93	10,03	4,59	2,74	10,5	4,98	3,81	0,95
	Média	11,6	2,7	2,04	13,8	4,29	2,93	10,8	4,59	2,84	11,0	4,99	3,81	1,25
COT do efluente, kg C/t.a.s. polpa	Média	9,33	3,05	2,8	11,4	3,6	3,65	8,21	4,50	3,14	6,78	5,34	2,96	3,33
AOX do efluente, kg Cl/t.a.s. polpa	A	0,58	0,05	0,05	0,32	0,07	0,05	0,45	0,06	0,04	0,02	0,12	0,07	0,04
	B	0,59	0,05	0,05	0,33	0,06	0,05	0,44	0,06	0,05	0,01	0,13	0,08	0,04
	Média	0,585	0,046	0,051	0,328	0,065	0,051	0,446	0,056	0,040	0,017	0,125	0,075	0,038
Cor do efluente, kg Pt/t.a.s. polpa	A	32,4	30,3	5,62	18,9	30,6	7,77	28,06	19,4	7,52	28,5	11,1	12,3	3,24
	B	32,4	30,3	5,72	18,8	30,7	7,87	28,18	19,4	7,48	28,6	11,1	12,3	3,33
	Média	32,4	30,3	5,67	18,8	30,7	7,82	28,1	19,4	7,49	28,5	11,1	12,3	3,29

Quadro 2B – Caracterização dos filtrados (mg/L filtrado) do pré-branqueamento, estágio por estágio, para polpa de alta DQO branqueada pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Repetição	Polpa de Alta DQO												
		D	E	Ep	D*	E	Ep	A/D*	E	Ep	A	D	E	Ep
pH	Média	2,9	11,2	11,2	3,0	11,2	10,9	2,8	10,9	11,0	3,2	3,0	11,2	10,9
DQO, mg O ₂ /L efluente	A	2426	949	948	2849	1065	1088	1962	1439	978	1930	1327	930	768
	B	2672	841	978	2799	1069	1058	2010	1285	962	1956	883	960	853
	Média	2549	895	963	2824	1067	1073	1986	1362	970	1943	1105	945	810
DBO, mg O ₂ /L efluente	A	1288	302	238	1535	455	326	979	509	326	1288	554	423	172
	B	1288	302	216	1535	499	326	852	510	304	1166	553	423	106
	Média	1288	302	227	1535	477	326	918	510	315	1227	554	423	139
COT, mg C/L efluente	Média	1037	339	311	1272	400	405	697	499	349	753	594	329	370
AOX, mg Cl ⁻ /L efluente	A	64,5	5,12	5,7	36,0	7,44	5,4	37,9	6,22	4,82	2,17	13,5	8,00	4,10
	B	65,7	5,11	5,7	36,8	6,9	6,0	37,8	6,29	5,16	1,53	14,3	8,56	4,32
	Média	65,1	5,12	5,7	36,4	7,17	5,7	37,9	6,26	4,99	1,85	13,9	8,28	4,21
Cor, mg Pt/L efluente	A	3601	3371	624	2097	3403	863	2384	2160	835	3165	1230	1369	360
	B	3603	3371	636	2091	3409	874	2394	2160	831	3179	1238	1370	370
	Média	3602	3371	630	2094	3406	869	2389	2160	833	3172	1234	1370	365

APÊNDICE C

Quadro 1C – Caracterização dos efluentes combinados brutos do pré-branqueamento (kg/t.a.s. polpa), para polpas de baixa e alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Repetição	Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
		DEp	D*Ep	A/D*Ep	ADEp	DE	D*E	A/D*E	ADE
pH	Média	6,9	6,40	5,57	4,8	4,0	3,95	3,3	3,1
DQO do efluente, kg O ₂ /t.a.s. polpa	A	18,67	18,85	21,62	23,19	33,05	34,29	30,07	36,96
	B	17,93	18,31	21,12	23,14	31,75	34,33	26,96	32,81
	C	17,69	18,00	20,81	23,11	33,10	36,02	27,42	35,34
	Média	18,1	18,4	21,2	23,1	32,6	34,8	28,3	35,2
DBO do efluente, kg O ₂ /t.a.s. polpa	A	7,22	7,45	9,14	9,48	14,69	17,89	13,50	15,55
	B	7,40	7,45	7,52	10,18	16,06	18,40	14,46	14,42
	Média	7,31	7,45	8,33	9,83	15,4	18,1	14,0	15,0
COT do efluente, kg C/t.a.s. polpa	Média	7,72	8,93	9,75	10,6	12,6	14,6	12,6	16,9
AOX do efluente, kg Cl ⁻ /t.a.s. polpa	A	0,486	0,309	0,436	0,512	0,468	0,284	0,422	0,392
	B	0,485	0,302	0,398	0,502	0,482	0,265	0,480	0,478
	Média	0,485	0,306	0,417	0,507	0,475	0,304	0,450	0,435
Cor do efluente, kg Pt/t.a.s. polpa	A	4,34	7,54	5,40	5,83	47,88	71,71	40,34	49,19
	B	4,48	7,61	5,40	6,10	47,79	71,91	40,83	49,36
	Média	4,41	7,58	5,40	5,97	47,8	71,8	40,6	49,3

Quadro 2C – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (kg/t.a.s. polpa), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência DEp

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl⁻/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	5,86	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	5,93	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	5,48	0,522	1,61	0,117	7,05
4	5,21	0,720	1,71	0,112	7,12
5	5,03	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	4,63	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	4,92	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	4,83	0,342	1,82	0,127	7,05
9	4,94	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	5,21	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	5,55	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	5,28	0,720	1,97	0,122	7,71
13	5,71	0,720	1,80	0,125	7,63
Média	5,28	0,605	1,78	0,121	7,31
Desvio Padrão	0,41	0,17	0,14	0,01	0,3

¹na = não avaliado

Quadro 3C – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (kg/t.a.s. polpa), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência D*Ep

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl⁻/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	6,43	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	6,34	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	6,56	0,522	2,11	0,138	10,20
4	6,76	0,522	1,94	0,137	9,94
5	5,71	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	6,09	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	5,91	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	5,73	0,522	2,09	0,131	9,96
9	7,35	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	7,39	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	7,66	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	6,49	0,720	2,27	0,140	12,37
13	6,18	0,342	2,17	0,132	10,60
Média	6,51	0,526	2,12	0,136	10,61
Desvio Padrão	0,63	0,13	0,12	0,004	1,0

¹na = não avaliado

Quadro 4C – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (kg/t.a.s. polpa), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência A/D*Ep

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	6,19	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	6,74	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	6,35	0,602	2,12	0,141	8,94
4	5,31	0,602	1,85	0,144	8,69
5	5,00	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	5,08	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	5,13	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	5,13	0,602	2,03	0,141	11,53
9	4,56	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	5,05	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	5,39	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	6,25	1,039	2,10	0,175	9,50
13	5,94	0,602	2,18	0,145	9,33
Média	5,55	0,690	2,06	0,149	9,60
Desvio Padrão	0,66	0,20	0,13	0,01	1,1

¹na = não avaliado

Quadro 5C – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (kg/t.a.s. polpa), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência ADEp

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	6,94	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	7,61	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	7,82	0,783	2,02	0,166	9,40
4	6,03	0,513	1,90	0,159	8,90
5	5,83	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	5,59	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	6,20	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	5,72	0,783	2,07	0,150	8,88
9	5,42	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	5,83	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	6,47	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	6,94	1,35	2,34	0,169	9,32
13	8,56	1,35	2,16	0,206	9,95
Média	6,53	0,956	2,10	0,170	9,29
Desvio Padrão	0,98	0,38	0,16	0,02	0,44

¹na = não avaliado

Quadro 6C – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (kg/t.a.s. polpa), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência DE

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	8,76	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	9,76	1,00	4,43	0,176	42,7
3	11,58	1,04	5,39	0,172	46,8
4	8,51	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	9,86	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	10,87	na ¹	4,54	0,147	43,9
7	10,44	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	10,24	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	10,2	0,473	4,96	0,170	44,7
10	8,64	0,624	8,43	0,184	45,5
Média	9,88	0,785	5,55	0,170	44,7
Desvio Padrão	1,01	0,28	1,65	0,01	1,6

¹na = não avaliado

Quadro 7C – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (kg/t.a.s. polpa), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência D*E

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	9,37	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	11,2	1,19	4,62	0,167	58,9
3	12,0	0,662	4,61	0,196	56,7
4	10,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	10,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	11,1	na ¹	4,76	0,177	59,2
7	11,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	12,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	11,9	0,852	5,43	0,184	65,1
10	10,9	1,00	5,18	0,170	64,7
Média	11,1	0,927	4,92	0,179	60,9
Desvio Padrão	0,89	0,22	0,37	0,01	3,76

¹na = não avaliado

Quadro 8C – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (kg/t.a.s. polpa), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência A/D*E

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	16,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	13,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	10,7	0,328	3,27	0,148	37,7
4	9,6	1,73	3,32	0,154	36,6
5	10,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	9,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	9,7	1,22	3,97	0,153	36,4
8	8,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	10,2	0,786	4,63	0,131	38,6
10	10,2	0,568	3,12	0,158	37,8
Média	10,8	0,927	3,66	0,149	37,43
Desvio Padrão	2,31	0,56	0,63	0,01	0,93

¹na = não avaliado

Quadro 9C – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (kg/t.a.s. polpa), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência ADE

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	19,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	14,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	11,4	1,05	3,80	0,131	45,19
4	10,4	1,02	3,72	0,134	47,91
5	17,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	11,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	9,48	0,993	4,41	0,138	47,94
8	8,98	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	12,9	1,02	4,94	0,136998	48,91
10	11,8	0,454	4,37	0,151	45,82
Média	12,7	0,909	4,25	0,138	47,2
Desvio Padrão	3,24	0,26	0,50	0,01	1,6

¹na = não avaliado

Quadro 10C – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (kg/t.a.s. polpa), para polpas de baixa e alta DQO, branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
	DEp	D*Ep	A/D*Ep	ADEp	DE	D*E	A/D*E	ADE
DQO do efluente, kg O ₂ /t.a.s. polpa	5,28	6,51	5,55	6,53	9,88	11,10	10,79	12,7
DBO do efluente, kg O ₂ /t.a.s. polpa	0,605	0,526	0,690	0,956	0,785	0,927	0,927	0,909
COT do efluente, kg C/t.a.s. polpa	1,78	2,12	2,06	2,10	5,55	4,92	3,66	4,25
AOX do efluente, kg Cl ⁻ /t.a.s. polpa	0,121	0,136	0,149	0,170	0,170	0,179	0,149	0,138
Cor do efluente, kg Pt/t.a.s. polpa	7,31	10,6	9,59	9,29	44,7	60,9	37,4	47,2

APÊNDICE D

Quadro 1D – Caracterização dos efluentes combinados brutos do pré-branqueamento (mg/L efluente), para polpas de baixa e alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Repetição	Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
		DEp	D*Ep	A/D*Ep	ADEp	DE	D*E	A/D*E	ADE
pH	Média	6,9	6,4	5,6	4,8	4,0	4,0	3,3	3,1
DQO, mg O ₂ /L efluente	A	1037	1047	1041	859	1836	1905	1448	1369
	B	996	1017	1017	857	1764	1907	1298	1215
	C	983	1000	1002	856	1839	2001	1320	1309
	Média	1004	1020	1019	857	1808	1935	1364	1304
DBO, mg O ₂ /L efluente	A	401	414	440	351	816	994	650	576
	B	411	414	362	377	892	1022	696	534
	Média	406	414	401	364	854	1008	673	555
COT, mg C/L efluente	Média	429	496	470	393	701	812	605	625
AOX, mg Cl/L efluente	A	27,0	17,2	21,0	19,0	26,0	15,8	20,3	14,5
	B	26,9	16,8	19,2	18,6	26,8	14,7	23,1	17,7
	Média	27,0	17,0	20,1	18,8	26,4	16,9	21,7	16,1
Cor, mg Pt/L efluente	A	241	419	260	216	2660	3984	1942	1822
	B	249	423	260	226	2655	3995	1966	1828
	Média	245	421	260	221	2657	3990	1954	1825

Quadro 2D – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (mg/L efluente), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência DEp

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	326	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	330	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	305	29	89,2	6,53	392
4	290	40	95,3	6,20	395
5	280	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	257	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	273	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	268	19	101	7,05	392
9	275	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	290	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	308	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	293	40	110	6,80	429
13	317	40	100	6,96	424
Média	293	33,6	99,1	6,71	406
Desvio Padrão	22,7	9,45	7,60	0,35	18,3

¹na = não avaliado

Quadro 3D – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (mg/L efluente), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência D*Ep

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	357	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	352	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	365	29	117	7,66	566
4	376	29	108	7,59	552
5	317	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	338	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	328	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	318	29	116	7,27	553
9	408	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	411	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	426	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	361	40	126	7,80	687
13	343	19	121	7,35	589
Média	362	29,2	118	7,53	590
Desvio Padrão	35,2	7,43	6,82	0,22	56,6

¹na = não avaliado

Quadro 4D – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (mg/L efluente), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência A/D*Ep

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	298	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	325	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	306	29	102	6,79	430
4	256	29	89,0	6,95	419
5	241	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	245	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	247	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	247	29	98	6,79	555
9	220	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	243	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	260	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	301	50	101	8,42	458
13	286	29	105	6,98	449
Média	267	33,2	99,0	7,19	462
Desvio Padrão	32,0	9,39	6,14	0,70	54,2

¹na = não avaliado

Quadro 5D – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (mg/L efluente), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência ADEpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	257	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	282	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	290	29	74,9	6,14	348
4	223	19	70,3	5,88	329
5	216	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	207	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	230	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	212	29	76,8	5,57	329
9	201	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	216	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	240	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	257	50	87	6,28	345
13	317	50	80	7,62	369
Média	242	35,4	77,7	6,30	344
Desvio Padrão	36,1	13,94	6,11	0,79	16,3

¹na = não avaliado

Quadro 6D – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (mg/L efluente), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência DEpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	487	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	542	55,7	246	9,80	2370
3	644	57,8	300	9,56	2599
4	473	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	548	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	604	na ¹	252	8,15	2440
7	580	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	569	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	565	26,3	276	9,46	2485
10	480	34,7	468	10,2	2529
Média	549	43,6	308	9,43	2485
Desvio Padrão	55,9	15,6	91,9	0,77	86,8

¹na = não avaliado

Quadro 7D – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (mg/L efluente), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência D*EpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl/L	Cor, mg Pt/L
1	521	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	625	66,2	257	9,26	3275
3	665	36,8	256	10,9	3150
4	559	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	598	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	619	na ¹	265	9,81	3287
7	632	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	680	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	663	47,3	302	10,2	3615
10	606	55,7	288	9,46	3596
Média	617	51,5	273	9,93	3385
Desvio Padrão	49,2	12,5	20,3	0,65	209

¹na = não avaliado

Quadro 8D – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (mg/L efluente), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência A/D*EpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	779	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	644	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	516	15,8	158	7,13	1815
4	460	83,4	160	7,39	1764
5	504	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	453	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	465	58,9	191	7,35	1751
8	393	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	490	37,8	223	6,29	1860
10	492	27,3	150	7,60	1822
Média	519	44,6	176	7,15	1802
Desvio Padrão	111	26,9	30,4	0,51	44,8

¹na = não avaliado

Quadro 9D – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (mg/L efluente), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência ADEpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	706	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	534	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	421	39,0	141	4,83	1674
4	386	37,8	138	4,97	1774
5	629	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	443	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	351	36,8	164	5,10	1776
8	333	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	476	37,8	183	5,07	1811
10	437	16,8	162	5,60	1697
Média	472	33,7	157	5,12	1746
Desvio Padrão	120	9,45	18,5	0,29	58,3

¹na = não avaliado

Quadro 10D – Caracterização dos efluentes combinados tratados do pré-branqueamento (mg/L efluente), para polpas de baixa e alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
	DEp	D*Ep	A/D*Ep	ADEp	DE	D*E	A/D*E	ADE
DQO, mg O ₂ /L efluente	293	362	267	242	549	617	519	472
DBO, mg O ₂ / L efluente	33,6	29,2	33,2	35,4	43,6	51,5	44,6	33,7
COT, mg C/ L efluente	99,1	118	99,0	77,7	308	273	176	157
AOX, mg Cl ⁻ / L efluente	6,7	7,53	7,19	6,30	9,43	9,93	7,15	5,12
Cor, mg Pt/ L efluente	406	590	462	344	2485	3385	1802	1746

APÊNDICE E

Quadro 1E – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência DEp

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	68,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	68,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	70,6	92,9	79,2	75,8	-60,1
4	72,1	90,1	77,8	77,0	-61,5
5	71,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	74,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	72,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	73,1	95,3	76,4	73,9	-60,1
9	72,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	70,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	68,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	70,2	90,1	74,4	74,8	-75,0
13	67,8	90,1	76,6	74,2	-73,2
Média	70,8	91,7	76,9	75,1	-66,0
Desvio Padrão	2,04	2,33	1,77	1,28	7,75

¹na = não avaliado

Quadro 2E – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência D*Ep

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	65,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	66,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	65,2	93,0	76,4	54,8	-34,6
4	64,1	93,0	78,3	55,3	-31,2
5	68,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	66,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	67,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	68,7	93,0	76,6	57,2	-31,4
9	59,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	58,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	57,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	63,9	90,3	74,6	54,0	-63,3
13	65,7	95,4	75,7	56,7	-39,9
Média	64,5	92,9	76,3	55,6	-40,1
Desvio Padrão	3,76	1,79	1,37	1,31	13,5

¹na = não avaliado

Quadro 3E – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência A/D*Ep

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	71,3	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	68,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	70,6	92,8	78,2	66,1	-65,5
4	75,4	92,8	81,1	65,4	-61,0
5	76,3	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	76,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	75,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	75,7	92,8	79,2	66,1	-113
9	78,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	75,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	74,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	70,0	87,5	78,5	58,0	-76,0
13	71,5	92,8	77,7	65,2	-72,7
Média	73,8	91,7	78,9	64,2	-77,7
Desvio Padrão	2,95	2,34	1,31	3,47	20,8

¹na = não avaliado

Quadro 4E – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência ADEp

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	70,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	67,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	66,3	92,0	80,9	67,3	-57,5
4	74,0	94,8	82,1	68,7	-49,0
5	74,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	75,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	73,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	75,3	92,0	80,5	70,4	-48,8
9	76,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	74,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
11	72,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
12	70,0	86,3	77,9	66,6	-56,2
13	63,0	86,3	79,7	59,4	-66,7
Média	71,8	90,3	80,2	66,5	-55,6
Desvio Padrão	4,20	3,83	1,55	4,20	7,36

¹na = não avaliado

Quadro 5E – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência DE

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	73,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	70,5	93,5	64,9	62,9	10,8
3	65,0	93,2	57,2	63,8	2,18
4	73,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	68,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	65,8	na ¹	64,0	69,1	8,15
7	67,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	69,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	69,3	96,9	60,7	64,2	6,48
10	73,9	95,9	33,2	61,4	4,79
Média	69,6	94,9	56,0	64,3	6,48
Desvio Padrão	3,18	1,82	13,1	2,93	3,27

¹na = não avaliado

Quadro 6E – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência D*E

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	72,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	67,2	93,4	68,4	45,2	17,9
3	65,1	96,4	68,4	35,5	21,1
4	70,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	68,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	67,5	na ¹	67,4	42,0	17,6
7	66,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
8	66,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	66,9	95,3	62,9	39,6	9,40
10	69,7	94,5	64,6	44,0	9,89
Média	68,1	94,9	66,3	41,3	15,2
Desvio Padrão	2,30	1,24	2,50	3,86	5,23

¹na = não avaliado

Quadro 7E – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência A/D*E

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	46,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	55,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	64,3	97,7	74,0	67,1	7,11
4	68,2	87,6	73,6	65,9	9,72
5	61,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	65,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	64,2	91,3	68,4	66,1	10,4
8	70,3	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	62,9	94,4	63,1	71,0	4,78
10	62,7	95,9	75,2	64,9	6,73
Média	62,1	93,4	70,8	67,0	7,74
Desvio Padrão	6,83	3,99	5,02	2,35	2,3

¹na = não avaliado

Quadro 8E – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência ADE

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	48,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	61,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	69,2	93,0	77,4	70,0	8,31
4	71,8	93,2	77,9	69,1	2,79
5	48,3	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	63,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	71,1	93,4	73,8	68,3	2,73
8	74,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	63,6	93,2	70,7	68,5	0,766
10	66,6	97,0	74,1	65,2	7,04
Média	63,8	93,9	74,8	68,2	4,33
Desvio Padrão	9,17	1,70	2,96	1,81	3,19

¹na = não avaliado

Quadro 9E – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpas de baixa e alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
	DEp	D*Ep	A/D*Ep	ADEp	DE	D*E	A/D*E	ADE
Remoção de DQO do efluente, %	70,8	64,5	73,8	71,8	69,6	68,1	62,1	63,8
Remoção de DBO do efluente, %	91,7	92,9	91,7	90,3	94,9	94,9	93,4	93,9
Remoção de COT do efluente, %	76,9	76,3	78,9	80,2	56,0	66,3	70,9	74,8
Remoção de AOX do efluente, %	75,1	55,6	64,2	66,5	64,3	41,3	67,0	68,2
Remoção de Cor do efluente, %	-67,5	-40,1	-77,74	-55,6	6,48	15,2	7,74	4,33

APÊNDICE F

Quadro 1F – Caracterização dos efluentes combinados brutos das seqüências de branqueamento inteiras (kg/t.a.s. polpa), para polpas de baixa e alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Repetição	Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
		DEpD	D*EpD	A/D*EpD	ADEpD	DEpDD	D*EpDD	A/D*EpDD	ADEpDD
pH	Média	6,7	6,28	5,15	4,8	4,4	4,0	4,6	4,6
DQO do efluente, kg O ₂ /t.a.s. polpa	A	22,28	2,32	23,37	24,05	42,95	45,65	43,34	53,01
	B	21,82	23,14	23,07	23,98	41,58	44,14	47,26	52,47
	C	22,17	23,11	22,98	23,29	38,09	41,69	40,71	46,58
	Média	22,1	23,1	23,1	23,7	41,1	44,0	43,7	50,9
DBO do efluente, kg O ₂ /t.a.s. polpa	A	9,61	9,56	10,54	10,87	17,46	18,36	16,90	18,95
	B	11,45	10,37	10,78	11,88	17,89	18,58	16,90	17,33
	Média	10,5	10,0	10,7	11,4	17,7	18,5	16,9	18,1
COT do efluente, kg C/t.a.s. polpa	Média	9,88	9,59	10,8	10,7	15,8	17,2	13,8	17,6
AOX do efluente, kg Cl ⁻ /t.a.s. polpa	A	0,63	0,32	0,45	0,51	0,565	0,526	0,541	0,414
	B	0,59	0,37	0,43	0,54	0,565	0,504	0,524	0,410
	Média	0,610	0,342	0,437	0,523	0,566	0,514	0,532	0,412
Cor do efluente, kg Pt/t.a.s. polpa	A	5,27	8,45	5,78	6,12	36,00	41,83	30,43	45,99
	B	5,32	8,45	6,01	6,05	36,07	42,34	30,43	46,35
	Média	5,29	8,45	5,89	6,10	39,6	42,1	30,4	46,2

Quadro 2F – Caracterização dos efluentes combinados tratados das seqüências de branqueamento inteiras (kg/t.a.s. polpa), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência DEpD

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl⁻/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	7,07	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	6,84	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	6,60	0,513	2,44	0,134	7,56
4	6,80	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	5,69	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	4,91	0,513	2,15	0,139	7,70
7	4,71	0,513	1,61	0,134	7,56
8	5,45	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	5,76	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	5,25	0,513	2,26	0,140	7,68
11	6,70	0,513	2,42	0,147	8,26
12	5,15	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	5,76	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	5,90	0,513	2,18	0,139	7,75
Desvio Padrão	0,81	0,00	0,34	0,01	0,3

¹na = não avaliado

Quadro 3F – Caracterização dos efluentes combinados tratados das seqüências de branqueamento inteiras (kg/t.a.s. polpa), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência D*EpD

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl⁻/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	6,94	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	7,61	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	7,82	0,783	2,58	0,186	10,88
4	6,03	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	5,83	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	5,59	0,216	2,43	0,149	10,5
7	6,20	0,513	2,47	0,148	10,4
8	5,72	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	5,42	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	5,83	0,513	2,16	0,151	11,2
11	6,08	0,513	2,80	0,146	12,8
12	6,23	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	6,74	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	6,31	0,508	2,49	0,156	11,2
Desvio Padrão	0,75	0,20	0,23	0,02	1,0

¹na = não avaliado

Quadro 4F – Caracterização dos efluentes combinados tratados das seqüências de branqueamento inteira (kg/t.a.s. polpa), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência A/D*EpD

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl⁻/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	7,87	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	7,54	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	7,06	0,566	2,15	0,158	10,12
4	6,13	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	6,13	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	5,01	0,566	1,93	0,154	9,08
7	5,23	0,238	2,72	0,156	7,38
8	5,27	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	5,46	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	5,05	0,566	2,05	0,167	8,48
11	5,60	0,863	1,95	0,138	7,26
12	5,72	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	7,32	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	6,11	0,560	2,16	0,155	8,46
Desvio Padrão	1,01	0,22	0,33	0,01	1,2

¹na = não avaliado

Quadro 5F – Caracterização dos efluentes combinados tratados das sequências de branqueamento inteiras (kg/t.a.s. polpa), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência ADEpD

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl⁻/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	8,53	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	7,36	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	7,54	0,288	2,92	0,170	10,7
4	6,64	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	6,91	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	5,70	0,684	2,87	0,181	9,32
7	5,43	1,44	2,84	0,180	10,5
8	6,46	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	6,24	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	6,19	1,84	2,47	0,171	9,47
11	8,35	1,04	2,62	0,205	10,1
12	5,65	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	6,42	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	6,73	1,1	2,7	0,18	10
Desvio Padrão	0,98	0,61	0,19	0,01	0,6

¹na = não avaliado

Quadro 6F – Caracterização dos efluentes combinados tratados das sequências de branqueamento inteiras (kg/t.a.s. polpa), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência DEpDD

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	24,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	15,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	13,8	1,32	5,31	0,220	38,4
4	14,4	1,36	6,79	0,211	47,5
5	12,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	12,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	13,0	1,30	6,47	0,208	49,9
8	12,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	14,7	0,606	3,40	0,181	45,5
10	10,1	1,36	5,31	0,193	41,7
Média	14,3	1,19	5,46	0,203	44,6
Desvio Padrão	3,76	0,33	1,33	0,02	4,6

¹na = não avaliado

Quadro 7F – Caracterização dos efluentes combinados tratados das sequências de branqueamento inteiras (kg/t.a.s. polpa), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência D*EpDD

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl⁻/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	22,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	15,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	13,6	1,36	7,19	0,224	44,9
4	13,6	1,74	5,40	0,197	31,5
5	11,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	11,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	12,7	1,36	5,04	na ¹	31,5
8	12,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	12,6	1,36	5,94	0,226	50,3
10	11,2	1,36	6,90	0,193	48,7
Média	13,8	1,44	6,09	0,204	41,4
Desvio Padrão	3,18	0,17	0,93	0,02	9,23

¹na = não avaliado

Quadro 8F – Caracterização dos efluentes combinados tratados das sequências de branqueamento inteiras (kg/t.a.s. polpa), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência A/D*EpDD

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl⁻/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	23,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	16,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	12,6	0,611	5,21	0,220	31,0
4	14,1	2,68	5,74	0,203	43,2
5	12,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	11,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	12,7	2,28	6,08	0,203	45,0
8	12,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	12,7	2,38	5,45	0,191	37,5
10	13,6	3,30	4,99	0,202	41,8
Média	14,3	2,25	5,49	0,204	39,7
Desvio Padrão	3,57	1,00	0,43	0,01	5,61

¹na = não avaliado

Quadro 9F – Caracterização dos efluentes combinados tratados das sequências de branqueamento inteiras (kg/t.a.s. polpa), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência ADEpDD

Ciclos	DQO, kg O₂/t.a.s.	DBO₅, kg O₂/t.a.s.	COT, kg C/t.a.s.	AOX, kg Cl⁻/t.a.s.	Cor, kg Pt/t.a.s.
1	23,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	21,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	17,0	1,18	5,67	0,150	49,6
4	15,6	1,23	4,72	0,140	52,9
5	19,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	15,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	16,7	1,23	6,05	0,141	51,0
8	14,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	17,3	1,23	6,52	0,136	56,7
10	17,5	0,757	6,09	0,227	51,0
Média	17,9	1,13	5,81	0,159	52,2
Desvio Padrão	2,85	0,21	0,68	0,04	2,8

¹na = não avaliado

Quadro 10F – Caracterização dos efluentes combinados tratados das seqüências de branqueamento inteiras (kg/t.a.s. polpa), para polpas de baixa e alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas pelas tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
	DEpD	D*EpD	A/D*EpD	ADEpD	DEpDD	D*EpDD	A/D*EpDD	ADEpDD
DQO do efluente, kg O ₂ /t.a.s. polpa	5,90	6,31	6,11	6,73	14,3	13,8	14,27	17,92
DBO ₅ do efluente, kg O ₂ /t.a.s. polpa	0,513	0,508	0,560	1,06	1,190	1,44	2,25	1,13
COT do efluente, kg C/t.a.s. polpa	2,18	2,49	2,16	2,74	5,46	6,09	5,49	5,81
AOX do efluente, kg Cl ⁻ /t.a.s. polpa	0,139	0,156	0,155	0,181	0,203	0,204	0,204	0,159
Cor do efluente, kg Pt/t.a.s. polpa	7,75	11,2	8,46	10,0	44,6	41,4	39,7	52,2

APÊNDICE G

Quadro 1G – Caracterização dos efluentes combinados brutos das seqüências de branqueamento inteiras (mg/L efluente), para polpas de baixa e alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Repetição	Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
		DEpD	D*EpD	A/D*EpD	ADEpD	DEpDD	D*EpDD	A/D*EpDD	ADEpDD
pH	Média	6,7	6,3	5,2	4,8	4,4	4,0	4,6	4,6
DQO, mg O ₂ /L efluente	A	825	860	785	668	1193	1268	1118	1178
	B	808	857	775	666	1155	1226	1219	1166
	C	821	856	772	647	1058	1158	1050	1035
	Média	818	857	777	659	1141	1222	1128	1131
DBO ₅ , mg O ₂ /L efluente	A	356	354	354	302	485	510	436	421
	B	424	384	362	330	497	516	436	385
	Média	390	369	358	316	491	513	436	403
COT, mg/L efluente	Média	366	355	363	297	438	477	355	391
AOX, mg Cl ⁻ /L efluente	A	23,25	11,78	14,98	14,13	15,7	14,6	13,95	9,21
	B	21,97	13,57	14,4	14,94	15,7	14,0	13,52	9,12
	Média	22,6	12,7	14,7	14,5	15,7	14,3	13,7	9,16
Cor, mg/L efluente	A	195	313	194	170	1000	1162	785	1022
	B	197	313	202	168	1002	1176	785	1030
	Média	196	313	198	169	1101	1169	785	1026

Quadro 2G – Caracterização dos efluentes combinados tratados das seqüências de branqueamento inteiras (mg/L efluente), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência DEpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	262	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	253	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	245	19	90,5	4,95	280
4	252	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	211	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	182	19	79,7	5,17	285
7	175	19	59,8	4,96	280
8	202	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	213	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	195	19	83,7	5,17	284
11	248	19	89,6	5,45	306
12	191	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	213	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	219	19,0	80,6	5,14	287
Desvio Padrão	30,0	0,00	12,48	0,20	10,7

¹na = não avaliado

Quadro 3G – Caracterização dos efluentes combinados tratados das sequências de branqueamento inteiras (mg/L efluente), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência D*EpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	257	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	282	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	290	29	95,5	6,88	403
4	223	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	216	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	207	8	89,9	5,52	388
7	230	19	91,5	5,50	387
8	212	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	201	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	216	19	80,0	5,60	414
11	225	19	104	5,41	474
12	231	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	250	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	234	18,8	92,1	5,78	413
Desvio Padrão	27,9	7,43	8,63	0,62	35,8

¹na = não avaliado

Quadro 4G – Caracterização dos efluentes combinados tratados das sequências de branqueamento inteiras (mg/L efluente), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência A/D*EpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	265	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	253	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	237	19	72,4	5,31	340
4	206	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	206	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	168	19,0	64,7	5,19	305
7	176	8,0	91,4	5,25	248
8	177	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	183	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	170	19,0	68,8	5,60	285
11	188	29,0	65,5	4,62	244
12	192	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	246	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	205	18,8	72,5	5,20	284
Desvio Padrão	33,8	7,43	10,94	0,36	40,2

¹na = não avaliado

Quadro 5G – Caracterização dos efluentes combinados tratados das seqüências de branqueamento inteiras (mg/L efluente), para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência ADEpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	237	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	205	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	210	8,00	81,2	4,71	297
4	185	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	192	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	158	19,0	79,7	5,03	259
7	151	40,0	78,9	5,00	291
8	180	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	173	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	172	51,0	68,7	4,76	263
11	232	29,0	72,6	5,68	279
12	157	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	178	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	187	29,4	76,2	5,04	278
Desvio Padrão	27,3	16,9	5,32	0,39	16,8

¹na = não avaliado

Quadro 6G – Caracterização dos efluentes combinados tratados das seqüências de branqueamento inteiras (mg/L efluente), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência DEpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	666	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	443	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	383	36,8	148	6,11	1065
4	401	37,8	189	5,87	1320
5	335	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	350	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	361	36,0	180	5,79	1387
8	351	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	408	16,8	94,5	5,04	1263
10	280	37,8	148	5,35	1157
Média	398	33,1	152	5,63	1239
Desvio Padrão	104	9,11	37,0	0,43	128

¹na = não avaliado

Quadro 7G – Caracterização dos efluentes combinados tratados das sequências de branqueamento inteiras (mg/L efluente), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência D*EpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	610	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	441	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	379	37,8	200	6,22	1247
4	378	48,4	150	5,46	875
5	321	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	330	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	353	37,8	140	na ¹	875
8	349	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	351	37,8	165	6,28	1397
10	310	37,8	192	5,35	1352
Média	382	39,9	169,3	5,66	1149
Desvio Padrão	88,2	4,70	25,9	0,57	256

¹na = não avaliado

Quadro 8G – Caracterização dos efluentes combinados tratados das seqüências de branqueamento inteiras (mg/L efluente), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência A/D*EpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	613	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	424	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	326	15,8	135	5,68	799
4	364	69,0	148	5,23	1115
5	319	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	305	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	329	58,9	157	5,23	1159
8	323	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	329	61,5	141	4,93	966
10	351	85,0	129	5,22	1078
Média	368	58,0	142	5,26	1023
Desvio Padrão	92,2	25,7	11,0	0,27	145

¹na = não avaliado

Quadro 9G – Caracterização dos efluentes combinados tratados das seqüências de branqueamento inteiras (mg/L efluente), para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência ADEpD

Ciclos	DQO, mg O₂/L	DBO₅, mg O₂/L	COT, mg C/L	AOX, mg Cl⁻/L	Cor, mg Pt/L
1	524	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	485	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	379	26,3	126	3,34	1102
4	346	27,3	105	3,11	1177
5	430	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	344	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	370	27,3	135	3,14	1133
8	330	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	385	27,3	145	3,02	1259
10	390	16,8	135	5,05	1132
Média	398	25,0	129	3,53	1161
Desvio Padrão	63,3	4,6	15,1	0,86	61,3

¹na = não avaliado

Quadro 10G – Caracterização dos efluentes combinados tratados das seqüências de branqueamento inteiras (mg/L efluente), para polpas de baixa e alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas pelas tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
	DEpD	D*EpD	A/D*EpD	ADEpD	DEpDD	D*EpDD	A/D*EpDD	ADEpDD
DQO, mg O ₂ / efluente	219	234	205	187	398	382	368	398
DBO, mg O ₂ / efluente	19,0	18,8	18,8	29,4	33,1	39,9	58,0	25,0
COT, mg C/ efluente	80,6	92,1	72,5	76,2	152	169	142	129
AOX, mg Cl ⁻ / efluente	5,14	5,78	5,20	5,04	5,63	5,66	5,26	3,53
Cor, mg Pt/ efluente	287	413	284	278	1239	1149	1023	1161

APÊNDICE H

Quadro 1H – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência DEpD

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	68,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	69,3	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	70,3	95,1	75,3	78,1	-42,8
4	69,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	74,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	77,9	95,1	78,2	77,2	-45,5
7	78,8	95,1	83,7	78,1	-42,8
8	75,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	73,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	75,9	95,1	77,1	77,1	-45,1
11	69,3	95,1	75,5	75,9	-56,0
12	76,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	73,6	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	73,3	95,1	77,9	77,3	-46,4
Desvio Padrão	3,61	0,00	3,41	0,90	5,48

¹na = não avaliado

Quadro 2H – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência D*EpD

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	70,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	67,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	66,3	92,1	73,1	45,7	-28,8
4	74,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	74,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	75,8	97,8	74,7	56,4	-23,9
7	73,2	94,9	74,2	56,6	-23,6
8	75,3	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	76,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	74,8	94,9	77,5	55,8	-32,2
11	73,7	94,9	70,8	57,3	-51,4
12	73,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	70,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	72,7	94,9	74,1	54,4	-32,0
Desvio Padrão	3,22	2,01	2,43	4,88	11,43

¹na = não avaliado

Quadro 3H – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência A/D*EpD

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	66,3	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	67,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	69,8	94,7	80,1	63,9	-71,8
4	73,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	73,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	78,3	94,7	82,2	64,7	-54,2
7	77,3	97,8	74,8	64,2	-25,3
8	77,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	76,3	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	78,0	94,7	81,1	61,8	-43,9
11	75,6	91,9	82,0	68,5	-23,3
12	75,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	68,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	73,6	94,7	80,0	64,6	-43,7
Desvio Padrão	4,22	2,08	3,01	2,43	20,32

¹na = não avaliado

Quadro 4H – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de baixa DQO branqueada pela seqüência ADEpD

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	64,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	68,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	68,5	97,5	72,7	67,6	-75,4
4	72,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
5	71,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	76,2	94,0	73,1	65,4	-52,9
7	77,4	87,3	73,4	65,6	-72,1
8	73,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	73,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
10	73,4	83,9	76,9	67,2	-55,4
11	64,1	90,8	75,5	60,9	-65,0
12	75,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
13	72,4	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
Média	71,6	90,7	74,3	65,3	-64,2
Desvio Padrão	4,15	5,35	1,79	3,06	9,91

¹na = não avaliado

Quadro 5H – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência DEpDD

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	44,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	62,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	67,9	92,5	66,3	61,1	3,20
4	66,4	92,3	56,9	62,7	-19,9
5	71,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	69,7	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	68,7	92,7	59,0	63,2	-26,0
8	66,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	61,5	96,6	78,4	68,0	-14,7
10	73,5	92,3	66,3	66,0	-5,15
Média	65,3	93,3	65,4	64,2	-12,5
Desvio Padrão	8,23	1,86	8,44	2,74	11,7

¹na = não avaliado

Quadro 6H – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência D*EpDD

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	51,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	65,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	70,1	92,6	58,2	56,4	-6,64
4	70,2	90,6	68,6	61,8	25,2
5	73,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	73,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	71,3	92,6	70,7	na ¹	25,2
8	69,9	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	69,7	92,6	65,4	56,0	-19,5
10	73,2	92,6	59,8	62,5	-15,6
Média	68,8	92,2	64,5	60,4	1,74
Desvio Padrão	6,45	0,92	5,43	4,01	21,9

¹na = não avaliado

Quadro 7H – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência A/D*EpDD

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	45,2	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	62,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	70,8	96,4	62,1	58,6	-1,72
4	67,4	84,2	58,3	61,9	-42,0
5	73,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	75,0	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	73,0	86,5	55,8	61,9	-47,7
8	69,3	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	68,7	85,9	60,4	64,1	-23,1
10	66,6	80,5	63,7	62,0	-37,3
Média	67,2	86,7	60,0	61,7	-30,4
Desvio Padrão	8,62	5,90	3,10	1,95	18,4

¹na = não avaliado

Quadro 8H – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpa de alta DQO branqueada pela seqüência ADEpDD

Ciclos	DQO, %	DBO₅, %	COT, %	AOX, %	Cor, %
1	55,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
2	58,8	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
3	67,8	93,5	67,8	63,5	-7,40
4	70,6	93,2	73,2	66,1	-14,7
5	63,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
6	70,5	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
7	68,3	93,2	65,6	65,7	-10,5
8	68,1	na ¹	na ¹	na ¹	na ¹
9	62,8	93,2	63,0	67,1	-22,8
10	62,3	95,8	65,4	44,8	-10,4
Média	64,8	93,8	67,0	61,4	-13,1
Desvio Padrão	5,09	1,14	3,87	9,38	5,98

¹na = não avaliado

Quadro 9H – Remoção (%) de DQO, DBO₅, COT, AOX e Cor dos efluentes combinados do pré-branqueamento após tratamento biológico, para polpas de baixa e alta DQO branqueadas pelas seqüências iniciadas com as tecnologias D, D*, A/D* e AD

Resultados	Polpa de Baixa DQO				Polpa de Alta DQO			
	DEpD	D*EpD	A/D*EpD	ADEpD	DEpDD	D*EpDD	A/D*EpDD	ADEpDD
Remoção de DQO do efluente, %	73,3	72,7	73,6	71,6	65,3	68,8	67,2	64,8
Remoção de DBO do efluente, %	95,1	94,9	94,7	90,7	93,3	92,2	86,7	93,8
Remoção de COT do efluente, %	77,9	74,1	80,0	74,3	65,4	64,5	60,0	67,0
Remoção de AOX do efluente, %	77,3	54,4	64,6	65,3	64,2	60,4	61,7	61,4
Remoção de Cor do efluente, %	-46,4	-32,0	-43,7	-64,2	-12,5	1,74	-30,4	-13,1

APÊNDICE I

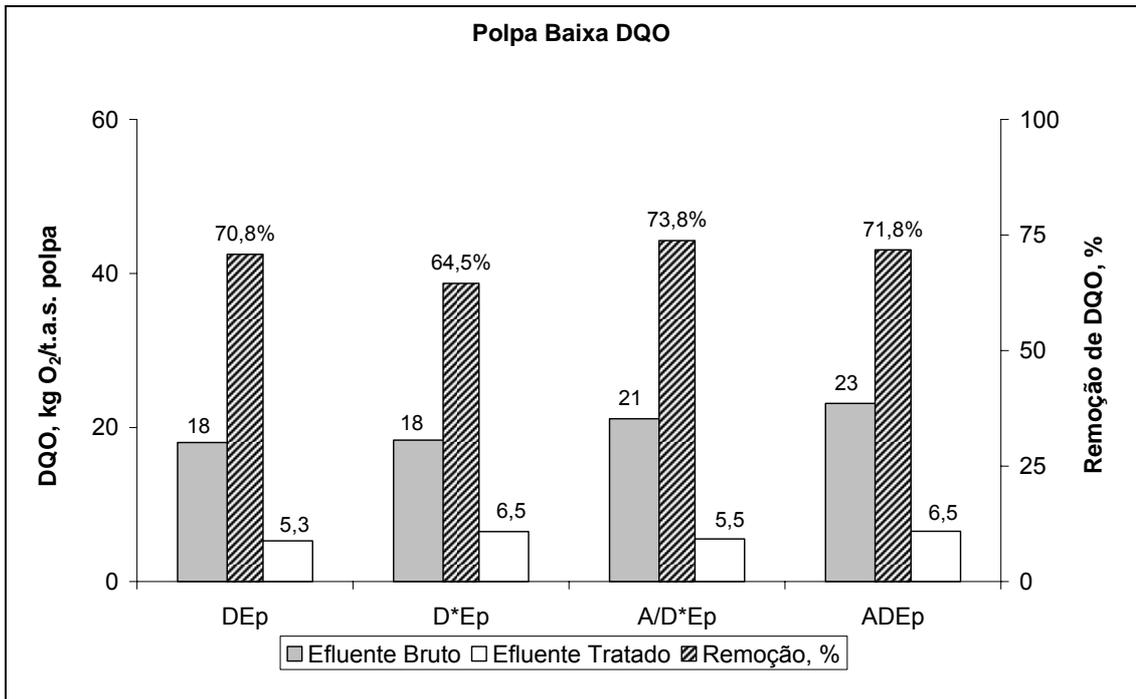


Figura 1l – DQO (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoções da DQO (%), para polpa de baixa DQO

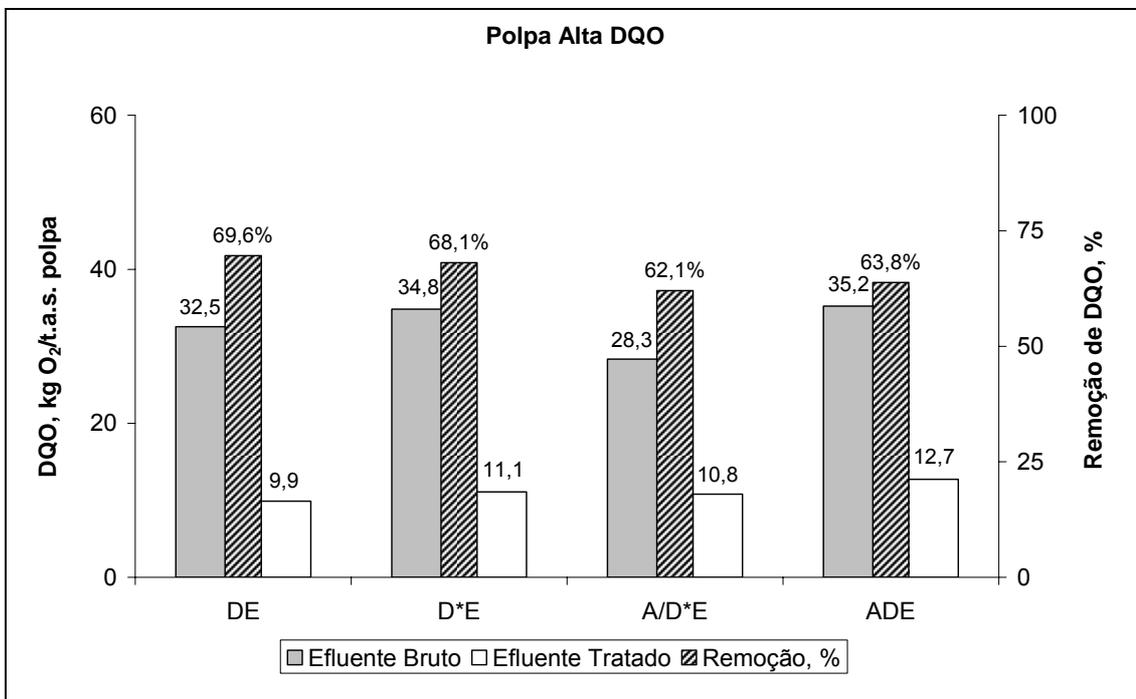


Figura 2l – DQO (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoções da DQO (%), para polpa de alta DQO

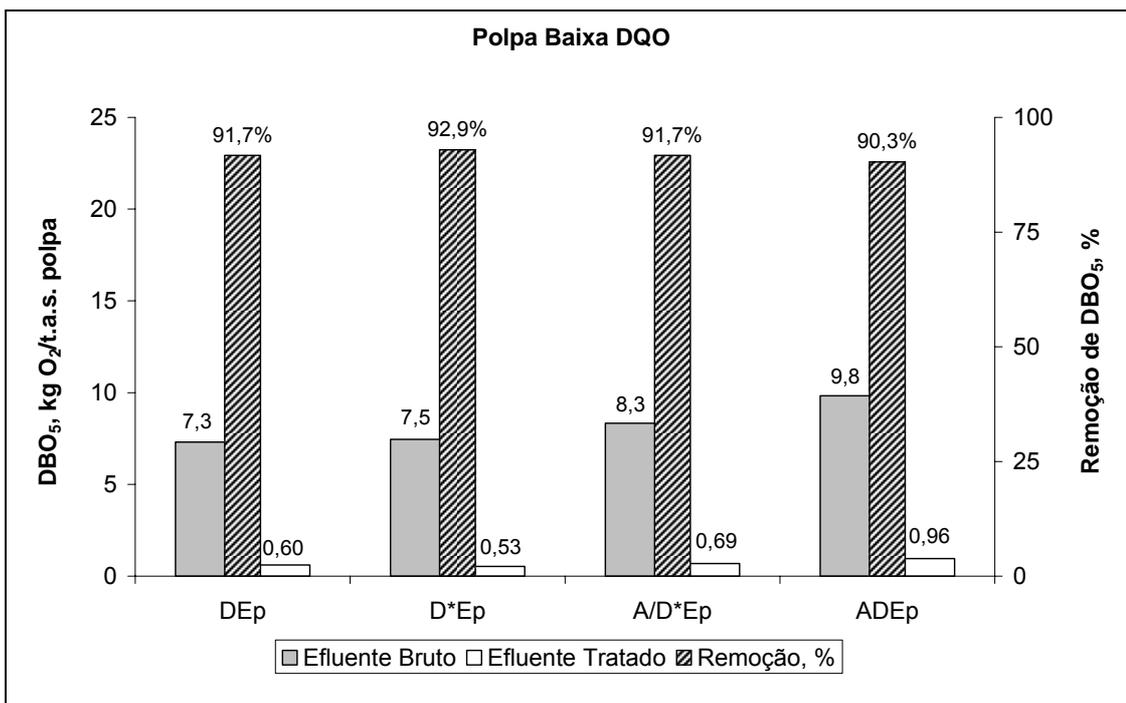


Figura 3l – DBO₅ (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoções da DBO₅ (%), para polpa de baixa DQO

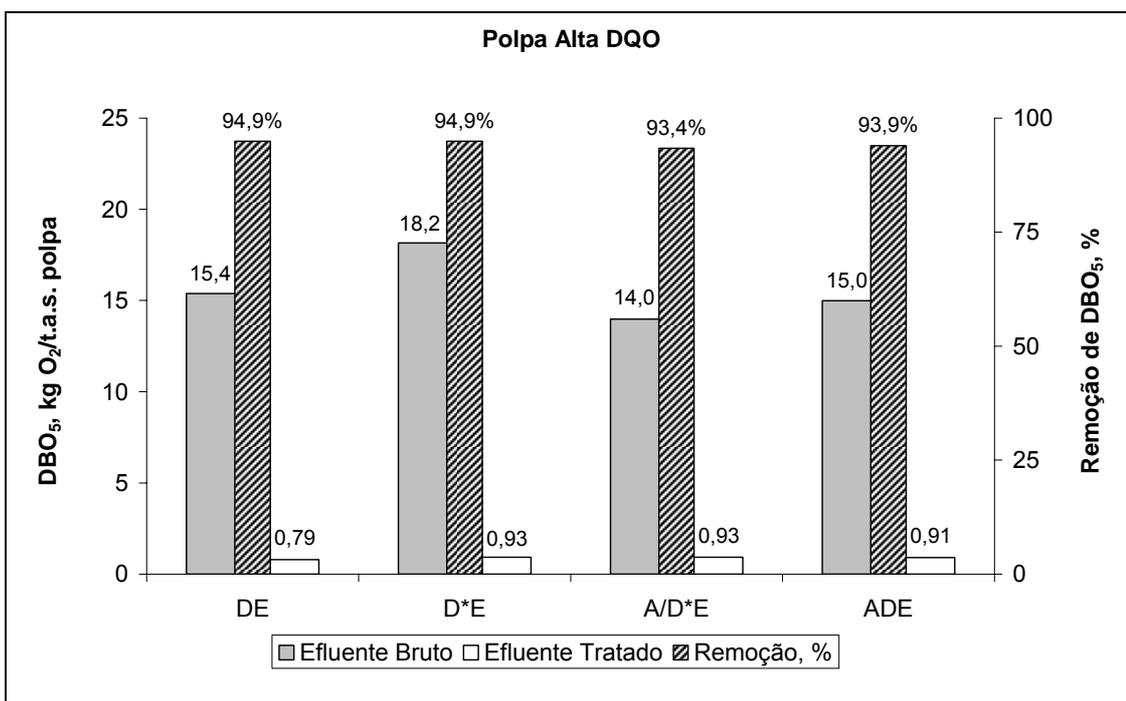


Figura 4l – DBO₅ (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoções da DBO₅ (%), para polpa de alta DQO

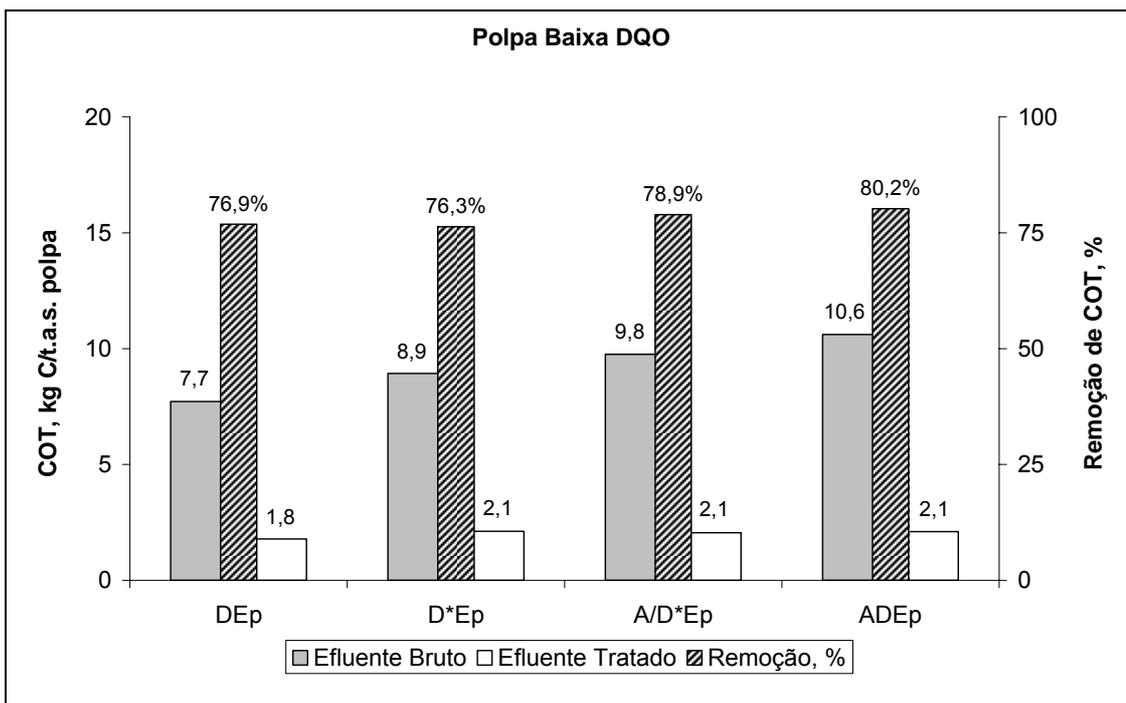


Figura 5I – COT (kg C/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoções do COT (%), para polpa de baixa DQO

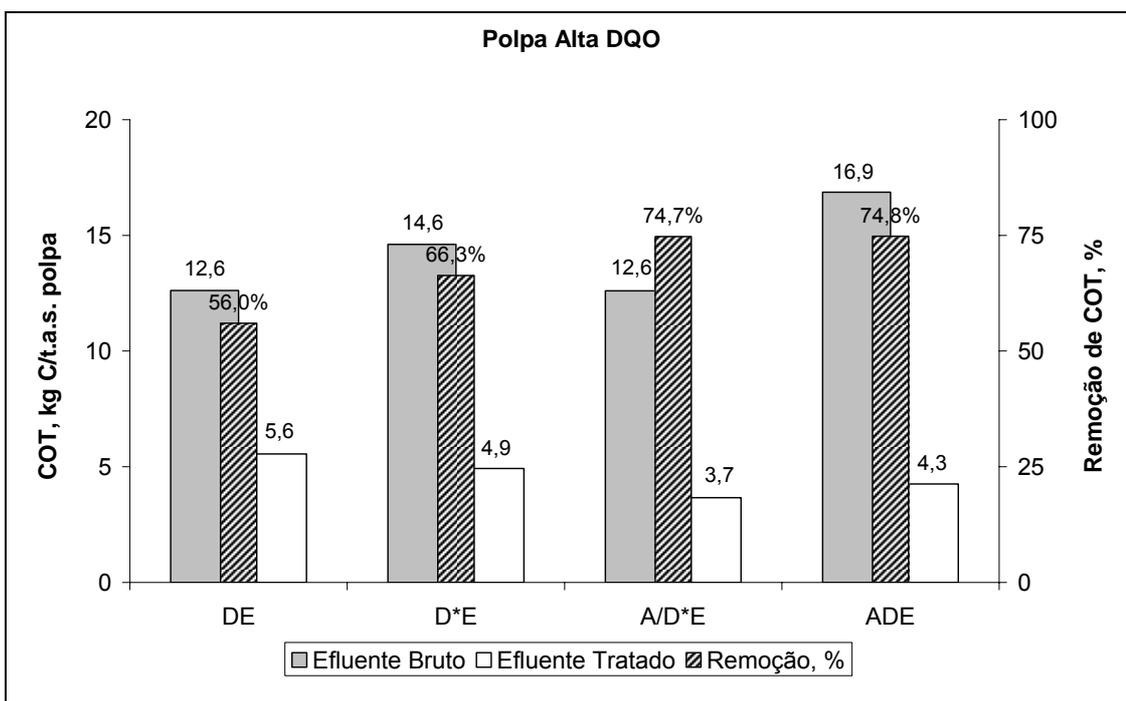


Figura 6I – COT (kg C/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoções do COT (%), para polpa de alta DQO

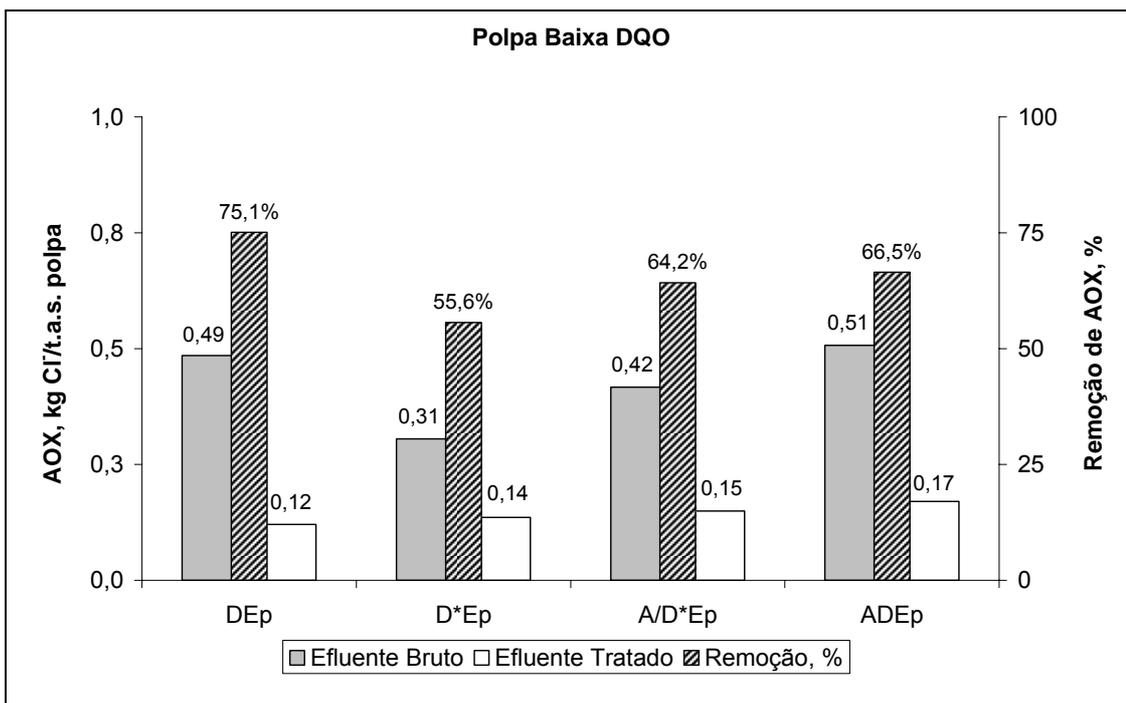


Figura 7l – AOX (kg Cl⁻/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoções do AOX (%), para polpa de baixa DQO

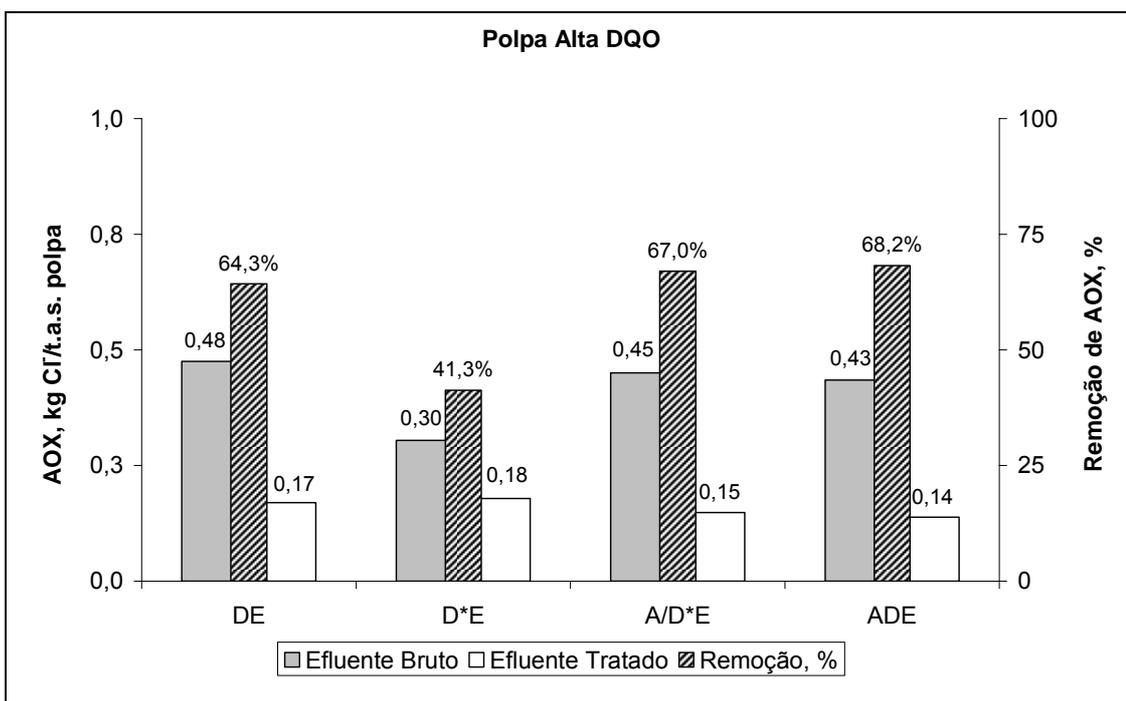


Figura 8l – AOX (kg Cl⁻/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoções do AOX (%), para polpa de alta DQO

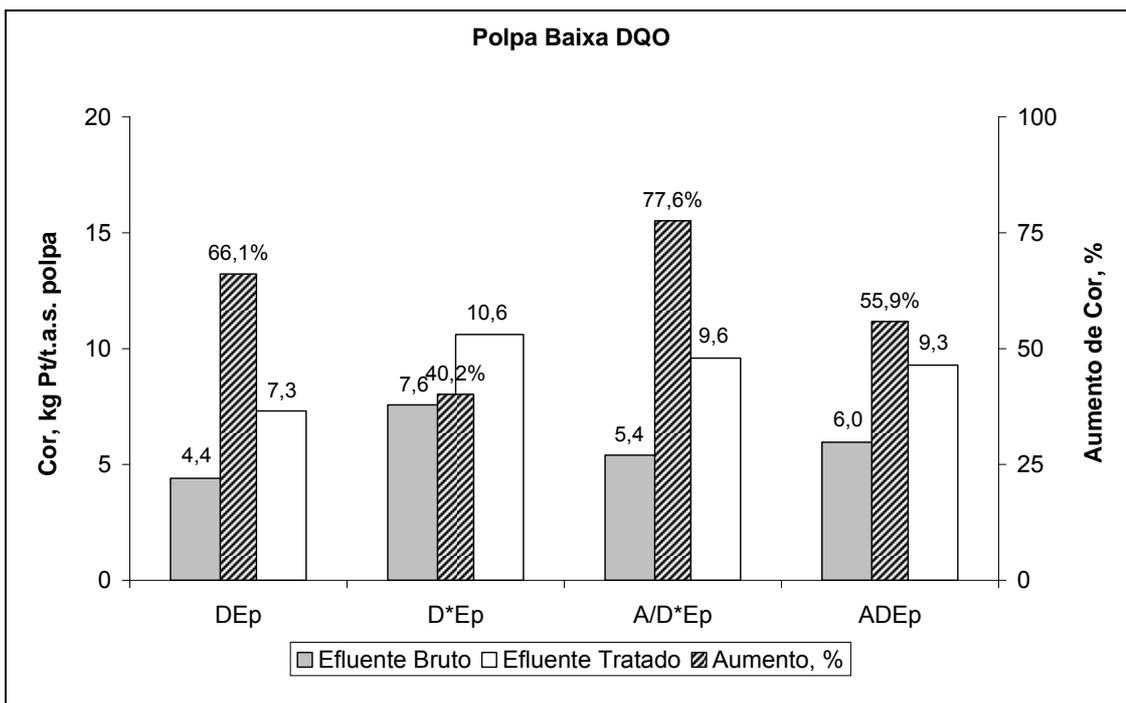


Figura 9I – Cor (kg Pt/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e aumentos de cor (%), para polpa de baixa DQO

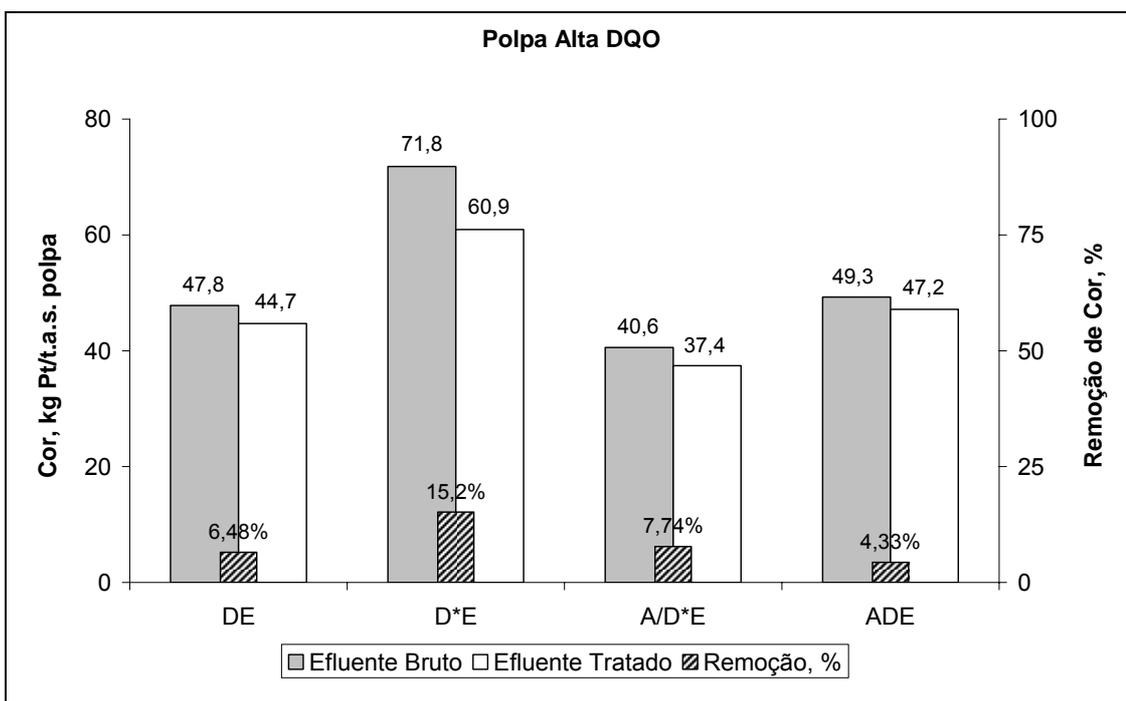


Figura 10I – Cor (kg Pt/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados dos pré-branqueamentos e remoções de cor (%), para polpa de alta DQO

APÊNDICE J

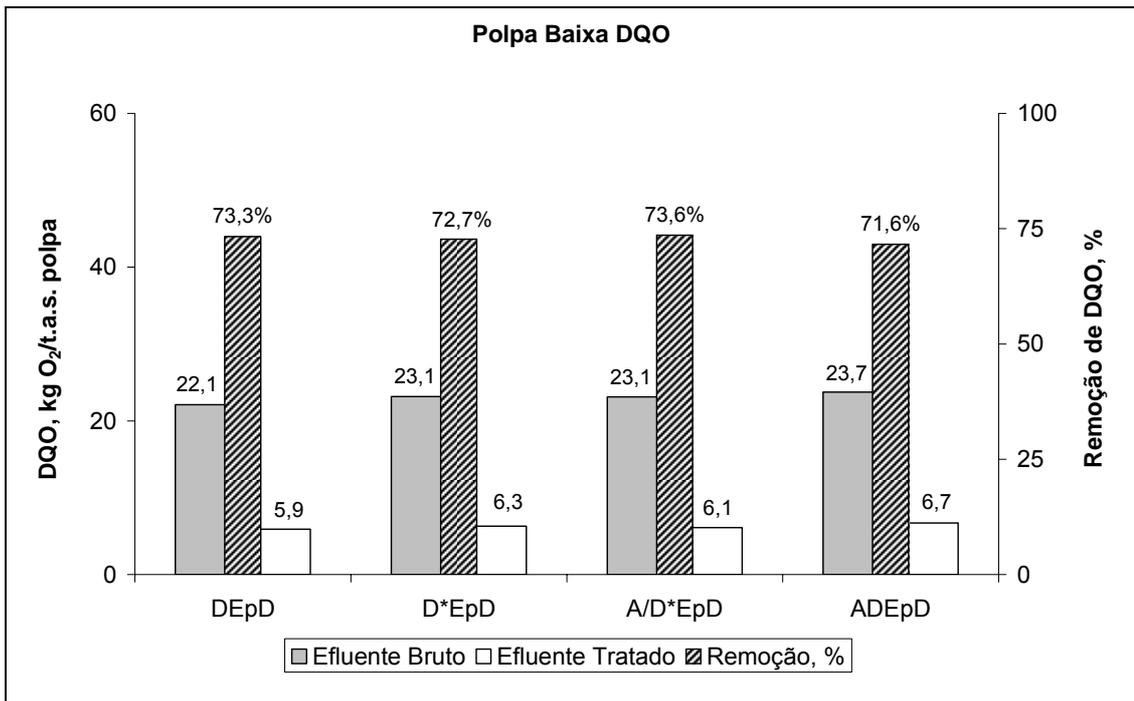


Figura 1J – DQO (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoções da DQO (%), para polpa de baixa DQO

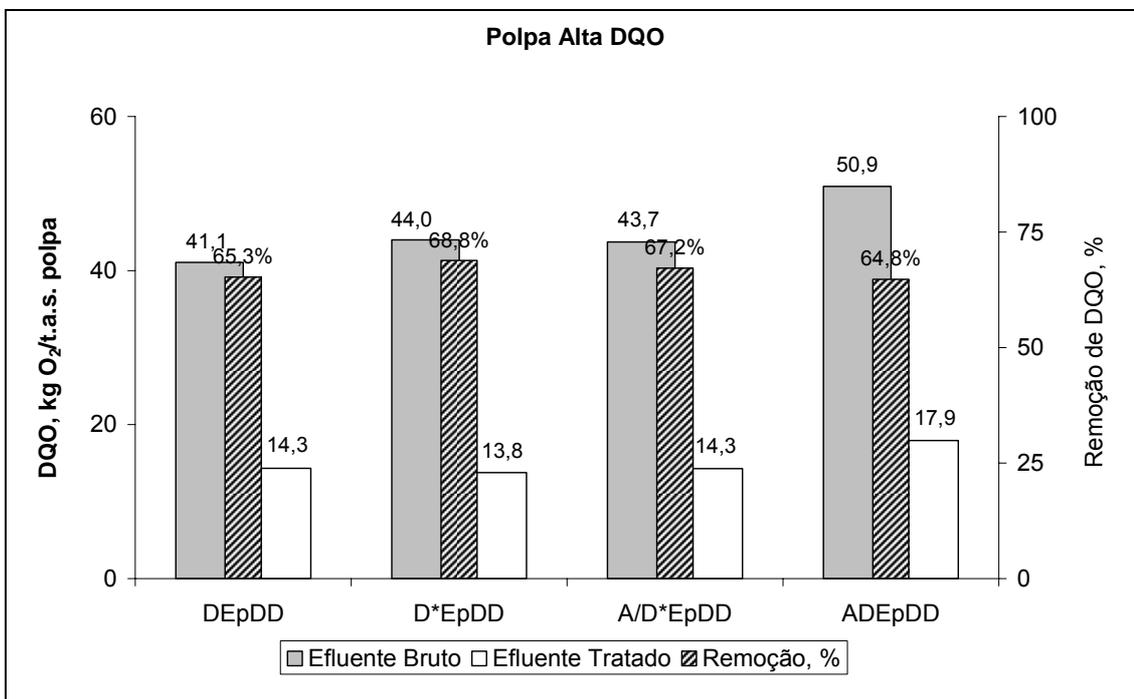


Figura 2J – DQO (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoções da DQO (%), para polpa de alta DQO

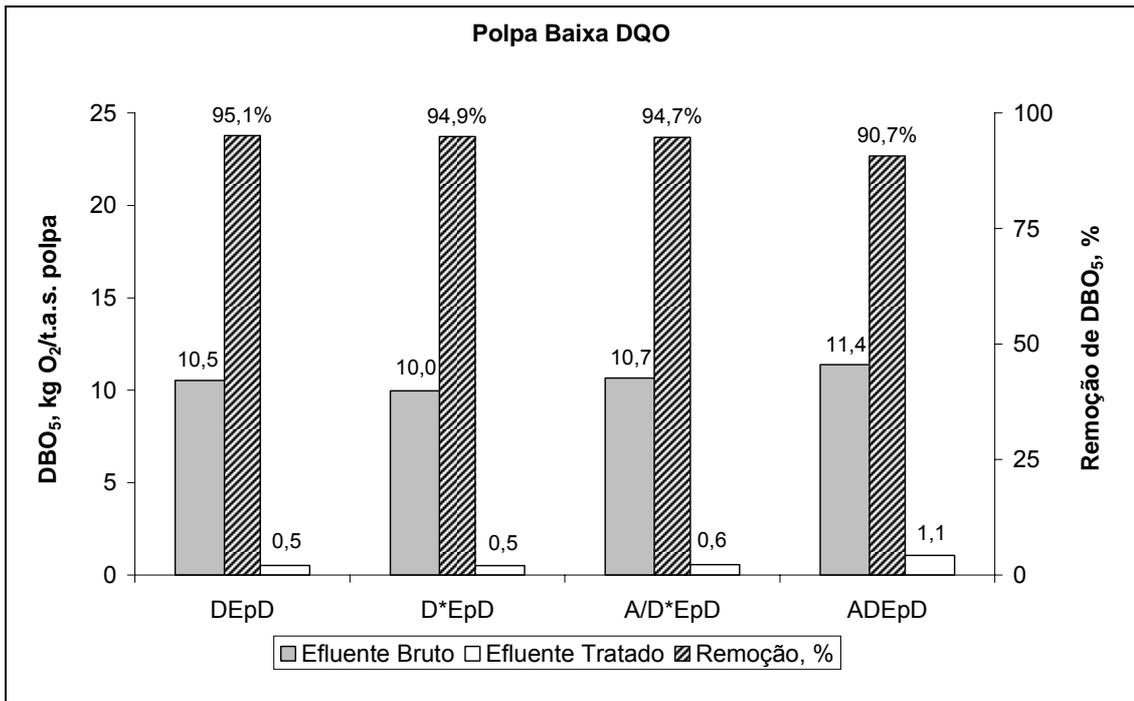


Figura 3J – DBO₅ (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoções da DBO₅ (%), para polpa de baixa DQO

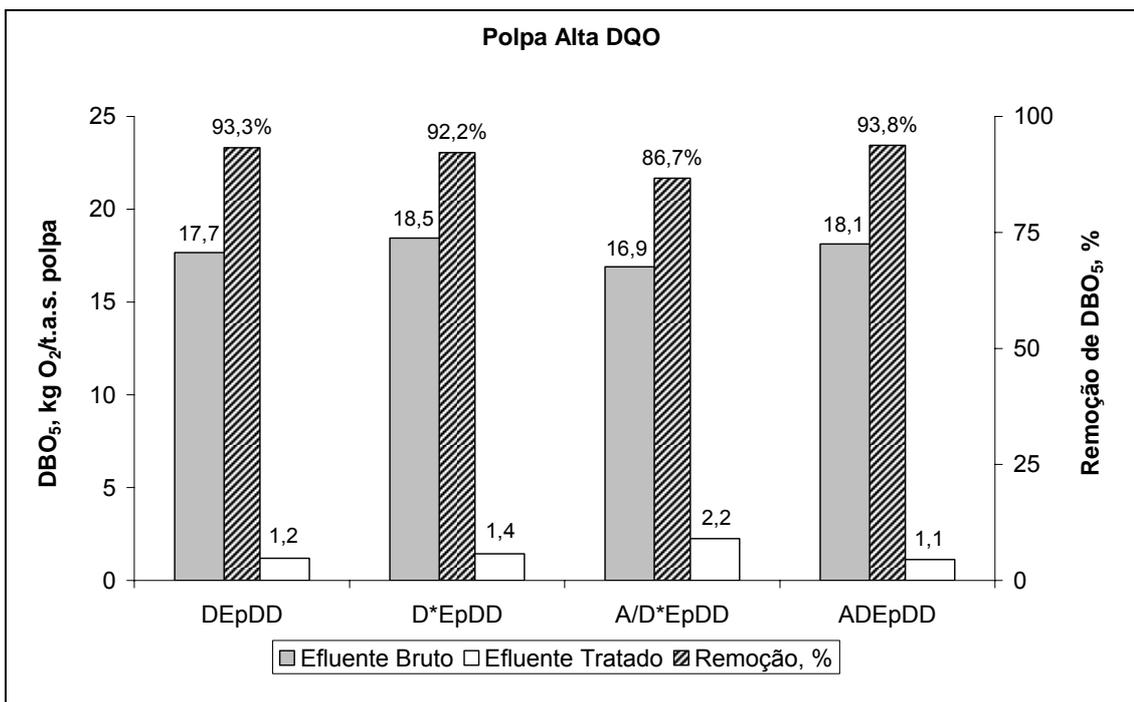


Figura 4J – DBO₅ (kg O₂/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoções da DBO₅ (%), para polpas de alta DQO

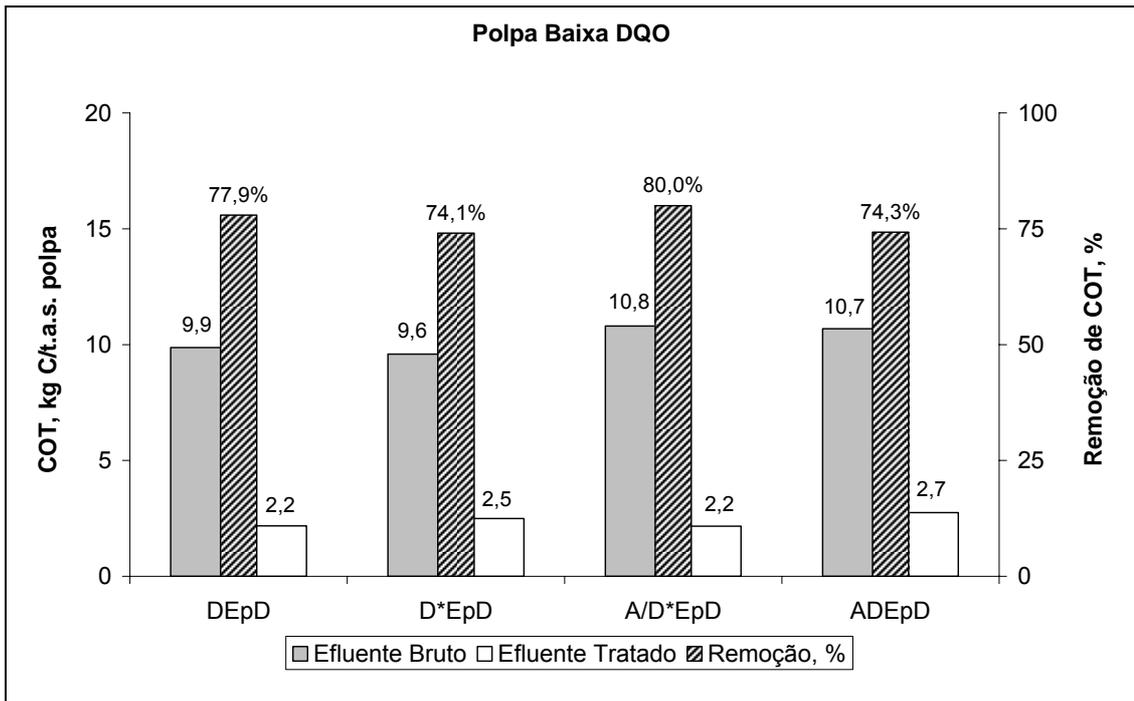


Figura 5J – COT (kg C/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoções do COT (%), para polpa de baixa DQO

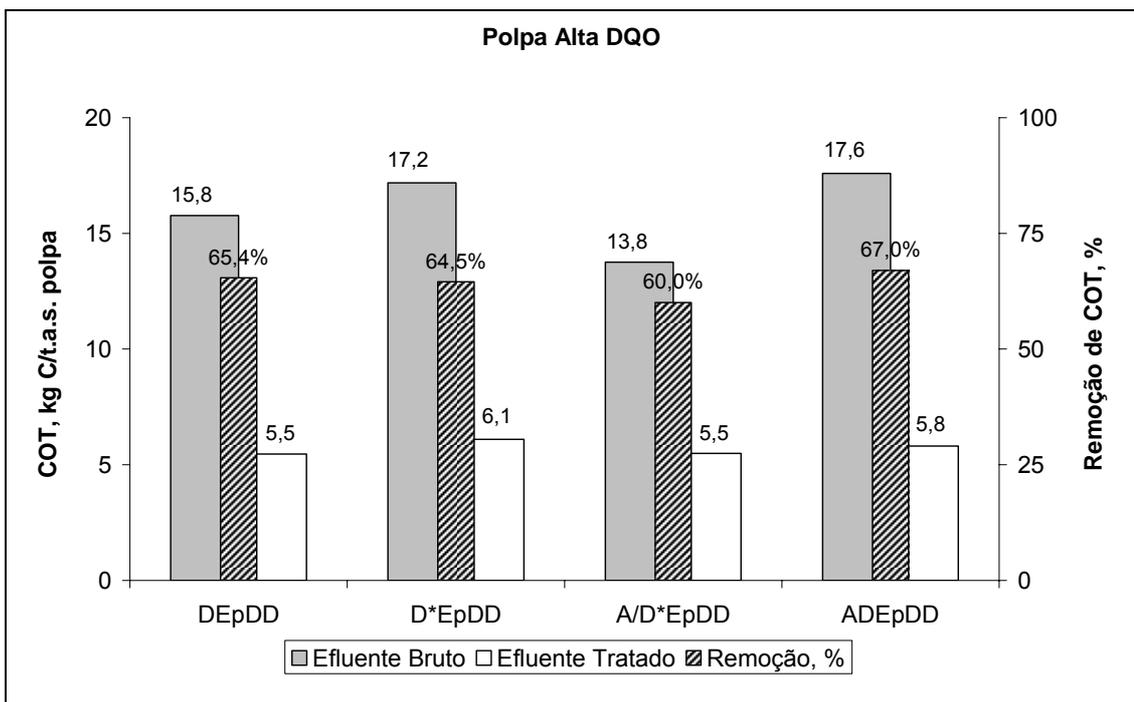


Figura 6J – COT (kg C/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoções do COT (%), para polpa de alta DQO

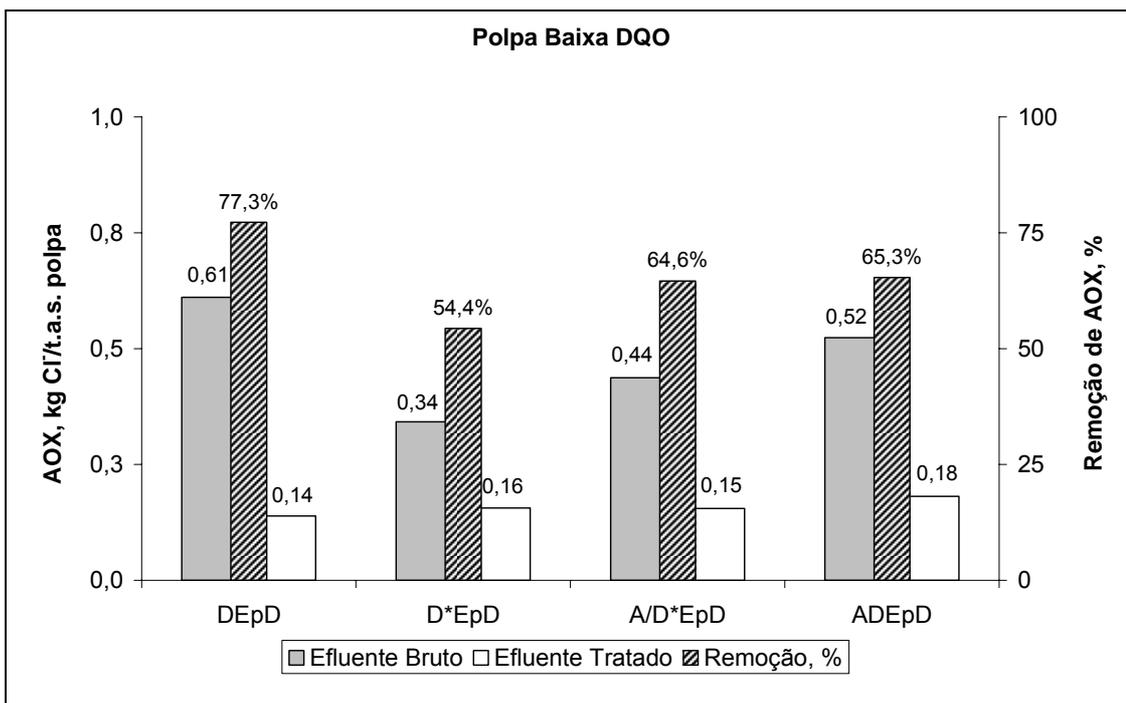


Figura 7J – AOX (kg Cl⁻/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoções do AOX (%), para polpa de baixa DQO

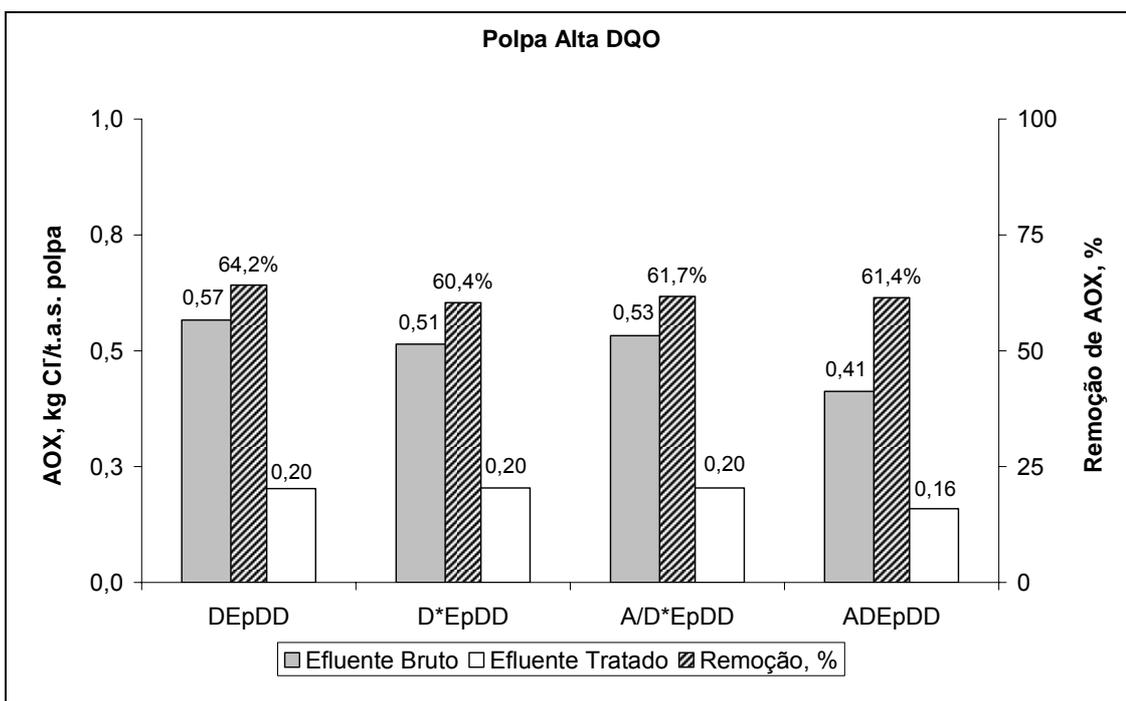


Figura 8J – AOX (kg Cl⁻/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e remoções do AOX (%), para polpa de alta DQO

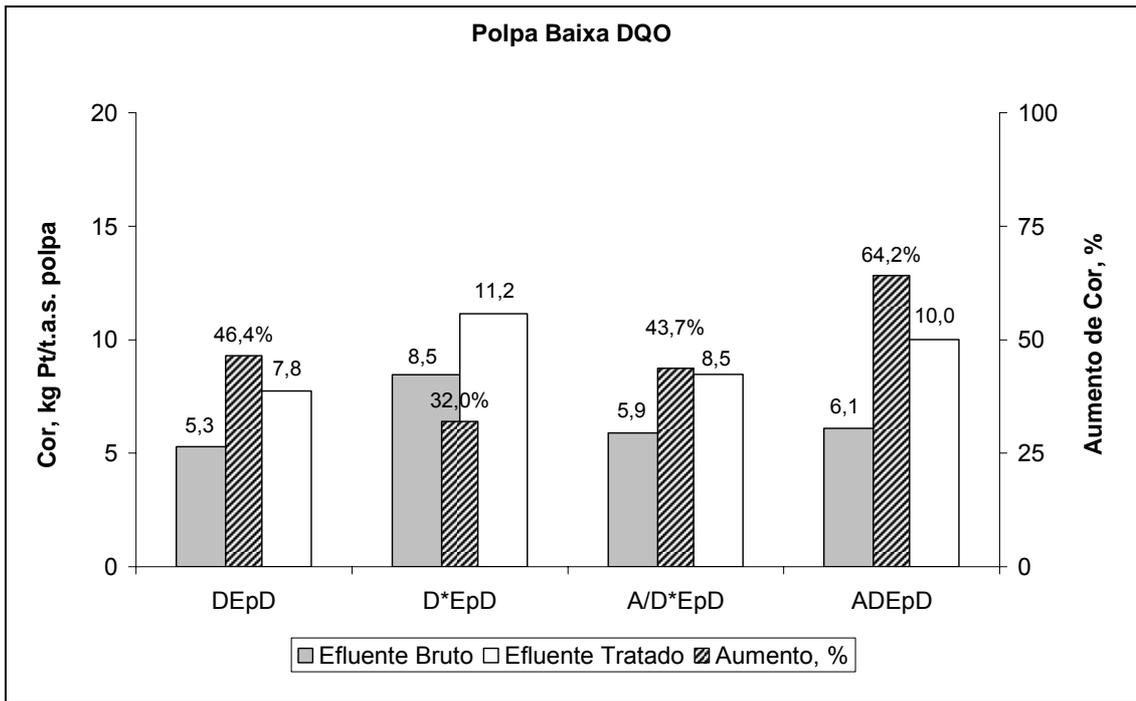


Figura 9J – Cor (kg Pt/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e aumentos de cor (%), para polpa de baixa DQO

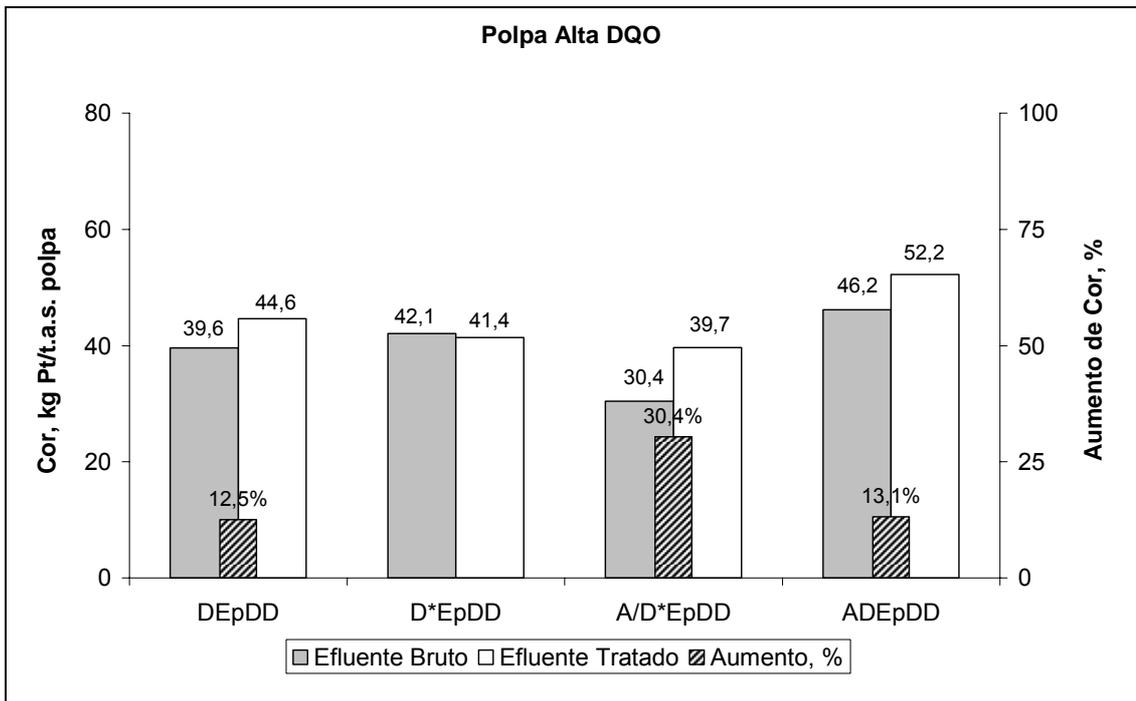


Figura 10J – Cor (kg Pt/t.a.s.) dos efluentes combinados brutos e tratados das seqüências de branqueamento inteiras e aumentos de cor (%), para polpa de alta DQO

APÊNDICE L

Quadro 1L – Volumes de filtrados utilizados na composição dos efluentes combinados dos pré-branqueamentos

Polpas	Baixa DQO			Alta DQO		
Seqüências	D	Ep		D	E	
Consistência, %	10	10		10	10	
Volume, mL	3750	3750		3750	3750	
Volume Total, mL	7500			7500		
Seqüências	D*	Ep		D*	E	
Consistência, %	10	10		10	10	
Volume, mL	3750	3750		3750	3750	
Volume Total, mL	7500			7500		
Seqüências	A/D*	Ep		A/D*	E	
Consistência, %	7,8	10		7,8	10	
Volume, mL	4012	3060		4012	3060	
Volume Total, mL	7072			7072		
Seqüências	A	D	Ep	A	D	E
Consistência, %	10	10	10	10	10	10
Volume, mL	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Volume Total, mL	7500			7500		

Quadro 2L – Volumes de filtrados utilizados na composição dos efluentes combinados das seqüências de branqueamento inteiras

Polpas	Baixa DQO				Alta DQO				
Seqüências	D	Ep	D		D	Ep	D	D	
Consistência, %	10	10	10		10	10	10	10	
Volume, mL	2500	2500	2500		1900	1900	1900	1900	
Volume Total, mL	7500				7600				
Seqüências	D*	Ep	D		D*	Ep	D	D	
Consistência, %	10	10	10		10	10	10	10	
Volume, mL	2500	2500	2500		1900	1900	1900	1900	
Volume Total, mL	7500				7600				
Seqüências	A/D*	Ep	D		A/D*	Ep	D	D	
Consistência, %	7,8	10	10		10	10	10	10	
Volume, mL	2950	2250	2250		2360	1800	1800	1800	
Volume Total, mL	7450				7760				
Seqüências	A	D	Ep	D	A	D	Ep	D	D
Consistência, %	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Volume, mL	2000	2000	2000	2000	1500	1500	1500	1500	1500
Volume Total, mL	8000				7500				