

DENISE PIRES DE BARROS

**Aplicação do Ácido Peracético no
Branqueamento da Polpa de Eucalipto e o
Impacto na sua Qualidade**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, para a obtenção do Grau de “*Magister Scientiae*”.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2008**

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

T

B277a
2008

Barros, Denise Pires, 1982-

Aplicação do ácido peracético no branqueamento da polpa de eucalipto e o impacto na sua qualidade\ Denise Pires Barros– Viçosa, MG, 2008.

ix, 165f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui Apêndices.

Orientador: Jorge Luiz Colodette.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 78-87.

1. Celulose - Branqueamento. 2. Polpa Kraft. 3. Ácido peracético. 4. Branqueamento - Impacto ambiental

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 634.986

DENISE PIRES DE BARROS

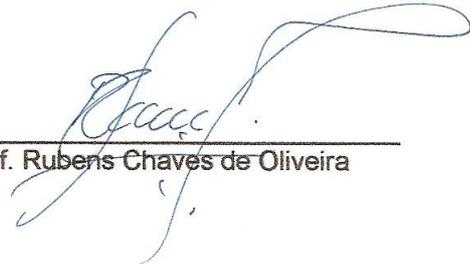
Aplicação do Ácido Peracético no Branqueamento da Polpa de Eucalipto e o Impacto na sua Qualidade

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, para a obtenção do Grau de “*Magister Scientiae*”.

APROVADA: 23 de setembro de 2008



Prof. Efraim Lázaro Reis
(Co-orientador)



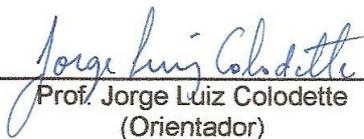
Prof. Rubens Chaves de Oliveira



Profª Maria Eliana L. Ribeiro de Queiroz



Prof. Cláudio Mudado Silva



Prof. Jorge Luiz Colodette
(Orientador)

Aos meus pais, exemplos de luta, força e perseverança, pelo amor incondicional, incentivo e confiança, pelos conselhos, e por estarem sempre ao meu lado.

A minha querida irmã, pela amizade e carinho, pelo amor constante, por alegrar minha vida.

As minhas avós, pelas orações diárias, pelo amor, cuidado e pelo apoio constante.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus: Força para todas as circunstâncias!

A minha família:

Aos meus amados pais e minha irmã.

As minhas avós.

Aos meus tios, tias, primos e primas.

Aos meus amigos, pela ajuda, apoio e carinho.

Agradeço a todos que sempre se preocuparam com meus estudos, com meu futuro, sempre me incentivaram, oraram por mim... que de alguma forma, direta ou indiretamente, me ajudaram ao longo desses anos.

Deus abençoe e recompense a todos.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Química, por tornar possível a realização deste curso.

Aos Professores do departamento de Química, pela confiança e amizade, pela contribuição indispensável à minha formação acadêmica, pelo carinho e conselhos, pela disponibilidade com que sempre me receberam e auxiliaram, pelos valiosos ensinamentos e pela excelente orientação. Em especial, ao Prof. Luis Cláudio de Almeida Barbosa, pelo apoio em momentos difíceis e pela contribuição na realização deste trabalho.

Aos Professores do Laboratório de Celulose e Papel, pelo apoio e disposição em ajudar.

Ao Prof. Paulo Roberto Cecon, pela valiosa contribuição e enriquecimento deste trabalho.

Aos amigos Gáu, Narah, Kelly, Paty, Marcela, Gabi, Eraldo que transformaram minhas preocupações em momentos de descontração. Obrigada, pela ajuda, pelo agradável convívio e pela alegria, carinho e paciência com que sempre me acolheram.

Aos estagiários, pela amizade e pela ajuda na realização dos experimentos e análises laboratoriais.

À querida prima e amiga Fabiana, por todo seu apoio! Estava sempre pronta para ajudar, independente do que se passava!

A todos os alunos de Graduação, Mestrado e Doutorado, que colaboraram com informações e as disponibilizaram para a elaboração deste trabalho.

Aos professores e pesquisadores, pela disponibilidade, acolhida e ajuda indispensável durante a realização deste.

Aos estudantes e amigos, pela importante colaboração.

Aos verdadeiros amigos..., guardados no coração, pelo carinho, confiança, incentivo, paciência e orações.

Enfim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho. Serei sempre grata.

BIOGRAFIA

DENISE PIRES DE BARROS, filha de José Joaquim Bezerra de Barros e Ivone Maria Pires de Barros, nasceu em Viçosa, Minas Gerais, em 03 de abril de 1982.

Em 2001, ingressou no Curso de Química pela Universidade Federal de Viçosa, diplomando-se em outubro de 2006.

Em seguida (2006), ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, na Universidade Federal de Viçosa, em nível de mestrado, com ênfase em Celulose e Papel (Engenharia Florestal).

Em setembro de 2008, submeteu-se à defesa de dissertação para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

ABREVIATURAS

- D: branqueamento com dióxido de cloro convencional
- D_{HT}: branqueamento com dióxido de cloro em alta temperatura
- A: estágio de hidrólise ácida a quente
- E: extração alcalina convencional
- (EP): extração oxidativa reforçada com peróxido de hidrogênio
- P: branqueamento com peróxido de hidrogênio convencional
- Z: branqueamento com ozônio
- Q: estágio de remoção de metais com quelantes
- Paa: branqueamento com ácido peracético
- /: ausência de lavagem entre estágios
- (): reação ocorre no mesmo reator.

CONTEÚDO

ABREVIATURAS.....	v
CONTEÚDO	vi
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.2. Química do ácido peracético (Paa)	11
2.3. Presença de íons metálicos na polpa celulósica.....	15
2.4. Refino da polpa.....	16
2.5. Propriedades da polpa celulósica.....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1. Materiais	21
3.2. Métodos	21
3.2.1. Procedimentos analíticos de caracterização da polpa.....	21
3.2.2. Preparo e padronização da solução de ácido peracético.....	22
3.2.3. Preparo e padronização da solução de dióxido de cloro.....	24
3.2.4. Branqueamento da polpa de celulose.....	25
3.2.4.1. Branqueamento com dióxido de cloro (D)	25
3.2.4.2. Branqueamento de extração alcalina (E)	26
3.2.4.3. Branqueamento de extração alcalina com peróxido de hidrogênio (EP).....	27
3.2.4.4. Branqueamento com peróxido de hidrogênio (P).....	27
3.2.4.5. Branqueamento com ozônio em média consistência (Z).....	28
3.2.4.6. Tratamento com quelante para remoção de metais (Q)	28
3.2.4.7. Hidrólise ácida da polpa para remoção de Hexas (A)	29
3.2.4.8. Branqueamento com ácido peracético (Paa).....	30
3.2.5. Caracterização da polpa branqueada.....	31
3.2.6. Caracterização do efluente.....	32
3.2.7. Refino da polpa branqueada	32
3.2.8. Propriedades físicas, mecânicas e ópticas das polpas.....	32
3.2.8.1. Formação de folhas	32
3.2.8.2. Determinação do Consumo de Energia	33
3.2.9. Análise Estatística dos Resultados.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1. Aplicação do estágio Paa na seqüência ECF D(EP)DD	34
4.2. Aplicação do estágio Paa na seqüência ECF D _{HT} (EP)DD.....	37
4.2.1. Efeito da lavagem entre os estágios D e Paa	39
4.2.2. Influência do pH do estágio Paa	40
4.3. Aplicação do estágio Paa na seqüência ECF A/D(EP)DD	42
4.4. Aplicação do estágio Paa na seqüência ECF D _{HT} /QP.....	43
4.5. Aplicação do estágio Paa na seqüência ECF Z/EDP	45
4.6. Carga poluente dos efluentes de branqueamento.....	47
4.7. Refino e Propriedades Físico-Mecânicas das Polpas.....	50
4.7.1. Resistência à drenagem (grau Schopper Riegler - °SR).....	51
4.7.2. Peso específico aparente (PEA) e Volume específico aparente (VEA).....	54
4.7.3. Energia absorvida em regime de tração (TEA)	58
4.7.4. Módulo de elasticidade específica (MOE).....	60
4.7.5. Índice de tração (IT)	62

4.7.6. Índice de arrebentamento (IA)	64
4.7.7. Índice de rasgo (IR)	66
4.7.8. Resistência à passagem de ar (RPA).....	69
4.7.9. Propriedades ópticas	72
Opacidade e Coeficiente de dispersão de luz.....	72
5- CONCLUSÕES	77
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICES	88
APÊNDICE A.....	89
APÊNDICE B	97
APÊNDICE C	134
APÊNDICE D.....	151

RESUMO

BARROS, Denise Pires de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro, 2008. **Aplicação do Ácido Peracético no Branqueamento da Polpa de Eucalipto e o Impacto na sua Qualidade.** Orientador: Jorge Luiz Colodette. Co-orientadores: Luiz Cláudio de Almeida Barbosa e Efraim Lázaro Reis.

No setor produtivo de celulose as exigências quanto à qualidade do produto final são muito grandes, visto que o mercado que ele abastece é muito competitivo e globalizado. Os objetivos principais desta investigação foram o estabelecimento de condições apropriadas para aplicar o ácido peracético como último estágio de branqueamento de seqüências ECF (Elemental Chlorine Free) e a avaliação do impacto do último estágio de branqueamento com ácido peracético na refinabilidade e propriedades físico-mecânicas da polpa de eucalipto. As seqüências avaliadas foram D(EP)D/Paa, DHT(EP)D/Paa, D/QP/Paa e Z/ED/Paa. O uso do ácido peracético, como estágio final de branqueamento nessas seqüências, não se mostrou economicamente viável em relação ao custo dos reagentes químicos de branqueamento, resultando em diminuição da viscosidade da polpa e não trazendo benefícios ambientais quando avaliado pela cor, DQO (Demanda Química de Oxigênio) e AOX (Halogênios Orgânicos Adsorvíveis) do efluente, independentemente da seqüência de branqueamento empregada. A seqüência de branqueamento em que ele apresentou melhor potencial foi a Z/EDP, para a qual a conversão dos estágios DP final em D/Paa elevou o custo do branqueamento em apenas US\$3,5/t de polpa, o que seria compensado pela redução do investimento pela eliminação de um estágio de lavagem. A seqüência D/QP/Paa se destaca das demais pela melhor qualidade da polpa. No entanto, a mesma se apresenta com o custo de branqueamento muito elevado.

ABSTRACT

BARROS, Denise Pires de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, september, 2008. **Application of peracetic acid in the eucalyptus pulp bleaching and its quality impact.** Adviser: Jorge Luiz Colodette. Co-Advisers: Luiz Cláudio de Almeida Barbosa e Efraim Lázaro Reis.

In the productive sector of cellulose the demands on the quality of the final product are too great, once the market is very competitive and globalized. The main objectives of this paper were the establishment of appropriate conditions to implement the peracetic acid as the last stage of elemental chlorine-free (ECF) bleaching sequence and assessing the impact of the last stage of bleaching with peracetic acid in refinery and physical-mechanical properties of the eucalyptus pulp. The evaluated sequences were D(EP)D/Paa, DHT(EP)D/Paa, D/QP/Paa and Z/ED/Paa. The use of peracetic acid, as final stage of bleaching in those sequences, was not economically viable in relation to the cost of chemical bleaching reagent, resulting in the decrease in pulp viscosity and not bringing environmental benefits when judged by the color, COD (Chemical Demand Oxygen) and AOX (Adsorbable Organic Halogens) of the effluent, regardless of the bleaching sequence. The bleaching sequence that presented best potential was Z/EDP, for which the conversion of DP final stages into D/Paa raised the bleaching cost in just \$ 3.5/tonne of pulp, what would be offset by reducing the investment by the elimination of a washing stage. The sequence D/QP/Paa stands out from the others by the better pulp quality. However, the sequence presented a high bleaching cost.

1. INTRODUÇÃO

No setor produtivo de celulose as exigências quanto à qualidade do produto final são muito grandes, visto que o mercado que ele abastece é muito competitivo e globalizado.

Segundo SALVADOR, et al. 2000, as fibras de madeiras possuem características peculiares que afetam a qualidade dos papéis delas produzidos. Segundo o mesmo autor, é necessário que o processamento da madeira durante as fases de cozimento e branqueamento seja adequado para se tirar máximo aproveitamento do potencial das fibras durante a produção de papéis.

O branqueamento de polpas por tecnologia ECF (Elemental Chlorine Free) tem se tornado cada vez mais importante devido a fatores ambientais e mercadológicos. Esse tipo de branqueamento não utiliza o cloro elementar, sendo sua química fortemente substanciada no uso de dióxido de cloro. Porém, existe tendência de se minimizar também o uso do dióxido de cloro, caminhando-se na direção do chamado branqueamento ECF-light. Reagentes de branqueamentos derivados do oxigênio vêm sendo muito estudados e, atualmente, têm substituído, parcialmente, o dióxido de cloro (SEISTO et al., 1998).

Dentre os reagentes de deslignificação e branqueamentos derivados do oxigênio, os perácidos apresentam potencial. O potencial oxidante dos perácidos é maior que os do peróxido de hidrogênio e oxigênio, em meio alcalino, e semelhante aos do cloro e dióxido de cloro, em meio ácido (GENG et al., 1993). Além disso, são reagentes bastante seletivos para remoção de lignina (SEISTO et al., 1998). O perácido avaliado neste estudo foi o ácido peracético (Paa), por ele ser eficiente na deslignificação de polpas de folhosas (HILL et al., 1992; AMINI e WEBSTER, 1994, BARNA et al., 1996^b; MACCONACHIE et al., 1993).

A seletividade dos perácidos tem sido comprovada por muitos autores, tendo em vista que a viscosidade e a resistência mecânica das polpas branqueadas com estes produtos são semelhantes às aquelas obtidas em branqueamentos ECF convencionais, à base de dióxido de cloro.

A eficiência e a seletividade dos perácidos como agentes de deslignificação e branqueamento também estão associadas à presença de metais de transição (SILVA FILHO e MIRANDA, 1995). A presença destes metais pode contribuir negativamente para o processo de branqueamento, proporcionando a decomposição dos próprios perácidos ou de residuais de peróxido de hidrogênio usualmente presentes nos perácidos.

Os objetivos principais desta investigação foram: (1) o estabelecimento de condições apropriadas para aplicar o ácido peracético como último estágio de branqueamento de seqüências ECF e (2) a avaliação do impacto do último estágio de branqueamento com ácido peracético na refinabilidade da polpa de eucalipto e em suas propriedades físico-químicas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Considerações gerais sob fabricação e usos da celulose

No Brasil, a madeira utilizada como matéria-prima para a produção de celulose provém, principalmente, de várias espécies arbóreas de eucalipto (folhosas) e pinus (coníferas). A escolha dessas espécies para o reflorestamento é determinada pelo tipo de solo e clima tropical existente no Brasil, que favorecem seu rápido crescimento acelerando-o em aproximadamente três a quatro vezes em relação à produção em áreas nativas (D`ALMEIDA, 1988^a).

Estas espécies começaram a ser introduzidas no Brasil, em decorrência da diminuição dos povoamentos das espécies nativas. Mas, foi somente com a lei dos incentivos fiscais, em 1966, que o reflorestamento dessas espécies tomou impulso, formando maciços florestais para os mais diversos fins.

A produção de celulose a partir do eucalipto teve início nos anos 60, e ainda era considerada uma "novidade" até a década de 70. O eucalipto oferece diversas vantagens em comparação a outras espécies florestais utilizadas no mundo para a produção de celulose. Graças ao clima favorável do Brasil e ao avanço alcançado em pesquisa e tecnologia florestal, o eucalipto pode ser colhido em apenas 7 anos para a produção de celulose, quando atinge até 35 metros de altura (www.aracruz.br, 2007).

O eucalipto tem o dobro da produtividade de espécies coníferas plantadas no Brasil e da maioria das árvores nativas, o que garante um importante fator de competitividade. Os plantios de eucalipto podem ser considerados a grande conquista rumo ao controle da matéria-prima (www.aracruz.br, 2007).

Segundo QUEIROZ et al., 2004, a utilização da madeira de eucalipto tem aumentado significativamente nas últimas décadas, e o volume de informações sobre as diferentes espécies vem crescendo no mesmo ritmo. Variações da qualidade da madeira de eucalipto ocorrem em níveis de estrutura anatômica, composição química e propriedades físicas, podendo ser detectadas significativas diferenças (TOMAZELLO FILHO, 1994).

A madeira é constituída fundamentalmente pelos componentes: celulose (~50%), hemicelulose (~20%), lignina (15 a 35%) e constituintes menores que podem alcançar até 10% do peso madeira tais como extrativos e minerais.

A celulose é o componente mais abundante e mais importante economicamente, já que é o material de maior interesse na fabricação do papel. É como um esqueleto envolvido pela hemicelulose (recheio) e, as duas são envolvidas pela lignina que atua como um cimento para causar rigidez ao conjunto.

A celulose, principal componente da parede celular da fibra, é um polissacarídeo linear, constituído por um único tipo de unidade de açúcar, possuindo uma estrutura organizada e parcialmente cristalina, localizada na parede secundária da célula. Pertence à função química dos carboidratos ou, mais corretamente, a dos glicídeos. A estrutura da celulose, exposta na Figura 1, se forma pela união de moléculas de β -D-glicose através de ligações β -1,4-glicosídicas, o que a faz ser insolúvel em água. A celulose é um polímero de cadeia longa de peso molecular variável, com fórmula empírica $(C_6H_{10}O_5)_n$, com um valor mínimo de $n = 200$. A celulose tem uma estrutura linear ou fibrosa, na qual se estabelecem múltiplas ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxilas das distintas cadeias justapostas de glicose, fazendo-as impenetráveis à água, e originando fibras compactas que constituem a parede celular dos vegetais.

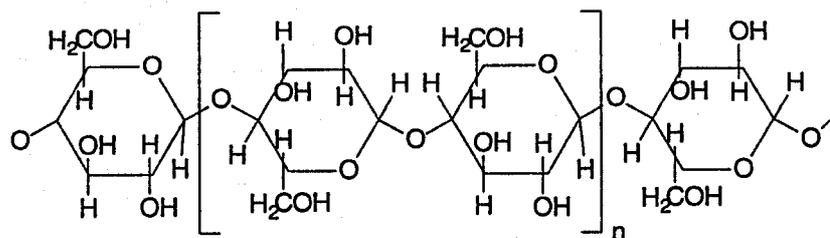


Figura 1. Estrutura da celulose
Fonte: Notas de aula

As hemiceluloses (ou polioses) são constituídas por diferentes unidades de açúcares (D-glicose, D-manose, D-galactose, D-xilose, L-arabinose, L-raminose, L-fucose) e ácidos (acético, 4-O-metilglicourônico, D-galactourônico e D-glicourônico), expostos na Figura 2, de baixo grau de polimerização, os quais estão intimamente associados à celulose nas paredes celulares, constituídas de hexoses e pentoses neutras,

e quantidades variáveis de ácidos urônicos. São polímeros ramificados, amorfos de cadeia curta e facilmente hidrolisáveis, que contribuem na textura rígida dos vegetais.



Figura 2. Algumas unidades de açúcares que compõem as hemiceluloses

Fonte: Morais, S. A. L., et al., Análise da madeira de pinus oocarpa parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis, UFU.

A lignina é um polímero tridimensional amorfo constituído de um sistema aromático, heterogêneo e ramificado, que confere resistência e durabilidade ao conjunto de fibras de celulose. Atua como um composto de ligação da celulose e polioses na parede celular. Possui composição química complexa, que confere firmeza, rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos vegetais. Pelo decréscimo que causa na permeação de água por meio das paredes das células dos tecidos condutores do xilema, a lignina tem uma função importante no intrincado transporte interno de água, nutrientes e metabólitos. A lignina é um polímero natural proveniente da condensação desidrogenativa de três álcoois precursores: trans-coniferílico, trans-sinapílico e p-cumarílico que sofrem desidrogenação enzimática, dando origem a radicais fenóxido (D'ALMEIDA, 1988^a). A proporção destes três compostos resulta em diferentes tipos de lignina e, depende, principalmente, da espécie. Em madeiras de folhosas, existe uma mistura de quantidades significativas de subestruturas guaiacil e siringilpropano, resultantes da polimerização dos precursores trans-coniferílico, trans-sinapílico, respectivamente. A estrutura proposta para a lignina da madeira de eucalipto é exposta na Figura 3.

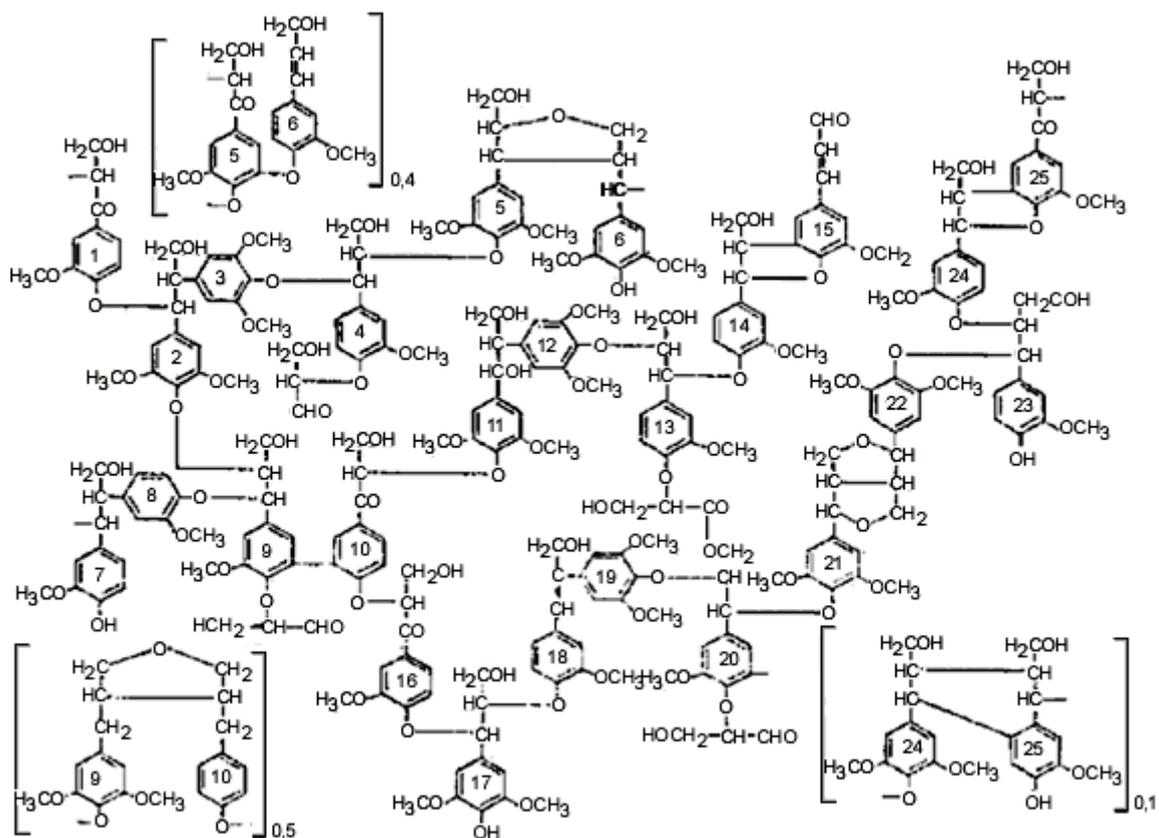


Figura 3. Estrutura proposta para a macromolécula de lignina da madeira de eucalipto
 Fonte: Saliba, E. O. S., et al., Ligninas – Métodos de obtenção e caracterização química. *Ciência Rural*, v. 31, nº5, 2001.

Os constituintes menores incluem compostos orgânicos de diversas funções químicas e, em quantidade menor, compostos inorgânicos, proteínas e substâncias pécnicas. Os constituintes menores solúveis em solventes orgânicos, em água, ou ainda em ambos, são normalmente denominados extrativos. Os extrativos são responsáveis por determinadas características da planta, como cheiro, resistência natural ao apodrecimento, sabor e propriedades abrasivas.

Não existe ainda um método totalmente satisfatório para a separação dos constituintes da madeira. O isolamento dos componentes, de acordo com as classes químicas, é geralmente impossível (COLODETTE, 2001).

Atualmente o processo de produção de celulose dominante no Brasil (97% da produção) e no mundo, é o processo químico Kraft, caracterizado por permitir a produção de celulose a partir de uma ampla gama de espécies vegetais, possuir ciclos de cozimentos mais curtos, facilidade no branqueamento da polpa, eficiência no sistema de

recuperação dos reagentes gerando autosustentabilidade energética, o que faz com que seja o mais adequado na produção de celulose (Leal, L. C. et al., 2007).

O processo Kraft é empregado para obtenção de polpas celulósicas, a partir da maioria das espécies de madeira (www.cetesb.com.br, 2007). Este processo ajuda a manter a força inerente às fibras de madeira e assim produzir uma celulose especialmente adequada para a fabricação de papéis de imprimir e escrever, papéis especiais e papéis sanitários (www.aracruz.br, 2007).

Após o cozimento Kraft, ocorre uma etapa de deslignificação com oxigênio. O oxigênio é uma molécula que contém dois elétrons desemparelhados, tendo, e, portanto, tem tendência a reagir dando origem a radicais livres. Os radicais resultantes, sendo extremamente reativos, tendem a reagir com a primeira molécula que encontram, seja lignina ou carboidrato. Desta forma, ocorrem, simultaneamente, a deslignificação e uma degradação indesejada dos carboidratos, que não podem ser completamente suprimidas (D'ALMEIDA, 1988^b). O processo com oxigênio tem se tornado mais aceito à medida que se consegue minimizar esta degradação indesejada. A seletividade na deslignificação com oxigênio está relacionada com a taxa de remoção da lignina e com uma baixa ou desprezível taxa de degradação dos carboidratos (DENCE e REEVE, 1996).

Segundo McDONOUGH (1986), o problema da seletividade surge da tendência natural de o oxigênio formar radicais livres de alta reatividade, que podem atacar a celulose, conforme é mostrado na (Figura 4, e outros carboidratos, além da lignina. Portanto, o conhecimento das reações das espécies derivadas do oxigênio com a lignina e com os carboidratos se faz necessário para alcançar alta seletividade.

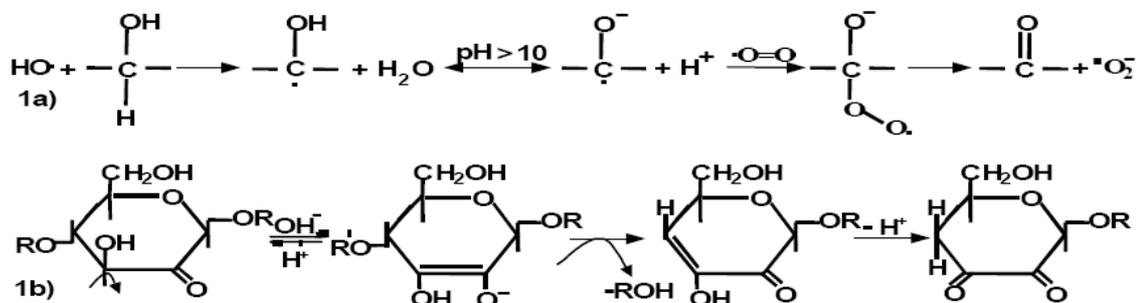


Figura 4. (1a) Mecanismo de formação das carbonilas pelo ataque dos radicais aos carboidratos; (1b) com posterior ruptura das ligações glicosídicas em meio alcalino no estágio de pré-deslignificação com oxigênio.

Fonte: SALVADOR, E., 2000.

O fator predominante que governa a seletividade no branqueamento com oxigênio é a quantidade de metais de transição presentes na polpa, que catalisam a formação de radicais livres que vão acelerar a degradação dos carboidratos. Os íons metálicos de maior efeito degradativo são o ferro, o cobre e o cobalto (D`ALMEIDA, 1988^b).

O processo de pré-deslignificação com oxigênio possibilita reduzir a carga de matéria orgânica do branqueamento, já que os filtrados gerados neste estágio são enviados para o sistema de recuperação química do licor da fábrica.

A etapa posterior é o processo de branqueamento que visa fundamentalmente à eliminação ou modificação das substâncias que pelas suas características de absorção de luz na região visível, conferem cor as polpas celulósicas. São substâncias derivadas da lignina, mas representa uma porção muito pequena da quantidade original presente na madeira.

A branqueabilidade da polpa está relacionada à seletividade e à facilidade de remoção e, ou, branqueamento da lignina pelos diferentes agentes de branqueamento (SJÖSTRÖM e TEDER, 1999). As reações de degradação da lignina durante o branqueamento são difíceis de determinar, pois a estrutura da lignina residual é desconhecida na maioria dos casos. Nas seqüências de branqueamento são usados reagentes de natureza química variada, que agem simultânea ou sucessivamente. De modo geral, a maioria das reações de degradação da lignina inicia por um ataque eletrofílico aos centros de alta densidade eletrônica (núcleos aromáticos conjugados a grupos carbonilas, ou carboxila, por exemplo). O reagente eletrofílico pode ser um íon com carga positiva (O_3^+ , HO^+), procurando por um elétron, ou um radical livre ($Cl\cdot$, $O_2\cdot$, $HO\cdot$, $HOO\cdot$, $ClO_2\cdot$) procurando por um elétron desemparelhado (D`ALMEIDA, 1988^a).

Polpas branqueadas podem ainda conter grupos funcionais leuco-cromóforos que podem originar grupos cromóforos, responsáveis pelo escurecimento da polpa. A estabilidade da alvura pode depender principalmente destes grupos residuais, que podem se originar de ácidos hexenurônicos (HexAs), lignina residual, carboidratos oxidados, extrativos e metais de transição (COSTA et al., 2003).

A intensidade da reversão depende de fatores ambientais e da natureza química da polpa. Ela é influenciada pelos seguintes fatores: matéria-prima (tipo de fibra, idade,

taxa de crescimento, localização e lavagem), processo de fabricação (tipo de processo, parâmetros de processo, seqüência de branqueamento, água e íons metálicos), estocagem (condições, tempo, luz, oxigênio, circulação de ar, calor, umidade e poluentes) (FORSSKÄHL, 2000).

Os carboidratos da polpa sofrem reações típicas de oxidação e de hidrólise em condições extremas de pH e temperatura, na presença de reagentes de branqueamento. O grupo terminal aldeídico e os grupos hidroxilas da cadeia de carboidratos são atacados em meio oxidativo, formando carboxilas e carbonilas, respectivamente. Os grupos carbonilas são considerados responsáveis pela reversão de alvura da polpa quando exposta ao calor e à luz. Já os grupos carboxilas causam reversão quando a polpa é exposta ao calor (EIRAS et al., 2005). Contudo, o efeito do grupo funcional específico sobre a estabilidade de alvura, seja carboxila, seja carbonila (cetona ou aldeído), ainda não é bem conhecido (CHIRAT et al., 1997).

Na formação do papel os grupos carboxilas são considerados sítios de retenção dos aditivos catiônicos na interface sólido/líquido, um requisito importante para as interações entre as fibras e os componentes de acabamento do papel, essenciais para a melhoria do processo e propriedades do produto. A compreensão das condições de formação, vantagens e desvantagens de se manterem os grupos oxidados no papel acabado podem ser alcançadas pela quantificação acurada destes grupos.

Os processos de branqueamento variam desde aqueles que removem ligninas e outras impurezas coloridas da polpa (ECF) até aqueles que, simplesmente, descolorem tais impurezas (TCF). O processo ECF (Elemental Chlorine Free), mais utilizado mundialmente, se baseia no uso de oxidantes tais como dióxido de cloro, oxigênio e peróxido de hidrogênio. O processo TCF (Total Chlorine Free) que, simplesmente, descolore as impurezas da polpa, removendo apenas uma pequena parcela destas, utiliza oxidantes como peróxidos, ozônio e perácidos e agentes quelantes para remoção de metais da polpa.

O branqueamento é o processo no qual a celulose é submetida a diversos tratamentos com oxidantes, extrações alcalinas e lavagens, que removem a maior parte da lignina, dando origem a um produto de alvura ideal para a qual a celulose é destinada.

Recentemente, têm sido propostas algumas seqüências alternativas para branqueamento da polpa kraft de eucalipto, motivada por duas forças principais: (1) diminuição dos custos de capital e (2) facilitar o fechamento do circuito de águas. Para minimizar custos de capital, foram propostas seqüências com somente dois estágios efetivos de branqueamento tais como D/Q(PO), D_{HT}/Q(PO) e Z/(EP)D. Embora estas seqüências permitam obtenção de polpa com elevada alvura, suas exigências químicas são consideravelmente mais elevadas do que aquelas requeridas no branqueamento com seqüências de 3-5 estágios, sendo as polpas resultantes de menor alvura e estabilidade de alvura.

O segundo estágio do branqueamento da maioria das plantas de branqueamento é compreendido de uma extração reforçada com o oxigênio (EO), com peróxido de hidrogênio (EP) ou com oxigênio e peróxido hidrogênio em pressão baixa (EPO) e alta (PO). As plantas de branqueamento com geração insuficiente de dióxido de cloro utilizam elevadas doses de peróxido na extração (0,8-1,0%), exigindo condições mais severas para o consumo do peróxido. Nestes casos, os sistemas de alta pressão são sugeridos, sendo o estágio (PO) mais adequado, desde que sejam mantidas temperaturas de 95 °C sob pressão ao longo de todo o tempo de reação. Entretanto, o uso do estágio (EP) é interessante, particularmente para processos de branqueamento que requerem somente 0,3-0,5% de H₂O₂. Nesses casos, é possível consumir quase todo o peróxido dosado sob pressões atmosféricas (BARNA et al., 1996^b).

O alveijamento final de polpas Kraft pode ser feito por maneiras diversas, como D, D/D, DD, DP, DED e, neste estudo, foi proposto avaliar a combinação D/Paa (estágio com dióxido de cloro e posteriormente ácido peracético sem lavagem intermediária). Embora os alveijamentos finais com dois e três estágios tenham sido populares no passado, a tendência é, hoje em dia, para um único estágio (fibra curta) visando minimizar capital. As tecnologias D e D/D são ambas de único estágio, pois requerem somente um sistema de lavagem. Isso é também verdadeiro para a alternativa de D/Paa. Essas alternativas resultam em menor investimento de capital, mas aumentam o custo operacional e diminuem a flexibilidade da planta de branqueamento. Por exemplo, um aumento do número Kappa do digestor pode comprometer o branqueamento da polpa ao nível desejado de alvura; por outro lado, polpas alveijadas com apenas um estágio final tendem a apresentar menor estabilidade de alvura.

Para eucalipto, o alvejamento final da polpa tem sido usualmente realizado com as alternativas de dois estágios (DD e DP). A lavagem entre D e D pode ser omitida, mas não entre D e P devido ao grande desnível de pH entre os dois estágios. A lavagem também não é relevante entre os estágios D e Paa, que operam praticamente no mesmo pH.

Muito antes de serem empregados como reagentes de deslignificação e branqueamento de polpas celulósicas, os perácidos já eram usados comercialmente na síntese de epóxidos, glicerol e resinas epóxi, como desinfetantes, fungicidas e em lavanderias (SWERN, 1953). Mais recentemente, devido ao seu elevado poder oxidante, os perácidos passaram a ser considerados como substitutos parciais para o dióxido de cloro, em seqüências de branqueamento ECF (Elemental Chlorine Free), e como reagentes complementares em seqüências de branqueamento TCF (Totally Chlorine Free), reduzindo a carga de peróxido de hidrogênio aplicada e/ou substituindo o ozônio que possui elevado custo e alta possibilidade de reversão de alvura devido à formação de carbonilas.

2.2. Química do ácido peracético (Paa)

Um dos perácidos mais estudados é o ácido peracético (Figura 5), que vem sendo investigado como agente de branqueamento e deslignificação. Este perácido é um oxidante mais forte do que oxigênio e peróxido de hidrogênio, em meio alcalino.

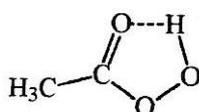


Figura 5. Estrutura do ácido peracético (Paa).

O ácido peracético é comercializado em meio levemente ácido e, mesmo em baixas temperaturas, é instável, sendo necessário padronizá-lo sempre antes do uso.

Durante o branqueamento, os perácidos são consumidos pelas reações de oxidação da lignina e de decomposição espontânea, catalisada por metais de transição (KOUBEK et al., 1963 e YUAN et al., 1997^a).

A decomposição espontânea do Paa envolve a formação de oxigênio, de acordo com o mecanismo proposto por KOUBEK et al.(1963), mostrado na Figura 6.

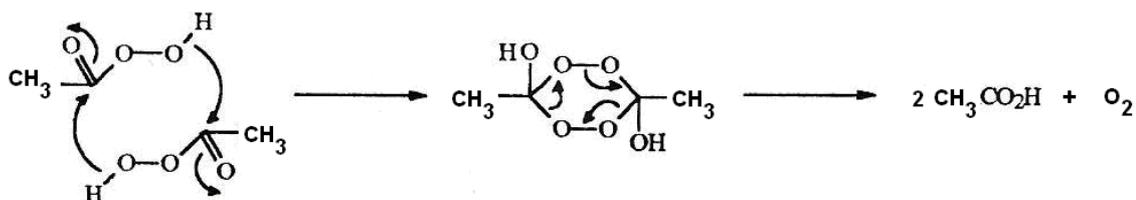


Figura 6. Reação de decomposição do ácido peracético.
Fonte: KOUBEK et al., 1963.

As reações entre Paa e peróxido de hidrogênio, descritas por BALL e EDWARDS, 1956, podem ser catalisadas por íons de metais de transição e radicais hidroxila.

Pelos estudos realizados com ácido peracético, sabe-se que os perácidos podem reagir com a lignina por dois mecanismos: reações de substituição/adição eletrofílica e reações nucleofílicas (CHANG, 1995).

Vários autores sugerem que as reações iniciais do Paa com a lignina envolvem a hidroxilação eletrofílica de posições ativadas do anel aromático (orto e para aos grupos oxigenados), como mostrado na Figura 7. A etapa de hidroxilação é, provavelmente, a etapa determinante da velocidade da reação e alguns estudos propõem que ela ocorre efetivamente por transferência do grupo OH do perácido e não por reações com radicais hidroxilas.

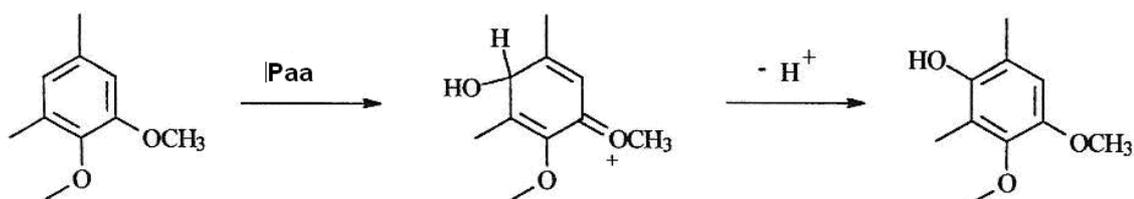


Figura 7. Hidroxilação de estruturas aromáticas por Paa
Fonte: JOHNSON, 1980.

Hidroxilações do anel aromático podem levar à sua desmetoxilação, por um intermediário hemiacetal (Figura 8). A desmetoxilação pode levar à formação de quinonas e, assim como os intermediários hidroxilados, estas são geralmente mais rapidamente oxidadas que os compostos iniciais (JOHNSON, 1980). NI & D'ENTREMONT (1997) verificaram que um aumento na concentração de Paa promoveu maior desmetoxilação, gerando mais o-quinonas. Como as quinonas apresentam uma coloração bastante escura, este autor sugeriu que a carga de perácido

aplicada em branqueamentos deve ser otimizada com a finalidade de obter maior ganho de alvura. Em muitos casos, apenas as p-quinonas têm sido isoladas, uma vez que as o-quinonas podem ser rapidamente oxidadas através de reações de Baeyer-Villiger, formando produtos solúveis em água (DAVIDGE et al., 1958). Nas reações do Paa com fenóis e seus éteres metílicos já foram reportadas a formação de quinonas, hidroquinonas, quinóis, ácidos mucônicos e lactonas (DAVIDGE et al., 1958; NI & D'ENTREMONT, 1997, citado por BRASILEIRO, 1999).

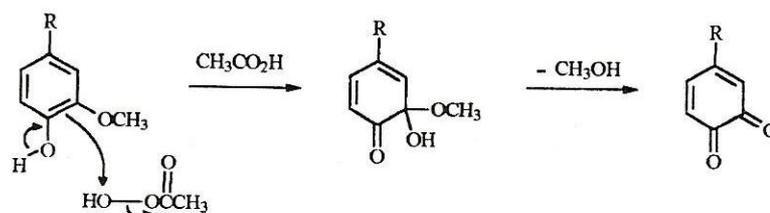


Figura 8. Desmetoxilação de estruturas aromáticas por Paa
Fonte: NI & D'ENTREMONT, 1997.

As etapas finais de oxidação das estruturas aromáticas da lignina envolvem a quebra oxidativa dos anéis a partir de quinonas, levando à formação de lactonas e ácidos mucônicos. A abertura do anel aromático ocorre geralmente entre carbonos de carbonilas adjacentes, através da hidrólise de um intermediário anidrido cíclico, formado pela introdução de um oxigênio através de uma reação nucleofílica de Baeyer-Villiger (MARSHALL & NAYLOR, 1974, citados por BRASILEIRO, 1999), como mostrado na Figura 9.

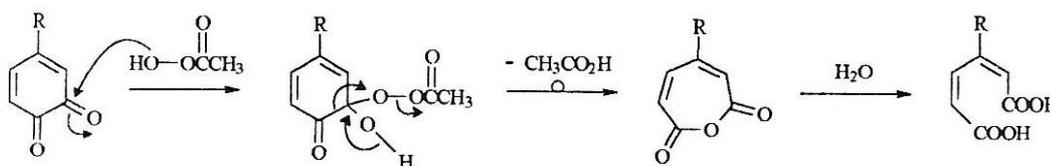


Figura 9. Abertura dos anéis aromáticos por Paa com a formação de ácidos mucônicos
Fonte: NI e D'ENTREMONT, 1997.

No tratamento de uma polpa com Paa, a abertura do anel aromático torna a lignina oxidada mais hidrofílica, contribuindo para a sua solubilização no licor de branqueamento (GELLERSTEDT, 1997, citados por BRASILEIRO, 1999). A formação de grupos ácidos também favorece a solubilização de fragmentos de lignina, especialmente durante os estágios de extração alcalina, em virtude da sua ionização.

Os perácidos podem reagir também com grupos ácidos ligados principalmente às

xilanas das hemiceluloses (ácidos urônicos e hexenurônicos; Figura 10). HEIKKILÄ et al. (1998) demonstrou que as reações com Paa podem envolver tanto o ataque eletrofílico à dupla ligação dos ácidos hexenurônicos, promovendo a sua hidroxilação, quanto o ataque nucleofílico aos grupos carbonílicos formados após a hidrólise dos compostos hidroxilados (Figura 11). Essas reações competem entre si e, ainda, com as reações eletrofílicas de Paa com a lignina, de modo que a prévia remoção dos ácidos urônicos pode favorecer a eficiência do branqueamento com perácidos.

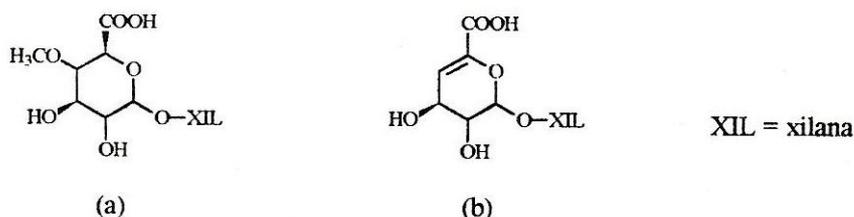


Figura 10. Estrutura de ácidos (a) 4-O-metilglicurônico e (b) 4-desoxi-4-hexenurônico
 Fonte: Brasileiro, L., et al., 2001.

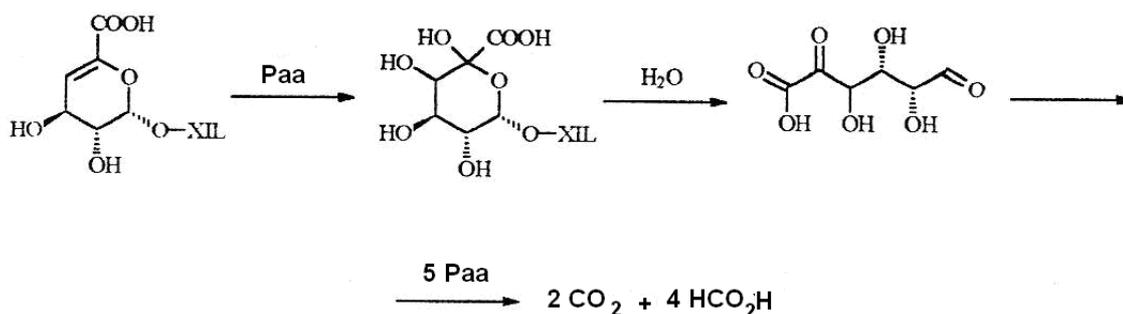


Figura 11. Oxidação de ácidos hexenurônicos por Paa
 Fonte: Brasileiro, L., et al., 2001.

Segundo os resultados apresentados por BAILEY & DENCE (1996) e HILL et al. (1992), para diferentes tipos de polpas branqueadas com Paa, o aumento na concentração do perácido promoveu um aumento na deslignificação. Entretanto, maiores concentrações de perácido colaboraram para a diminuição da seletividade do processo, tendo em vista as reduções de viscosidade das polpas branqueadas. Em meio neutro ou levemente ácido, a degradação dos carboidratos da polpa também foi bastante dependente da concentração de Paa, como foi verificado por JASKELÄINEN & POPPIUS (1998). Essa degradação é causada pelas espécies reativas resultantes da decomposição do perácido, cuja formação é tanto maior quanto maior for a concentração de Paa aplicado. Outro tipo de reação que, também, contribui para a despolimerização dos carboidratos é a hidrólise ácida, em pH baixo, que envolve a

quebra das ligações glicosídicas, promovendo a redução da viscosidade da polpa.

Em função dessa queda de viscosidade, têm sido estudadas formas de protegê-la, como a remoção de íons metálicos, previamente ao estágio com o perácido (por quelação ou lavagem ácida da polpa) e o controle das condições de branqueamento (pH, temperatura, concentração do oxidante e tempo de reação).

Os perácidos também apresentam grande potencial para a substituição de dióxido de cloro no branqueamento de polpas químicas em seqüências ECF e o investimento de capital para sua implementação é relativamente baixo (BARNA et al., 1996^b). Tal possibilidade é bastante interessante no caso de fábricas de celulose deficientes de ClO₂. Além disso, a substituição de dióxido de cloro por outros oxidantes é desejável por razões ambientais, visto que na redução de dióxido de cloro a cloreto forma-se certa quantidade de cloro, podendo ocorrer à cloração dos materiais orgânicos.

O controle das condições de branqueamento (pH, temperatura, concentração do oxidante e tempo de reação) é essencial para garantir a máxima eficiência e seletividade do processo. A melhor eficiência de deslignificação dos perácidos tem sido verificada em meio ácido (HILL et al., 1992).

2.3. Presença de íons metálicos na polpa celulósica

O fator predominante que governa a seletividade no branqueamento com oxigênio é a quantidade de metais de transição presentes na polpa, que catalisam a formação de radicais livres responsáveis pela degradação dos carboidratos. Os íons metálicos de maior efeito degradativo são o ferro, o cobre e o cobalto (D'ALMEIDA, 1988^b).

Os íons metálicos podem estar presentes na polpa associados aos ácidos hexenurônicos por uma através da dupla ligação no anel desses ácidos, que favorece a sua excepcional capacidade quelante. A remoção desses grupos ácidos reduz a afinidade da polpa por íons metálicos, permitindo a redução do consumo de reagentes e da quantidade de agentes quelantes usados.

Os íons manganês, cobre e ferro são conhecidos por acelerar a decomposição do ácido peracético em soluções aquosas, levando à formação de monóxido e dióxido de carbono, oxigênio, ácido acético e etanol. Entretanto, alguns autores demonstram que o

branqueamento com ácido peracético pode ser realizado efetivamente mesmo sem a remoção desses íons.

Uma relação Mg/Mn (magnésio/manganês) acima de 30 proporciona um consumo adequado de peróxido de hidrogênio em um estágio P tradicional (2% H₂O₂, 1,5% NaOH, 120 minutos, 10% consistência). À medida que a relação aumenta, o residual de peróxido de hidrogênio também aumenta devido à diminuição de reações paralelas. Com mais peróxido de hidrogênio disponível para as reações de branqueamento, alvuras maiores são alcançadas. O residual maior de peróxido de hidrogênio possibilita também, que as demais variáveis do processo, como temperatura, consistência, e o tempo de retenção, possam ser modificadas, conseguindo-se um maior rendimento do processo e patamares maiores de alvura.

A remoção de metais da polpa é usualmente feita com agentes quelantes. Em pH 11, a afinidade da polpa pelo íon manganês é muito grande; portanto, a eficiência do quelante é muito baixa, e, à medida que o pH abaixa, essa afinidade da polpa diminui. Em níveis de pH 7-8, uma menor afinidade da polpa se torna evidente, e o quelante começa a se mostrar mais eficiente.

A afinidade dos quelantes pelos íons cálcio e magnésio é menor que pelo manganês, portanto, a remoção destes íons está mais relacionada à protonação dos compostos da polpa do que aos quelantes.

A remoção dos íons metálicos por tratamento com agentes quelantes, geralmente, promove ganhos de seletividade nos branqueamentos com compostos derivados do oxigênio tais como ozônio, peróxidos e perácidos.

2.4. Refino da polpa

A refinação é um processo complexo que depende basicamente de quatro fatores: características das pastas a serem refinadas, especificações do papel a serem produzidos, equipamentos de refinação e aspectos econômicos. A refinação é uma das mais importantes etapas do processo da fabricação do papel. As fibras respondem bem ao refino, influenciam em diversas características finais do papel e sua ação sobre a polpa celulósica impacta no andamento da máquina de papel. No entanto, após atingirem um máximo, as propriedades tendem a se estabilizar e, se este tratamento for prolongado, ele pode-se levar ao declínio.

O refino é um tratamento mecânico dado às fibras de celulose com a finalidade de efetuar mudanças na estrutura das fibras que compõem a polpa, melhorando a formação e a resistência mecânica do papel. A refinação é feita em equipamentos denominados refinadores, em três ações distintas: hidratação, fibrilação e corte. É um processo em que as fibras se hidratam e as fibrilas se unem por meio através de ligações residuais de pontes de hidrogênio. A refinação modifica as propriedades das fibras e, praticamente, todas as propriedades do papel. Porém, esta refinação tem efeito sobre estas propriedades finais em diferentes proporções. Portanto, é impossível obter valores máximos de resistência para todas as propriedades ao mesmo tempo, uma vez que cada uma delas alcança o seu máximo valor em diferentes níveis de refinação para um dado papel.

Para a fabricação do papel, o refino é uma importante etapa do processo, pois garante que as fibras sejam flexíveis o suficiente para assegurar que entrem em contato e colapsem formando uma superfície achatada, assegurando ligação adequada entre fibras. O refino envolve deformações vigorosas da fibra na presença de água. Durante este processo, a parede incha permitindo que a molécula de água penetre entre as moléculas cristalinas de celulose.

Com o refino e o inchamento, superfícies que anteriormente estavam dentro da celulose ficam expostas. Quando a folha de papel é formada, sua resistência depende, em grande parte, das ligações formadas entre as fibras. Por causa do aumento da superfície externa, produzido pela refinação, o número de contatos e, conseqüentemente, de ligações, aumenta, o que resulta em um papel mais resistente.

Quando as fibras estão retendo água, elas se apresentam inchadas, flexíveis e capazes de deformação plástica. À medida que as camadas das fibras secam, elas sofrem uma retração, ao mesmo tempo em que se ligam espontaneamente. É uma plasticidade a úmido que possibilita ocorrerem às ligações entre fibras, sendo o grau de ligação dependente do estado das superfícies das fibras. Esta ligação espontânea, formada comumente por ligações de hidrogênio, constitui a essência da fabricação de papel. Sem estas ligações naturais, a folha não teria suficiente resistência.

A facilidade de refino é um importante atributo de uma polpa celulósica, pois favorece a economia de energia. Os resultados obtidos por GONÇALEZ et al. (1986) mostraram que o refino favoreceu o desenvolvimento da resistência ao rasgo e o

aumento do peso específico aparente do papel. FERREIRA et al. (1998) também verificaram ou que, com a refinação, as polpas aumentam as suas resistências bem como a capacidade de retenção de água (Grau Schopper Riegler), em consequência dos fenômenos de fibrilação interna e externa, de formação de finos e de aumento de flexibilidade, que ocorrem nesta fase. Simultaneamente, a maior área de ligação entre as fibras mais conformáveis reduz a interface material fibroso/ar, o que faz diminuir o coeficiente de dispersão de luz.

SILVA (1996) relata que, para os papéis “tissue”, em que onde se deseja usufruir ao máximo de algumas características inerentes às fibras da madeira, o refino não é uma operação desejada, pois causaria redução das características das fibras potencialmente interessantes. Segundo MARTINS et al. (1995), o que se deseja nestes papéis é que as fibras, embora não-refinadas, apresentem boa resistência mecânica, principalmente à umidade, capacidade de absorção de água e produzam papéis com boa maciez.

A energia requerida para refinação da celulose representa um dos maiores custos na produção de papel. O aumento do refino da celulose conduz a decréscimos de propriedades tais como opacidade, porosidade e volume específico aparente (MANFREDI et al, 1986). A celulose ideal é aquela que consome baixa energia de refino e conserva ao máximo as propriedades importantes para cada tipo específico de papel. A demanda energética para se atingir um nível desejado de determinada propriedade é fator de elevado interesse para os fabricantes de papel, uma vez que se torna um parâmetro importante de custo operacional.

Além das modificações desejadas para melhorar as propriedades do papel, a refinação causa modificações indesejadas. Dentro das propriedades desejadas, algumas apresentam respostas inversas ao aumento do grau de refinação, tais como formação de finos. Essa interdependência das propriedades desejadas, além dos resultados indesejados da refinação, exige uma busca do equilíbrio em que onde os maiores valores de uma característica do papel sejam atingidos sem comprometer outras propriedades que também são importantes para a característica final do papel. A busca e a manutenção desse ponto é o que determinam a forma como a refinação será operada.

Estudos envolvendo variáveis de refino, como tipo de celulose, consistência, viscosidade, pH e produção, assim como potência de acionamento, área refinadora, velocidade do refinador, entre outras estão geralmente associados à economia de energia

na operação, indicada pela facilidade da ação dos elementos refinadores sobre as fibras, promovendo ou melhorando propriedades com menor consumo de energia possível. Na literatura, os autores não citam o percentual que essa energia representa dentro da linha de produção, mas relatam ser uma operação que demanda grande quantidade de energia (SFERRAZZA, 1996; MANFREDI et al., 1986).

2.5. Propriedades da polpa celulósica

Algumas das propriedades físicas e químicas mais valorizadas pelos fabricantes de papel de imprimir e escrever tais como opacidade, porosidade e volume específico aparente (VEA) estão presentes nas celuloses de fibras curtas e, particularmente, na celulose de eucalipto (Foelkel, C., www.aracruz.br, 2007).

No começo, a celulose de eucalipto era vista como fibra secundária, de menor valor. Mas, gradativamente, passou a ser muito requisitada pela indústria papelreira, em função das características únicas da fibra, que garantem a produção de papéis de alta opacidade, maciez e boa absorção – qualidades ideais para a produção de papéis sanitários (tissue), de imprimir e escrever (P&W) e especiais (Foelkel, C., www.aracruz.br, 2007).

As polpas de eucalipto são recomendadas para a fabricação de um grande número de papéis devido às excelentes qualidades que elas podem conferir a esses papéis, os mesmos, como, por exemplo: volume específico aparente, opacidade, maciez, porosidade, lisura, absorção, estabilidade dimensional, etc. Por isso, os produtos papelreiros mais usuais fabricados com fibras de eucalipto são papéis tipo “tissue” e impressão e escrita. Para cada um deles há especificações diferenciadas, e o comportamento desejado para as fibras é são distintos (FOELKEL, 1998). O termo tissue é utilizado para descrever produtos de baixa gramatura, como papel higiênico, toalha de cozinha, guardanapo de mesa, guardanapo sanitário e lenço de papel. Segundo FOELKEL (1998), as propriedades desejadas para papéis tissue são: maciez, suavidade ao tato, absorção, sensação de papel fofo e volumoso, resistência, baixo teor de finos, dentre outras. Para isso, são necessárias fibras rígidas e com baixo grau de colapsabilidade, fibras estreitas, baixo teor de hemiceluloses e relativa resistência ao refino, baixa ligação entre fibras, mantendo uma rede frouxa e porosa. Os papéis de imprimir e escrever são destinados a atender aos processos de impressão para reprodução de livros, cadernos, documentos, propagandas e desenho. De acordo com

FOELKEL (1998), as principais propriedades requeridas requisitadas pelos papéis de impressão e escrita são: lisura, opacidade, formação (arranjo fibroso da folha de papel), volume específico (“bulk”), porosidade, imprimabilidade, resistência, dentre outras. Essas propriedades podem ser obtidas com numerosas fibras curtas e estreitas, com relativa rigidez e boa refinabilidade, capazes de se manter unidas sem colapsar, constituindo uma rede bem estruturada e com boa ligação entre fibras. Para que a resistência da folha de papel possa ser mantida, as fibras empregadas na produção desses papéis devem apresentar alta habilidade de ligação interfibras, que é favorecida pela presença das hemiceluloses.

Diante da atual necessidade de economia de energia, os fabricantes de papéis de impressão e escrita requerem polpas de mais fácil refino. Portanto, deseja-se que a polpa apresente altas resistências em baixos níveis de refinação.

Nos papéis “tissue” (sanitários), são desejadas resistência ao refino e, baixa ligação entre fibras (dificuldade de refino), mantendo uma rede frouxa e porosa, favorável à maciez ao tato, e estrutural, menor índice de tração e maior valor de VEA.

A maneira mais adequada de para avaliar a qualidade das polpas para a produção de papel é pelas através de suas propriedades físicas. Essas propriedades são influenciadas pela não uniformidade da estrutura do papel, definida pela formação da folha, pela orientação das fibras, pelas forças a que ele é submetido durante a secagem e pela intensidade das ligações interfibras (KORTEOJA et al., 1998).

Para alguns tipos de papéis, por exemplo, os papéis para impressão, uma boa formação é mais importante do que elevados valores de resistência. A propriedade das fibras que mais afeta a formação, e é alterada pela refinação, é o seu comprimento: das fibras , quanto maior o comprimento da fibra, maior a dificuldade em obter uma boa formação da folha.

As propriedades das fibras podem ser influenciadas durante o processo de refinação e por diversos materiais não fibrosos, incorporados durante a preparação da massa e fabricação do papel. As principais propriedades podem ser avaliadas em laboratório por métodos ópticos, físicos-mecânicos e anatômicos, obedecendo a métodos de ensaios padronizados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Foi utilizada uma amostra industrial de polpa Kraft de eucalipto pré-deslignificada com oxigênio. As principais características da amostra estão apresentadas na Tabela 1. Foram utilizados reagentes químicos p.a., exceto pelo ácido peracético e o dióxido de cloro, que foram preparados conforme procedimentos descritos no próximo item.

Tabela 1. Características da amostra de polpa utilizada nos estudos de branqueamento

Características	Valor Médio
Número kappa	10,0
Viscosidade, mPa.s	18,3
Alvura, % ISO	55,7
Ácidos hexenurônicos, mmol/kg	49,2
Teor de metais, mg/kg de polpa:	
Cálcio	571
Magnésio	461
Ferro	25,7
Manganês	13,3
Cobre	1,2

3.2. Métodos

3.2.1. Procedimentos analíticos de caracterização da polpa

Foram confeccionadas folhas da polpa de celulose conforme procedimento da “Technical Association of the Pulp and Paper industry” (Tappi) T 205 om-88 (1998). As folhas de polpa foram analisadas quanto ao número kappa, viscosidade e alvura, conforme procedimentos T 236 cm-85 (1993), T 230 om-89 (1989) e T 525 om-92 (1992), da Tappi, respectivamente. O teor de ácidos hexenurônicos foi determinado por espectrofotometria UV, após a polpa ter sido hidrolisada com ácido fórmico, de acordo com o método descrito por VUORINEN et al., 1996. O conteúdo de metais Ca, Mg, Fe, Cu e Mn da polpa foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, pelo método SCAN CM 38:96, após digestão úmida da amostra de polpa conforme norma técnica Kanadian Pulp and Paper Association - CPPA G 30P (1974).

3.2.2. Preparo e padronização da solução de ácido peracético

O ácido peracético (Paa) foi preparado pela mistura de 20 mL de peróxido de hidrogênio (solução 60% v/v), 79 mL de ácido acético (p.a.) e 0,7 mL de ácido sulfúrico (solução 5% v/v). A geração do ácido peracético ocorre pela oxidação do ácido acético pelo peróxido de hidrogênio. Esta reação está em equilíbrio, onde estão presentes ácido acético, peróxido de hidrogênio, ácido peracético e água, conforme representado na equação 1.



A percentagem de conversão de ácido acético e peróxido de hidrogênio em Paa depende da proporção molar relativa entre os reagentes e de suas concentrações (GENG et al., 1993; AMINI e WEBSTER, 1994; WANG et al., 1994).

A padronização da solução de Paa permite determinar a porcentagem de conversão da mistura de ácido acético e peróxido de hidrogênio em perácido. Esta padronização baseia-se na titulação do peróxido de hidrogênio presente na mistura com solução de sulfato cérico amoniacal - $(NH_4)_2Ce(SO_4)_3$ - $0,1\text{molL}^{-1}$, seguida de determinação iodométrica do perácido (GREENSPAN & MACKELLAR, 1948). Para esta padronização foram pesados, em balança analítica, 0,3 g da solução contendo o perácido, que foram transferidos para um béquer contendo 10 mL de solução de ácido sulfúrico 5% v/v e gelo moído suficiente para manter a temperatura entre 0 e 10 °C. Após a adição de três gotas do indicador ferroína, a mistura foi titulada com solução de sulfato cérico amoniacal $0,1\text{molL}^{-1}$, até o aparecimento de uma cor verde/azulada. Imediatamente, foram adicionados 10 mL da solução de iodeto de potássio 1molL^{-1} e o iodo liberado foi titulado com solução de tiosulfato de sódio $0,1\text{molL}^{-1}$, utilizando solução de amido 0,2% m/v como indicador do ponto final da titulação com tiosulfato.

As concentrações de peróxido de hidrogênio e ácido peracético foram determinadas, na padronização e no licor de cozimento, através das Equações 2 e 3.

$$[H_2O_2] = \frac{([H_2O_2]_{inicial} - [H_2O_2]_{final})}{[H_2O_2]_{inicial}} \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$[Paa] = \frac{([Paa]_{inicial} - [Paa]_{final})}{[Paa]_{inicial}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que,

$$[H_2O_2]_{inicial} = \frac{V_1 \times 0,1 \times 17}{m}$$

$$[Paa]_{inicial} = \frac{v_1 \times 0,1 \times 38}{m}$$

$$[H_2O_2]_{final} = \frac{V_2 \times 0,1 \times 17}{V_2}$$

$$[Paa]_{final} = \frac{v_2 \times 0,1 \times 38}{V_2}$$

V_1 = volume da solução de sulfato cérico amoniacal gasto para padronização, mL

v_1 = volume da solução de tiosulfato de sódio gasto para padronização, mL

m = massa da amostra, g

V_2 = volume da solução de sulfato cérico amoniacal gasto para titular o licor de cozimento, mL

v_2 = volume da solução de tiosulfato de sódio gasto para titular o licor de cozimento, mL

Conhecendo-se as concentrações inicial e final de peróxido de hidrogênio na mistura, é possível calcular a percentagem de conversão dos reagentes em Paa (Equação 4).

$$\%conversao = \frac{\%H_2O_{2inicial} - \%H_2O_{2final}}{\%H_2O_{2inicial}} \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que a $\% H_2O_2$ inicial refere-se ao peróxido de hidrogênio adicionado para o preparo do perácido.

3.2.3. Preparo e padronização da solução de dióxido de cloro

O dióxido de cloro é um oxidante muito forte e precisa ser gerado na própria unidade industrial, para uso imediato. O ClO_2 foi preparado adicionando-se 500 mL de solução de clorito de sódio (NaClO_2) a 10% em um frasco de erlenmeyer de 2 L (gerador) e solução de ácido sulfúrico a 20% no funil de separação que é posicionado acima deste erlenmeyer, como relatado na Figura 12. Interligado a este erlenmeyer, é adicionado um frasco (receptor) com água destilada e gelo no seu interior. É produzido um fluxo de ar contínuo, suficiente para causar um borbulhamento no erlenmeyer e no frasco receptor. Posteriormente, goteja-se, cuidadosamente, o ácido sulfúrico. A solução de clorito de sódio fica saturada de gases de dióxido de cloro e o excesso é arrastado, pelo fluxo de ar, para o receptor, onde é absorvido pela água.

A produção de dióxido de cloro é representada pela Equação 5.

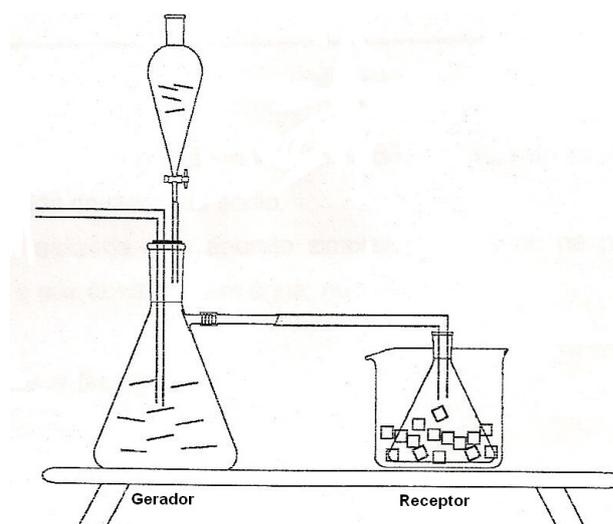
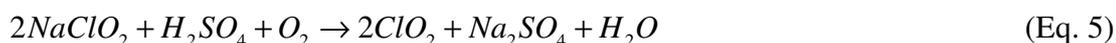


Figura 12. Aparato para produção de dióxido de cloro

A solução de dióxido de cloro, preparada, foi padronizada antes de ser utilizada. Uma alíquota de 5,0 mL da solução estoque foi pipetada e transferida para um erlenmeyer de 200 mL, contendo 50,0 mL de água destilada, 10,0 mL de solução de ácido sulfúrico $2,0 \text{ molL}^{-1}$ e 10,0 mL de solução de iodeto de potássio $1,0 \text{ molL}^{-1}$. Posteriormente esta solução foi titulada com solução de tiosulfato de sódio $0,1 \text{ molL}^{-1}$, utilizando solução de amido 0,2% m/v como indicador do ponto final da titulação. A concentração de dióxido de cloro, expressa como cloro, foi calculada de acordo com a Equação 6.

$$[ClO_2] = 35,5 \times \frac{V \times C}{v} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

$[ClO_2]$ = concentração da solução de dióxido de cloro, gL^{-1} ,

V = volume gasto da solução de tiosulfato de sódio, mL,

C = concentração da solução de tiosulfato de sódio, $molL^{-1}$, e

v = volume da amostra, mL.

3.2.4. Branqueamento da polpa de celulose

As seqüências contendo uma etapa final de branqueamento com ácido peracético foram comparadas com seqüências tradicionais empregadas pelas indústrias de celulose brasileiras. Estas seqüências, de referência e contendo o estágio final de Paa, estão descritas na Tabela 2. As condições operacionais de cada estágio destas seqüências foram ajustadas para se alcançar o nível de alvura final de 90% ISO.

Tabela 2. Seqüências analisadas

D(EP)DD vs D(EP)DP vs D(EP)D/Paa
A/D(EP)DD vs A/D(EP)DP vs A/D(EP)D/Paa
D _{HT} (EP)DD vs D _{HT} (EP)DP vs D _{HT} (EP)D/Paa vs D _{HT} (EP)DPaa
D _{HT} /QP vs D _{HT} /QP/Paa
Z/EDP vs Z/ED/Paa

3.2.4.1. Branqueamento com dióxido de cloro (D)

As condições gerais de branqueamento com dióxido de cloro estão apresentadas na Tabela 3. A dosagem de dióxido de cloro, expressa em kg/t de polpa seca (a.s) como cloro ativo, aplicada no primeiro estágio com dióxido de cloro (estágio D_0), foi calculada multiplicando-se o número kappa da polpa não branqueada (medida da lignina residual) por um fator kappa (número empírico estabelecido pela experiência) e multiplicado por 10. O fator kappa representa a porcentagem de cloro ativo aplicado no primeiro estágio de branqueamento (base seca) dividido pelo número kappa inicial da polpa. Vários fatores kappa foram investigados dependendo do processo de branqueamento empregado. No segundo estágio com dióxido de cloro, estágio D_1 , foram avaliadas as dosagens de 5, 10 e 15 kg de ClO_2 , expressa em kg/t de polpa seca

(a.s) como cloro ativo. No terceiro estágio com dióxido de cloro, estágio D₂, foi utilizada a dosagem fixa de 2 kg de ClO₂/t expressa em kg/t de polpa seca (a.s) como cloro ativo. Os branqueamentos foram realizados em sacos de polietileno, onde as polpas foram misturadas com uma quantidade de água destilada suficiente para fornecer uma consistência final de 10% m/v e ácido sulfúrico 2 molL⁻¹ ou hidróxido de sódio 1 molL⁻¹ suficiente para estabelecer o pH 2,7. Após a adição de quantidade apropriada de solução estoque de dióxido de cloro, os sacos de polietileno foram imediatamente selados, pré-aquecidos em forno microondas e acondicionados em banho de vapor termostaticado à temperatura de 60 °C. Após o tratamento, foram extraídas amostras do licor residual para análise de pH e de residual de dióxido de cloro. Subseqüentemente, as polpas, foram lavadas com 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa (base seca).

3.2.4.2. Branqueamento de extração alcalina (E)

As condições gerais de branqueamento na extração alcalina são estão apresentadas na Tabela 3. O branqueamento foi realizado em sacos de polietileno, onde as polpas foram misturadas com uma quantidade de água destilada suficiente para fornecer uma consistência final de 10% m/v e hidróxido de sódio 1 molL⁻¹ suficiente para estabelecer o pH 10,0.

Após a adição de quantidade apropriada dos reagentes, a polpa foi misturada vigorosamente até obter uma massa homogênea. A polpa homogeneizada foi distribuída uniformemente em saco de polietileno, aquecida em forno de microondas até a temperatura 60 °C e, posteriormente, depositada em banho de vapor termostaticado, onde é mantido à temperatura constante por 30 minutos. Terminado o tempo de reação, a amostra foi transferida para um saco de pano nylon, permitindo a coleta de licor residual para análises de pH. Em seguida, lavou-se a polpa com 9 m³ de água deionizada ou destilada por tonelada de polpa (base seca). Após a lavagem, desaguou-se a polpa em uma centrífuga e a transferiu para um saco de polietileno. Posteriormente foi dispersa e efetuou-se a homogeneização. A polpa está pronta para a realização dos estágios posteriores de branqueamento.

3.2.4.3. Branqueamento de extração alcalina com peróxido de hidrogênio (EP)

As condições gerais de branqueamento na extração alcalina com peróxido de hidrogênio estão apresentadas na Tabela 3. Os branqueamentos foram realizados em sacos de polietileno. Calculou-se o volume de reagentes e a quantidade de água a ser utilizada para o ajuste da consistência.

Mediu-se, em uma proveta, a quantidade necessária de solução de hidróxido de sódio (pH 10,5) e de peróxido de hidrogênio (3 kg/t de polpa seca) e adicionou-se ao volume total de água necessário para o ajuste da consistência (10% m/v). Adicionou-se esta solução à polpa e esta foi misturada vigorosamente até obter uma massa homogênea. Após a mistura, o pH inicial foi medido e a polpa foi distribuída uniformemente em um saco de polietileno, aqueceu-se o material em forno de microondas até a temperatura 80 °C e foi depositada em banho de vapor termostatizado, onde foi mantido à temperatura constante por 90 minutos. Terminado o tempo de reação, transferir a amostra para um saco de pano nylon, permitindo a coleta de licor residual para análises de pH e residual de peróxido. Em seguida, lavou-se a polpa com 9 m³ de água deionizada ou destilada por tonelada de polpa (base seca). Após a lavagem, desaguou-se a polpa em uma centrífuga e esta foi transferida para um saco de polietileno onde realizou-se sua desintegração e homogeneização. A polpa está pronta para a realização das análises físico-químicas e dos estágios posteriores de branqueamento.

3.2.4.4. Branqueamento com peróxido de hidrogênio (P)

As condições gerais de branqueamento com peróxido de hidrogênio estão apresentadas na Tabela 3. Calculou-se o volume de reagentes (5, 20, 30, 40 e 50 kg/t de polpa seca (a.s), dependendo da seqüência utilizada) e a quantidade de água a ser utilizada para o ajuste da consistência (10% m/v). Os branqueamentos foram realizados em sacos de polietileno.

Mediu-se a quantidade necessária de solução de peróxido de hidrogênio e de hidróxido de sódio, e misturou-se com a água. Adicionou-se esta solução à polpa e misturou-se vigorosamente até obter uma massa homogênea. Após a mistura, o pH inicial foi medido e a polpa foi distribuída uniformemente em um saco de polietileno. O material foi então aquecido em forno de microondas até a temperatura 80 °C e

depositado em banho de vapor termostaticado, onde foi mantido à temperatura constante por 120 minutos (tempo pré-determinado em estudo com miniamostras). Terminado o tempo de reação, a amostra foi transferida para um saco de pano nylon, permitindo a coleta de licor residual para análises de pH e residual de peróxido. Em seguida, lavou-se a polpa com 9 m³ de água deionizada ou destilada por tonelada de polpa (base seca). Após a lavagem, a polpa foi centrifugada para eliminar excesso de água e transferida para sacos de polietileno onde foi dispersa e homogeneizada.

A polpa está pronta para a realização das análises físico-químicas e dos estágios posteriores de branqueamento.

3.2.4.5. Branqueamento com ozônio em média consistência (Z)

As condições gerais de branqueamento com ozônio em média consistência (10%) estão apresentadas na Tabela 3. O branqueamento foi realizado em um reator/misturador Mark V (Quantum Technologies) acoplado a um compressor de ozônio (Ozone Cart). A polpa foi acidificada com H₂SO₄ 2 molL⁻¹ até o pH 2,7. Atingida a temperatura de 50 °C e, sob efeito de agitação constante, a dosagem pré-estabelecida de ozônio (6 kg/t) foi injetada no reator através do Ozone Cart por 1 minuto. Terminada a reação, o ozônio residual, no Ozone Cart, foi coletado em uma solução de KI 5% v/v e titulado com solução de tiosulfato de sódio 0,1 molL⁻¹, utilizando solução de amido 0,2% como indicador do ponto final da titulação.

O ozônio consumido pela polpa foi calculado pela diferença entre as concentrações de ozônio aplicada e residual. Terminada a reação, foram extraídas amostras de licor para análises de pH final e ozônio residual, e a polpa foi lavada com água destilada (9 m³/t de polpa, base seca).

3.2.4.6. Tratamento com quelante para remoção de metais (Q)

As condições gerais de branqueamento com DTPA estão apresentadas na Tabela 3. Calculou-se o volume de reagentes e a quantidade de água a ser utilizada para o ajuste da consistência (9% m/v). Os branqueamentos foram realizados em sacos de polietileno.

Mediu-se, em uma pipeta, a quantidade avaliada de solução de hidróxido de sódio para estabelecer pH 6,5 e misturou-se com 2/3 do volume total de água necessária para o ajuste da consistência. O requerimento de hidróxido de sódio para controle do pH depende do estágio anterior de branqueamento e é determinado em estudo prévio, com mini-amostras de polpa. Esta solução foi adicionada à polpa e misturada manualmente. Em seguida, mediu-se a quantidade necessária de solução de DTPA (1,5 kg/t), e misturou-se com o restante da água. Adicionou-se esta solução à polpa e misturou-se vigorosamente até obter uma massa homogênea. Após a mistura, o pH foi medido e, se necessário foi ajustado novamente até que atinja o valor 5,0. A polpa foi distribuída uniformemente em um saco de polietileno. Em seguida, o material foi aquecido em forno de microondas até a temperatura 90 °C e depositado em banho de vapor termostaticado, onde é mantido à temperatura constante por 30 minutos. Terminado o tempo de reação, transferiu-se a amostra para um saco de pano nylon, permitindo a coleta de licor residual para análises de pH. Em seguida, lavou-se a polpa com 9 m³ de água deionizada ou destilada por tonelada de polpa (base seca). Após a lavagem, a polpa foi centrifugada, no saco de pano nylon, para eliminar excesso de água e transferida para sacos de polietileno onde foi dispersa e homogeneizada.

A polpa está pronta para a realização dos estágios posteriores de branqueamento.

3.2.4.7. Hidrólise ácida da polpa para remoção de Hexas (A)

As condições gerais deste estágio de hidrólise ácida estão apresentadas na Tabela 3. Calculou-se o volume de reagentes e a quantidade de água a ser utilizada para o ajuste da consistência (11% m/v).

Adicionou-se à polpa a água contendo a solução de ácido sulfúrico e misturou-se manualmente. O requerimento de ácido sulfúrico para controle do pH é determinado em estudo prévio, com mini-amostras de polpa, em função do pH 2,7. Após a mistura manual, a polpa foi distribuída uniformemente em um saco de polietileno, aquecida em forno de microondas até a temperatura de 95 °C e depositar em um banho de vapor termostaticado, onde é mantida a temperatura constante por 110 minutos. Terminado o tempo de reação, a amostra foi transferida para um saco de pano nylon, permitindo a coleta de licor residual para análises de pH. Em seguida, lavou-se a polpa com 9 m³ de água deionizada ou destilada por tonelada de polpa (base seca). Após a lavagem, a

polpa foi centrifugada para eliminar excesso de água e transferida para sacos de polietileno onde foi dispersa e homogeneizada.

A polpa está pronta para a realização das análises físico-química e dos estágios posteriores de branqueamento.

3.2.4.8. Branqueamento com ácido peracético (Paa)

As condições gerais de branqueamento com ácido peracético (Paa) estão apresentadas na Tabela 3. Calculou-se o volume de reagentes (Paa avaliado para 1,0, 2,5, 3,5 e 5,0 kg/t de polpa seca) e a quantidade de água a ser utilizada para o ajuste da consistência (9% m/v). As polpas foram misturadas com solução de ácido peracético e ácido sulfúrico 2 molL^{-1} ou hidróxido de sódio 1 molL^{-1} suficiente para estabelecer o pH $\sim 5,0$, e água. Misturou-se a polpa vigorosamente até obter uma massa homogênea. Posteriormente, distribuiu-se a polpa uniformemente em um saco de polietileno, aqueceu-se o material em forno de microondas até a temperatura $75 \text{ }^\circ\text{C}$ e este foi acondicionado em banho de vapor termostaticado à temperatura constante, sendo avaliados os tempos de 30, 60, 90 e 120 minutos. Terminado o tempo de reação, transferiu-se a amostra para um saco de pano nylon, permitindo a coleta de licor residual para análises de pH e residual de ácido peracético. Em seguida, lavou-se a polpa com 9 m^3 de água deionizada ou destilada por tonelada de polpa (base seca). Após a lavagem, a polpa foi centrifugada para eliminar excesso de água e transferida para sacos de polietileno onde foi dispersa e homogeneizada.

A polpa está pronta para a realização das análises físico-químicas.

Tabela 3. Condições gerais de branqueamento

Estágio	Consistência, %(m/v)	Tempo de reação, min	Temperatura, °C	pH final
D ₀	10	30	60	2,7
D _{HT}	10	120	95	2,7
A	11	110	95	2,7
E	10	30	60	10,0
(EP)	10	90	80	10,5
D ₁	10	120	80	3,8
D ₂	10	120	80	5,5
Z	10	1	50	2,7
P	10	120	90	10,0
Q	9	30	90	6,5
Paa	9	30-120	75	5,0

3.2.5. Caracterização da polpa branqueada

Após o branqueamento das polpas, elas foram caracterizadas quanto à alvura, reversão de alvura, viscosidade, coordenadas de cor L*a*b*, coeficiente de dispersão de luz (S), número kappa, grupos carboxilas e grupos carbonilas, conforme procedimentos da Technical Association of the Pulp and Paper Industry T 525 om-92, T 525 om-92, T 230 om-89, T 524 om-94, T 519 om-96, T 236 cm-85, T 237 om-93, e T 430 om-94, respectivamente e quanto a orgânicos halogenados totais (OX) e teores de ácidos

hexenurônicos, conforme a norma SCAN P:699 e método de VUORINEN et al., respectivamente.

3.2.6. Caracterização do efluente

Foram agrupadas Juntaram-se alíquotas de igual volume dos licores residuais de cada estágio de branqueamento, exceto do estágio O, para preparar o efluente combinado de cada seqüência. Os efluentes combinados foram analisados quanto aos parâmetros DQO, cor e AOX, conforme procedimentos CPPA H 3P, CPPA H 5P e SCAN W 9:89, respectivamente.

3.2.7. Refino da polpa branqueada

As polpas branqueadas foram submetidas ao refino em moinho PFI, modelo Mark VI (HAMAR NORWAY). Para cada nível de refino, 30 g (a.s.) de polpa foram pesados e dispersados em, aproximadamente, 2 L de água destilada (consistência de 1,5%). A polpa foi colocada em um desagregador REGMED e submetida a 30.000 revoluções. Em seguida, foi filtrada, imersa em água destilada até uma consistência de 10% (m/v) e colocada no moinho PFI. Cada uma das polpas branqueadas através das diferentes seqüências foi submetida a quatro níveis de refino: 0, 1500, 2000, 2500 e 3000 revoluções do moinho. Após o refino, a polpa foi recolhida, dispersa em 2 L de água destilada (consistência de 1,5% m/v), a 10.000 revoluções do desagregador e suspendida para 15 L em um homogeneizador. A polpa não refinada foi também desagregada em 2 L de água, porém a 30.000 revoluções, numa consistência de 0,2%. A intensidade de refino (°SR) foi expressa pela resistência à drenagem da polpa (°SR). Foi medido em um aparelho SCHOPPER-RIEGLER, com base na norma da ABCP C10/79.

3.2.8. Propriedades físicas, mecânicas e ópticas das polpas

3.2.8.1. Formação de folhas

A partir da suspensão de polpa, mantida continuamente sob agitação mecânica, foram fabricadas folhas em formadora tipo TAPPI, conforme o método TAPPI T205 om-88 (1988), com gramatura $60 \pm 2 \text{ g/m}^2$. Para cada índice de refino foram formadas, em média, doze folhas. Em seguida, elas foram submetidas à climatização com umidade relativa do ar de $50\% \pm 2\%$ e temperatura de $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1^\circ \text{C}$ para secagem, acondicionamento e realização dos testes físico-mecânicos e ópticos, os quais foram

efetuados conforme procedimentos padronizados pela *Technical Association of Pulp and Paper Industry* (Tabela 4).

Tabela 4. Parâmetros analisados e seus respectivos procedimentos analíticos

Testes	Normas
Gramatura	T 410 om-93
Espessura	T 411 om-97
Peso específico aparente (PEA)	T 220 sp-96
Volume específico aparente (VEA)	T 220 sp-96
Opacidade e coeficiente de dispersão de luz (S)	T 519 om-96
Resistência à passagem de ar (porosidade)	T 536 om-96
Resistência ao arrebentamento	T 403 om-97
Resistência ao rasgo	T 414 om-98
Resistência à tração	T 494 om-96
Energia absorvida em regime de tração (TEA)	T 494 om-88
Módulo de elasticidade específica (MOE)	T 494 om-88
Propriedades ópticas	T519 om-91

3.2.8.2. Determinação do Consumo de Energia

Medição direta no moinho PFI, que realiza a ação mecânica tendo um rotor interno e uma carcaça externa rodando sob pressão constante na mesma direção, porém com velocidades periféricas diferentes. Nesse processo, ele registra o consumo de energia (Wh) necessário para refinação da polpa.

3.2.9. Análise Estatística dos Resultados

Para comparações de propriedades entre amostras, foram ajustadas equações do desenvolvimento de propriedades em função do consumo de energia. O tratamento dos resultados experimentais foi realizado utilizando-se o *software* comercializado com o nome Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG), versão 5.0/1993, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na busca de substitutos para os reagentes clorados empregados no branqueamento de polpas celulósicas, o ácido peracético foi estudado, especialmente em razão do seu forte caráter oxidante e da sua seletividade nas reações com a lignina e com ácidos hexenurônicos. Neste estudo, o ácido peracético (Paa) foi avaliado como última etapa de processos de branqueamento ECF. Foram avaliados cenários com e sem lavagem da polpa previamente ao estágio de branqueamento com ácido peracético.

4.1. Aplicação do estágio Paa na seqüência ECF D(EP)DD

A seqüência D(EP)DD é uma das mais utilizadas, mundialmente, para o branqueamento de polpa celulósica, por ser eficiente e seletiva. Porém, a estabilidade de alvura, a refinabilidade e as propriedades de resistência das polpas produzidas por esta seqüência podem ser melhoradas. Por exemplo, tem sido demonstrado (BARNA et al., 1996^b) que a substituição do último estágio D desta seqüência por um estágio P (branqueamento com peróxido de hidrogênio), convertendo-a em D(EP)DP, melhora significativamente as características de estabilidade de alvura e refinabilidade da polpa produzida. Outra opção é a substituição do último estágio D por um estágio de Paa (ácido peracético), convertendo-a em D(EP)D/Paa (o símbolo “/” indica ausência de lavagem). Neste caso, têm se a vantagem de eliminar a lavagem da polpa entre o segundo estágio D e o tratamento com Paa, já que estas duas etapas operam em valores similares de pH. Os resultados experimentais, obtidos em cada estágio de branqueamento, das alternativas D(EP)DD, D(EP)DP e D(EP)D/Paa estão apresentados nas Tabelas B.1, B.2 e B.3, do Apêndice B, respectivamente. Um sumário comparativo entre as três alternativas está apresentado na Tabela 5. Verifica-se que a polpa branqueada pelas seqüências D(EP)DD, D(EP)DP e D(EP)D/Paa apresentam características similares de alvura final. A seqüência terminada com o estágio P final resultou em polpa com maior número kappa, menor viscosidade e muito menor reversão de alvura em relação à seqüência terminada com D final. A seqüência terminada com estágio Paa final resultou em polpa com kappa pouco maior, reversão de alvura pouco

menor e viscosidade muito menor em relação à referência. Os valores das coordenadas L* e a* das três polpas não diferiram grandemente entre si. Porém, a coordenada b* da polpa branqueada pela seqüência D(EP)DP mostrou-se substancialmente maior que as das demais polpas.

Tabela 5. Características das polpas e consumo de reagentes no branqueamento pelas seqüências D(EP)DD, D(EP)DP e D(EP)D/Paa

Resultados	Seqüências		
	D(EP)DD	D(EP)DP	D(EP)D/Paa
Número kappa	1,7	2,2	1,9
Alvura, % ISO	89,9	90,0	89,8
Reversão, % ISO	3,0	2,0	2,5
Viscosidade, cP	13,9	13,0	12,1
Coordenada L*	97,9	97,7	97,9
Coordenada a*	-0,1	-0,1	-0,1
Coordenada b*	2,7	3,9	2,7
HexAs, mmol/kg	4,5	NA	3,5
OX, g/t	194,2	NA	141,3
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	0,4	NA	0,5
Carboxila, meq/100g	8,0	NA	8,1
ClO ₂ , kg/t	10,65	11,79	13,69
H ₂ O ₂ , kg/t	3,0	5,0	3,0
Paa, kg/t	0,0	0,0	1,0
NaOH, kg/t	9,3	13,5	14,7
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,5	7,0	7,0
Custo Total Reagentes, US\$/t	18,45	23,35	27,15

*preços dos reagentes (US\$/t): ClO₂ = 1000, H₂O₂ = 850, Paa = 3000, NaOH = 500, H₂SO₄ = 80.

* NA = não avaliado

A reversão de alvura pode ser causada quando são utilizados reagentes incapazes de remover toda a lignina da polpa. A alvura da polpa branqueada não é permanente e a reversão é acelerada pela exposição à luz, calor, umidade, produtos químicos e oxigênio. Para evitar a reversão de alvura, deve-se controlar as condições ambientais (umidade e temperatura), metais, oxidação de carboidratos, kappa final idealmente abaixo de 1, eliminação dos ácidos hexenurônicos da polpa e controle do pH final da polpa. A mais baixa reversão de alvura da polpa branqueada com a seqüência D(EP)DP é explicada pelo efeito positivo do peróxido na eliminação de carboidratos oxidados presentes na polpa.

O fabricante de celulose está acostumado a mudar as condições de processo de digestão e branqueamento na busca de otimizações. Ele geralmente não tem nenhuma indicação acerca de efeitos desastrosos que ele possa estar trazendo à parede celular das fibras, exceto por medições de viscosidade da polpa. Viscosidade é uma propriedade muito simples para realmente mostrar os danos físicos e químicos que a parede celular da fibra possa estar sofrendo. Embora esse parâmetro seja um indicativo do grau de degradação das cadeias de celulose, não necessariamente deve ser utilizado como indicativo de qualidade da polpa (COLODETTE, 2001). A seqüência D(EP)D/Paa produziu polpa com viscosidade significativamente mais baixa que a referência, porém somente os testes físicos-mecânicos das fibras, que serão apresentados nas sessões seguintes, podem indicar se houve verdadeira perda de qualidade da fibra. Os resultados mostram simplesmente que o estágio final de Paa reduziu o tamanho médio das cadeias de celulose em relação a um estágio convencional com dióxido de cloro.

As coordenadas cromáticas $L^*a^*b^*$ é um sistema de medição de cores. A cor não é propriedade do objeto, mas o resultado da interação do objeto com a luz sobre ele incidente. A coordenada L^* , que se costuma chamar de luminosidade, vale 0 para uma amostra perfeitamente preta e cresce com a percepção de claridade da amostra. As coordenadas a^* e b^* têm valores próximos de 0 para cores neutras (brancas, cinzentas ou pretas) e valores claramente diferentes de 0 (positivos ou negativos) para as amostras coloridas. O eixo b^* é o eixo azul-amarelo, de maneira que valores positivos de b^* indicam uma amostra mais amarela que a referência. O caráter branco da celulose pura se manifesta nos baixos valores de a^* e b^* , bem como no valor de L^* próximo de 100. O maior valor de coordenada b^* para a polpa branqueada pela seqüência D(EP)DP indica que ela tem um tom mais amarelado, o que é explicado pelo seu maior número kappa. Essa característica não é muito desejável para polpas destinadas à fabricação de papéis de imprimir e escrever que possui alta exigência em relação ao tom amarelo.

Numa análise geral, verifica-se que a polpa branqueada pela seqüência D(EP)DD apresenta características superiores à branqueada com a seqüência D(EP)DP. Portanto, a primeira foi utilizada para um estudo mais detalhado, comparativamente à seqüência contendo o estágio Paa, D(EP)D/Paa. Os resultados das análises mais finas das polpas branqueadas com as seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa estão também apresentados na Tabela 5. Verifica-se teor significativamente menor de OX e ligeiramente menor de HexAs na polpa branqueada pela seqüência contendo estágio

final de Paa. O menor teor de OX é explicado pelo menor uso de dióxido de cloro nesta seqüência. O menor teor de HexAs pode ser explicado pela alta eficiência do Paa em atacar esses ácidos durante o branqueamento. Os teores de grupos carboxilas da polpa não foram influenciados pelo estágio Paa enquanto houve aumento do teor de grupos carbonilas. O aumento das carbonilas é explicado pela diminuição da viscosidade da polpa no tratamento com Paa.

Os ácidos hexenurônicos (HexAs) derivam da conversão parcial do ácido 4-O-metil-glicurônico presentes nas xilanas da madeira, durante a polpação kraft. Eles são os principais responsáveis pela característica apresentada pelas polpas de eucalipto de seqüestrar metais, deixando-os fracamente ligados a ela e, portanto, podem ser removidos facilmente. Eles formam ligações covalentes com a lignina, consomem reagentes químicos eletrofílicos de branqueamento (dióxido de cloro, ozônio, etc.), causam reversão de alvura das polpas branqueadas e é uma das principais fontes de ácido oxálico (causadores de incrustações nas fábricas). Além de protegerem as xilanas durante a polpação e estágios alcalinos de branqueamento. Portanto, são indesejáveis na polpa celulósica, devido à diminuição da qualidade do produto final.

A reversão de alvura da polpa branqueada pela seqüência D(EP)D/Paa foi menor que a da branqueada pela seqüência D(EP)DD (Tabela 5), resultado que pode ser explicado pelo menor teor de HexAs da primeira.

Em resumo, verificou-se que o estágio Paa resulta polpa de menor viscosidade, HexAs, número kappa e reversão de alvura, porém com teor ligeiramente maior de grupos carbonilas. Estas pequenas diferenças químicas não afetaram, aparentemente, as coordenadas $L^*a^*b^*$ da polpa branqueada.

Deve ser notado que o uso do Paa elevou significativamente o custo total de branqueamento da polpa (Tabela 5). Os pequenos benefícios químicos acima relatados provavelmente não justificam a utilização desse reagente.

4.2. Aplicação do estágio Paa na seqüência ECF D_{HT}(EP)DD

Este estudo é similar ao discutido no item 4.1, exceto que o primeiro estágio com dióxido de cloro foi efetuado por tempo longo (120 minutos) e temperatura elevada (95 °C). O estágio de dióxido realizado nestas condições e comumente designado de

D_{HT} e, em princípio, é mais eficiente que um estágio com dióxido de cloro normal (D), especialmente para polpa de eucalipto. Igualmente ao relatado anteriormente, foram comparadas as seqüências $D_{HT}(EP)DD$, $D_{HT}(EP)DP$ e $D_{HT}(EP)D/Paa$. Os resultados experimentais desse estudo, obtidos em cada estágio do branqueamento, estão apresentados nas Tabelas B.4, B.5 e B.6 do Apêndice B. Um sumário comparativo dos resultados obtidos para as três seqüências está apresentado na Tabela 6. Verifica-se que a polpa branqueada pelas seqüências $D_{HT}(EP)DD$, $D_{HT}(EP)DP$ e $D_{HT}(EP)D/Paa$ apresentam características similares de alvura final. A seqüência terminada com o estágio Paa final resultou em polpa com menor número kappa e viscosidade, porém com maior reversão de alvura em relação à seqüência terminada com D final. Como esperado, a seqüência terminada com o estágio final P foi que produziu polpa com a menor reversão de alvura. Os valores das coordenadas L^* e a^* das três polpas não diferiram grandemente entre si. Porém, a coordenada b^* da amostra branqueada pela seqüência $D(EP)D/Paa$ mostrou-se substancialmente maior que as das demais. A seqüência $D(EP)D/Paa$ produziu polpa com teor de HexAs, OX e carboxilas ligeiramente superiores à referência e teor de carbonila ligeiramente inferior.

O custo de reagentes para obtenção de alvura 90% ISO foi muito superior para seqüência $D(EP)D/Paa$ refletindo o alto custo do ácido peracético.

Comparando-se os resultados da Tabela 5 com os da Tabela 6, verifica-se que o estágio final de Paa produziu resultados inferiores na seqüência contendo o estágio D_{HT} (Tabela 6). O estágio D_{HT} é mais eficiente na redução do número kappa da polpa (eliminação de materiais oxidáveis) que o estágio D convencional. Em razão disto, o benefício trazido pelo estágio Paa foi menor já que a polpa que chegou a este estágio se encontrava praticamente isenta de materiais oxidáveis, tornando o efeito do Paa praticamente inócuo. O estágio Paa é mais efetivo em polpas ricas em lignina, por se tratar de um agente de deslignificação, especialmente em pH baixo.

O estágio D_{HT} é mais eficiente que o D para reduzir o número kappa devido a maior remoção de ácidos hexenurônicos, em razão do mais alto tempo/temperatura de reação. A significativa perda de viscosidade é explicada pela exposição da polpa a um meio mais ácido por elevado tempo e temperatura, o que causa hidrólise das cadeias de celulose.

Tabela 6. Características das polpas e consumo de reagentes no branqueamento pelas seqüências $D_{HT}(EP)DD$, $D_{HT}(EP)DP$ e $D_{HT}(EP)D/Paa$

Resultados	Seqüências		
	$D_{HT}(EP)DD$	$D_{HT}(EP)DP$	$D_{HT}(EP)D/Paa$
Número kappa	1,0	1,2	0,8
Alvura, % ISO	89,8	90,1	89,8
Reversão, % ISO	2,1	1,8	2,6
Viscosidade, cP	11,6	10,5	9,9
Coordenada L*	97,5	97,7	97,6
Coordenada a*	-0,1	-0,1	0,0
Coordenada b*	3,0	3,9	4,3
HexAs, mmol/kg	1,1	NA	1,9
OX, g/t	95,9	NA	109,6
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	0,5	NA	0,4
Carboxila, meq/100g	6,7	NA	7,7
ClO ₂ , kg/t	10,65	11,79	11,79
H ₂ O ₂ , kg/t	3,0	5,0	3,0
Paa, kg/t	0,0	0,0	3,5
NaOH, kg/t	9,3	13,5	15,0
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,5	7,0	7,0
Custo Total Reagentes, US\$/t*	18,45	23,35	32,90

*preços dos reagentes (US\$/t): ClO₂ = 1000, H₂O₂ = 850, Paa = 3000, NaOH = 500, H₂SO₄ = 80.

* NA = não avaliado.

4.2.1. Efeito da lavagem entre os estágios D e Paa

Para determinar o efeito da lavagem entre os estágios D e Paa, foram comparadas as seqüências $D_{HT}(EP)D/Paa$ e $D_{HT}(EP)DPaa$. Os resultados experimentais desse estudo, obtidos em cada estágio do branqueamento, são apresentados nas Tabelas B.6 e B.7 do Apêndice B. Um sumário comparativo dos resultados obtidos para as duas seqüências é está apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Características das polpas e consumo de reagentes no branqueamento pelas seqüências D_{HT}(EP)D/Paa, D_{HT}(EP)DPaa

Resultados	Seqüências	
	D _{HT} (EP)D/Paa	D _{HT} (EP)DPaa
Número kappa	0,8	0,6
Alvura, % ISO	89,8	89,7
Reversão, % ISO	2,6	2,1
Viscosidade, cP	9,9	9,5
Coordenada L*	97,6	97,7
Coordenada a*	0,0	-0,1
Coordenada b*	4,3	3,9
ClO ₂ , kg/t	11,79	11,79
H ₂ O ₂ , kg/t	3,0	3,0
Paa, kg/t	3,5	2,5
NaOH, kg/t	14,0	13,5
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,0	7,0
Custo Total Reagentes, US\$/t*	32,90	29,65

*preços dos reagentes (US\$/t): ClO₂ = 1000, H₂O₂ = 850, Paa = 3000, NaOH = 500, H₂SO₄ = 80.

Foi observado que a polpa branqueada pela seqüência D_{HT}(EP)DPaa (com lavagem entre os estágios D e Paa) resultou em polpa com menor número kappa e viscosidade, e também menor reversão de alvura em relação à seqüência D_{HT}(EP)D/Paa. Os valores das coordenadas L* e a* das polpas não diferiram significativamente entre si. Porém, a coordenada b* da amostra branqueada pela seqüência D_{HT}(EP)D/Paa mostrou-se 10,3% maior que a outra seqüência analisada. A introdução da lavagem entre os estágios D e Paa foi vantajosa no que tange ao custo de reagentes de branqueamento, que foi reduzido em US\$3,25 por tonelada de polpa branqueada.

4.2.2. Influência do pH do estágio Paa

O controle do pH de reação é essencial para garantir máxima eficiência de deslignificação e alveamento no estágio Paa, além de menor degradação da celulose. A melhor eficiência e seletividade de deslignificação dos perácidos têm sido verificadas em meio ácido (SPRINGER, 1990; HILL et al., 1992; FRANCIS et al., 1993). Para as reações realizadas em meio neutro, a deslignificação com a quebra das estruturas

aromáticas não é muito favorecida, de modo que tais condições podem ser utilizadas para o branqueamento de polpas mecânicas (LI et al., 1997). Entretanto, YUAN et al., 1997^a, demonstraram que nessas condições o uso de Paa foi pouco eficiente, já que a maior parte do perácido foi consumida em reações de decomposição.

Buscando avaliar se o efeito do pH do estágio Paa modifica o desempenho do branqueamento pela seqüência $D_{HT}(EP)D/Paa$, desenvolveu-se o estudo verificando os pH's 4,0, 6,5 e 8,5. O resultado está apresentado na Tabela 8. Verifica-se que a alvura e a viscosidade final da polpa decresceu com o aumento do pH do estágio Paa.

Nas reações da polpa com o Paa em pH mais elevado, ocorreu maior degradação dos carboidratos devido à decomposição do perácido em espécies oxigenadas reativas, como radicais, oxigênio singlete e hidroxila. A decomposição dos perácidos é grandemente dependente do pH. YUAN et al. (1997^a) demonstraram que, numa faixa de pH de 5,5 a 8,2, a decomposição espontânea de Paa em ácido acético e oxigênio (equação 6) foi a principal responsável pelo consumo do perácido no meio de reação. Nesta faixa de pH, a hidrólise de Paa, formando ácido acético e peróxido de hidrogênio (equação 7), foi desprezível, o mesmo tendo sido constatado por ZHANG et al., 1998. De acordo PEREIRA (1995), a perda de eficiência do estágio Paa com o aumento do pH é causada pela ação negativa dos íons OH^- na estabilidade do ácido peracético, sendo o efeito de metais de transição praticamente negligível neste caso.

O aumento dos valores de reversão de alvura e de coordenada b^* com o aumento do pH é explicado pelo maior teor de HexAs deixados na polpa, quando o branqueamento foi efetuado em pH mais elevados.



Tabela 8. Características das polpas e consumo de reagentes no branqueamento pela seqüência D_{HT}(EP)D/Paa, com variação de pH no estágio Paa

Resultados	Seqüências		
	D _{HT} (EP)D/Paa	D _{HT} (EP)D/Paa	D _{HT} (EP)D/Paa
pH	4,0	6,5	8,5
Número kappa	1,0	0,8	0,8
Alvura, % ISO	90,1	89,7	89,3
Reversão, % ISO	2,7	2,7	3,0
Viscosidade, cP	10,2	9,0	8,1
Coordenada L*	97,9	97,7	97,9
Coordenada a*	0,0	-0,1	0,0
Coordenada b*	3,2	3,9	4,3
HexAs, mmol/kg	1,76	2,03	2,72
OX, g/t	106,8	109,9	110,3
ClO ₂ , kg/t	11,79	11,79	11,79
H ₂ O ₂ , kg/t	3,0	3,0	3,0
Paa, kg/t	5,0	5,0	5,0
NaOH, kg/t	45,5	55,5	63,5
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,0	7,0	7,0
CAT, kg/t	92,47	92,47	92,47
Custo Total Reagentes, US\$/t*	37,40	37,90	38,30

*preços dos reagentes (US\$/t): ClO₂ = 1000, H₂O₂ = 850, Paa = 3000, NaOH = 500, H₂SO₄ = 80.

4.3. Aplicação do estágio Paa na seqüência ECF A/D(EP)DD

Este estudo é similar ao discutido nos itens 4.1 e 4.2, exceto que o primeiro estágio com dióxido de cloro da seqüência D(EP)DD foi substituído pelo estágio A/D que consiste de um hidrólise ácida da polpa (120 min, 95 °C), seguida do estágio curto com dióxido de cloro (10 min, 90 °C). Igualmente ao relatado anteriormente, foram comparadas as seqüências A/D(EP)DD, A/D(EP)DP e A/D(EP)D/Paa. Os resultados experimentais desse estudo, obtidos em cada estágio do branqueamento, estão apresentados nas Tabelas B.13, B.14 e B.15 do Apêndice B. Um sumário comparativo dos resultados obtidos para as três seqüências está apresentado na Tabela 9.

Verifica-se na Tabela 9 que a polpa branqueada pelas seqüências A/D(EP)DD, A/D(EP)DP e A/D(EP)D/Paa apresentam características similares de alvura final. A seqüência terminada com o estágio Paa final resultou em polpa com menor viscosidade,

porém com maior reversão de alvura em relação às seqüências terminadas com estágios finais D ou P. Como esperado, a seqüência terminada com o estágio final P foi a que produziu polpa com a menor reversão de alvura. Os valores das coordenadas a^* e b^* das três polpas não diferiram grandemente entre si. Porém, os valores de coordenada L^* das amostras branqueadas pelas seqüências A/D(EP)DP e A/D(EP)D/Paa se mostraram ligeiramente inferiores ao da referência.

Avaliando-se os custos de reagentes para branqueamento verifica-se que a seqüência A/D(EP)DD é a mais atrativa, sendo o uso do perácido totalmente inviável do ponto de vista econômico, pois aumenta o custo do branqueamento em cerca de 75%.

Tabela 9. Características das polpas e consumo de reagentes no branqueamento pelas seqüências A/D(EP)DD, A/D(EP)DP e A/D(EP)D/Paa

Parâmetros	Estágios de Branqueamento		
	A/D(EP)DD	A/D(EP)DP	A/D(EP)D/Paa
Número kappa	0,5	0,8	0,7
Alvura AD., % ISO	89,9	90,3	90,0
Reversão, % ISO	2,4	1,8	2,7
Viscosidade, cP	11,3	11,4	9,8
Coordenada L^*	98,6	97,6	97,6
Coordenada a^*	0,0	0,0	0,0
Coordenada b^*	3,2	3,1	3,3
ClO_2 , kg/t	10,65	9,89	9,89
H_2O_2 , kg/t	3,0	5,0	3,0
Paa, kg/t	0,0	0,0	5,0
NaOH, kg/t	15,5	19,0	20,0
H_2SO_4 , kg/t	12,3	12,3	12,3
Custo Total Reagentes, US\$/t*	21,93	24,12	38,42

*preços dos reagentes (US\$/t): $ClO_2 = 1000$, $H_2O_2 = 850$, Paa = 3000, NaOH = 500, $H_2SO_4 = 80$.

4.4. Aplicação do estágio Paa na seqüência ECF D_{HT}/QP

Nesta seqüência, Q representa um estágio quelante que tem o objetivo de remover metais da polpa, visando aumentar a eficiência do estágio P subsequente. Foi comparada a seqüência D_{HT}/QP (referência) com uma seqüência contendo o estágio final de Paa, $D/QP/Paa$, onde o símbolo “/” representa ausência de lavagem. Os resultados experimentais desse estudo, obtidos em cada estágio do branqueamento,

estão apresentados nas Tabelas B.9 e B.10 do Apêndice B. Um sumário comparativo dos resultados obtidos para as três seqüências está apresentado na Tabela 10.

Verifica-se na Tabela 10 que a polpa branqueada pelas seqüências D/QP e D/QP/Paa apresentam características similares de alvura final. A seqüência D/QP/Paa resultou em polpa de menores viscosidades e conteúdos de HexAs, porém com maior conteúdo de carbonilas e carboxilas em relação a seqüência D/QP. As polpas branqueadas pelas duas seqüências apresentaram valores similares de OX, coordenada L*a*b* e reversão de alvura.

Os resultados indicaram baixa viabilidade econômica da seqüência D/QP/Paa visto que o seu custo de reagentes foi 62% superior ao da seqüência D/QP. Em outras palavras, é preferível utilizar a seqüência D/QP com maiores dosagens de peróxido no estágio P que introduzir o ácido peracético no processo de branqueamento.

Tabela 10. Características das polpas e consumo de reagentes no branqueamento pelas seqüências D*/QP e D*/QP/Paa

Parâmetros	Estágios de branqueamento	
	D*/QP	D*/QP/Paa
Número kappa	1,9	1,7
Alvura, % ISO	90,2	89,9
Reversão, % ISO	2,3	2,4
Viscosidade, cP	10,7	8,0
Coordenada L*	98,1	97,9
Coordenada a*	-0,1	-0,2
Coordenada b*	2,5	2,8
HexAs, mmol/kg	13,3	12,5
OX, g/t	52,9	52,0
Carbonila	0,11	0,40
Carboxila	8,52	9,33
ClO ₂ , kg/t	9,89	9,89
H ₂ O ₂ , kg/t	50,0	40,0
Paa, kg/t	0,0	5,0
NaOH, kg/t	35,0	70,0
H ₂ SO ₄ , kg/t	3,0	3,0
DTPA, kg/t	1,5	1,5
Custo Total Reagentes, US\$/t*	25,83	41,73

*preços dos reagentes (US\$/t): ClO₂ = 1000, H₂O₂ = 850, Paa = 3000, NaOH = 500, H₂SO₄ = 80, DTPA=2500.

4.5. Aplicação do estágio Paa na seqüência ECF Z/EDP

Nesta seqüência, Z representa um estágio de branqueamento com ozônio à média consistência. O ozônio é um reagente eficiente que tem a capacidade de oxidar, descolorir e solubilizar a lignina e os ácidos hexenurônicos. Porém, a limitação de transferência de massa dificulta seu contato com as frações de lignina que estão no interior das paredes das fibras. O uso de ozônio tem sido considerado como alternativa para a redução e/ou eliminação de dióxido de cloro de uma planta de branqueamento de celulose. Porém o ozônio apresenta os inconvenientes de alto custo de fabricação, não ser transportável e baixa seletividade de reação em razão da sua instabilidade química. A baixa seletividade do ozônio em processos de branqueamento de polpa ocorre devido ao seu alto poder oxidante e deve-se a reações de degradação de carboidratos pelo ozônio e por radicais livres que são gerados durante o processo. A formação de radicais hidroxilas ocorre por reações do ozônio com a lignina, pela decomposição do ozônio catalisada por ânions hidroxila e metais de transição e pela decomposição de peróxidos orgânicos, gerados durante reações do ozônio com estruturas de lignina.

A crescente necessidade da indústria de celulose e papel em atender os requisitos de órgãos ambientais e exigências de mercado tem sido a força motriz para o desenvolvimento e a prática de processos que utilizam compostos menos agressivos ao meio ambiente. O ozônio vem conquistando cada vez mais espaço, sendo um substituto potencial para o cloro molecular e dióxido de cloro. A utilização do ozônio minimiza o problema de geração de organoclorados, sem necessariamente impactar no custo operacional do branqueamento.

O ozônio se decompõe em soluções aquosas, sendo o processo acelerado na presença de metais de transição e de ânions hidroxila. Segundo LACHENAL e BOKSTROM (1990), citado por COLODETTE et al. (1993), desde que os metais sejam previamente removidos da polpa, o ozônio poderia ser utilizado em valores de pH mais elevados.

Normalmente o estágio de ozonólise é efetuado em valores de pH na faixa de 2 a 3 para minimizar a decomposição do ozônio e, conseqüentemente, a degradação de carboidratos (LIEBERGOTT et al., 1992).

Um meio alcalino depois do branqueamento com ozônio pode reduzir a alvura da polpa branqueada, devido à indução de estruturas coloridas pelo tratamento alcalino.

Contudo, a extração alcalina facilita a remoção de fragmentos de lignina solúveis em álcali.

Neste estudo, as seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa foram comparadas para o branqueamento de polpa Kraft de eucalipto, onde o símbolo “/” representa ausência de lavagem. Os resultados experimentais, obtidos em cada estágio do branqueamento, estão apresentados nas Tabelas B.11 e B.12 do Apêndice B. Um sumário comparativo dos resultados obtidos para as três seqüências está apresentado na Tabela 11. Verifica-se que a polpa branqueada pela seqüência Z/EDP e Z/ED/Paa apresentam características similares de alvura final. A seqüência Z/ED/Paa resultou em polpa com menor viscosidade e conteúdo de carboxilas, porém com maior reversão e conteúdo de carbonilas e de OX em relação à seqüência Z/EDP. As polpas branqueadas pelas duas seqüências apresentaram valores similares de coordenadas $L^*a^*b^*$. O maior teor de OX da polpa contendo o estágio final D/Paa é explicado pela ausência de um estágio alcalino subsequente à etapa com dióxido de cloro que é responsável pela geração dos compostos organoclorados. Esses compostos organoclorados são removidos em grande extensão por uma etapa alcalina subsequente, como foi o caso da seqüência Z/EDP que utilizou a estratégia DP, sendo que o estágio P reage em meio alcalino.

O uso do ácido peracético não teve efeito positivo no branqueamento da polpa, porém elevou o custo de reagentes químicos. Deve ser ressaltado, no entanto, que nesta seqüência contendo ozônio foi onde o uso do ácido peracético teve o menor impacto negativo nos custos de reagentes químicos, se comparado, por exemplo, com as demais estratégias discutidas anteriormente.

Tabela 11. Características das polpas e consumo de reagentes no branqueamento pelas seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

Resultados	Seqüências	
	Z/EDP	Z/ED/Paa
Número kappa	1,0	0,9
Alvura, % ISO	89,7	90,0
Reversão, % ISO	2,1	2,5
Viscosidade, cP	12,2	10,3
Coordenada L*	97,7	97,8
Coordenada a*	-0,2	0,0
Coordenada b*	2,9	3,1
HexAs, mmol/kg	1,3	1,3
OX, g/t	18,9	34,0
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	0,40	0,62
Carboxila, meq/100g	7,9	7,3
ClO ₂ , kg/t	1,9	1,9
H ₂ O ₂ , kg/t	5,0	0,0
Paa, kg/t	0,0	3,5
NaOH, kg/t	20,0	45,0
H ₂ SO ₄ , kg/t	13,2	13,2
Ozônio, kg/t	6,0	6,0
Custo Total Reagentes, US\$/t*	28,01	31,51

*preços dos reagentes (US\$/t): ClO₂ = 1000, H₂O₂ = 850, Paa = 3000, NaOH = 500, H₂SO₄ = 80, O₃=1800.

4.6. Carga poluente dos efluentes de branqueamento

Durante os processos produtivos de polpa e papel, grandes quantidades de água são necessárias na produção destes produtos. Caso na indústria, não haja reuso de efluentes (fechamento de circuito de água) e, levando-se em consideração, toda a água utilizada no processo, o volume dos despejos resultantes é bastante elevado. As técnicas de redução dos despejos podem ser feitas pela supervisão do processo produtivo e através de medidas internas de controle de poluição, cuja aplicação na indústria de celulose Kraft tem, entre outros, como incentivo importante a minimização dos custos de controle da poluição. As medidas internas de controle podem ser por: modificações do processo, reciclagem de águas (dentro do processo), reuso de águas (de processo para processo), controle de descargas acidentais e derrames, sendo que, na maioria das

vezes, as três primeiras formas são inter-relacionadas nos projetos que visam a redução do potencial poluidor da indústria.

Os despejos das fábricas de celulose e papel podem ser reduzidos, de uma forma significativa, por intermédio de medidas internas de controle. Normalmente este é o meio mais econômico para a redução dos efluentes, particularmente para as novas instalações. Entretanto, em várias situações, a qualidade dos efluentes obtidos através destas medidas pode não ser suficiente para atender os regulamentos ambientais e/ou a implantação destas medidas nas unidades existentes torna-se inexecutáveis em função dos custos envolvidos. Nestes casos, métodos de tratamentos externos ou a combinação de métodos internos e externos são então necessários.

O tratamento dos despejos é efetuado após o efluente deixar a indústria com o objetivo de reduzir sólidos em suspensão, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), cor, toxidez, etc. O lançamento de efluentes líquidos nos corpos receptores somente será possível quando as características dos despejos não alterarem as propriedades físicas, químicas e biológicas dos cursos d'água além dos limites estabelecidos para os múltiplos usos dos mesmos. No Brasil, os estados deliberam sobre os padrões de lançamento de efluentes líquidos industriais, tendo em vista as características regionais e locais e os usos preponderantes ou classes do receptor.

A demanda química de oxigênio (DQO) é uma medida rápida do oxigênio consumido durante a oxidação química do material orgânico no efluente. Quantifica o teor de oxidante químico (dicromato de potássio) consumido por uma amostra de efluente, sendo expressa por mg/L. A DQO é um parâmetro indicativo da carga orgânica do efluente, porém não dá informação sobre sua biodegradabilidade. Por definição, AOX é a fração do elemento cloro, bromo e iodo que numa amostra de água, efluente ou sólido está ligada à matéria orgânica dissolvida ou suspensa e, que é determinada em condições normatizadas. Os organoclorados são substâncias tóxicas provenientes das reações do composto de cloro com constituintes naturais da madeira (AXERGARD et al. e SOUZA, 2002). A cor é uma medida direta da coloração do efluente, sendo o seu impacto ambiental mais relacionado ao impedimento da penetração de luz nos leitos aquáticos.

Neste estudo, para cada seqüência avaliada, os filtrados de cada estágio de branqueamento foram homogeneizados numa mistura e avaliados. Nesta mistura de

cada seqüência foram determinados os parâmetros DQO, cor, e AOX que dão uma noção aproximada da chamada carga ambiental do processo de branqueamento. Os resultados médios dessa avaliação estão apresentados na Tabela 12.

Comparando os efluentes das seqüências D(EP)DD, D(EP)DP e D(EP)D/Paa verifica-se que o uso do ácido peracético teve efeito negativo nos valores de DQO e AOX e positivo na cor do efluente. O aumento da DQO é explicado pelo ácido acético presente no efluente ao final do branqueamento, o qual é derivado das reações do ácido peracético com a polpa. A maior redução de cor é explicada pela ação dos residuais de Paa no efluente, o qual oxida matéria orgânica colorida que foi extraída da polpa em estágios anteriores. O aumento do teor de AOX é provavelmente explicável pela menor capacidade do ácido peracético em retirar cloro organicamente ligado às ligninas e HexAs, os quais são produzidos no estágio com dióxido de cloro. Como esperado, a seqüência D(EP)DP resultou em efluente contendo o menor valor de AOX dado que o meio alcalino do estágio P é eficiente na retirada do cloro organicamente ligado aos componentes da polpa.

Tendências similares às acima discutidas foram observadas para as seqüências $D_{HT}(EP)DD$ e $A/D(EP)DD$. Porém comparando-se as seqüências D(EP)DD e $D_{HT}(EP)DD$, verifica-se que o estágio D_{HT} produz menos AOX que o estágio D para uma mesma dosagem de dióxido de cloro aplicada à polpa. A redução dos valores de AOX causada pela elevação do tempo e temperatura se deve, aparentemente, a dois fatores: (1) menor taxa de geração de organoclorados e (2) conversão de cloro organicamente ligado em cloreto. A menor geração de organoclorados no processo em alto tempo e temperatura está evidente e é explicada pela hidrólise parcial dos HexAs que são importantes fontes geradoras de AOX (COSTA e COLODETTE, 2002). Evidência para a segunda hipótese é a redução dos níveis de AOX e simultâneo aumento do teor de cloretos no filtrado, com o aumento do tempo de reação a 95 °C (VENTORIM, G., et al., 2002). As condições de elevado tempo e temperatura geram menos organoclorados e estes são decompostos dando origem a cloretos.

Comparando-se os efluentes das seqüências D/QP e D/QP/Paa verifica-se poucas diferenças nas qualidades dos efluentes, exceto pela menor cor do efluente da seqüência D/QP/Paa, como haveria de ser esperado. Entretanto, comparando-se as seqüência Z/EDP e Z/ED/Paa verifica-se um efeito muito negativo do ácido peracético na DQO e no AOX do efluente. A ausência do estágio alcalino após a etapa com dióxido de cloro

explica o elevado valor de AOX e os residuais de Paa explicam a elevada DQO do efluente derivado da seqüência contendo o estágio Paa.

Comparando-se todas as seqüências entre si, verifica-se que a aquela contendo o estágio de ozonólise, Z/EDP se destaca por apresentar o efluente com a menor carga poluente, independente de ter ou não ter o estágio de Paa.

Foi investigada a possibilidade de reutilização do efluente do estágio com ácido peracético. Os resultados indicaram que processos de evaporação são apropriados para a purificação desse efluente e que o condensado pode ser reutilizado sem prejuízo da qualidade da polpa e sem afetar o consumo de reagentes (BASTA et al., 1994).

Tabela 12: Análise dos efluentes combinados das várias seqüências de branqueamento

Seqüência	DQO (mg/L)	Cor (mg/L)	AOX (mg Cl ⁻¹ /L)
D(EP)DD	408	170	5,0
D(EP)DP	448	150	4,4
D(EP)D/Paa	978	140	5,9
D _{HT} (EP)DD	639	384	4,0
D _{HT} (EP)DP	717	394	4,0
D _{HT} (EP)D/Paa	981	307	4,4
D _{HT} (EP)DPaa	977	437	5,0
A/D(EP)DD	614	217	5,1
A/D(EP)DP	706	240	4,7
A/D(EP)D/Paa	1022	234	6,5
D _{HT} /QP	992	90	2,8
D _{HT} /QP/Paa	982	50	2,7
Z/EDP	809	184	0,7
Z/ED/Paa	958	200	1,0

4.7. Refino e Propriedades Físico-Mecânicas das Polpas

Para avaliar o impacto da aplicação de um estágio final de branqueamento com Paa na refinabilidade e propriedades físico-mecânicas da polpa, amostras representativas de polpa de celulose foram branqueadas até alvura de 90% ISO, por

seqüências selecionadas, conforme discutido nos itens anteriores, a saber: D(EP)DD vs D(EP)D/Paa, $D_{HT}(EP)DD$ vs $D_{HT}(EP)D/Paa$, D_{HT}/QP vs $D_{HT}/QP/Paa$, e Z/EDP vs Z/ED/Paa. Polpas branqueadas por cada um par de seqüências, contendo uma alternativa tradicional e uma utilizando o Paa como estágio final de branqueamento foram refinadas em moinho PFI e avaliadas quanto às suas propriedades físicas, mecânicas e ópticas, a saber: resistência à drenagem (grau Schopper Riegler - °SR), volume específico aparente (VEA), peso específico aparente (PEA), energia absorvida em regime de tração (TEA), módulo de elasticidade específico (MOE), índice de tração (IT), índice de arrebentamento (IA), índice de rasgo (IR), resistência à passagem de ar (RPA), opacidade (OPC) e coeficiente de dispersão de luz (CDL). As propriedades das polpas estão apresentadas sempre em função do correspondente consumo de energia gasto durante o refino. O consumo de energia foi escolhido para se relacionar com as demais propriedades, pois, na indústria de papel, o processo de refinação é uma das etapas de maior custo. Foram ajustadas equações de regressão para cada propriedade avaliada em função do consumo de energia. Os valores médios das propriedades físico-mecânicas e ópticas, para todos os tratamentos, encontram-se sumarizados no Apêndice D. As propriedades de grande importância para controle de qualidade nas fábricas de papel, são apresentadas e discutidas a seguir.

4.7.1. Resistência à drenagem (grau Schopper Riegler - °SR)

A resistência à drenagem, expressa em graus Schopper Riegler, é um indicativo da dificuldade com que a água escoar através da camada de fibras, ou seja, quanto maior a resistência de escoamento, menor a resistência à drenagem. O grau de refino torna-se maior com o aumento da energia aplicada nesta operação.

A Figura 15 mostra o comportamento da resistência à drenagem (°SR) em função do consumo de energia gasto para refinar a polpa. Os modelos matemáticos que melhor se adequam, para cada curva de refino, encontram-se no apêndice C.

Para as polpas D(EP)DD e D(EP)D/Paa (Figura 15a), $D_{HT}(EP)DD$ e $D_{HT}(EP)D/Paa$ (Figura 15b), Z/EDP e Z/ED/Paa (Figura 15d), a resistência à drenagem não apresenta diferenças significativas entre as polpas utilizando ácido peracético como estágio final e sua referência. Portanto, com base na análise de identidade modelo, foi

ajustado um único modelo estatístico para representar estas seqüências. Neste caso, o uso do ácido peracético com estágio final não modificou, significativamente, a estrutura das fibras de modo a causar efeito deletério ou benéfico em suas propriedades. Para as outras seqüências (Figura 15c), a utilização de ácido peracético como estágio final - $D_{HT}/QP/Paa$ - causou diferença estatisticamente significativa quando comparado a sua referência - D_{HT}/QP , resultando em polpa com menor demanda de energia para se obter determinado nível de refinação.

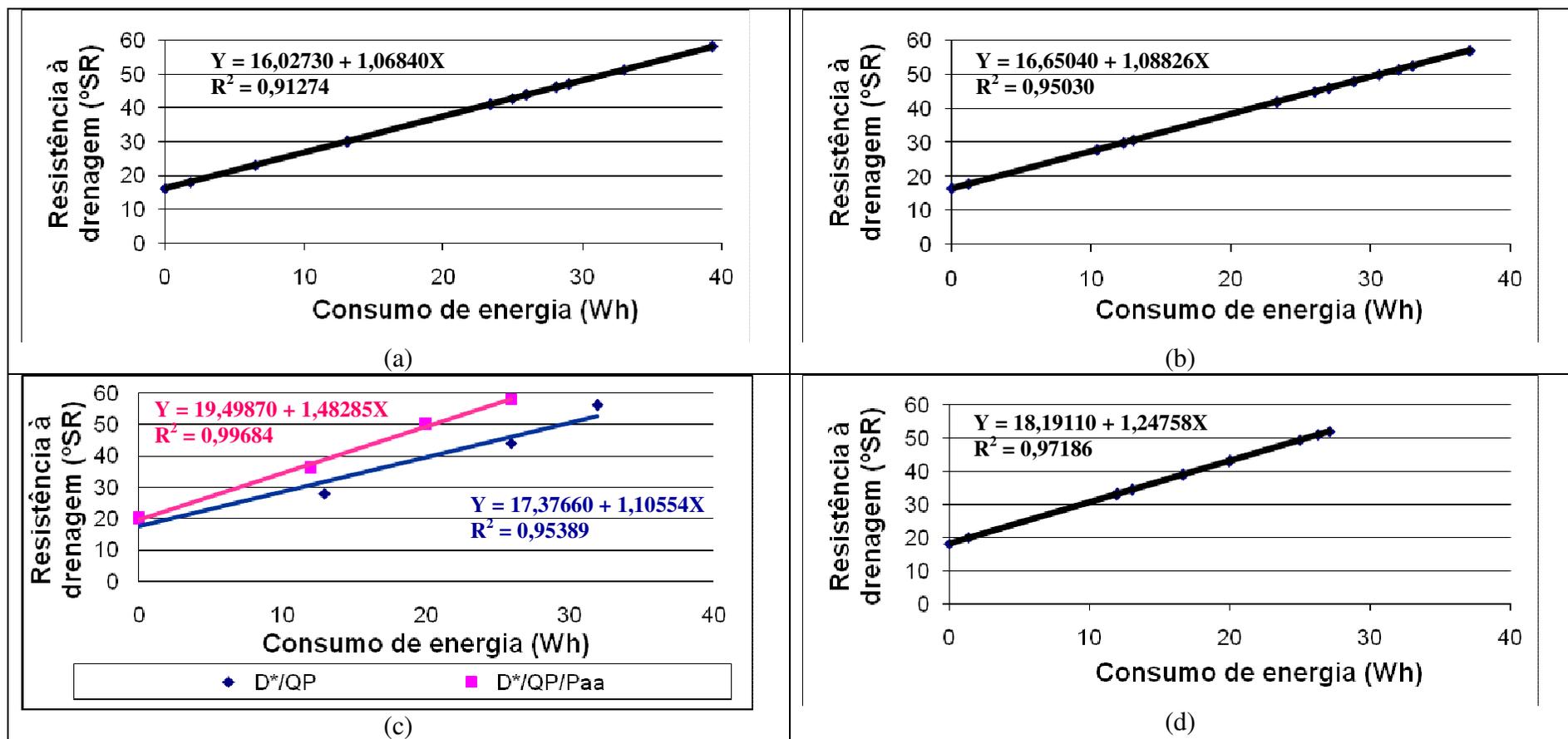


Figura 15: Consumo de energia (Wh) x Resistência à drenagem (Schopper Riegler - °SR)

- (a) análise estatística das seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) análise estatística das seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) análise estatística das seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

4.7.2. Peso específico aparente (PEA) e Volume específico aparente (VEA)

O peso específico aparente (PEA) e volume específico aparente (VEA) são propriedades estruturais associadas com a habilidade de consolidação da estrutura do papel, sendo influenciados pelas características dimensionais, números de fibras por grama, capacidade de colapsamento, número de ligações interfibras, resistência das ligações e outras possíveis características que dependam da composição física e química das polpas (CARVALHO, 1997). O VEA inclui os espaços do papel preenchidos por ar, sendo afetado por muitos fatores tais como o grau de ligação das fibras e a presença de materiais não-fibrosos que preenchem os espaços vazios (D'ALMEIDA, 1988^b).

O PEA aumenta com o aumento do refino, devido ao colapsamento das fibras, enquanto o VEA tem comportamento contrário, que, por definição matemática, é: $VEA = 1/PEA$. A importância dessas propriedades, entre outras, está na fabricação de papéis para impressão e escrita, em que uma alta opacidade é essencial para a qualidade do produto final. Para uma mesma matéria-prima, com aumento do VEA e, conseqüentemente, redução do PEA, há aumento da opacidade do papel.

A Figura 16 mostra o comportamento do peso específico aparente em função do consumo de energia gasto para refinar a polpa. Os modelos matemáticos que melhor se adequam, para cada curva de refino, encontram-se no apêndice C.

A Figura 17 mostra o comportamento do volume específico aparente em função do consumo de energia gasto para refinar a polpa. Os modelos matemáticos que melhor se adequam, para cada curva de refino, encontram-se no apêndice C.

De maneira geral, as seqüências de branqueamento utilizando o ácido peracético como estágio final são consideradas semelhantes, estatisticamente, às suas devidas referências. Observou-se maiores valores de PEA para as polpas de seqüências D_{HT}/QP e $D_{HT}/QP/Paa$ quando analisadas para o mesmo consumo de energia.

Para produção de papéis de impressão e escrita é preciso desenvolver propriedades de resistência e, para isso, é necessária a adição de reagentes químicos ou, comumente, submeter à polpa ao refino, reduzindo, no entanto, o VEA. Com o tratamento mecânico, o grau de colapsamento das fibras é aumentado, melhorando sua conformação na estrutura do papel e, conseqüentemente, reduzindo o VEA. Outro

parâmetro muito importante neste tipo de papel é a opacidade, onde se deseja maiores valores de VEA.

Para as polpas com as maiores viscosidades, ou seja, com as fibras menos danificadas, estas se colapsam menos, por serem mais rígidas e, portanto, apresentam tendência de gerarem papéis com maior VEA. Este fato só não é observado para as polpas utilizando dióxido de cloro a quente e ozônio como primeiro estágio (Figura 17b e d), pois seu comportamento foi descrito estatisticamente como uma mesma equação.

De uma maneira geral, notam-se menores valores de VEA com o aumento do consumo de energia. Na Figura 17c observa-se que a seqüência $D_{HT}/QP/Paa$ consome menos energia para qualquer valor de volume específico aparente quando comparado à sua referência. Esse comportamento está relacionado ao maior nível de refino dessas polpas, aumentando o colapso das fibras e permitindo a formação de maior número de ligações entre elas. Conseqüentemente, há uma redução dos espaços vazios, reduzindo a espessura e o VEA das folhas. As seqüências $D(EP)DD$ e $D(EP)D/Paa$ apresentam comportamentos semelhantes (Fig. 17a).

As polpas Kraft branqueadas com dióxido de cloro a quente utilizando quelante no estágio primário apresentaram viscosidades elevadas e maiores quantidades de lignina na estrutura de suas fibras, causando maior rigidez nestas, o que as torna mais resistentes ao colapsamento durante o refino, proporcionando valores de VEA mais elevados e, conseqüentemente, menores valores de PEA.

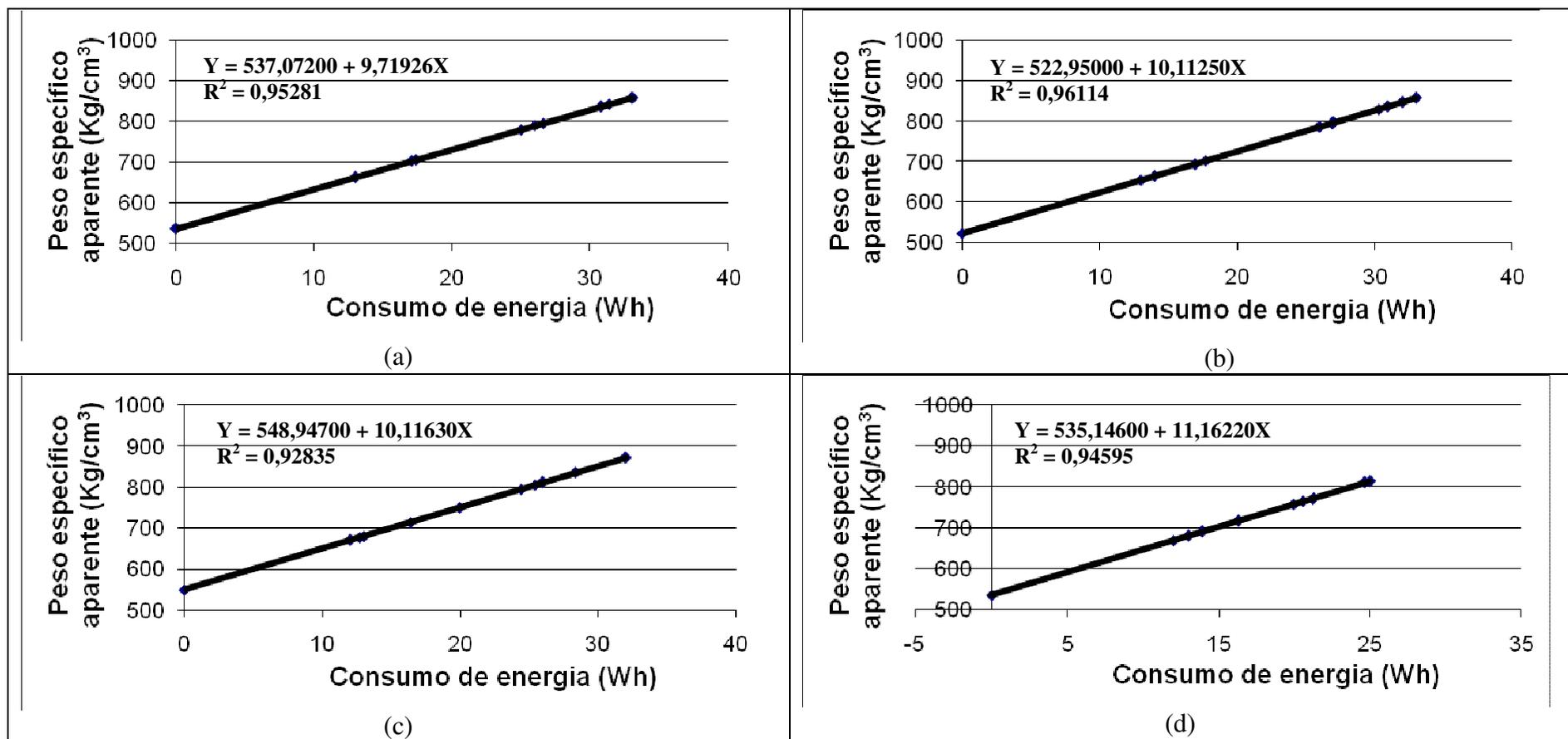


Figura 16: Consumo de energia (Wh) x Peso Específico Aparente (kg/cm³).

- (a) análise estatística das seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) análise estatística das seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) análise estatística das seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) análise estatística das seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

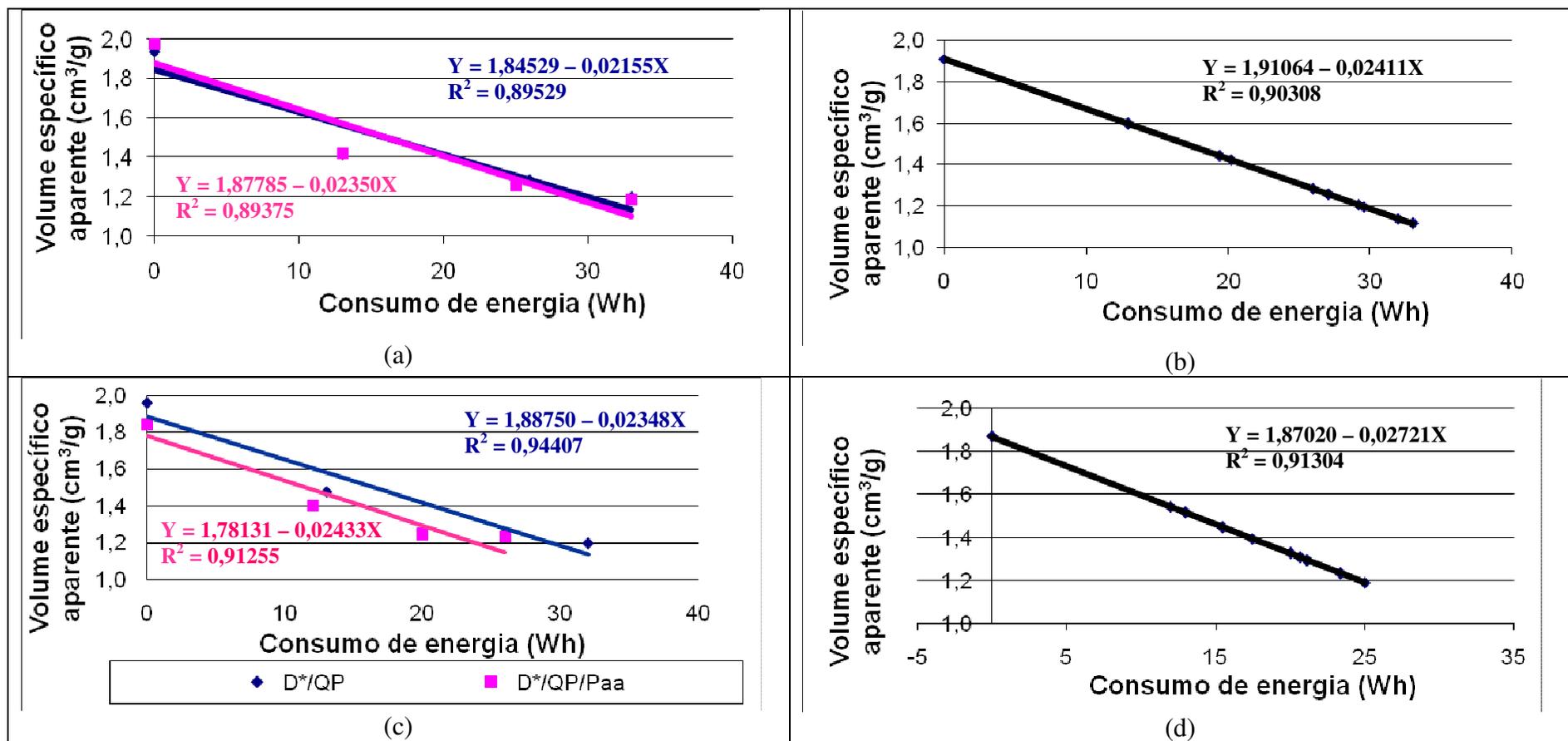


Figura 17: Consumo de energia (Wh) x Volume Específico Aparente (cm³/g).

- (a) seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) análise estatística das seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) análise estatística das seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

4.7.3. Energia absorvida em regime de tração (TEA)

A energia de deformação (TEA) mede a habilidade do papel em absorver energia sob condições de aplicação de carga. Isto significa que essa propriedade determina o trabalho realizado pelo material, submetido a variações crescentes de tensão, até a sua ruptura. Podendo indicar a durabilidade do material sob condições de tração e impacto, fundamentais nos papéis para impressão e embalagens.

A Figura 18 mostra o comportamento da energia de deformação em função do consumo de energia gasto para refinar a polpa. Os modelos matemáticos que melhor se adequam, para cada curva de refino, encontram-se no apêndice C. Fibras de menores comprimentos podem se acomodar melhor na estrutura da rede durante a formação do papel e fazem com que o contato entre elas seja maior, aumentando o número de ligações interfibras na estrutura do papel formado. Isso gera papéis com maior capacidade de absorver energia quando submetidos a uma força de tração.

A TEA é muito afetada pelo nível de refino das polpas e, conseqüentemente, pela conformabilidade das fibras. Dessa forma, um aumento gradativo do refino, que leva a uma redução do volume específico aparente das folhas, pode provocar uma elevação rápida do TEA (GARLET, 1994).

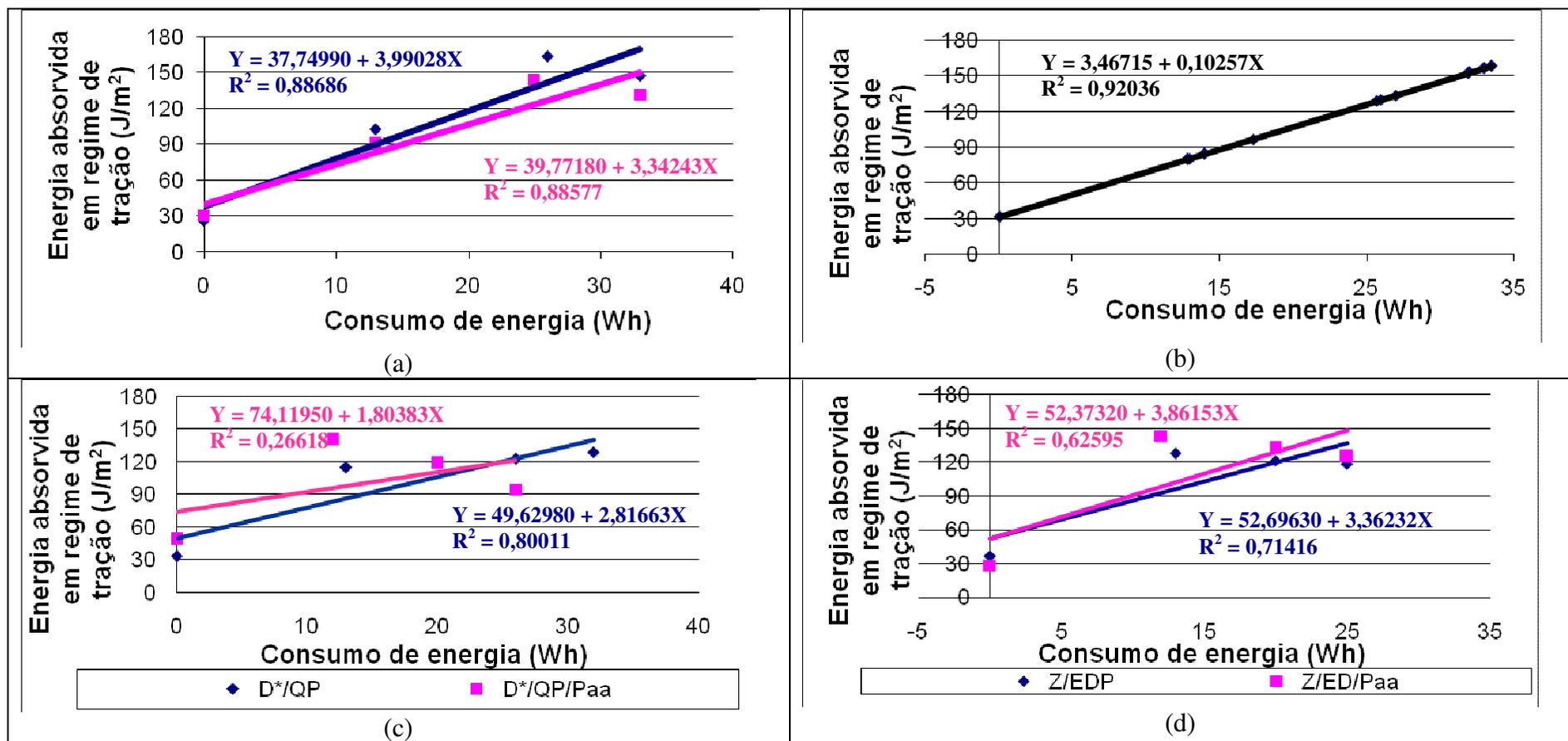


Figura 18: Consumo de energia (Wh) x Energia Absorvida em regime de Tração (J/m^2).

- (a) seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) análise estatística das seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

4.7.4. Módulo de elasticidade específica (MOE)

Módulo de elasticidade expressa à capacidade de um material em resistir à deformação, quando submetido a esforço, a cada variação crescente de carga aplicada por unidade de massa do material. Em outras palavras, maiores valores de módulo de elasticidade específica indicam a capacidade do material em absorver carga sem, contudo, sofrer deformações substanciais, o que indica o seu potencial de rigidez.

A Figura 19 mostra o comportamento do módulo de elasticidade específico em função do consumo de energia gasto para refinar a polpa. Os modelos matemáticos que melhor se adequam, para cada curva de refino, encontram-se no apêndice C. Nas Figuras 19a e 19c observou-se que na seqüência em que se utilizou o ácido peracético como estágio final, para se atingir determinado MOE é necessário menor consumo de energia. Enquanto, na Figura 19 b e 19d a seqüência em que se utilizou o ácido peracético como estágio final se assemelha estatisticamente à sua referência. Podendo assim, ser consideradas semelhantes.

De maneira notória observou-se que o ácido peracético permite economizar energia para obter o mesmo módulo de elasticidade específico quando comparado com sua referência, ou seja, a polpa branqueada com Paa apresenta maior capacidade de resistir a deformações quando submetida a uma força de tração.

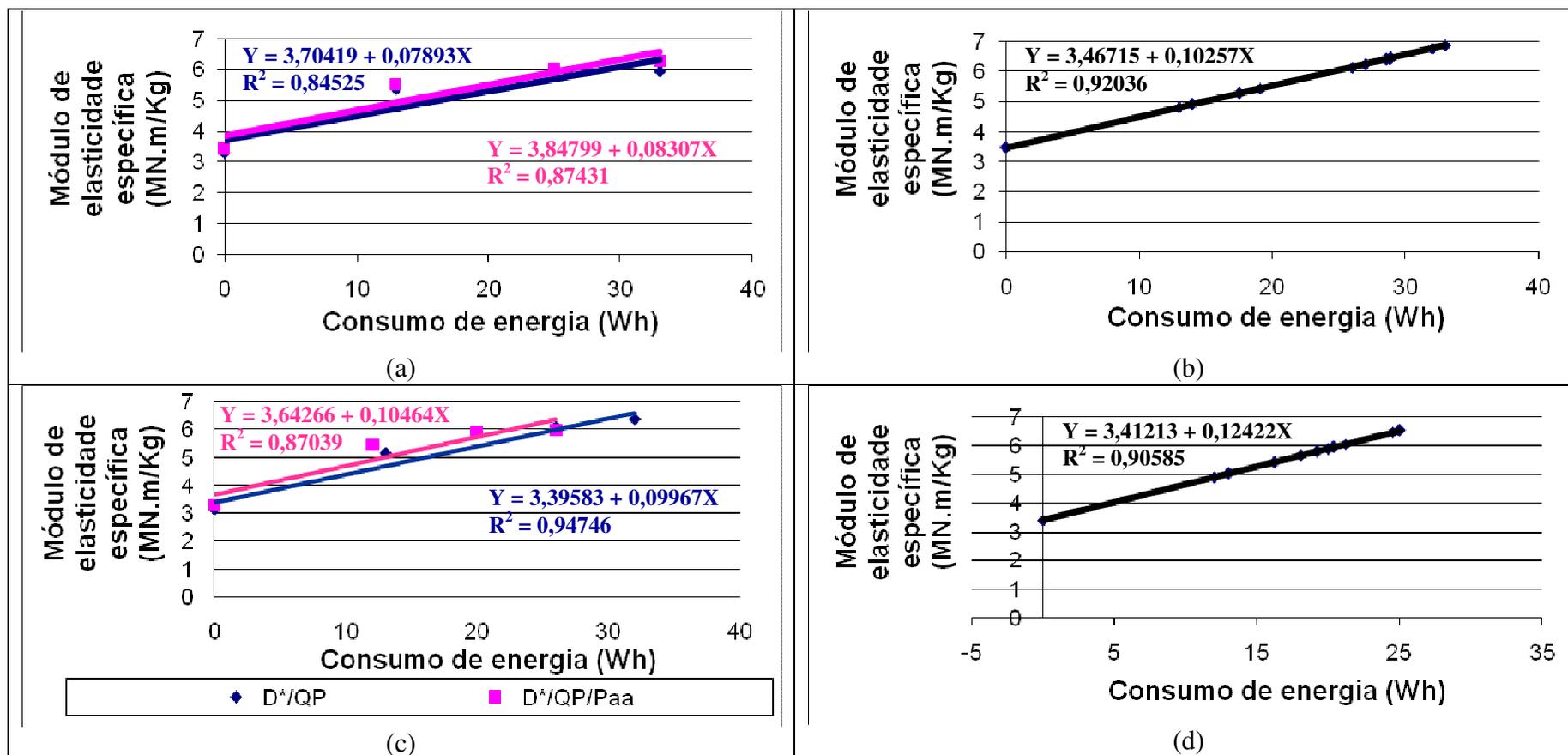


Figura 19: Consumo de energia (Wh) x Módulo de Elasticidade Específica (MN.m/Kg).

- (a) seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) análise estatística das seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) análise estatística das seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

4.7.5. Índice de tração (IT)

O índice de tração relaciona-se à força máxima necessária para causar a ruptura de um material e depende de quão uniformemente essa força pode ser transmitida através da rede de fibras (COWAN, 1994), ou seja, é a relação matemática entre a força máxima necessária para causar ruptura do corpo de prova de uma determinada largura e a gramatura da amostra. É uma importante propriedade, especialmente, para papéis destinados a imprimir e escrever.

A resistência à tração aumenta à medida que aumenta o grau de refinação, a tensão de secagem à qual o papel está sujeito na máquina de papel, o comprimento das fibras, a gramatura e o conteúdo de umidade. A resistência diminui conforme o aumento do conteúdo de carga mineral.

A Figura 20 mostra o comportamento do índice de tração em função do consumo de energia gasto para refinar a polpa. Os modelos matemáticos que melhor se adequam, para cada curva de refino, encontram-se no apêndice C. Os valores alcançados podem ser explicados pelo fato de que as fibras são mais susceptíveis ao colapsamento e a cortes com geração de teores de finos, que possuem grande potencial de ligações interfibras, possibilitando, assim, maior contato durante a formação do papel.

Pela Figura 20c e 20d observa-se a tendência das polpas, utilizando ácido peracético como estágio final, exigirem menor consumo de energia para um mesmo índice de tração. Na Figura 20a e 20b observa-se que estatisticamente as polpas utilizando ácido peracético como estágio final e sua referência apresentaram o mesmo comportamento.

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

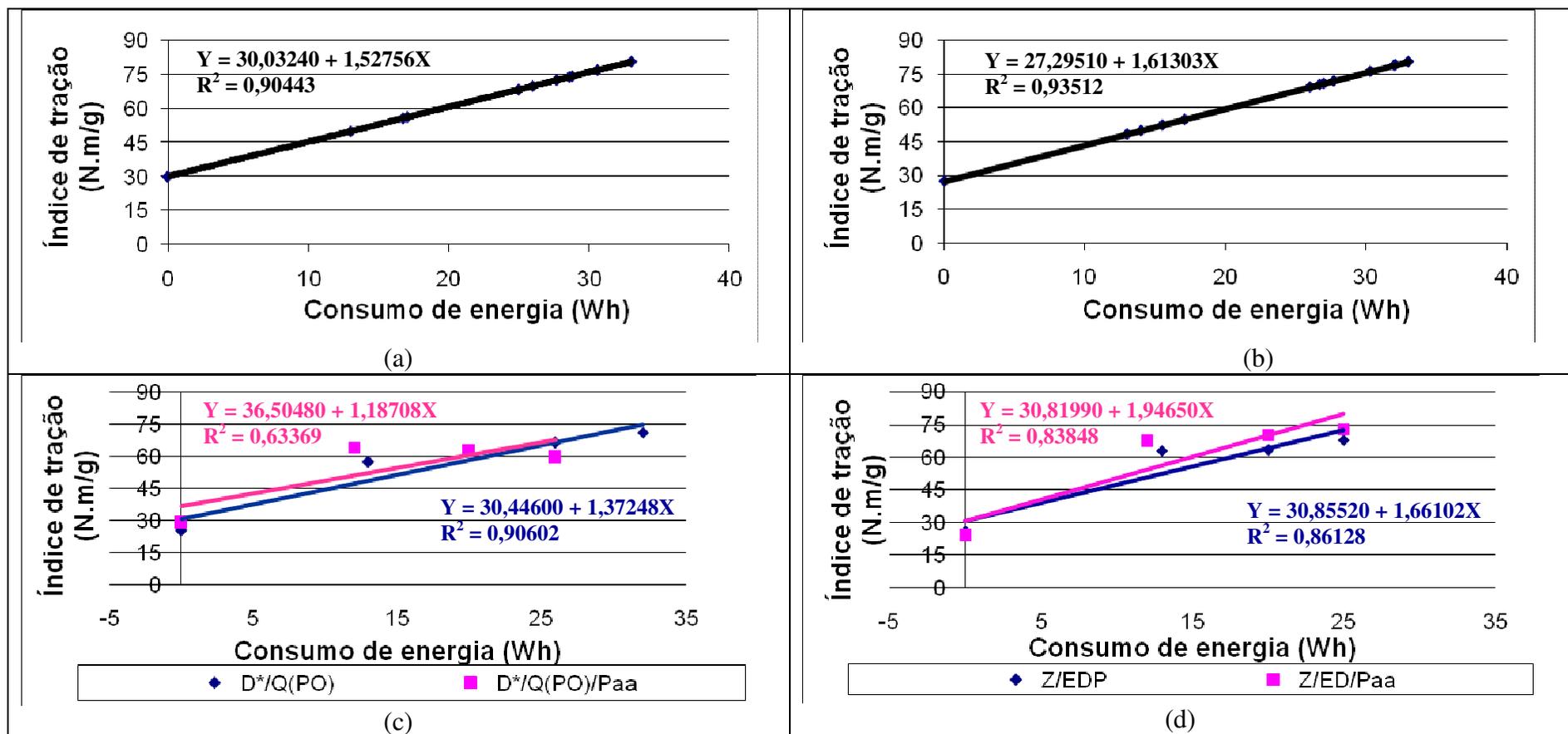


Figura 20: Consumo de energia (Wh) x Índice de tração (N.m/g).

- (a) análise estatística das seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) análise estatística das seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

As propriedades físicas do papel, como resistência à tração e arrebatamento, são melhoradas com a refinação, até um ponto máximo. Em geral, após este ponto, a continuação da refinação implicará na redução destas propriedades. As principais características das fibras que influenciam as propriedades físicas do papel, que são beneficiadas pela refinação, são características que aumentam o número de ligações entre as fibras. Para os papéis “tissue” considera-se que a resistência à tração não deva ser superior a 20Nm/g, para evitar excessiva ligação entre as fibras, que prejudicaria a maciez e o volume específico da folha. Para esse tipo de produto a polpa deve também apresentar baixo valor de módulo de elasticidade, se relacionando bem com a maciez do papel.

4.7.6. Índice de arrebatamento (IA)

O índice de arrebatamento é definido como a força necessária para promover o arrebatamento da folha de papel, ao se aplicar uma pressão uniformemente crescente, transmitida por um diafragma elástico de área circular igual a 962 mm². É um teste altamente relacionado com a resistência à tração.

O IA é influenciado, principalmente, pelo número de ligações interfibras e pela força destas ligações. Portanto, com o aumento do grau de refino, ocorre colapsamento das fibras, resultando em maior compactação e maior área de contato entre elas, favorecendo o número e a força das ligações; conseqüentemente, ocorre aumento da resistência ao arrebatamento. Conforme o conteúdo de carga mineral aumenta, a resistência ao arrebatamento diminui.

A Figura 21 mostra o comportamento do índice de arrebatamento em função do consumo de energia gasto para refinar a polpa. Os modelos matemáticos que descrevem cada curva são apresentados no apêndice C. O efeito de corte de fibras no refinador, para polpas de eucalipto, não é muito pronunciado, devido ao próprio comprimento dessas fibras. Ocorre maior efeito de desfibrilamento, que também pode contribuir para o desenvolvimento de resistência ao arrebatamento do papel formado.

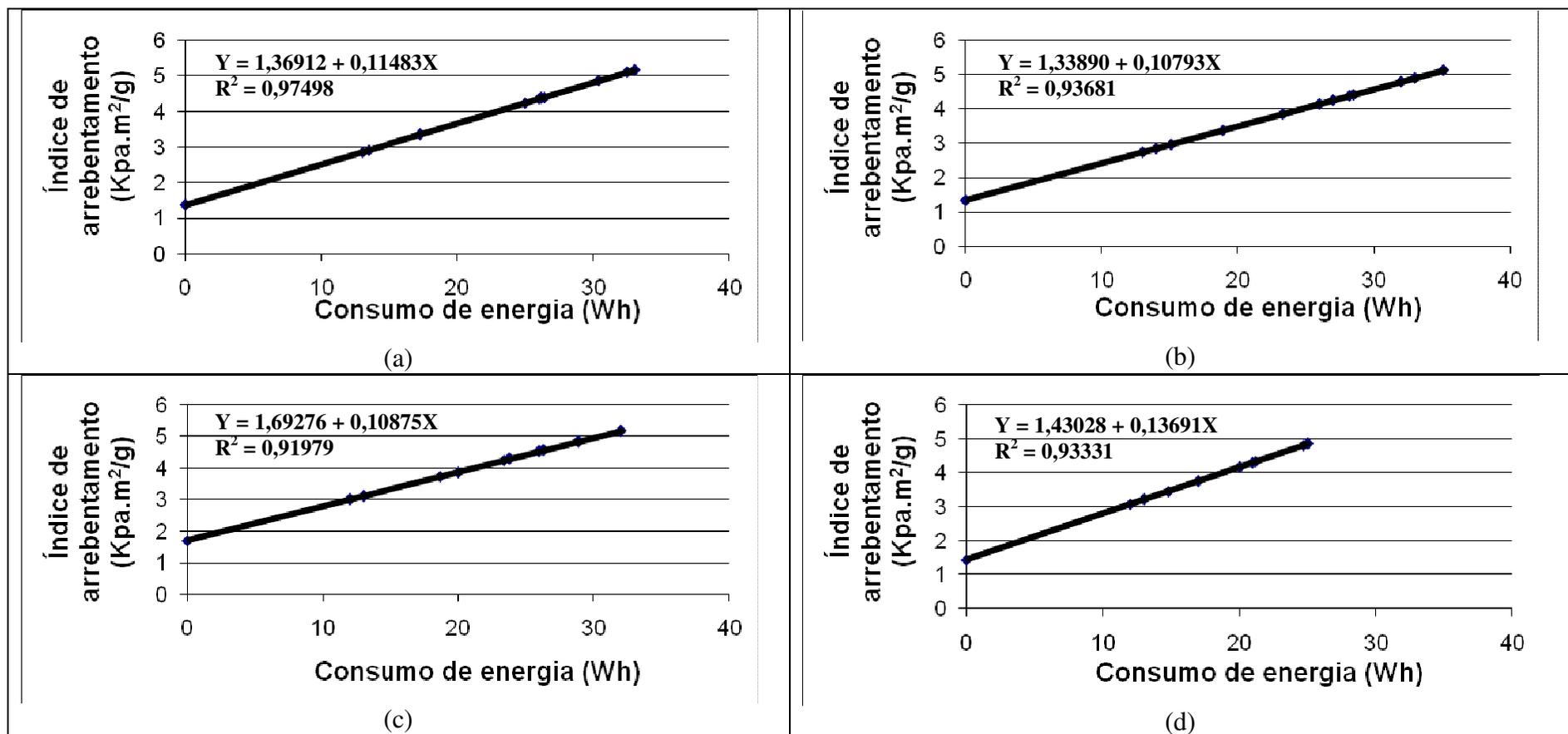


Figura 21: Consumo de energia (Wh) x Índice de arrebentamento (Kpa.m²/g).

- (a) análise estatística das seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) análise estatística das seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) análise estatística das seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) análise estatística das seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

O refino possui influência positiva no índice de arrebetamento, uma vez que confere maior flexibilidade e melhor conformabilidade às fibras, aumentando o colapsamento entre as fibras e a área de contato entre elas e, conseqüentemente, o número de ligações interfibras. Isso leva ao aumento dos valores de índice de arrebetamento, como pode ser visto na Figura 21, tornando o papel mais resistente a uma pressão aplicada em sua superfície. Observou-se que o uso do ácido peracético como estágio final não afetou desfavoravelmente as propriedades da polpa de celulose. E observou-se, também, a similaridade das polpas utilizando ácido peracético como estágio final e sua referência, apresentando, assim, o mesmo comportamento estatisticamente e podendo ser descritas por uma equação comum. Para as polpas da seqüência utilizando dióxido de cloro a quente e quelante como estágio primário, nota-se uma superioridade, embora pequena, do índice de arrebetamento quanto às demais.

4.7.7. Índice de rasgo (IR)

A resistência ao rasgo, por definição, é o trabalho executado por um pêndulo, necessário para rasgar um número de folhas, após um corte inicial de comprimento especificado ter sido previamente realizado nas amostras, cujas fibras estão dispostas de forma desordenadas devido ao refino. O índice de rasgo é o resultado da divisão da força média necessária para rasgar uma folha pela gramatura desta. O índice de rasgo é uma propriedade que depende do comprimento da fibra, da espessura de suas paredes, da sua resistência individual e das ligações interfibras. Este último fator é especialmente importante para fibras curtas, como as do eucalipto (GARLET, 1994). O papel tem maior resistência ao rasgo na direção perpendicular às fibras. Quanto mais longa a fibra, maior a resistência ao rasgo. Quanto maior o conteúdo de carga mineral, menor a resistência ao rasgo.

A Figura 22 mostra o comportamento do índice de rasgo em função do consumo de energia gasto para refinar a polpa. Os modelos matemáticos que descrevem cada curva são apresentados no apêndice C. Observou-se que a resistência ao rasgo, em geral, apresenta um pequeno aumento em seus valores no início da refinação, porém, começa a cair com o desenvolvimento normal da refinação. Este comportamento deve-se ao fato da resistência ao rasgo estar diretamente relacionada com o comprimento das

fibras. A piora das propriedades físicas do papel causadas pela refinação prolongada geralmente é atribuída à redução do comprimento das fibras.

O aumento inicial da resistência ao rasgo é explicado pelo aumento da capacidade de realizar pontes de hidrogênio, porém, a redução dessa propriedade indica que ela depende muito mais do comprimento das fibras do que das ligações entre elas. O índice de rasgo é uma propriedade que é influenciada pelo número de ligações interfibras e pela resistência intrínseca da fibra.

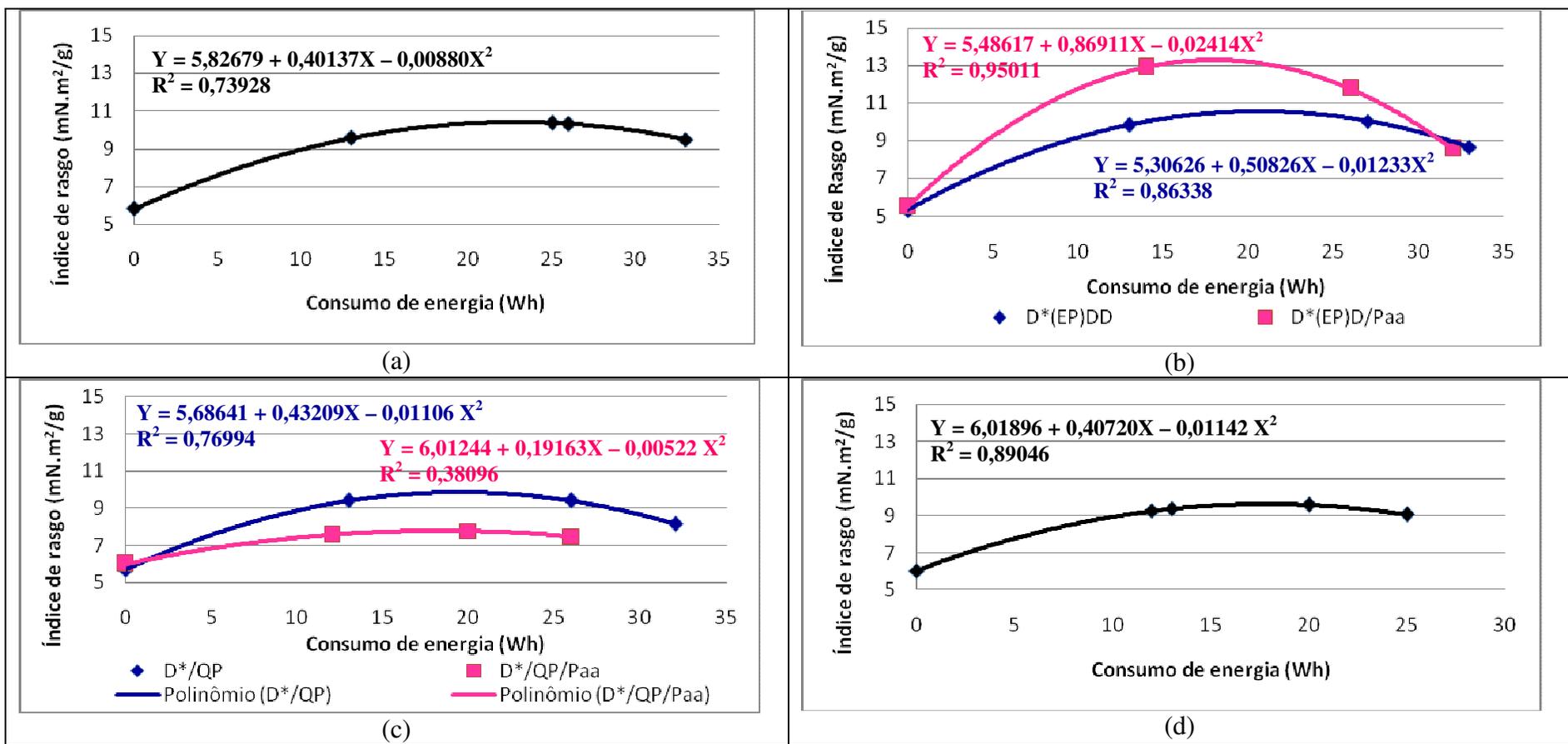


Figura 22: Consumo de energia (Wh) x Índice de rasgo (mN.m²/g).

- (a) seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

Na Figura 22 a e d poucas diferenças, entre as seqüências utilizando ácido peracético como estágio final e sua referência, são notadas. Na Figura 22d pode ser observado menores valores de índice de rasgo para os devidos pontos de refino analisados. Isto pode ter sido em razão da utilização de reagentes oxidantes de branqueamento menos seletivos, como o ozônio, ocasionando a fibrilação da parede celular por via química. As seqüências utilizando o ozônio como primeiro estágio (Figura 22d), embora tenham assumido comportamento estatisticamente diferente entre si, mostram, em termos práticos, semelhanças durante a evolução do refino.

Apesar de CARNEIRO et al. (1995), relatarem que a viscosidade é um fraco indicativo da resistência das polpas, é importante ressaltar que as cadeias de celulose maiores podem beneficiar o número de ligações interfibras, ocasionando maiores valores para índice de rasgo em altos níveis de refino. A viscosidade se relaciona a degradação da celulose, portanto influi mais pronunciadamente nas propriedades que dependem da resistência da fibra, como resistência ao rasgo, mas tem pouca relação com as propriedades que dependem do entrelaçamento e ligação entre fibras como a resistência à tração. A presença de cadeias de celulose maiores nas fibras, indicada pela maior viscosidade, pode beneficiar suas estruturas, aumentando a resistência ao rasgo.

Segundo MACLEOD et al. (1994), a viscosidade da polpa não prediz sua resistência, mas dá idéia da degradação dos carboidratos, em razão da ação de reagentes químicos utilizados ao longo do processo. A correlação entre resistência ao rasgo e viscosidade final só é válida para uma comparação das diferentes seqüências numa mesma polpa (MOUNTEER, 1992).

4.7.8. Resistência à passagem de ar (RPA)

A resistência à passagem de ar através de uma folha depende do tamanho e da distribuição de poros nesta folha. A estrutura porosa do papel consiste em vazios da superfície, espaços entre as fibras e poros ou canais que atravessam o papel. A resistência à passagem de ar representa a dificuldade que um determinado volume de ar encontra para passar através de uma folha de papel. As curvas de refino para esta propriedade variam para cada seqüência utilizada. Os resultados, estatisticamente, não podem ser descritos por uma equação comum, mas podem ser validados na prática.

A Figura 23 mostra o comportamento da resistência à passagem de ar em função do consumo de energia gasto para refinar a polpa. Os modelos matemáticos que descrevem cada curva são apresentados no apêndice C. Na maioria dos tratamentos, as curvas se sobrepõem principalmente em menores níveis de refino, relacionados aos menores valores de consumo de energia. Em níveis mais elevados de consumo de energia, na maioria dos tratamentos, as polpas branqueadas com o uso do ácido peracético sobressaem em relação à referência. Isto mostra o desenvolvimento de ligações interfibrilares com o desenvolvimento do refino.

A habilidade de uma folha de papel em resistir à passagem de ar está relacionada com a quantidade de espaços vazios em sua estrutura. A Figura 23 mostra que a resistência à passagem do ar aumenta com o aumento da energia de refinação, indicando que a folha fica mais fechada com o aumento do grau de refinação. E, para todas as seqüências estudadas, aquelas em que se utilizou o ácido peracético foram superiores ao da seqüência referência. Na Figura 23 é importante notar que por todas as seqüências analisadas, a resistência à passagem do ar obteve o mesmo comportamento, a partir de um determinado consumo de energia, essa propriedade é maior para a polpa branqueada pela seqüência utilizando ácido peracético como estágio final.

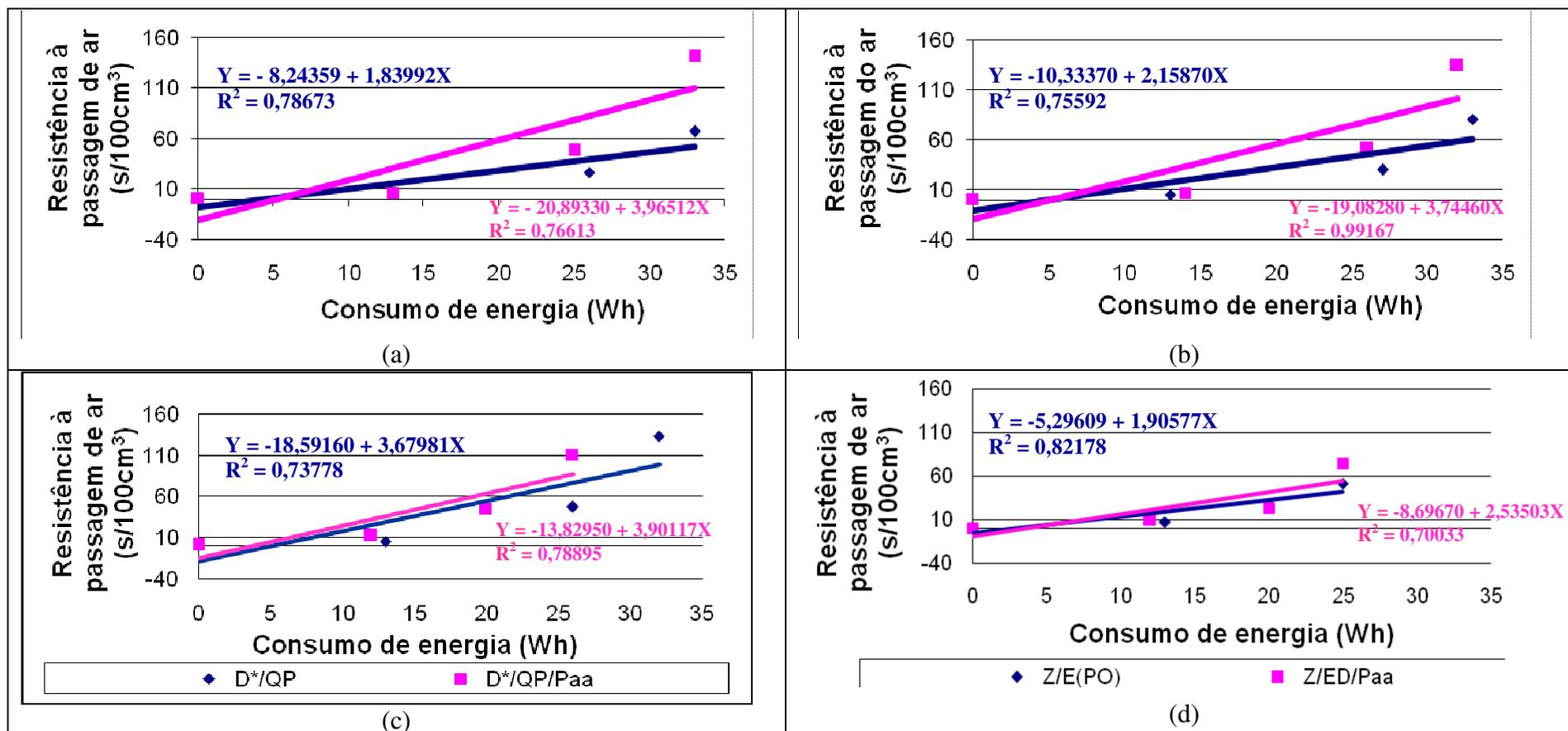


Figura 23: Consumo de energia (Wh) x Resistência à passagem de ar (s/100cm³).

- (a) seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

4.7.9. Propriedades ópticas

Opacidade e Coeficiente de dispersão de luz

As propriedades ópticas dependem do tipo e da intensidade da luz incidente sobre o papel e dos materiais utilizados na sua fabricação, sendo estas propriedades de grande importância para várias aplicações do papel como impressão, escrever e fins decorativos (D'ALMEIDA, 1988^b). Entre os fatores que afetam as propriedades ópticas está o grau de refinação da pasta celulósica. A opacidade é a medida da obstrução da luz pelo papel. Quando a luz incide no papel, parte é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida através do papel. A transmitância total de luz determina a opacidade do papel. As fibras de celulose pura são transparentes, portanto a opacidade resulta da absorção e difusão da luz conforme esta passa do ar para as fibras e volta para o ar e, adicionalmente, para papéis contendo cargas minerais, nas interfaces: ar-fibra, ar-carga e fibra-carga. Cargas minerais dispersam a luz e aumentam a opacidade do papel.

O grau de opacidade depende de diversas propriedades do papel: composição fibrosa e não-fibrosa, alvura, tonalidade, gramatura, espessura, grau de refinação etc. A transparência do impresso pode ser resultado da falta de opacidade do papel ou do atravessamento causado por excessiva penetração da tinta no papel, ou ainda uma combinação dos dois fatores. Falta de opacidade, ou transparência, reduz o contraste do impresso. A opacidade caracteriza-se por ser um parâmetro importante, principalmente quando o papel é utilizado para fins de impressão e escrita. O papel caracteriza-se por ser um material poroso e não-homogêneo, com estrutura interna constituída por vários elementos, formando interfaces entre si e com o ar. A opacidade do papel é influenciada pelos fenômenos ópticos de reflexão, refração, dispersão e absorção da luz, que determinam a habilidade da folha de papel em obstruir a passagem da luz.

As grandes diferenças entre as opacidades de vários tipos de papéis são principalmente em virtude das diferenças nas quantidades de ligações interfibras e do número de superfícies ópticas de refração e de partículas com potenciais para dispersão de luz que o constituem (GIERTZ, 1989). Portanto, o número, a dimensão e a forma das fibras ou de outros constituintes da estrutura do papel e seus respectivos índices de refração são fatores que determinam a quantidade de luz a ser refletida, refratada e dispersa pelo papel. A opacidade e o coeficiente de dispersão de luz de uma folha de

papel são propriedades importantes, principalmente quando o papel é usado para fins de impressão e escrita.

Os resultados para a opacidade da polpa em função do consumo de energia gasto durante o refino são mostrados na Figura 24. A operação de refino exerceu efeito negativo nas opacidades das polpas, sendo mostrada tendência de redução desta propriedade à medida que se evolui este tratamento, fato que pode ser explicado pelo aumento de compactação da estrutura da folha (redução dos espaços internos), reduzindo o número de interfaces fibra-ar, proporcionando menor espalhamento da luz e, portanto, maior transparência. Quanto mais superfícies de refração existir no papel, mais fácil é para a luz incidente ser refratada e menor é a quantidade de luz que irá alcançar o lado oposto. Quanto maior o número de fibras e partículas existentes na folha, maior é a refração, pois a luz é obrigada a atravessar mais interfaces fibra-ar. Quanto maior o número de fibras, maior é a área superficial interna da estrutura das folhas, favorecendo a dispersão, aumentando, assim, a opacidade. Apesar do exposto, não é correto afirmar que o refino tem influência positiva na opacidade. Apesar de aumentar a área superficial em exposição, aumenta também a superfície de ligação entre as fibras, o que vem a reduzir a opacidade (SILVA e OLIVEIRA, 2000).

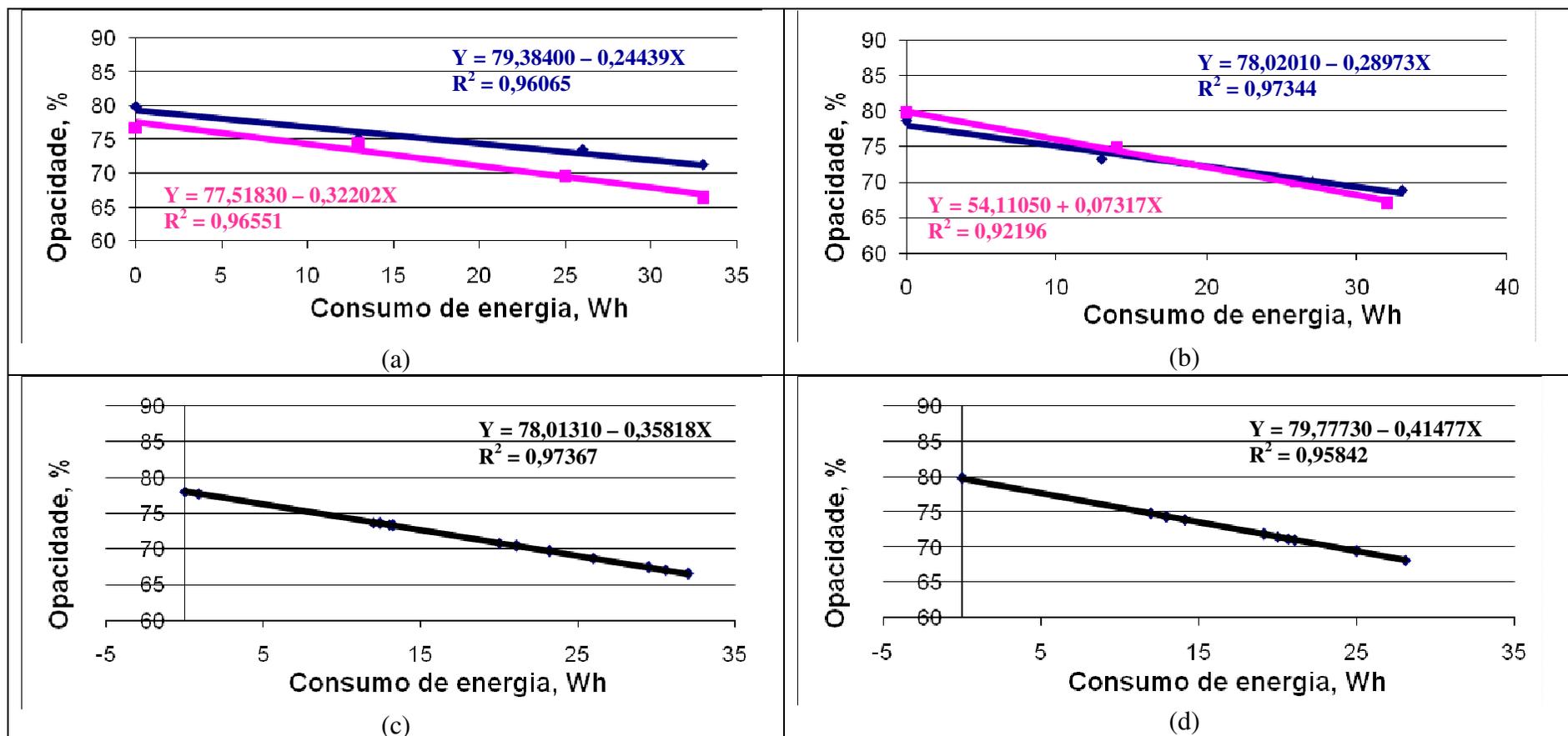


Figura 24: Consumo de energia (Wh) x Opacidade (%).

- (a) seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) análise estatística das seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) análise estatística das seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

Os modelos matemáticos que descrevem cada curva são apresentados no apêndice C.

Como pode ser verificado na Figura 24a houve tendência de menor queda da opacidade para a polpa branqueada pela seqüência D(EP)DD. Este fato pode ser em razão de as fibras possuírem maior potencial em manter a estrutura original de suas fibras com a evolução do refino, proporcionando assim maior estabilidade da opacidade.

A Figura 25 mostra o comportamento do coeficiente de dispersão de luz em função do consumo de energia gasto para refinar a polpa. Os modelos matemáticos que descrevem cada curva são apresentados no apêndice C.

Por estas polpas terem sofrido maior ataque às suas fibras, durante o branqueamento, apresentaram, também, menores valores de coeficiente de espalhamento de luz (SILVA, 1997). Observa-se que as propriedades opacidade e coeficiente de dispersão de luz são reduzidas, com a evolução do refino, sendo que esse comportamento pode ser explicado pelo fenômeno de espalhamento de luz. Quando sobre uma folha incide um feixe de luz, a mesma sofre repetidas refrações e reflexões no seu interior, até sair do lado oposto como luz transmitida. A intensidade com que a luz é transmitida indica a variação de alvura, opacidade e, obviamente, o coeficiente de espalhamento de luz. Isto pode ser facilmente verificado nas equações de Kubelka-Munk, onde são relacionados os termos refletividade (alvura), reflectância, coeficiente de espalhamento e dispersão de luz (SILVA, 1997).

Neste estudo, a quantidade de luz refletida, refratada e espalhada pela folha é influenciada, principalmente, pelos índices de refração dos constituintes da folha (celulose e ar, principalmente) e pela quantidade do contato óptico entre eles. O refino influencia diretamente o contato óptico entre a celulose e o ar, de forma que, com o aumento do refino, a folha se consolida diminuindo os espaços vazios no seu interior e, conseqüentemente, a quantidade de ar (SILVA, 1997).

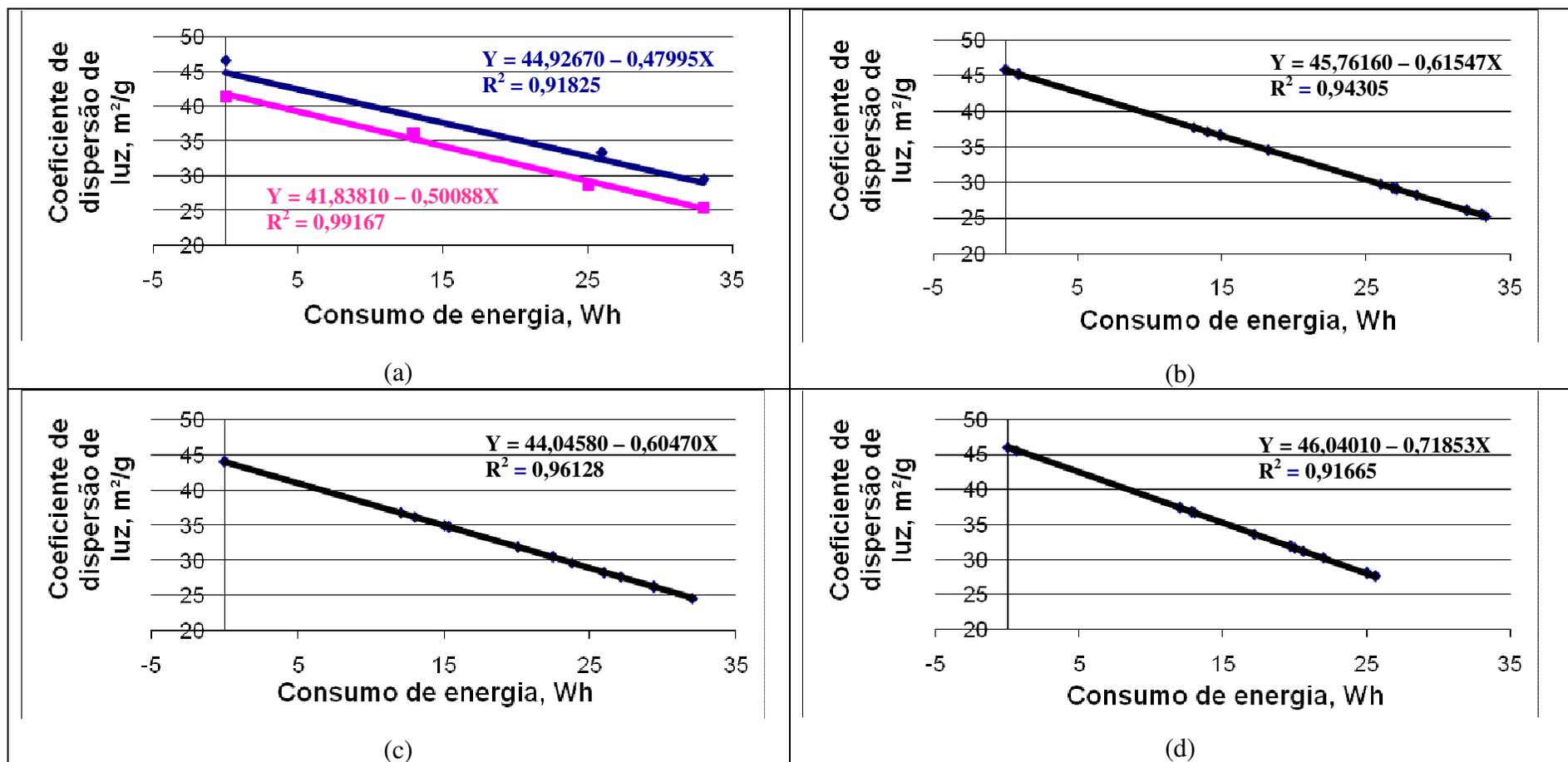


Figura 25: Consumo de energia (Wh) x Coeficiente de dispersão de luz (m²/kg)

- (a) seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa
- (b) seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa
- (c) seqüências D*/QP e D*/QP/Paa
- (d) seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa

5- CONCLUSÕES

1. O uso do ácido peracético como estágio final de branqueamento de várias seqüências ECF não se mostrou economicamente viável em relação ao custo de reagentes químicos de branqueamento.
2. A seqüência de branqueamento onde ele apresentou melhor potencial foi a Z/EDP, para a qual a conversão dos estágios DP final em D/Paa elevou o custo do branqueamento em apenas US\$3,5/t de polpa, o que seria compensado pela minimização do investimento derivada da ausência de um estágio de lavagem.
3. O uso de Paa como estágio final de branqueamento resulta em diminuição da viscosidade da polpa e não tem efeito positivo na estabilidade de alvura e coordenadas $L^*a^*b^*$ da polpa.
4. O uso de Paa como estágio final de branqueamento não traz benefícios ambientais quando avaliado pela cor, DQO e AOX do efluente, independente da seqüência de branqueamento empregada.
5. O uso de Paa como estágio final de branqueamento melhorou a refinabilidade da polpa branqueada quando comparada a sua referência DHT/QP, resultando em menor gasto de energia para atingir determinado nível de refinação.
6. O uso do Paa como estágio final de branqueamento permite economizar energia para obter o mesmo módulo de elasticidade específico e o mesmo índice de tração quando comparado com sua referência DHT/QP.
7. As seqüências que utilizaram o ozônio como primeiro estágio atingiu menores valores de índice de rasgo para os devidos pontos de refino analisados, quando comparados as demais seqüências.
8. O uso de Paa como estágio final de branqueamento não melhora a propriedades óticas das polpas branqueadas, independente da seqüência de branqueamento empregada.

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMINI, B.; WEBSTER, J. *On-site peracids: tools for bleaching strategies to meet the cluster rule, and considerations on how to select among them.* In: TAPPI PULPING CONFERENCE, 1994, San Diego. *Proceedings...* San Diego: TAPPI, p. 371-380, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL – ABTCP. Normas técnicas. São Paulo: ABTCP, v. 1, 1974.

BAILEY, C. W.; DENCE, C. W. *Peroxyacetic acid bleaching of chemical pulps.* TAPPI, v. 49, n. 1, p. 9-15, 1996.

BALL, D. L.; EDWARDS, J. O. *The kinetics and mechanism of the decomposition of Caro's acid.* I. J. Am. Chem. Soc., v. 78, p. 1125-1129, 1956.

BARNA, J.; et al. *Full bleaching of eucalyptus Kraft-O pulp with peracids and pressurized H₂O₂.* In: TAPPI PULPING CONFERENCE, 1996, Nashville. *Proceedings...* Nashville: TAPPI, p. 949-956, 1996.

BARNA, J.; et al. *Branqueamento com peróxido e perácidos: uma alternativa para processos ECF e TCF.* O Papel, v. 57, n. 11, p. 69-77, 1996.

BIANCHI, M. L. *Branqueamento de polpas Kraft com H₂O₂ e reações de oxidação de composto modelo de lignina catalisados por polioxometalatos.* Campinas: Universidade Federal de Campinas, SP, 1999 (Tese, Doutorado em Química Inorgânica).

BRASILEIRO, L. B. *A utilização de perácidos no branqueamento e na deslignificação de polpa kraft.* Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 250p., 1999, (Tese, Doutorado em Química Orgânica).

BUGAJER, S.; SILVA, O. F.; PIRES, F. S. *Influência do pH na refinação de pastas celulósicas.* In: 17º Congresso Anual de Celulose e Papel, São Paulo, v. 1, p. 31-38, 1984.

CAMPOS, E. da S. *Refino.* In: SEMINÁRIO PAPÉIS PARA EMBALAGENS – ASPECTOS TÉCNICOS NA RECICLAGEM, 1998, Canela. *Anais...* Canela: ABCP, 1998.

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

CARPIM, M. A.; et al. *A influência do número de fibras por grama nas propriedades óticas do papel*. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 20, 1987, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABTCP, p. 183-205, 1987.

CARVALHO, H. G. *Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose kraft branqueada de eucalipto*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 104p., out. 1997. (Dissertação, Mestrado em Ciência Florestal).

CHANG, H. M. *Peracids as a bleaching agent: basics*. In: EMERGING PULPING AND BLEACHING TECHNOLOGIES WORKSHOP, 1995, Durham, NC. *Proceedings...* Durham: TAPPI, não paginado, 1995.

CHIRAT, C.; et al. *Yellowing of bleached chemical pulps*. In: CTP FORUM. ASSOCIATE MEMBERS 2, Grenoble, p. 11-12, 1997.

CHIRAT, C.; LA CHAPELLE, V. *Heat and light induced brightness reversion of bleached chemical pulps*. *J Pulp Paper Sci*, p. 201-205, 1999.

CLAUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E. *Efeito da moagem nas propriedades das fibras*. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP - semana do papel, 1983, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP, p. 97-120, 1983.

COLODETTE, J. L. *Utilização do peróxido de hidrogênio no branqueamento de polpa Kraft de eucalipto*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 78p., 1981. (Dissertação, Mestrado em Ciência Florestal).

COLODETTE, J. L.; et al. *Novos processos para branqueamento de polpa Kraft de eucalipto*. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 26, 1993, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABTCP, p. 71-90, 1993.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; SALLES, D. V. C., et al. *Fatores que afetam a branqueabilidade de polpas kraft com oxidantes derivados do oxigênio*. In:

CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABTCP, p. 49-68, 1995.

COLODETTE, J. L. *Química da Madeira*. In: Pós-graduação em tecnologia de celulose e papel. Viçosa: UFV, 196p. Apostila, 2001.

COSTA, M. M.; COLODETTE, J. L. *Efeito da composição química da polpa Kraft-O₂ na sua branqueabilidade*. *O Papel*, São Paulo, v. 63, n. 8, p. 93-103, 2002.

COSTA, M. M.; et al. *Efeito do fator kappa na estabilidade de alvura de polpas Kraft branqueada de Eucalyptus spp.* In: 1º Colloquium International on Eucalyptus Kraft Pulp, UFV, 2003.

COWAN, W. F. *Testing pulp quality – an alternative to conventional laboratory evaluation*. *Journal Tappi*, v. 77, n. 10, p. 77-81, 1994.

D'ALMEIDA, M. L. O. (Coord.) *Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica*. São Paulo: IPT/SENAI, v. 1, 1988.

D'ALMEIDA, M. L. O. (Coord.) *Celulose e papel: tecnologia de fabricação do papel*. São Paulo: IPT/SENAI, v. 2, 1988.

DAVIDGE, H.; et al. *The oxidation of phenolic ethers with peroxyacetic acid*. *J. Chem. Soc.*, p. 4569-4573, 1958.

DENCE, C.W.; REEVE, D. W. *Pulp bleaching: principles and practices*. Atlanta: Tappi Press, p. 695-716, 1996.

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

EIRAS, K. M. M.; COLODETTE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. *Efeito das causas de reversão de alvura de polpas Kraft de eucalipto*. *Revista*, v. 11, número 4, 2005.

FERRAZ, R. P. *Refinação – Conceitos, operação e efeitos nas propriedades do papel*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 51p., 2007. (Monografia, Programa de Pós-Graduação Lato Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel).

FERREIRA, C. R.; et al. *Avaliação tecnológica de clones de eucalipto: parte II – qualidade da celulose branqueada Kraft para papel de imprimir e escrever*. In: Publicações Scientia, n. 71, p. 09-18, 1998.

FOELKEL, C. E. B. *Ao eucalipto com carinho*. O Celsius Degree/ Grau Celcius. Disponível em: www.celsofoekel.com.br. Acesso em: 24 abr. 1997.

FOELKEL, C.; SANTOS, C. R. *Qualidade da madeira e sua influência nas características de papéis de imprimir e escrever e tissue*. Universidade Federal de Viçosa, 45p., 2002.

FOELKEL, C. E. B.; ZVINAKEVICIUS, C. *Hardwood pulping in Brazil*. Tappi Journal, v. 63, n. 3, p. 39-42, 1980.

FOELKEL, C. *Qualidade da madeira de eucalipto para atendimento das exigências do mercado de celulose e papel*. Conferência IUFRO sobre Silvicultura e Melhoramento de Eucaliptos, 11p., 1997.

FOELKEL, C. *Eucalypt wood and pulp quality requirements oriented to the manufacture of tissue and printing & writing papers*. Anais da 52ª Appita Conference, Brisbane, Austrália, p. 149-154, 1998.

FOELKEL, C. *As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose Kraft para a fabricação de papel*. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP, 2007. Disponível em: www.ufsm.br/dcfl/seriestecnicas/capitulo_fibras.pdf Acesso em: 14 out. 2007.

FORSSKAHL, I. *Brightness reversion*. In: Papermaking Science and Technology, book 3. Johan Gullichsen and Hannu Paulapuro, Fapet, Helsinki, 2000.

FRANCIS, R. C.; et al. *Alkali and met induced decomposition of peroxymonosulfate*. In: BIENNIAL WORKSHOP ON EMERGING PULPING AND CHLORINE-FREE BLEACHING TECHNOLOGIES, 1993, Raleigh. *Proceedings...* Raleigh: NCSU, não paginado, 1993.

GABRIEL, E. S.; et al. *A influência do consumo específico de energia e intensidade de refino sobre a qualidade da fibra de celulose de eucalipto*. Viçosa: Universidade

Federal de Viçosa, 72p., 2002.

GARLET, V. N. *Influência dos espaçamentos das árvores de Eucalyptus grandis na qualidade da madeira para produção de polpa celulósica Kraft*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1994, 80p. (Dissertação, Mestrado em Ciência Florestal).

GENG, Z. P.; et al. *Mixed peracids: manufacture and use as non-chlorine delignification and bleaching agents*. In: TAPPI PULPING CONFERENCE, 1993, Atlanta. *Proceedings...* Atlanta: TAPPI, não paginado, 1993.

GIERER, J. *The chemistry of delignification. A general concept. Part II*. *Holzforschung*, v. 36, p. 55-64, 1982.

GIERTZ, H. W. *A influência da moagem sobre as fibras individuais e seus efeitos nas propriedades do papel*. *O Papel*, v. 50, n. 1, p. 62-66, 1989.

GONÇALEZ, J. C.; GOMIDE, J. L.; VITAL, B. R. *Estudos tecnológicos da madeira de brotações de Eucalyptus grandis para produção de celulose Kraft*. *Revista Árvore*, v. 10, n. 1, p. 1-15, 1986.

GREENSPAN, F. P.; MACKELLAR, D. G. *Analysis of aliphatic per acids*. *Journal Anal. Chem.*, v. 20, n. 11, p. 1061-1063, 1948.

GULLICHSEN, J.; PAULAPURO, H. *Chemical Pulping, Papermaking Science and technology*. Helsinki, 496p, volume 6B, 2000.

HEIKKILÄ, M.; et al. *Competing electrophilic and nucleophilic reactions of peracids*. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE, 1998, Helsinki. *Proceedings...* Helsinki: TAPPI, p. 139-144, 1998.

HILL, R. T.; WALSH, P. B.; HOLLIE, J. A. *Part I: peracetic acid – an effective alternative for chlorine compound free delignification of kraft pulp*. In: TAPPI PULP CONFERENCE, 1992, Boston. *Proceedings...* Boston: TAPPI, p. 1219-1230, 1992.

IORIO, M. N. *Os Químicos na formação do papel*. *O Papel, Eminentes Tecnologias*, p. 52-55, 2005.

JÄÄSKELÄINEN, A. S.; POPPIUS-LEVLIN, K. *Carbohydrates in peroxyacetic acid bleaching*. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE, 1998, Helsinki. *Proceedings...* Helsinki: TAPPI, p. 423-428, 1998.

JHONSON, D. C. *Lignin reactions in delignification with peroxyacetic acid*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DELIGNIFICATION WITH OXYGEN, OZONE AND PERACIDS, 1, 1980, Raleigh. *Proceedings...* Tokyo: Uni Publishers Co., Ltd, p. 217-228, 1980.

KORTEOJA, M.; et al. *Statistical variation of paper strength*. *J. Pulp Pap. Sci.*, v. 24, n. 1, p. 1-7, 1998.

KOUBEK, E.; et al. *Kinetics and mechanism of the spontaneous decompositions of some peroxyacids, hydrogen peroxide and t-butyl hydroperoxide*. *J. Am. Chem. Soc.*, v. 85, p. 2263-2268, 1963.

LI, Z.; NI, Y.; VAN HEININGEN, A. R. P. *Incorporation of peracetic acid into brightening of groundwood pulps*. *Pulp Pap. Can.*, v. 98, n. 5, p.34-37, 1997.

LIEBERGOTT, N.; LIEROP, B. van; SKOTHOS, A. *The use of ozone in bleaching pulps*. In: TAPPI PULPING CONFERENCE, 1991, Orlando. *Anais...* Orlando: TAPPI, p. 1-23, 1992.

LIEBERGOTT, N. *Peracid delignification and bleaching*. In: TAPPI PULPING CONFERENCE, 1994, San Diego. *Proceedings...* San Diego: TAPPI, p. 357-370, 1994.

MACCONNACHIE, P. T. F.; ANDERSON, J. R.; AMINI, B. *Novel peroxyacid delignification for low AOX and TCF bleaching*. In: CANADIAN PULP AND PAPER ASSOCIATION, 1993, WHESTLER CONFERENCE, 1993, WHESTLER. *Proceeding...* WHESTLER: CPPA, não paginado, 1993.

MACLEOD, J. M.; et al. *Pulp strength delivery along complete kraft mill fibre lines*. In: TAPPI PULPING CONFERENCE, 1994, San Diego. *Proceedings...* San Diego: TAPPI, p.183-191, 1994.

MANFREDI, V.; VILELO, C. B.; CLAUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E. *Efeito das variáveis operacionais do refino na evolução das propriedades da polpa refinada*. In:

CONGRESSO ANUAL DA ABCP – SEMANA DO PAPEL, 19, 1986, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP, p. 189-207, 1986.

MARSHALL, R. A. G.; NAYLOR, R. *Investigation of the model enzyme oxidation of phenol by peracetic acid*. J. Chem. Soc., Perkin II, p.1242-1246, 1974.

MARTINS, M.; et al. *Atendimento ao cliente e tendência de mercado para celulose de eucalipto*. *O Papel*, v.56, n.7, p. 27-34, jul. 1995.

McDONOUGH, T. J. *Oxygen bleaching processes*. *Tappi Journal*, v.69, n.6, p. 46-52, 1986.

MOUNTEER, A. H. *Alternativas para o branqueamento de polpa kraft de eucalipto sem cloro molecular*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1992. (Dissertação, Mestrado em Ciência Florestal).

NI, Y.; d'ENTREMONT, M. *Peroxyacetic acid oxidation of lignin model compounds*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD AND PULPING CHEMISTRY, 9, 1997, Montreal. *Proceedings...* Montreal: CPPA, p. D6-1-D6-5, 1997.

NI, Y.; et al. *The complementary effect of peracetic acid and hydrogen peroxide in a TCF bleaching sequence*. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE, 1998, Helsinki. *Proceedings...* Helsinki: TAPPI, p. 509-514, 1998.

NOTA TÉCNICA SOBRE TECNOLOGIA DE CONTROLE DA FABRICAÇÃO DE CELULOSE (KRAFT) E PAPEL, NT – 18, CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, novembro de 1990, Acesso em: 17 ago. 2007.

Papel e celulose - competitividade e crescimento produtivo destacam o Brasil no cenário mundial. Revista da Madeira, nº 101, ano 17, Jan. 2007. Disponível em: http://www.remade.com.br/pt/revista_materia.php?edicao=101&id=1018. Acesso em: 16 jul. 2007.

PEREIRA, E.R. *Branqueamento de polpa kraft de eucalipto com perácidos e peróxido pressurizado*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995. 70p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.

PEREIRA, E. R.; COLODETTE, J. L.; BRITO, A. C. H. *Fatores que afetam a eficiência e a seletividade do branqueamento com ozônio*. In: 33º CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo: ABTCP, 2002.

PIRES, F. S.; et al. *Preparação da massa*. In: D'ALMEIDA, M. L. O. (Coord.) *Celulose e papel: tecnologia de fabricação do papel*, v. 2. São Paulo: IPT/SENAI, p. 583-656, 1988.

POIRIER, N. A.; et al. *The Effect of pH on the Optical Properties of Paper*. *Journal of Pulp and Paper Science*, v. 22, n. 11, 1996.

QUEIROZ, S. C. S.; et al. *Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa Kraft de clones híbridos de Eucalyptus Grandis W. Hill Ex Maiden X Eucalyptus Urophilla S. T. Blake*. *Revista Árvore*, v. 28, n. 006, p. 901-906, 2004.

RATNIEKS, E.; FOELKEL, C. *Uma discussão teórico-prática sobre polpas de eucalipto para a fabricação de papel tissue*. In: 29º Congresso Anual da ABTCP, São Paulo, p. 717-734, 1996.

REINER, F. J. M. *Mecanismo de ligação entre fibras e a importância do refino*. *O Papel*, v. 50, n. 1, p. 29-32, 1989.

RUOHONIEMI, K.; et al. *Experience in the use of peracetic acid in ECF and TCF bleaching*. In: International Pulp Bleaching Conference, Helsinki. *Proceedings...* Helsinki: TAPPI, p. 145-150, 1998.

SALVADOR, E.; et al. *Efeito da deslignificação com oxigênio nas propriedades físico-mecânicas de polpas Kraft*. In: ABTCP, São Paulo, p. 1-24, 2000.

SÊCO, I. M. C. L.; NETO, C. P.; SILVESTRE, A. J. D. *Influência das condições de branqueamento na reversão da alvura de polpa kraft de Eucalyptus globulus branqueada por ECF*. *O Papel*, p. 20-29.

SEISTO, A.; POPPIUS-LEVLIN, K.; FUHRMANN, A. *Correlations between chemical fibre and paper properties or TCF and ECF bleached kraft pulps*. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE, Helsinki. *Proceedings...* Helsinki: TAPPI, p. 175-

183, 1998.

SFERRAZZA, M. *Proper refiner selection, upkeep boost performance and savings*. In: Pulp & Paper, Atlanta, v.70, n.2, p. 89-91, 1996.

SILVA, D.J.; et al. *Impacto da qualidade da madeira na deslignificação, no branqueamento e na qualidade da polpa kraft de clones de eucalipto*. IN: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 29, 1996, São Paulo, Anais..., São Paulo: ABTCP, p. 453-470, 1996.

SILVA, M. R. da.; BRITO, A. C. H.; COLODETTE, J. L. *A seqüência de branqueamento ideal para um processo em circuito fechado*. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, n.29, São Paulo, 1996.

SILVA, R. P.; OLIVEIRA, R. C. *Efeitos da ação do refino e da reciclagem nas propriedades de papéis de pinus e eucalipto*. Revista Árvore, v. 24, n.3, p. 349-360, 2000.

SILVA, M. R. *Impacto do estágio de hidrólise ácida sobre a qualidade da polpa*, 2001.

SILVA FILHO, L. L.; MIRANDA, C. R. *Utilização de perácidos no branqueamento de polpas de Eucalyptus*. In: O Papel, v.3, p.28-31, 1995.

SJÖSTRÖM, K.; TEDER, A. *Changes within the modified kraft process aiming to improve TCF bleachability*. In: Journal Pulp and Paper Science, v. 25, n. 5, p.176-182, 1999.

SPRINGER, E. L. *Delignification of aspen wood using hydrogen peroxide and peroxymonosulfate*. In: Journal Tappi , v.73, n.1, p.175-178, 1990.

SUESS, H. U.; LEPORINI, C. F. *Progress in bleaching to top brightness and low reversion*. Proceedings..., In: ABTCP Annual conference, 2004.

SWERN, D. *Epoxidation and hydroxylation of ethylenic compounds with organic peracids*. In: Organic reactions. New York: John Wiley & Sons, Inc., v.7, p.378-433, 1953.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY, Atlanta.
Tappi Standard Methods.

TOMAZELLO FILHO, K. *Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do Eucalyptus saligna e Eucalyptus grandis*. Piracicaba: ESALQ/USP, p.37-45, 1994. Apostila.

URREAGA, J. M.; VILLAR, J. C.; ORDEN, M. U. *Cor e degradação em materiais celulósicos de diferente composição e grau de refinação*. Artigo técnico, In: O Papel. Madri: Universidade Politécnica de Madri.

VIEIRA, R. Carboidrato – Estrutura e funções. Disponível em: http://www.geocities.com/capecanaveral/launchpad/9071/Carboidratos_est.html, Acesso em: 26 dez. 2008.

VUORINEN, T.; et al. *Selective hydrolysis of hexenuronic acid groups and its application in ECF and TCF bleaching of kraft pulps*. In: International Pulp Bleaching Conference, Proc... Washington, DC., Tappi, p. 43-51, 1996.

WANG, S.; CHANG, H-m.; JAMEEL, H. *The preparation of peracids for bleaching*. In: TAPPI PULPING CONFERENCE, San Diego. *Proceedings...* San Diego: TAPPI, p.531-541, 1994.

YUAN, Z.; NI, Y.; VAN HEININGEN, A. R. P. *Kinetics of peracetic acid decomposition. Part I: the spontaneous decomposition at typical pulp bleaching conditions*. In: The Can. J. Chem. Eng., v. 75, n. 2, p. 37-41, 1997.

YUAN, Z.; NI, Y.; VAN HEININGEN, A. R. P. *Kinetics of peracetic acid decomposition. Part II: pH effect and alkaline hydrolysis*. In: The Can. J. Chem. Eng., v. 75, n. 2, p. 42-47, 1997.

ZHANG, X. Z.; et al. *The role of pH and Fe (III) in deslignification with distilled peracetic acid*. In: TAPPI PULPING CONFERENCE, 1998, Montreal. *Proceedings...* Montreal: TAPPI, p.1561-1570, 1998.

ZOGBI, O. *Avaliação do Setor de Celulose e Papel*. BRACELPA. Disponível em: <HTTP://www.bracelpa.org.br>, Acesso em: 03 ago. 2007.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Logo abaixo são expostas as condições dos estágios de branqueamento das seqüências D(EP)DD, D(EP)DP e D(EP)D/Paa.

Tabela A.1. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência D(EP)DD

Condições	Estágios de branqueamento			
	D0	(EP)	D	D
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	60	80	80	80
Tempo, min	30	90	120	120
Fator Kappa	0,16	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3,0	-	-
NaOH, kg/t	-	9,0	-	0,3
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,0	-	0,5	-
ClO ₂ as Cl ₂ , kg/t	16,0	-	10,0	2,0
Paa, kg/t	-	-	-	-
pH final	2,7	10,5	3,8	5,5

Tabela A.2. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência D(EP)DP

Condições	Estágios de branqueamento			
	D0	(EP)	D	P
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	60	80	80	80
Tempo, min	30	90	120	120
Fator Kappa	0,16	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3,0	-	2,0
NaOH, kg/t	-	9,0	1,5	3,0
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,0	-	-	-
ClO ₂ as Cl ₂ , kg/t	16,0	-	15,0	-
Paa, kg/t	-	-	-	-
pH final	2,7	10,5	3,8	10,0

Tabela A.3. Condições dos estágios de branqueamento da sequência D(EP)D/Paa

Condições	Estágios de branqueamento			
	D0	(EP)	D/	Paa
Consistência, %	10	10	10	9
Temperatura, °C	60	80	80	75
Tempo, min	30	90	120	120
Fator Kappa	0,16	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3,0	-	-
NaOH, kg/t	-	9,0	2,2	3,5
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,0	-	-	-
ClO ₂ as Cl ₂ , kg/t	16,0	-	20,0	-
Paa, kg/t	-	-	-	1,0
pH final	2,7	10,5	3,8	5,0

Logo abaixo são expostas as condições dos estágios de branqueamento das seqüências D_{HT}(EP)DD, D_{HT}(EP)DP e D_{HT}(EP)D/Paa.

Tabela A.4. Condições dos estágios de branqueamento da sequência D_{HT}(EP)DD

Condições	Estágios de branqueamento			
	D _{HT}	(EP)	D	D
Consistência, %	10	10	10	10,0
Temperatura, °C	95	80	80	80
Tempo, min	120	90	120	120
Fator Kappa	0,16	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3,0	-	-
NaOH, kg/t	-	9,0	-	0,30
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,0	-	0,5	-
ClO ₂ as Cl ₂ , kg/t	16,0	-	10,0	2,0
Paa, kg/t	-	-	-	-
pH final	2,7	10,5	3,8	5,5

Tabela A.5. Condições dos estágios de branqueamento da sequência D_{HT}(EP)DP

Condições	Estágios de Branqueamento			
	D _{HT}	(EP)	D	P
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	80	80
Tempo, min	120	90	120	120
Factor Kappa	0,16	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3,0	-	2,0
NaOH, kg/t	-	9,0	1,5	3,0
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,0	-	-	-
ClO ₂ as Cl ₂ , kg/t	16,0	-	15,0	-
Paa, Kg/t	-	-	-	-
pH final	2,7	10,5	3,8	10,0

Tabela A.6. Condições dos estágios de branqueamento da sequência D_{HT}(EP)D/Paa

Condições	Estágios de branqueamento			
	D _{HT}	(EP)	D/	Paa
Consistência, %	10	10	10	9
Temperatura, °C	95	80	80	75
Tempo, min	120	90	120	60
Fator Kappa	0,16	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3,0	-	-
NaOH, kg/t	-	9,0	1,5	4,5
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,0	-	-	-
ClO ₂ as Cl ₂ , kg/t	16,0	-	15,0	-
Paa, kg/t	-	-	-	3,5
pH final	2,7	10,5	3,8	5,0

Logo abaixo são expostas as condições dos estágios de branqueamento da seqüência $D_{HT}(EP)D/Paa$ sem lavagem entre o estágio D e Paa.

Tabela A.7. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência $D_{HT}(EP)DPaa$

Condições	Estágios de branqueamento			
	D_{HT}	(EP)	D	Paa
Consistência, %	10	10	10	9
Temperatura, °C	95	80	80	75
Tempo, min	120	90	120	120
Fator Kappa	0,16	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3,0	-	-
NaOH, kg/t	-	9,0	1,5	4,5
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,0	-	-	-
ClO ₂ as Cl ₂ , kg/t	16,0	-	15,0	-
Paa, kg/t	-	-	-	3,5
pH final	2,7	10,5	3,8	5,0

Logo abaixo são expostas as condições dos estágios de branqueamento da seqüência $D_{HT}(EP)D/Paa$ com variação de pH.

Tabela A.8. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência $D_{HT}(EP)D/Paa$ com variação de pH

Condições	Estágios de branqueamento					
	D_{HT}	(EP)	D/	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	10	10	10	9	9	9
Temperatura, °C	95	80	80	75	75	75
Tempo, min	120	90	120	60	60	60
Fator Kappa	0,16	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3,0	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	9,0	1,5	4,5	5,5	6,3
H ₂ SO ₄ , kg/t	7,0	-	-	-	-	-
ClO ₂ as Cl ₂ , kg/t	16,0	-	15,0	-	-	-
Paa, kg/t	-	-	-	5,0	5,0	5,0
pH final	2,7	10,5	3,8	4,0	6,5	8,5

Logo abaixo são expostas as condições dos estágios de branqueamento das seqüências A/D(EP)DD, A/D(EP)DP e A/D(EP)D/Paa.

Tabela A.9. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência A/D(EP)DD

Condições	Estágios de Branqueamento				
	A/	D	(EP)	D	D
Consistência, %	11	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	90	80	80	80
Tempo, min	110	10	90	120	120
Fator Kappa	-	0,16	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3,0	-	-
NaOH, kg/t	-	5,0	10,0	-	0,5
H ₂ SO ₄ , kg/t	12,0	-	-	0,3	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	16,0	-	10,0	2,0
Paa, kg/t	-	-	-	-	-
pH final	2,7	3,0	10,5	3,8	5,5

Tabela A.10. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência A/D(EP)DP

Condições	Estágios de Branqueamento				
	A/	D	(EP)	D	P
Consistência, %	11	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	90	80	80	80
Tempo, min	110	10	90	120	120
Fator Kappa	-	0,16	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3,0	-	2,0
NaOH, kg/t	-	5,0	10,0	-	3,0
H ₂ SO ₄ , kg/t	12,0	-	-	0,3	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	16,0	-	10,0	-
Paa, kg/t	-	-	-	-	-
pH final	2,7	3,0	10,5	3,8	10,0

Tabela A.11. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência A/D(EP)D/Paa

Condições	Estágios de Branqueamento				
	A/	D	(EP)	D/	Paa
Consistência, %	11	10	10	10	9
Temperatura, °C	95	90	80	80	75
Tempo, min	110	10	90	120	30
Fator Kappa	-	0,16	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3,0	-	-
NaOH, kg/t	-	5,0	10,0	-	5,0
H ₂ SO ₄ , kg/t	12,0	-	-	0,3	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	16,0	-	10,0	-
Paa, kg/t	-	-	-	-	5,0
pH final	2,7	3,0	10,5	3,8	5,0

Logo abaixo são expostas as condições dos estágios de branqueamento das seqüências D_{HT}/QP e D_{HT}/QP/Paa.

Tabela A.12. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência D_{HT}/QP

Condições	Estágios de branqueamento		
	D _{HT} /	Q	P
Consistência, %	10	9	10
Temperatura, °C	95	90	90
Tempo, min	120	30	120
Fator Kappa	0,26	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	6,0
NaOH, kg/t	-	10,2	3,5
H ₂ SO ₄ , kg/t	3,0	-	-
ClO ₂ as Cl ₂ , kg/t	26,0	-	-
DTPA, kg/t	-	1,5	-
Paa, kg/t	-	-	-
pH final	2,7	6,5	10,0

Tabela A.13. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência D_{HT}/QP/Paa

Condições	Estágios de branqueamento			
	D _{HT}	/Q	P/	Paa
Consistência, %	10	9	10	9
Temperatura, °C	95	90	90	75
Tempo, min	120	30	120	30
Fator Kappa	0,26	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	5,0	-
NaOH, kg/t	-	10,2	2,0	5,0
H ₂ SO ₄ , kg/t	3,0	-	-	-
ClO ₂ as Cl ₂ , kg/t	26,0	-	-	-
DTPA, kg/t	-	1,5	-	-
Paa, kg/t	-	-	-	5,0
pH final	2,7	6,5	10,0	5,0

Logo abaixo são expostas as condições dos estágios de branqueamento das seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa.

Tabela A.14. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência Z/EDP

Condições	Estágios de Branqueamento			
	Z/	E	D	P
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	50	60	80	90
Tempo, min	1	30	120	120
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	5,0
NaOH, kg/t	-	10,0	-	10,0
H ₂ SO ₄ , kg/t	12,0	-	1,2	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	5,0	-
O ₃ , kg/t	6,0	-	-	-
Paa, Kg/t	-	-	-	-
pH final	2,7	10,0	3,8	10,0

Tabela A.15. Condições dos estágios de branqueamento da seqüência Z/ED/Paa

Condições	Estágios de Branqueamento			
	Z/	E	D/	Paa
Consistência, %	10	10	10	9
Temperatura, °C	50	60	80	75
Tempo, min	1	30	120	30
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	10,0	-	4,5
H ₂ SO ₄ , kg/t	12,0	-	1,2	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	5,0	-
O ₃ , kg/t	6,0	-	-	-
Paa, kg/t	-	-	-	3,5
pH final	2,7	10,0	3,8	5,0

APÊNDICE B

Os resultados experimentais, obtidos em cada estágio, das seqüências de branqueamento estão apresentados nas Tabelas abaixo.

AMOSTRA D(EP)DD

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento				
	D0	(EP)	D1	D1	D1
Consistência, %	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	60	80	80	80	80
Tempo, min	30	90	120	120	120
Fator Kappa	0,16	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3,0	-	-	-
NaOH, kg/t	-	9	-	-	1,5
H ₂ SO ₄ , kg/t	7	-	1,5	0,5	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	16,0	-	5	10	15
Paa, kg/t	-	-	-	-	-
pH final	2,8	11,4	4,2	4,2	4,8
Reagente Consumido, %	100	87,6	100	100	100
Número kappa	-	4,9	-	-	-
Alvura AD., % ISO	72,2	82,9	85,3	86,2	87,7
Alvura OD., %ISO	-	-	-	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	-
Viscosidade, cP	-	15,6	-	14,7	-
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-	-
OX, kg/t	-	-	-	-	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-
L*	-	-	-	-	-
a*	-	-	-	-	-
b*	-	-	-	-	-
Reversão L*	-	-	-	-	-
Reversão a*	-	-	-	-	-
Reversão b*	-	-	-	-	-

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D(EP)DD

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	D2	D2	D2	D2
Consistência, %	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	80	80	80	80
Tempo, min	120	120	120	120
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	0,3	0,3	0,3	0,3
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	2	2	2	2
Paa, kg/t	-	-	-	-
pH final	4,4	4,4	5,0	4,8
Reagente Consumido, %	100	100	100	100
Número kappa	-	-	1,7	-
Alvura AD., % ISO	87,9	88,8	89,9	90,5
Alvura OD., %ISO	85,0	86,0	86,9	87,2
Reversão, % ISO	2,9	2,8	3,0	3,3
Viscosidade, cP	-	-	13,9	-
HexA's, mmol/kg	-	-	4,5	-
OX, kg/t	-	-	194,2	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	0,4	-
Carboxila, meq/100g	-	-	8,0	-
Total DQO, mg /L	-	-	408	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	1,70	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	5,0	-
L*	97,6	98,0	97,9	97,7
a*	0,0	0,0	-0,1	-0,1
b*	3,5	2,9	2,7	3,2
Reversão L*	97,6	97,7	97,8	97,7
Reversão a*	0,1	0,0	0,0	0,0
Reversão b*	3,9	3,4	3,4	3,5

AMOSTRA D(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	60	60	60	60
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	25	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,6	4,8	4,6	4,9
Reagente Consumido, %	98,1	96,9	96,9	97,1
Número kappa	-	-	-	1,8
Alvura AD., % ISO	88,6	89,1	89,6	90,5
Alvura OD., %ISO	86,4	87,0	87,4	88,4
Reversão, % ISO	2,2	2,1	2,2	2,1
Viscosidade, cP	-	-	-	12,6
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t	-	-	-	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,6	97,5	97,9	97,6
a*	0,0	-0,1	-0,1	0,0
b*	3,8	3,0	2,7	3,6
Reversão L*	97,3	97,5	97,7	97,5
Reversão a*	0,1	0,0	0,0	0,1
Reversão b*	4,4	4,0	3,4	4,1

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	90	90	90	90
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	25	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,7	4,8	5,0	4,3
Reagente Consumido, %	97,5	96,9	96,9	96,4
Número kappa	-	1,6	-	-
Alvura AD., % ISO	89,0	89,9	90,6	91,3
Alvura OD., %ISO	86,5	87,6	88,4	88,8
Reversão, % ISO	2,5	2,3	2,2	2,5
Viscosidade, cP	-	12,7	-	-
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t	-	-	-	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,8	98,1	97,6	97,7
a*	0,0	-0,1	0,0	-0,1
b*	3,1	2,5	3,8	3,3
Reversão L*	97,7	97,7	97,3	97,3
Reversão a*	0,0	0,0	0,1	0,0
Reversão b*	3,6	2,5	4,5	3,9

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	120	120	120	120
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	25	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,4	4,8	4,4	4,7
Reagente Consumido, %	98,9	97,5	96,9	96,4
Número kappa	1,9	-	-	-
Alvura AD., % ISO	89,8	90,3	90,7	91,4
Alvura OD., %ISO	87,3	88,0	88,4	89,0
Reversão, % ISO	2,5	2,3	2,3	2,4
Viscosidade, cP	12,1	-	-	-
HexA's, mmol/kg	3,5	-	-	-
OX, kg/t	141,3	-	-	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	0,5	-	-	-
Carboxila, meq/100g	8,1	-	-	-
Total DQO, mg /L	978	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	140	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	5,9	-	-	-
L*	97,9	97,8	98,0	97,6
a*	-0,1	-0,1	-0,1	0,0
b*	2,7	3,1	2,8	3,8
Reversão L*	97,5	97,5	97,7	97,2
Reversão a*	0,1	0,0	0,0	0,1
Reversão b*	3,5	3,8	3,9	3,5

AMOSTRA D_HT(EP)DD

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento					
	DHT	(EP)	D1	D1	D1	D1
Consistência, %	10	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	80	80	80	80
Tempo, min	120	90	120	120	120	120
Fator Kappa	0,16	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	9	-	-	1,5	2,2
H ₂ SO ₄ , kg/t	7	-	1,5	0,5	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	16,0	-	5	10	15	20
Paa, kg/t	-	-	-	-	-	-
pH final	2,5	11,3	4,3	4,2	4,8	4,5
Reagente Consumido, %	100	87,6	100	100	100	100
Número kappa	-	3,5	-	-	-	-
Alvura AD., % ISO	69,2	82,4	86,4	87,3	89,4	89,8
Alvura OD., %ISO	-	-	-	-	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	-	-
Viscosidade, cP	-	13,7	-	12,2	-	-
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-	-	-
OX, kg/t	-	-	-	-	-	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-	-
L*	-	-	-	-	-	-
a*	-	-	-	-	-	-
b*	-	-	-	-	-	-
Reversão L*	-	-	-	-	-	-
Reversão a*	-	-	-	-	-	-
Reversão b*	-	-	-	-	-	-

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}(EP)DD

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	D2	D2	D2	D2
Consistência, %	10,0	10,0	10,0	10,0
Temperatura, °C	80	80	80	80
Tempo, min	120	120	120	120
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	0,30	0,30	0,30	0,30
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	2	2	2	2
Paa, kg/t	-	-	-	-
pH final	4,4	4,5	5,1	4,1
Reagente Consumido, %	100	100	100	100
Número kappa	-	1,0	-	-
Alvura AD., % ISO	89,0	89,8	90,7	91,4
Alvura OD., %ISO	86,6	87,7	88,3	88,9
Reversão, % ISO	2,4	2,1	2,4	2,5
Viscosidade, cP		11,6		
HexA's, mmol/kg	-	1,1	-	-
OX, kg/t	-	95,9	-	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	0,5	-	-
Carboxila, meq/100g		6,7		
Total DQO , mg /L	-	639	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	384	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	4,0	-	-
L*	97,6	97,5	97,9	97,7
a*	0,0	-0,1	-0,1	-0,1
b*	3,8	3,0	2,7	3,2
Reversão L*	97,3	97,5	97,7	97,7
Reversão a*	0,1	0,0	0,0	0,0
Reversão b*	4,4	4,0	3,4	3,5

AMOSTRA D_{HT}(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento					
	D _{HT}	(EP)	D/	D/	D/	D/
Consistência, %	10	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	80	80	80	80
Tempo, min	120	90	120	120	120	120
Fator Kappa	0,16	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	9	-	-	1,5	2,2
H ₂ SO ₄ , kg/t	7	-	1,5	0,5	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	16,0	-	5	10	15	20
Paa, kg/t	-	-	-	-	-	-
pH final	2,5	11,3	4,3	4,2	4,8	4,5
Reagente Consumido, %	-	-	100	100	100	100
Número kappa	-	3,5	-	-	-	-
Alvura AD., % ISO	69,2	82,4	86,4	87,3	89,4	89,8
Alvura OD., %ISO	-	-	-	-	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	-	-
Viscosidade, cP	-	13,7	-	-	12,2	-
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-	-	-
OX, kg/t	-	-	-	-	-	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-	-
L*	-	-	-	-	-	-
a*	-	-	-	-	-	-
b*	-	-	-	-	-	-
Reversão L*	-	-	-	-	-	-
Reversão a*	-	-	-	-	-	-
Reversão b*	-	-	-	-	-	-

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	30	30	30	30
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,7	4,8	4,8	4,9
Reagente Consumido, %	98,1	96,9	96,9	97,1
Número kappa	-	-	-	0,9
Alvura AD., % ISO	88,7	89,1	89,4	89,9
Alvura OD., %ISO	86,0	86,4	86,7	87,1
Reversão, % ISO	2,7	2,7	2,7	2,8
Viscosidade, cP				10,3
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t	-	-	-	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,7	97,8	97,8	97,9
a*	0,1	0,0	0,0	0,0
b*	3,7	3,5	3,5	3,2
Reversão L*	97,3	97,4	97,7	97,7
Reversão a*	0,1	0,0	0,0	0,0
Reversão b*	4,5	4,4	4,1	3,8

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento		
	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75
Tempo, min	60	60	60
Fator Kappa	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-
NaOH, kg/t	15	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	3,5	5,0
pH final	5,1	5,1	5,0
Reagente Consumido, %	97,5	96,9	96,4
Número kappa		0,8	-
Alvura AD., % ISO	89,0	89,8	90,5
Alvura OD., %ISO	86,4	87,2	88,0
Reversão, % ISO	2,6	2,6	2,5
Viscosidade, cP		9,9	
HexA's, mmol/kg	-	1,9	-
OX, kg/t	-	109,6	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	0,4	-
Carboxila, meq/100g	-	7,7	-
Total DQO, mg /L	-	981	-
Total cor, mg Pt/L	-	307	-
Total AOX, mg Cl/L	-	4,4	-
L*	98,0	97,6	97,7
a*	0,0	0,0	0,1
b*	3,0	4,3	3,9
Reversão L*	97,8	97,2	97,2
Reversão a*	0,0	0,0	0,1
Reversão b*	3,6	4,6	4,7

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	90	90	90	90
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,6	4,7	4,9	5,2
Reagente Consumido, %	99,3	98,9	98,1	97,5
Número kappa	-	-	0,8	-
Alvura AD., % ISO	88,6	89,2	89,7	90,2
Alvura OD., %ISO	86,0	86,6	87,0	87,8
Reversão, % ISO	2,6	2,6	2,7	2,4
Viscosidade, cP			9,7	
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t	-	-	-	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,6	97,8	97,7	97,9
a*	0,0	0,1	-0,1	0,0
b*	3,5	3,9	3,2	4,3
Reversão L*	97,3	97,4	97,7	97,2
Reversão a*	0,1	0,0	0,0	0,0
Reversão b*	4,5	4,7	3,5	4,2

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	120	120	120	120
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	5,0	4,3	4,4	4,5
Reagente Consumido, %	98,9	97,5	96,9	96,4
Número kappa	-	-	-	0,7
Alvura AD., % ISO	88,4	88,9	89,5	89,9
Alvura OD., %ISO	86,1	86,4	87,0	87,3
Reversão, % ISO	2,3	2,5	2,5	2,6
Viscosidade, cP				9,3
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t	-	-	-	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,6	97,7	97,7	9,9
a*	0,0	-0,1	-0,1	0,0
b*	3,6	3,9	3,5	3,9
Reversão L*	97,4	97,3	97,5	97,7
Reversão a*	0,1	0,1	0,1	0,0
Reversão b*	4,5	3,9	4,3	3,9

AMOSTRA D_{HT}(EP)D/Paa com variação de pH

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento					
	DHT	(EP)	D/	D/	D/	D/
Consistência, %	10	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	80	80	80	80	80
Tempo, min	120	90	120	120	120	120
Fator Kappa	0,16	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	3	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	9	-	-	1,5	2,2
H ₂ SO ₄ , kg/t	7	-	1,5	0,5	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	16,0	-	5	10	15	20
Paa, kg/t	-	-	-	-	-	-
pH final	2,5	11,3	4,3	4,2	4,8	4,5
Reagente Consumido, %	100	87,6	100	100	100	100
Número kappa	-	3,5	-	-	-	-
Alvura AD., % ISO	69,2	82,4	86,4	87,3	89,4	89,8
Alvura OD., %ISO	-	-	-	-	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	-	-
Viscosidade, cP	-	13,7	-	-	12,2	-
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-	-	-
OX, kg/t						
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-	-
L*	-	-	-	-	-	-
a*	-	-	-	-	-	-
b*	-	-	-	-	-	-
Reversão L*	-	-	-	-	-	-
Reversão a*	-	-	-	-	-	-
Reversão b*	-	-	-	-	-	-

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}(EP)D/Paa com variação de pH

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	60	60	60	60
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	12	25	30	35
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	3,9	4,0	4,2	4,3
Reagente Consumido, %	97,8	97,3	96,4	99,3
Número kappa	-	-	-	1,0
Alvura AD., % ISO	89,0	89,3	89,6	90,1
Alvura OD., %ISO	86,4	86,7	87,2	87,4
Reversão, % ISO	2,6	2,6	2,4	2,7
Viscosidade, cP				10,2
HexA's, mmol/kg	-	-	-	1,76
OX, kg/t				106,8
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,9	97,8	97,8	97,9
a*	0,0	-0,1	-0,1	0,0
b*	3,2	3,5	3,5	3,2
Reversão L*	97,7	97,4	97,7	97,7
Reversão a*	0,0	0,0	0,0	0,0
Reversão b*	3,8	4,4	4,1	3,8

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}(EP)D/Paa com variação de pH

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	60	60	60	60
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	20	35	40	45
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	6,7	7,0	6,2	6,5
Reagente Consumido, %	99,1	98,6	97,6	96,4
Número kappa		-	-	0,8
Alvura AD., % ISO	88,4	89,0	89,3	89,7
Alvura OD., %ISO	85,8	86,4	86,6	87,0
Reversão, % ISO	2,6	2,6	2,7	2,7
Viscosidade, cP				9,0
HexA's, mmol/kg	-	-	-	2,03
OX, kg/t				109,9
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	98,0	98,0	97,6	97,7
a*	0,0	0,0	-0,1	-0,1
b*	3,0	2,9	4,3	3,9
Reversão L*	97,8	97,7	97,2	97,3
Reversão a*	0,0	0,0	0,0	0,1
Reversão b*	3,6	3,4	4,6	3,9

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}(EP)D/Paa com variação de pH

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	60	60	60	60
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	27	43	47	53
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	9,0	9,2	8,4	8,9
Reagente Consumido, %	97,6	96,4	97,8	97,3
Número kappa	-	-	-	0,8
Alvura AD., % ISO	87,7	88,4	88,8	89,3
Alvura OD., %ISO	85,0	85,5	86,0	86,3
Reversão, % ISO	2,7	2,9	2,8	3,0
Viscosidade, cP				8,1
HexA's, mmol/kg	-	-	-	2,72
OX, kg/t				110,3
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,6	97,8	97,7	97,9
a*	0,0	0,1	-0,1	0,0
b*	3,5	3,9	3,2	4,3
Reversão L*	97,3	97,4	97,7	97,2
Reversão a*	0,1	0,0	0,0	0,0
Reversão b*	4,5	4,7	3,5	4,2

AMOSTRA D_HT/QP

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento						
	DHT	/Q	P	P	P	P	P
Consistência, %	10	9	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	90	90	90	90	90	90
Tempo, min	120	30	120	120	120	120	120
Pressão, kg	-	-	5	5	5	5	5
Fator Kappa	0,26	-	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0
NaOH, kg/t	-	10	10	15	20	25	30
H ₂ SO ₄ , kg/t	3,0	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	26,0	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/t	-	1,5	-	-	-	-	-
Paa, kg/t	-	-	-	-	-	-	-
pH final	-	5,0	11,0	11,2	10,8	11,0	11,3
Reagente Consumido, %	-	-	91,3	91,0	90,6	89,9	88,5
Número kappa	-	3,1	-	-	-	1,9	-
Alvura AD., % ISO	68,0	68,4	87,5	88,1	89,5	90,2	90,5
Alvura OD., %ISO	-	-	-	-	2,0	2,3	2,2
Reversão, % ISO	-	-	-	-	87,5	87,9	88,3
Viscosidade, cP	-	15,6	-	-	-	10,7	-
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-	-	13,3	-
OX, kg/t	-	-	-	-	-	52,9	-
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-	-	0,1	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-	-	8,5	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-	-	992	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-	90	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-	2,8	-
L*	-	-	97,7	97,7	97,9	98,1	97,7
a*	-	-	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1
b*	-	-	2,9	2,7	2,8	2,5	3,1
Reversão L*	-	-	97,4	97,5	97,8	97,7	97,7
Reversão a*	-	-	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1
Reversão b*	-	-	3,8	3,5	2,7	2,5	3,6

AMOSTRA D_{HT}/QP/Paa

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento						
	DHT	/Q	P/	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	10	9	10	9	9	9	9
Temperatura, °C	95	90	90	75	75	75	75
Tempo, min	120	30	120	30	30	30	30
Pressão, kg	-	-	5	-	-	-	-
Fator Kappa	0,26	-	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	40,0	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	10	20	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	3,0	-	-	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	26,0	-	-	-	-	-	-
DTPA, kg/t	-	1,5	-	-	-	-	-
Paa, kg/t	-	-	0,0	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	-	5,0	10,8	4,7	4,9	4,7	4,9
Reagente Consumido, %	-	-	90,6	99,6	98,8	98,4	97,5
Número kappa	-	3,1	2,2	-	-	-	1,7
Alvura AD., % ISO	68,0	68,4	89,5	88,0	88,7	89,4	89,9
Alvura OD., %ISO	-	-	87,7	85,4	86,4	87,0	87,5
Reversão, % ISO	-	-	1,8	2,6	2,3	2,4	2,4
Viscosidade, cP		15,6	11,1				8,0
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-	-	-	12,5
OX, kg/t							52,0
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-	-	-	0,4
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-	-	-	9,3
Total DQO, mg /L	-	-	-	-	-	-	982
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-	-	50
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-	-	2,7
L*	-	-	-	97,6	97,7	98,1	97,9
a*	-	-	-	0,0	-0,2	-0,1	-0,2
b*	-	-	-	3,6	3,5	2,5	2,8
Reversão L*	-	-	-	97,5	97,4	97,7	97,6
Reversão a*	-	-	-	0,1	-0,1	0,0	0,0
Reversão b*	-	-	-	4,1	3,9	2,5	4,0

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}/QP/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	60	60	60	60
Pressão, kg	-	-	-	-
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
DTPA, kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,9	5,2	5,0	4,6
Reagente Consumido, %	97,9	97,5	97,5	94,2
Número kappa		-	-	1,1
Alvura AD., % ISO	88,3	88,8	89,5	90,4
Alvura OD., %ISO	86,2	86,4	87,0	88,0
Reversão, % ISO	2,1	2,4	2,5	2,4
Viscosidade, cP				7,6
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t				
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,6	97,7	97,7	97,7
a*	0,0	-0,2	-0,2	0,0
b*	3,6	3,3	3,5	2,9
Reversão L*	97,5	97,5	97,4	97,4
Reversão a*	0,1	0,0	-0,1	0,1
Reversão b*	4,1	3,8	3,9	3,8

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}/QP/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	90	90	90	90
Pressão, kg	-	-	-	-
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
DTPA, kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,8	4,7	4,9	5,3
Reagente Consumido, %	97,5	96,0	97,1	97,0
Número kappa	-	-	-	1,3
Alvura AD., % ISO	88,0	88,7	89,4	90,2
Alvura OD., %ISO	85,7	86,6	87,0	88,0
Reversão, % ISO	2,3	2,1	2,4	2,2
Viscosidade, cP				7,6
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t				
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	98,0	97,6	97,7	97,7
a*	-0,1	0,0	-0,2	-0,2
b*	2,8	3,8	3,3	3,5
Reversão L*	97,4	97,3	97,5	97,4
Reversão a*	0,0	0,1	0,0	-0,1
Reversão b*	3,3	4,4	3,8	3,9

CONTINUAÇÃO AMOSTRA D_{HT}/QP/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	120	120	120	120
Pressão, kg	-	-	-	-
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
DTPA, kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,7	5,0	4,9	4,7
Reagente Consumido, %	99,2	98,8	98,4	97,1
Número kappa	-	-	-	1,6
Alvura AD., % ISO	88,3	88,9	89,5	89,9
Alvura OD., %ISO	86,0	86,5	87,0	87,5
Reversão, % ISO	2,3	2,4	2,5	2,4
Viscosidade, cP				7,5
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t				
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,8	97,5	97,9	97,7
a*	0,0	-0,1	-0,1	0,0
b*	3,1	3,0	2,7	2,9
Reversão L*	97,7	97,5	97,7	97,4
Reversão a*	0,0	0,0	0,0	0,1
Reversão b*	3,6	4,0	3,4	3,8

AMOSTRA Z/EDP

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento					
	Z/	E	D	D	D	D
Consistência, %	10	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	50	60	80	80	80	80
Tempo, min	1	30	120	120	120	120
Pressão, kg	-	-	-	-	-	-
Fator Kappa	-	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	10	-	-	1,5	2,2
H ₂ SO ₄ , kg/t	12	-	1,2	0,5	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	5	10	15	20
O ₃ , kg/t	6	-	-	-	-	-
Paa, kg/t	-	-	-	-	-	-
pH final	2,6	10,3	4,7	4,6	4,4	4,4
Reagente Consumido, %	85,4	100	100	100	100	100
Número de KMnO ₄	-	-	-	-	-	-
Número kappa	3,1	2,0	-	-	-	-
Alvura AD., % ISO	74,1	73,2	86,9	88,7	90,1	90,8
Alvura OD., %ISO	-	-	-	-	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	-	-
Viscosidade, cP	-	14,7	14,2	-	-	-
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-	-	-
OX, kg/t						
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-	-
L*	-	-	-	-	-	-
a*	-	-	-	-	-	-
b*	-	-	-	-	-	-
Reversão L*	-	-	-	-	-	-
Reversão a*	-	-	-	-	-	-
Reversão b*	-	-	-	-	-	-

CONTINUAÇÃO AMOSTRA Z/EDP

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	P	P	P	P
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	90	90	90	90
Tempo, min	120	120	120	120
Pressão, kg	-	-	-	-
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	5	5	5	5
NaOH, kg/t	10	10	10	10
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
O ₃ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	-	-	-	-
pH final	10,8	10,9	10,6	11,0
Reagente Consumido, %	92,8	93,0	93,2	93,0
Número de KMnO ₄	1,0	-	-	-
Número kappa	-	-	-	-
Alvura AD., % ISO	89,7	90,5	91,3	91,9
Alvura OD., %ISO	87,6	88,5	89,2	89,7
Reversão, % ISO	2,1	2,0	2,1	2,2
Viscosidade, cP	12,2			
HexA's, mmol/kg	1,3	-	-	-
OX, kg/t	18,9			
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	0,4	-	-	-
Carboxila, meq/100g	7,9	-	-	-
Total DQO, mg /L	809	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	184	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	0,7	-	-	-
L*	97,7	97,5	97,8	97,6
a*	-0,2	-0,1	0,0	0,0
b*	2,9	3,0	3,1	3,5
Reversão L*	97,1	96,8	97,7	97,5
Reversão a*	-0,1	0,0	0,0	0,1
Reversão b*	3,8	2,9	3,5	4,1

AMOSTRA Z/ED/Paa

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento					
	Z/	E	D/	D/	D/	D/
Consistência, %	10	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	50	60	80	80	80	80
Tempo, min	1	30	120	120	120	120
Pressão, kg	-	-	-	-	-	-
Fator Kappa	-	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	10,0	-	-	1,5	2,2
H ₂ SO ₄ , kg/t	12,0	-	1,2	0,5	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	5	10	15	20
O ₃ , kg/t	6,0	-	-	-	-	-
Paa, kg/t	-	-	-	-	-	-
pH final	2,6	10,3	4,7	4,6	4,4	4,4
Reagente Consumido, %	85,4	100	100	100	100	100
Número de KMnO ₄	-	-	-	-	-	-
Número kappa	3,1	2,0	-	-	-	-
Alvura AD., % ISO	74,1	73,2	86,9	88,7	90,1	90,8
Alvura OD., %ISO	-	-	-	-	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	-	-
Viscosidade, cP	-	14,7	14,2	-	-	-
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-	-	-
OX, kg/t						
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-	-
L*	-	-	-	-	-	-
a*	-	-	-	-	-	-
b*	-	-	-	-	-	-
Reversão L*	-	-	-	-	-	-
Reversão a*	-	-	-	-	-	-
Reversão b*	-	-	-	-	-	-

CONTINUAÇÃO AMOSTRA Z/ED/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	30	30	30	30
Pressão, kg	-	-	-	-
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
O ₃ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,9	5,1	4,7	4,6
Reagente Consumido, %	98,7	98,1	97,6	97,4
Número de KMnO ₄	-	-	-	-
Número kappa	-	-	0,9	-
Alvura AD., % ISO	88,1	88,9	90,0	90,8
Alvura OD., %ISO	85,8	86,4	87,5	88,6
Reversão, % ISO	2,3	2,5	2,5	2,2
Viscosidade, cP			10,3	
HexA's, mmol/kg	-	-	1,3	-
OX, kg/t			34,0	
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	0,6	-
Carboxila, meq/100g	-	-	7,3	-
Total DQO, mg /L	-	-	958	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	200	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	1,0	-
L*	97,7	97,6	97,8	98,0
a*	-0,2	0,0	0,0	-0,1
b*	3,5	3,7	3,1	2,8
Reversão L*	97,4	97,3	97,7	97,4
Reversão a*	-0,1	0,1	0,0	0,0
Reversão b*	3,9	4,1	3,9	3,3

CONTINUAÇÃO AMOSTRA Z/ED/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	60	60	60	60
Pressão, kg	-	-	-	-
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
O ₃ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,6	4,8	4,7	4,6
Reagente Consumido, %	98,3	97,9	96,6	95,8
Número de KMnO ₄	-	-	-	-
Número kappa	-	-	0,8	-
Alvura AD., % ISO	88,4	89,1	90,2	91,0
Alvura OD., %ISO	86,0	86,6	88,0	88,6
Reversão, % ISO	2,4	2,5	2,2	2,4
Viscosidade, cP			10,0	
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t				
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,8	97,5	97,6	97,6
a*	-0,1	-0,1	0,0	0,0
b*	3,1	3,0	3,8	3,6
Reversão L*	97,6	97,3	97,3	97,5
Reversão a*	0,0	0,0	0,1	0,1
Reversão b*	3,5	3,8	4,4	4,1

CONTINUAÇÃO AMOSTRA Z/ED/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	90	90	90	90
Pressão, kg	-	-	-	-
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
O ₃ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,8	4,9	4,8	5,1
Reagente Consumido, %	98,1	97,9	97,4	96,6
Número de KMnO ₄	-	-	-	-
Número kappa	-	-	1,0	-
Alvura AD., % ISO	88,0	88,7	89,8	90,3
Alvura OD., %ISO	85,4	86,0	87,3	88,0
Reversão, % ISO	2,6	2,7	2,5	2,3
Viscosidade, cP			9,8	
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t				
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,7	97,4	97,7	97,7
a*	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2
b*	3,3	2,7	3,3	3,3
Reversão L*	97,5	97,7	97,5	97,5
Reversão a*	0,0	0,0	0,0	0,0
Reversão b*	3,8	3,4	3,8	3,8

CONTINUAÇÃO AMOSTRA Z/ED/Paa

Condições e Resultados	Estágios de branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	120	120	120	120
Pressão, kg	-	-	-	-
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
O ₃ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,9	4,6	5,0	5,2
Reagente Consumido, %	99,1	98,7	97,6	95,8
Número de KMnO ₄	-	-	-	-
Número kappa	-	-	0,7	-
Alvura AD., % ISO	87,9	88,8	89,9	90,5
Alvura OD., %ISO	85,4	86,2	87,4	88,0
Reversão, % ISO	2,5	2,6	2,5	2,5
Viscosidade, cP			10,0	
HexA's, mmol/kg	-	-	-	-
OX, kg/t				
Carbonila, g(Cu ₂ O)/100g(a.s.)	-	-	-	-
Carboxila, meq/100g	-	-	-	-
Total DQO, mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	98,0	97,6	97,7	98,1
a*	-0,1	0,0	-0,2	-0,1
b*	2,8	3,6	3,5	2,5
Reversão L*	97,4	97,5	97,4	97,7
Reversão a*	0,0	0,1	-0,1	0,0
Reversão b*	3,3	4,1	3,9	2,5

AMOSTRA A/D(EP)DD

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento						
	A/	D	(EP)	D1	D1	D1	D1
Consistência, %	11	10	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	90	80	80	80	80	80
Tempo, min	110	10	90	120	120	120	120
Fator Kappa	-	0,16	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3,0	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	5,0	10	-	1,5	2,2	2,6
H ₂ SO ₄ , kg/t	12	-	-	0,3	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	16,0	-	10	15	20	25
Paa, kg/t	-	-	-	-	-	-	-
pH final	2,6	3,1	10,9	4,2	4,6	4,7	4,5
Reagente Consumido, %	-	100	88	100	100	100	100
Número kappa	5,0	-	2,2	-	-	-	-
Alvura AD., % ISO	54,4	66,2	79,8	88,1	89,9	90,1	90,5
Alvura OD., %ISO	-	-	-	-	-	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	-	-	-
Viscosidade, cP	14,0	-	12,0	11,8	-	-	-
Total DQO , mg /L	-	-	-	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-	-	-
L*	-	-	-	-	-	-	-
a*	-	-	-	-	-	-	-
b*	-	-	-	-	-	-	-
Reversão L*	-	-	-	-	-	-	-
Reversão a*	-	-	-	-	-	-	-
Reversão b*	-	-	-	-	-	-	-

CONTINUAÇÃO AMOSTRA A/D(EP)DD

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	D2	D2	D2	D2
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	80	80	80	80
Tempo, min	120	120	120	120
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	0,5	0,5	0,5	0,5
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	2	2	2	2
Paa, kg/t	-	-	-	-
pH final	5,5	5,3	5,6	5,5
Reagente Consumido, %	100	100	100	100
Número kappa	0,5	-	-	-
Alvura AD., % ISO	89,9	90,7	91,0	91,3
Alvura OD., %ISO	87,5	88,3	88,5	88,4
Reversão, % ISO	2,4	2,4	2,5	2,9
Viscosidade, cP	11,3	-	-	-
Total DQO , mg /L	614	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	217	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	5,1	-	-	-
L*	98,6	97,6	97,9	97,8
a*	0,0	0,0	-0,1	-0,1
b*	3,2	3,1	2,7	2,9
Reversão L*	97,9	97,7	97,8	97,5
Reversão a*	0,1	0,0	0,0	0,0
Reversão b*	3,5	2,9	3,4	3,2

AMOSTRA A/D(EP)DP

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento						
	A/	D	(EP)	D1	D1	D1	D1
Consistência, %	11	10	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	90	80	80	80	80	80
Tempo, min	110	10	90	120	120	120	120
Fator Kappa	-	0,16	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3,0	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	5,0	10	-	1,5	2,2	2,6
H ₂ SO ₄ , kg/t	12	-	-	0,3	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	16,0	-	10	15	20	25
Paa, kg/t	-	-	-	-	-	-	-
pH final	2,6	3,1	10,9	4,2	4,6	4,7	4,5
Reagente Consumido, %	-	100	88	100	100	100	100
Número kappa	5,0	-	2,2	-	-	-	-
Alvura AD., % ISO	54,4	66,2	79,8	88,1	89,9	90,1	90,5
Alvura OD., %ISO	-	-	-	-	-	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	-	-	-
Viscosidade, cP	14,0	-	12,0	11,8	-	-	-
Total DQO , mg /L	-	-	-	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-	-	-
L*	-	-	-	-	-	-	-
a*	-	-	-	-	-	-	-
b*	-	-	-	-	-	-	-
Reversão L*	-	-	-	-	-	-	-
Reversão a*	-	-	-	-	-	-	-
Reversão b*	-	-	-	-	-	-	-

CONTINUAÇÃO AMOSTRA A/D(EP)DP

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	P	P	P	P
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	80	80	80	80
Tempo, min	120	120	120	120
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	2	2	2	2
NaOH, kg/t	4	4	4	4
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	-	-	-	-
pH final	10,7	10,6	10,4	10,7
Reagente Consumido, %	100	100	100	100
Número kappa	0,8	-	-	-
Alvura AD., % ISO	90,3	90,6	91,3	91,7
Alvura OD., %ISO	88,5	88,7	89,5	90,0
Reversão, % ISO	1,8	1,9	1,8	1,7
Viscosidade, cP	11,4			
Total DQO , mg /L	706	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	240	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	4,7	-	-	-
L*	97,6	97,7	98,1	97,5
a*	0,0	-0,2	0,0	-0,1
b*	3,1	2,9	2,7	3,0
Reversão L*	97,3	97,4	97,9	97,3
Reversão a*	0,1	-0,1	0,1	0,0
Reversão b*	2,9	3,9	3,5	3,7

AMOSTRA A/D(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento						
	A/	D	(EP)	D1	D1	D1	D1
Consistência, %	11	10	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	95	90	80	80	80	80	80
Tempo, min	110	10	90	120	120	120	120
Fator Kappa	-	0,16	-	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3,0	-	-	-	-
NaOH, kg/t	-	5,0	10	-	1,5	2,2	2,6
H ₂ SO ₄ , kg/t	12	-	-	0,3	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	16,0	-	10	15	20	25
Paa, kg/t	-	-	-	-	-	-	-
pH final	2,6	3,1	10,9	4,2	4,6	4,7	4,5
Reagente Consumido, %	-	100	88	100	100	100	100
Número kappa	5,0	-	2,2	-	-	-	-
Alvura AD., % ISO	54,4	66,2	79,8	88,1	89,9	90,1	90,5
Alvura OD., %ISO	-	-	-	-	-	-	-
Reversão, % ISO	-	-	-	-	-	-	-
Viscosidade, cP	14,0	-	12,0	11,8	-	-	-
Total DQO , mg /L	-	-	-	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-	-	-	-
L*	-	-	-	-	-	-	98,0
a*	-	-	-	-	-	-	0,0
b*	-	-	-	-	-	-	2,6
Reversão L*	-	-	-	-	-	-	97,1
Reversão a*	-	-	-	-	-	-	-0,1
Reversão b*	-	-	-	-	-	-	2,9

CONTINUAÇÃO AMOSTRA A/D(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	30	30	30	30
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,9	5,0	4,6	4,7
Reagente Consumido, %	91,6	93,9	93,8	90,0
Número kappa	-	-	-	0,7
Alvura AD., % ISO	88,5	89,0	89,4	90,0
Alvura OD., %ISO	86,0	86,3	87,0	87,3
Reversão, % ISO	2,5	2,7	2,4	2,7
Viscosidade, cP	-	-	-	9,8
Total DQO , mg /L	-	-	-	1022
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	234
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	6,5
L*	97,8	97,7	98,1	97,6
a*	-0,1	-0,2	-0,2	0,0
b*	3,1	2,9	3,5	3,3
Reversão L*	97,6	97,5	97,4	97,1
Reversão a*	0,0	0,0	-0,1	0,1
Reversão b*	3,5	2,8	3,9	3,8

CONTINUAÇÃO AMOSTRA A/D(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	60	60	60	60
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,9	5,1	4,7	4,7
Reagente Consumido, %	96,0	96,1	97,0	96,8
Número kappa	-	-	-	0,6
Alvura AD., % ISO	88,6	88,7	89,2	89,8
Alvura OD., %ISO	86,0	86,3	86,8	87,2
Reversão, % ISO	2,6	2,4	2,4	2,6
Viscosidade, cP	-	-	-	9,5
Total DQO , mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,5	97,9	97,6	97,8
a*	-0,1	-0,2	0,0	0,0
b*	3,0	2,7	3,6	3,1
Reversão L*	97,5	97,7	97,5	97,7
Reversão a*	0,0	0,0	0,1	0,0
Reversão b*	4,0	3,4	4,1	3,6

CONTINUAÇÃO AMOSTRA A/D(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	90	90	90	90
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	5,1	5,0	4,9	5,0
Reagente Consumido, %	92,5	99,4	98,8	98,2
Número kappa	-	-	-	0,7
Alvura AD., % ISO	88,3	88,8	89,4	89,9
Alvura OD., %ISO	86,0	86,2	86,7	87,2
Reversão, % ISO	2,3	2,6	2,7	2,7
Viscosidade, cP	-	-	-	9,4
Total DQO , mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	98,1	97,6	97,7	97,9
a*	-0,1	0,0	-0,1	-0,2
b*	2,7	3,8	3,3	2,7
Reversão L*	97,7	97,3	97,3	97,5
Reversão a*	0,0	0,1	0,0	0,1
Reversão b*	2,5	3,5	3,9	3,5

CONTINUAÇÃO AMOSTRA A/D(EP)D/Paa

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	Paa	Paa	Paa	Paa
Consistência, %	9	9	9	9
Temperatura, °C	75	75	75	75
Tempo, min	120	120	120	120
Fator Kappa	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	-	-
NaOH, kg/t	15	30	35	40
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
ClO ₂ como Cl ₂ , kg/t	-	-	-	-
Paa, kg/t	1,0	2,5	3,5	5,0
pH final	4,5	5,0	4,8	4,7
Reagente Consumido, %	95,1	99,1	98,4	96,3
Número kappa	-	-	-	0,5
Alvura AD., % ISO	87,8	88,5	89,4	89,7
Alvura OD., %ISO	85,0	85,6	86,6	87,0
Reversão, % ISO	2,8	2,9	2,8	2,7
Viscosidade, cP	-	-	-	9,6
Total DQO , mg /L	-	-	-	-
Total cor, mg Pt/L	-	-	-	-
Total AOX, mg Cl/L	-	-	-	-
L*	97,8	98,0	97,6	97,5
a*	-0,1	-0,1	0,0	-0,1
b*	3,1	2,8	3,8	2,9
Reversão L*	97,5	97,7	97,2	97,7
Reversão a*	0,0	0,0	0,1	0,0
Reversão b*	3,8	3,9	3,5	2,5

APÊNDICE C

Abaixo estão relacionadas as propriedades físico-mecânicas e ópticas das seqüências D(EP)DD e D(EP)D/Paa, seus respectivos modelos matemáticos que relacionam Brancura CIE (Y) e Alvura da polpa de celulose após branqueamento (X) e os coeficientes de determinação bem como a equação comum, quando o caso se aplica.

Volume Específico Aparente (VEA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	VEA	$Y = 1,84529 - 0,02155X$	0,89529
D(EP)D/Paa	VEA	$Y = 1,87785 - 0,02350X$	0,89375
Comum	Y	$Y = 1,86146 - 0,02251X$	0,89278

Peso Específico Aparente (PEA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	PEA	$Y = 541,71000 + 9,34036X$	0,95310
D(EP)D/Paa	PEA	$Y = 532,30200 + 10,11090X$	0,95594
Comum	Y	$Y = 537,07200 + 9,71926X$	0,95281

Grau Schopper Riegler (°SR)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	°SR	$Y = 15,49140 + 0,93104X$	0,94901
D(EP)D/Paa	°SR	$Y = 16,45200 + 1,213970X$	0,98897
Comum	Y	$Y = 16,02730 + 1,06840X$	0,91274

Resistência à Passagem do Ar (RPA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	RPA	$Y = - 8,24359 + 1,83992X$	0,78673
D(EP)D/Paa	RPA	$Y = - 20,89330 + 3,96512X$	0,76613
Comum	Y	$Y = - 14,29200 + 2,87962X$	0,62471

Índice de estouro (IE)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	IE	$Y = 1,27559 + 0,11423X$	0,98873
D(EP)D/Paa	IE	$Y = 1,45957 + 0,11562X$	0,97155
Comum	Y	$Y = 1,36912 + 0,11483X$	0,97498

Índice de rasgo (IR)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	IR	$Y = 6,19594 + 0,35500X - 0,00771X^2$	0,78617
D(EP)D/Paa	IR	$Y = 5,45957 + 0,44626X - 0,00985X^2$	0,72504
Comum	Y	$Y = 5,82679 + 0,40137X - 0,00880X^2$	0,73928

Energia absorvida em regime de tração (ERT)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	ERT	$Y = 37,74990 + 3,99028X$	0,88686
D(EP)D/Paa	ERT	$Y = 39,77180 + 3,34243X$	0,88577
Comum	Y	$Y = 38,66360 + 3,67407X$	0,87157

Módulo de elasticidade específica (MOE)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	MOE	$Y = 3,70419 + 0,07893X$	0,84525
D(EP)D/Paa	MOE	$Y = 3,84799 + 0,08307X$	0,87431
Comum	Y	$Y = 3,77782 + 0,08089X$	0,85089

Índice de tração (IT)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	IT	$Y = 29,02270 + 1,58915X$	0,91159
D(EP)D/Paa	IT	$Y = 31,05630 + 1,46429X$	0,89922
Comum	Y	$Y = 30,03240 + 1,52756X$	0,90443

Alongamento (ALG)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	ALG	$Y = 2,55545 + 0,07136X$	0,82079
D(EP)D/Paa	ALG	$Y = 2,65593 + 0,05178X$	0,83292
Comum	Y	$Y = 2,60303 + 0,061788X$	0,78869

Opacidade (OPC)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D(EP)DD	OPC	$Y = 79,38400 - 0,24439X$	0,96065
D(EP)D/Paa	OPC	$Y = 77,51830 - 0,32202X$	0,96551
Comum	Y	$Y = 78,42460 - 0,28144X$	0,78762

Coefficiente de dispersão de luz (CDL)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D(EP)DD	CDL	$Y = 44,92670 - 0,47995X$	0,91825
D(EP)D/Paa	CDL	$Y = 41,83810 - 0,50088X$	0,99167
Comum	Y	$Y = 43,35690 - 0,48892X$	0,88670

Abaixo estão relacionadas as propriedades físico-mecânicas e ópticas das seqüências D*(EP)DD e D*(EP)D/Paa, seus respectivos modelos matemáticos que relacionam Brancura CIE (Y) e Alvura da polpa de celulose após branqueamento (X) e os coeficientes de determinação bem como a equação comum, quando o caso se aplica.

Volume Específico Aparente (VEA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*(EP)DD	VEA	$Y = 1,93218 - 0,02443X$	0,89064
D*(EP)D/Paa	VEA	$Y = 1,88911 - 0,02378X$	0,92330
Comum	Y	$Y = 1,91064 - 0,02411X$	0,90308

Peso Específico Aparente (PEA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*(EP)DD	PEA	$Y = 518,12400 + 10,07580X$	0,95360
D*(EP)D/Paa	PEA	$Y = 527,56000 + 10,16160X$	0,97314
Comum	Y	$Y = 522,95000 + 10,11250X$	0,96114

Grau Schopper Riegler (°SR)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*(EP)DD	°SR	$Y = 16,95380 + 0,96144X$	0,99055
D*(EP)D/Paa	°SR	$Y = 16,11000 + 1,23000X$	0,98161
Comum	Y	$Y = 16,65040 + 1,08826X$	0,95030

Resistência à Passagem do Ar (RPA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*(EP)DD	RPA	$Y = -10,33370 + 2,15870X$	0,75592
D*(EP)D/Paa	RPA	$Y = -19,08280 + 3,74460X$	0,74179
Comum	Y	$Y = -14,03590 + 2,90909X$	0,65881

Índice de estouro (IE)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)DD	IE	$Y = 1,31154 + 0,09680X$	0,96508
D*(EP)D/Paa	IE	$Y = 1,34387 + 0,12045X$	0,98150
Comum	Y	$Y = 1,33890 + 0,10793X$	0,93681

Índice de rasgo (IR)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)DD	IR	$Y = 5,30626 + 0,50826X - 0,01233X^2$	0,86338
D*(EP)D/Paa	IR	$Y = 5,48617 + 0,86911X - 0,02414X^2$	0,95011
Comum	Y	$Y = 5,36739 + 0,69329X - 0,01825X^2$	0,82839

Energia absorvida em regime de tração (ERT)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)DD	ERT	$Y = 37,20300 + 3,21901X$	0,89838
D*(EP)D/Paa	ERT	$Y = 24,08900 + 4,43533X$	0,97748
Comum	Y	$Y = 31,11540 + 3,79708X$	0,91587

Módulo de elasticidade específica (MOE)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)DD	MOE	$Y = 3,51279 + 0,09861X$	0,92641
D*(EP)D/Paa	MOE	$Y = 3,41520 + 0,10693X$	0,91843
Comum	Y	$Y = 3,46715 + 0,10257X$	0,92036

Índice de tração (IT)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)DD	IT	$Y = 28,82920 + 1,44566X$	0,91171
D*(EP)D/Paa	IT	$Y = 25,48240 + 1,79820X$	0,98148
Comum	Y	$Y = 27,29510 + 1,61303X$	0,93512

Alongamento (ALG)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)DD	ALG	$Y = 2,53475 + 0,05289X$	0,76790
D*(EP)D/Paa	ALG	$Y = 2,28530 + 0,06873X$	0,96674
Comum	Y	$Y = 2,41557 + 0,06045X$	0,86226

Opacidade (OPC)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)DD	OPC	$Y = 78,02010 - 0,28973X$	0,97344
D*(EP)D/Paa	OPC	$Y = 54,11050 + 0,07317X$	0,92196
Comum	Y	$Y = 66,06100 - 0,10929X$	0,00362

Coefficiente de dispersão de luz (CDL)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)DD	CDL	$Y = 43,61750 - 0,51041X$	0,94011
D*(EP)D/Paa	CDL	$Y = 48,04520 - 0,72973X$	0,99265
Comum	Y	$Y = 45,76160 - 0,61547X$	0,94305

Abaixo estão relacionadas as propriedades físico-mecânicas e ópticas da seqüência D*(EP)D/Paa, seus respectivos modelos matemáticos que relacionam Brancura CIE (Y) e Alvura da polpa de celulose após branqueamento (X) em diferentes valores de pH e os coeficientes de determinação bem como a equação comum, quando o caso se aplica.

Volume Específico Aparente (VEA)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*(EP)D/Paa	4,0	VEA	$Y = 1,84014 - 0,02194X$	0,93532
D*(EP)D/Paa	6,5	VEA	$Y = 1,88863 - 0,02434X$	0,92913
D*(EP)D/Paa	8,5	VEA	$Y = 1,85928 - 0,02065X$	0,91004
Comum	-	Y	$Y = 1,85981 - 0,02212X$	0,91566

Peso Específico Aparente (PEA)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*(EP)D/Paa	4,0	PEA	$Y = 540,21900 + 9,56785X$	0,97916
D*(EP)D/Paa	6,5	PEA	$Y = 526,82800 + 10,57140X$	0,97764
D*(EP)D/Paa	8,5	PEA	$Y = 537,32700 + 8,82629X$	0,95445
Comum	-	Y	$Y = 536,01800 + 9,56986X$	0,95941

Grau Schopper Riegler (°SR)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*(EP)D/Paa	4,0	°SR	$Y = 17,39290 + 1,28571X$	0,99801
D*(EP)D/Paa	6,5	°SR	$Y = 16,71000 + 1,03000X$	0,98727
D*(EP)D/Paa	8,5	°SR	$Y = 17,95620 + 0,84643X$	0,96228
Comum	-	Y	$Y = 17,75490 + 1,02277X$	0,90661

Resistência à Passagem do Ar (RPA)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)D/Paa	4,0	RPA	$Y = -18,74700 + 4,11423X$	0,77458
D*(EP)D/Paa	6,5	RPA	$Y = -16,00480 + 3,33277X$	0,75449
D*(EP)D/Paa	8,5	RPA	$Y = -16,94330 + 3,13797X$	0,73681
Comum	-	Y	$Y = -16,41140 + 3,46317X$	0,73154

Índice de estouro (IE)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)D/Paa	4,0	IE	$Y = 1,46728 + 0,12885X$	0,96022
D*(EP)D/Paa	6,5	IE	$Y = 1,27085 + 0,12844X$	0,99017
D*(EP)D/Paa	8,5	IE	$Y = 1,25286 + 0,12775X$	0,98796
Comum	-	Y	$Y = 1,34046 + 0,12776X$	0,97581

Índice de rasgo (IR)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)D/Paa	4,0	IR	$Y = 8,08959 + 0,09396X$	0,14262
D*(EP)D/Paa	6,5	IR	$Y = 7,28924 + 0,13664X$	0,31125
D*(EP)D/Paa	8,5	IR	$Y = 7,85204 + 0,11743X$	0,23908
Comum	-	Y	$Y = 7,73717 + 0,11680X$	0,22886

Energia absorvida em regime de tração (ERT)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)D/Paa	4,0	ERT	$Y = 24,94410 + 4,60035X$	0,98367
D*(EP)D/Paa	6,5	ERT	$Y = 27,92200 + 3,72100X$	0,88692
D*(EP)D/Paa	8,5	ERT	$Y = 25,17370 + 4,10786X$	0,96350
Comum	-	Y	$Y = 26,32240 + 4,11673X$	0,93404

Módulo de elasticidade específica (MOE)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)D/Paa	4,0	MOE	$Y = 3,50357 + 0,10714X$	0,90758
D*(EP)D/Paa	6,5	MOE	$Y = 3,41630 + 0,10590X$	0,91688
D*(EP)D/Paa	8,5	MOE	$Y = 3,77005 + 0,08517X$	0,88931
Comum	-	Y	$Y = 3,58122 + 0,09629X$	0,88626

Índice de tração (IT)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)D/Paa	4,0	IT	$Y = 29,49680 + 1,71725X$	0,95179
D*(EP)D/Paa	6,5	IT	$Y = 31,72610 + 1,42480X$	0,87784
D*(EP)D/Paa	8,5	IT	$Y = 27,81180 + 1,60614X$	0,97302
Comum	-	Y	$Y = 29,80370 + 1,57385X$	0,92847

Alongamento (ALG)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)D/Paa	4,0	ALG	$Y = 2,35322 + 0,07010X$	0,95728
D*(EP)D/Paa	6,5	ALG	$Y = 2,55730 + 0,06973X$	0,89971
D*(EP)D/Paa	8,5	ALG	$Y = 2,61221 + 0,06859X$	0,94040
Comum	-	Y	$Y = 2,49825 + 0,06996X$	0,92150

Opacidade (OPC)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*(EP)D/Paa	4,0	OPC	$Y = 83,66620 - 0,51404X$	0,99682
D*(EP)D/Paa	6,5	OPC	$Y = 77,56960 - 0,34470X$	0,95523
D*(EP)D/Paa	8,5	OPC	$Y = 77,63970 - 0,34869X$	0,94521
Comum	-	Y	$Y = 79,73560 - 0,40529X$	0,87047

Coefficiente de dispersão de luz (CDL)

Metodologia	pH	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D [*] (EP)D/Paa	4,0	CDL	$Y = 44,78920 - 0,75819X$	0,99137
D [*] (EP)D/Paa	6,5	CDL	$Y = 48,04130 - 0,75660X$	0,99721
D [*] (EP)D/Paa	8,5	CDL	$Y = 49,22640 - 0,67891X$	0,99460
Comum	-	Y	$Y = 47,07330 - 0,71410X$	0,92509

Abaixo estão relacionadas as propriedades físico-mecânicas e ópticas das seqüências D*/QP e D*/QP/Paa, seus respectivos modelos matemáticos que relacionam Brancura CIE (Y) e Alvura da polpa de celulose após branqueamento (X) e os coeficientes de determinação bem como a equação comum, quando o caso se aplica.

Volume Específico Aparente (VEA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*/QP	VEA	$Y = 1,88750 - 0,02348X$	0,94407
D*/QP/Paa	VEA	$Y = 1,78131 - 0,02433X$	0,91255
Comum	Y	$Y = 1,82108 - 0,02304X$	0,88503

Peso Específico Aparente (PEA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*/QP	PEA	$Y = 525,09300 + 10,15340X$	0,98684
D*/QP/Paa	PEA	$Y = 561,47100 + 10,85220X$	0,94453
Comum	Y	$Y = 548,94700 + 10,11630X$	0,92835

Grau Schopper Riegler (°SR)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*/QP	°SR	$Y = 17,37660 + 1,10554X$	0,95389
D*/QP/Paa	°SR	$Y = 19,49870 + 1,48285X$	0,99684
Comum	Y	$Y = 19,67640 + 1,19836X$	0,87914

Resistência à Passagem do Ar (RPA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
D*/QP	RPA	$Y = -18,59160 + 3,67981X$	0,73778
D*/QP/Paa	RPA	$Y = -13,82950 + 3,90117X$	0,78895
Comum	Y	$Y = -15,11840 + 3,71161X$	0,75062

Índice de estouro (IE)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*/QP	IE	$Y = 1,42058 + 0,11373X$	0,98168
D*/QP/Paa	IE	$Y = 1,90122 + 0,10704X$	0,87729
Comum	Y	$Y = 1,69276 + 0,10875X$	0,91979

Índice de rasgo (IR)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*/QP	IR	$Y = 5,68641 + 0,43209X - 0,01106 X^2$	0,76994
D*/QP/Paa	IR	$Y = 6,01244 + 0,19163X - 0,00522 X^2$	0,38096
Comum	Y	$Y = 5,92323 + 0,24447X - 0,00562 X^2$	0,45198

Energia absorvida em regime de tração (ERT)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*/QP	ERT	$Y = 49,62980 + 2,81663X$	0,80011
D*/QP/Paa	ERT	$Y = 74,11950 + 1,80383X$	0,26618
Comum	Y	$Y = 61,68550 + 2,37299X$	0,53245

Módulo de elasticidade específica (MOE)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*/QP	MOE	$Y = 3,39583 + 0,09967X$	0,94746
D*/QP/Paa	MOE	$Y = 3,64266 + 0,10464X$	0,87039
Comum	Y	$Y = 3,55831 + 0,09948X$	0,89543

Índice de tração (IT)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*/QP	IT	$Y = 30,44600 + 1,37248X$	0,90602
D*/QP/Paa	IT	$Y = 36,50480 + 1,18708X$	0,63369
Comum	Y	$Y = 33,60450 + 1,28112X$	0,78445

Alongamento (ALG)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*/QP	ALG	$Y = 3,18935 + 0,03342X$	0,43889
D*/QP/Paa	ALG	$Y = 3,92971 + 0,00123X$	0,42855
Comum	Y	$Y = 3,54957 + 0,01956X$	0,13155

Opacidade (OPC)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*/QP	OPC	$Y = 77,65890 - 0,32247X$	0,99545
D*/QP/Paa	OPC	$Y = 78,70420 - 0,42512X$	0,99838
Comum	Y	$Y = 78,01310 - 0,35818X$	0,97367

Coefficiente de dispersão de luz (CDL)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
D*/QP	CDL	$Y = 44,08410 - 0,57023X$	0,97501
D*/QP/Paa	CDL	$Y = 44,52170 - 0,68236X$	0,98112
Comum	Y	$Y = 44,04580 - 0,60470X$	0,96128

Abaixo estão relacionadas as propriedades físico-mecânicas e ópticas das seqüências Z/EDP e Z/ED/Paa, seus respectivos modelos matemáticos que relacionam Brancura CIE (Y) e Alvura da polpa de celulose após branqueamento (X) e os coeficientes de determinação bem como a equação comum, quando o caso se aplica.

Volume Específico Aparente (VEA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
Z/EDP	VEA	$Y = 1,85361 - 0,02530X$	0,93807
Z/ED/Paa	VEA	$Y = 1,88647 - 0,02912X$	0,90549
Comum	Y	$Y = 1,87020 - 0,02721$	0,91304

Peso Específico Aparente (PEA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
Z/EDP	PEA	$Y = 538,89500 + 10,34690X$	0,96341
Z/ED/Paa	PEA	$Y = 531,40100 + 11,99160X$	0,95147
Comum	Y	$Y = 535,14600 + 11,16220X$	0,94595

Grau Schopper Riegler (°SR)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
Z/EDP	°SR	$Y = 18,80310 + 1,25496X$	0,98224
Z/ED/Paa	°SR	$Y = 17,60480 + 1,23826X$	0,96857
Comum	Y	$Y = 18,19110 + 1,24758X$	0,97186

Resistência à Passagem do Ar (RPA)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r²
Z/EDP	RPA	$Y = -5,29609 + 1,90577X$	0,82178
Z/ED/Paa	RPA	$Y = -8,69670 + 2,53503X$	0,70033
Comum	Y	$Y = -7,00246 + 2,21808X$	0,71486

Índice de estouro (IE)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
Z/EDP	IE	$Y = 1,44264 + 0,13028X$	0,94610
Z/ED/Paa	IE	$Y = 1,41723 + 0,14370X$	0,93391
Comum	Y	$Y = 1,43028 + 0,13691X$	0,93331

Índice de rasgo (IR)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
Z/EDP	IR	$Y = 6,05272 + 0,36377X - 0,00977 X^2$	0,86366
Z/ED/Paa	IR	$Y = 5,97571 + 0,45140X - 0,01306 X^2$	0,93239
Comum	Y	$Y = 6,01896 + 0,40720X - 0,01142 X^2$	0,89046

Energia absorvida em regime de tração (ERT)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
Z/EDP	ERT	$Y = 52,69630 + 3,36232X$	0,71416
Z/ED/Paa	ERT	$Y = 52,37320 + 3,86153X$	0,62595
Comum	Y	$Y = 52,55400 + 3,60842X$	0,65288

Módulo de elasticidade específica (MOE)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
Z/EDP	MOE	$Y = 3,34652 + 0,12010X$	0,92272
Z/ED/Paa	MOE	$Y = 3,47437 + 0,12864X$	0,91147
Comum	Y	$Y = 3,41213 + 0,12422X$	0,90585

Índice de tração (IT)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
Z/EDP	IT	$Y = 30,85520 + 1,66102X$	0,86128
Z/ED/Paa	IT	$Y = 30,81990 + 1,94650X$	0,83848
Comum	Y	$Y = 30,85010 + 1,80165X$	0,83214

Alongamento (ALG)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
Z/EDP	ALG	$Y = 3,20003 + 0,04414X$	0,45026
Z/ED/Paa	ALG	$Y = 2,95778 + 0,05893X$	0,41778
Comum	Y	$Y = 3,07712 + 0,05159X$	0,42025

Opacidade (OPC)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
Z/EDP	OPC	$Y = 79,62250 - 0,36690X$	0,98365
Z/ED/Paa	OPC	$Y = 79,93450 - 0,46365X$	0,99326
Comum	Y	$Y = 79,77730 - 0,41477X$	0,95842

Coefficiente de dispersão de luz (CDL)

Metodologia	Propriedade	Equações ajustadas	r ²
Z/EDP	CDL	$Y = 47,69880 - 0,72785X$	0,96192
Z/ED/Paa	CDL	$Y = 44,44590 - 0,71357X$	0,96132
Comum	Y	$Y = 46,04010 - 0,71853X$	0,91665

APÊNDICE D

Os valores médios das propriedades físico-mecânicas e ópticas, para todos os tratamentos, encontram-se sumarizados abaixo.

Amostras D(EP)DD e D(EP)D/Paa

Amostra	Revoluções	Resistência à drenagem (°SR)	Consumo Energia PFI (Wh)	Gramatura (g/m ²)	Espessura (µm.m)	Volume específico aparente (cm ³ /g)	Peso específico aparente (Kg/m ³)
D(EP)DD	0	18	0	62,99	122	1,94	516,31
D(EP)DD	1000	23	13	64,30	91	1,42	706,59
D(EP)DD	2000	41	26	63,19	81	1,28	780,12
D(EP)DD	2500	47	33	63,56	76	1,20	836,32
D(EP)D/Paa	0	18	0	61,70	122	1,98	505,74
D(EP)D/Paa	1000	30	13	63,32	90	1,42	703,56
D(EP)D/Paa	2000	46	25	63,61	80	1,26	795,13
D(EP)D/Paa	2500	58	33	63,20	75	1,19	842,67

Amostra	Revoluções	Resistência a passagem de ar (s/100cm³)	Índice de estouro (KPa.m²/g)	Índice de Rasgo (µm.m²/g)	Energia Absorvida em regime de Tração (J/m²)	Módulo de Elasticidade Específica (MN.m/Kg)
D(EP)DD	0	0,88	1,15	6,08	25,4	3,29
D(EP)DD	1000	5,32	2,92	9,89	102,3	5,36
D(EP)DD	2000	26,17	4,39	9,76	163,5	5,91
D(EP)DD	2500	67,13	4,87	9,63	147,1	5,94
D(EP)D/Paa	0	0,90	1,22	5,38	30,4	3,46
D(EP)D/Paa	1000	6,72	3,35	9,87	90,5	5,53
D(EP)D/Paa	2000	48,17	4,38	10,11	143,8	6,02
D(EP)D/Paa	2500	142,16	5,10	9,62	131,7	6,28

Amostra	Revoluções	Índice de Tração (N.m/g)	Alongamento (%)	Opacidade (%)	Coefficiente de dispersão de luz (m²/Kg)
D(EP)DD	0	24,05	2,21	79,89	46,58
D(EP)DD	1000	55,64	3,91	75,19	35,64
D(EP)DD	2000	76,76	4,82	73,55	33,36
D(EP)DD	2500	74,06	4,42	71,31	29,57
D(EP)D/Paa	0	25,89	2,47	76,77	41,48
D(EP)D/Paa	1000	56,19	3,48	74,55	36,18
D(EP)D/Paa	2000	73,73	4,34	69,51	28,66
D(EP)D/Paa	2500	72,38	4,01	66,38	25,47

Amostras D_{HT}(EP)DD e D_{HT}(EP)D/Paa

Amostra	Revoluções	Resistência à drenagem (°SR)	Consumo Energia PFI (Wh)	Gramatura (g/m²)	Espessura (µm.m)	Volume específico aparente (cm³/g)	Peso específico aparente (Kg/m³)
D _{HT} (EP)DD	0	18	0	63,25	129	2,04	490,31
D _{HT} (EP)DD	1000	28	13	63,11	91	1,44	693,52
D _{HT} (EP)DD	2000	42	27	63,61	80	1,26	795,13
D _{HT} (EP)DD	2500	50	33	63,01	76	1,21	829,08
D _{HT} (EP)D/Paa	0	18	0	62,06	122	1,97	508,69
D _{HT} (EP)D/Paa	1000	30	14	64,59	92	1,42	702,07
D _{HT} (EP)D/Paa	2000	48	26	64,45	81	1,26	795,68
D _{HT} (EP)D/Paa	2500	57	32	66,00	79	1,20	835,44

Amostra	Revoluções	Resistência a passagem de ar (s/100cm³)	Índice de estouro (KPa.m²/g)	Índice de Rasgo (µm.m²/g)	Energia Absorvida em regime de Tração (J/m²)	Módulo de Elasticidade Específica (MN.m/Kg)
D_{HT}(EP)DD	0	0,70	1,09	5,17	24,8	3,19
D_{HT}(EP)DD	1000	4,84	2,97	10,25	96,7	5,26
D_{HT}(EP)DD	2000	30,23	3,85	9,37	133,5	6,4
D_{HT}(EP)DD	2500	80,48	4,41	9,03	128,8	6,4
D_{HT}(EP)D/Paa	0	0,77	1,17	5,45	25,3	3,08
D_{HT}(EP)D/Paa	1000	7,03	3,37	13,07	79,7	5,43
D_{HT}(EP)D/Paa	2000	51,33	4,38	11,54	152,4	6,43
D_{HT}(EP)D/Paa	2500	134,15	5,13	8,71	158,3	6,42

Amostra	Revoluções	Índice de Tração (N.m/g)	Alongamento (%)	Opacidade (%)	Coefficiente de dispersão de luz (m²/Kg)
D_{HT}(EP)DD	0	23,73	2,17	78,62	45,2
D_{HT}(EP)DD	1000	54,81	3,81	73,29	34,55
D_{HT}(EP)DD	2000	71,95	4,01	70,11	29,24
D_{HT}(EP)DD	2500	70,36	4,01	68,91	28,22
D_{HT}(EP)D/Paa	0	23,83	2,26	79,7	48,75
D_{HT}(EP)D/Paa	1000	52,27	3,21	4,96	36,58
D_{HT}(EP)D/Paa	2000	76,21	4,32	70,06	29,06
D_{HT}(EP)D/Paa	2500	79,09	4,3	66,99	25,25

Amostra D_{HT}(EP)D/Paa com variação de pH

Amostra	pH	Revoluções	Resistência à drenagem (°SR)	Consumo de energia PFI (Wh)	Gramatura (g/m²)	Espessura (μ.m)	Volume Específico Aparente (cm³/g)
D _{HT} (EP)D/Paa	4,0	0	18	0	63,42	121	1,91
D _{HT} (EP)D/Paa	4,0	1000	32	12	63,14	93	1,47
D _{HT} (EP)D/Paa	4,0	2000	49	25	62,95	80	1,27
D _{HT} (EP)D/Paa	4,0	2500	58	31	63,26	77	1,22
D _{HT} (EP)D/Paa	6,5	0	18	0	65,19	128	1,96
D _{HT} (EP)D/Paa	6,5	1000	29	14	64,72	92	1,42
D _{HT} (EP)D/Paa	6,5	2000	43	26	63,12	78	1,24
D _{HT} (EP)D/Paa	6,5	2500	51	32	64,33	76	1,18
D _{HT} (EP)D/Paa	8,5	0	20	0	63,52	123	1,94
D _{HT} (EP)D/Paa	8,5	1000	27	15	64,13	92	1,43
D _{HT} (EP)D/Paa	8,5	2000	41	27	63,10	79	1,25
D _{HT} (EP)D/Paa	8,5	2500	49	35	62,07	76	1,22

Amostra	pH	Peso Específico Aparente (Kg/m³)	Resistência à Passagem de Ar (s/100cm³)	Índice de Estouro (Kpa.m²/g)	Índice de Rasgo (µm.m²/g)	Energia absorvida em regime de tração (J/m²)
D_{HT}(EP)D/Paa	4,0	524,13	0,82	1,18	5,36	24,8
D_{HT}(EP)D/Paa	4,0	678,92	8,03	3,54	13,49	76,8
D_{HT}(EP)D/Paa	4,0	786,88	54,56	4,52	10,99	151,3
D_{HT}(EP)D/Paa	4,0	821,56	141,37	5,40	8,90	159,7
D_{HT}(EP)D/Paa	6,5	509,30	1,08	1,13	5,14	24,7
D_{HT}(EP)D/Paa	6,5	703,48	8,01	3,32	12,55	77,2
D_{HT}(EP)D/Paa	6,5	809,23	47,46	4,62	12,28	150,3
D_{HT}(EP)D/Paa	6,5	846,45	119,39	5,27	9,03	127,4
D_{HT}(EP)D/Paa	8,5	516,42	1,28	1,16	5,34	25,2
D_{HT}(EP)D/Paa	8,5	697,07	9,32	3,42	13,44	79,9
D_{HT}(EP)D/Paa	8,5	798,73	40,07	4,46	12,46	153,2
D_{HT}(EP)D/Paa	8,5	816,71	123,18	5,80	9,22	158,7

Amostra	pH	Módulo de Elasticidade Específica (MN.m/Kg)	Índice de Tração (N.m/g)	Alongamento (%)	Opacidade (%)	Coefficiente de dispersão de luz (m²/Kg)
D_{HT}(EP)D/Paa	4,0	3,12	24,93	2,27	83,80	45,58
D_{HT}(EP)D/Paa	4,0	5,34	57,21	3,25	77,12	34,56
D_{HT}(EP)D/Paa	4,0	6,42	73,52	4,36	71,32	25,33
D_{HT}(EP)D/Paa	4,0	6,42	79,10	4,30	67,47	22,13
D_{HT}(EP)D/Paa	6,5	3,08	25,76	2,31	77,08	47,96
D_{HT}(EP)D/Paa	6,5	5,42	62,16	3,92	73,21	37,85
D_{HT}(EP)D/Paa	6,5	6,4	69,13	4,53	69,82	27,60
D_{HT}(EP)D/Paa	6,5	6,39	72,44	4,49	65,35	24,28
D_{HT}(EP)D/Paa	8,5	3,42	26,01	2,40	78,66	49,57
D_{HT}(EP)D/Paa	8,5	5,56	53,02	4,01	70,57	38,82
D_{HT}(EP)D/Paa	8,5	6,02	76,27	4,47	68,36	29,95
D_{HT}(EP)D/Paa	8,5	6,28	79,62	4,85	66,12	26,29

Amostras D_{HT}/QP e D_{HT}/QP/Paa

Amostra	Revoluções	Resistência à drenagem (°SR)	Consumo Energia PFI (Wh)	Gramatura (g/m²)	Espessura (µm.m)	Volume específico aparente (cm³/g)	Peso específico aparente (Kg/m³)
D _{HT} /QP	0	20	0	61,39	120	1,95	511,58
D _{HT} /QP	1000	28	13	63,04	93	1,48	677,85
D _{HT} /QP	2000	44	26	62,04	78	1,26	795,38
D _{HT} /QP	2500	56	32	63,57	76	1,20	836,45
D _{HT} /QP/Paa	0	20	0	64,06	118	1,84	542,88
D _{HT} /QP/Paa	1000	36	12	62,87	88	1,40	714,43
D _{HT} /QP/Paa	1500	50	20	62,87	78	1,24	806,03
D _{HT} /QP/Paa	2000	58	26	61,71	76	1,23	811,97

Amostra	Revoluções	Resistência à passagem de ar (s/100cm³)	Índice de estouro (KPa.m²/g)	Índice de Rasgo (µm.m²/g)	Energia Absorvida em regime de Tração (J/m²)	Módulo de Elasticidade Específica (MN.m/Kg)
D _{HT} /QP	0	0,84	1,27	5,55	32,9	3,12
D _{HT} /QP	1000	5,88	3,10	9,88	114,6	5,13
D _{HT} /QP	2000	47,44	4,55	8,75	122,3	6,07
D _{HT} /QP	2500	132,74	4,83	8,23	128,7	6,34
D _{HT} /QP/Paa	0	1,27	1,56	5,85	48,4	3,3
D _{HT} /QP/Paa	1000	13,01	3,73	8,32	140,1	5,46
D _{HT} /QP/Paa	1500	45,37	4,24	7,79	118,2	5,91
D _{HT} /QP/Paa	2000	111,30	4,28	6,82	94,4	5,97

Amostra	Revoluções	Índice de Tração (N.m/g)	Alongamento (%)	Opacidade (%)	Coefficiente de dispersão de luz (m²/Kg)
D _{HT} /QP	0	25,19	2,74	77,69	45,13
D _{HT} /QP	1000	57,15	4,38	73,28	34,77
D _{HT} /QP	2000	66,1	4,06	69,7	29,7
D _{HT} /QP	2500	70,79	3,95	67,07	26,25
D _{HT} /QP/Paa	0	28,76	3,42	78,66	45,33
D _{HT} /QP/Paa	1000	64,03	4,85	73,57	34,98
D _{HT} /QP/Paa	1500	62,82	4,05	70,47	30,53
D _{HT} /QP/Paa	2000	59,26	3,47	67,46	27,67

Amostras Z/EDP e Z/ED/Paa

Amostra	Revoluções	Resistência à drenagem (°SR)	Consumo Energia PFI (Wh)	Gramatura (g/m²)	Espessura (µm.m)	Volume específico aparente (cm³/g)	Peso específico aparente (Kg/m³)
Z/EDP	0	20	0	64,78	123	1,90	526,67
Z/EDP	1000	33	13	62,86	91	1,45	690,77
Z/EDP	1500	43	20	63,52	83	1,31	765,30
Z/EDP	2000	52	25	62,61	81	1,29	772,96
Z/ED/Paa	0	18	0	63,20	124	1,96	509,68
Z/ED/Paa	1000	33	12	63,09	88	1,39	716,93
Z/ED/Paa	1500	39	20	62,50	81	1,30	771,60
Z/ED/Paa	2000	51	25	62,44	77	1,23	810,91

Amostra	Revoluções	Resistência à passagem de ar (s/100cm³)	Índice de estouro (KPa.m²/g)	Índice de Rasgo (µm.m²/g)	Energia Absorvida em regime de Tração (J/m²)	Módulo de Elasticidade Específica (MN.m/Kg)
Z/EDP	0	1,06	1,24	5,77	37	3,09
Z/EDP	1000	8,02	3,45	9,34	128,5	5,42
Z/EDP	1500	28,54	4,31	9,35	121,4	5,802
Z/EDP	2000	51,73	4,33	8,93	118,9	6,04
Z/ED/Paa	0	0,89	1,12	6,00	28,4	3,16
Z/ED/Paa	1000	10,47	3,76	9,45	143,7	5,66
Z/ED/Paa	1500	23,33	4,17	9,89	132,5	5,95
Z/ED/Paa	2000	75,02	4,81	9,05	125	6,46

Amostra	Revoluções	Índice de Tração (N.m/g)	Alongamento (%)	Opacidade (%)	Coefficiente de dispersão de luz (m²/Kg)
Z/EDP	0	26,01	2,84	79,92	48,63
Z/EDP	1000	62,97	4,5	74,41	36,81
Z/EDP	1500	63,05	4,14	71,86	31,91
Z/EDP	2000	67,73	3,88	71,02	31,23
Z/ED/Paa	0	23,96	2,4	80,06	45,59
Z/ED/Paa	1000	67,17	4,69	73,93	33,65
Z/ED/Paa	1500	70,27	4,26	71,18	30,26
Z/ED/Paa	2000	72,83	3,84	68,14	27,61