

DANIELA CORREIA MARTINO

**ESTUDO DA BRANQUEABILIDADE E DA QUALIDADE DE POLPAS DE
Eucalyptus spp. DE DIFERENTES ORIGENS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2011

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

T

M386e
2011

Martino, Daniela Correia, 1981-

Estudo da branqueabilidade e da qualidade de polpas de
Eucalyptus spp. de diferentes origens / Daniela Correia
Martino. – Viçosa, MG, 2011.
vi, 56f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Jorge Luiz Colodette.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Madeira - Composição. 2. Polpação alcalina por sulfato.
3. *Eucalyptus*. 4. Polpa de madeira - Branqueamento.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.986

DANIELA CORREIA MARTINO

**ESTUDO DA BRANQUEABILIDADE E DA QUALIDADE DE POLPAS DE
Eucalyptus spp. DE DIFERENTES ORIGENS**

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

APROVADA: 25 de Julho de 2011.

Prof. José Lívio Gomide
(Co-orientador)

Prof^ª. Deusanilde de Jesus Silva

Prof. Jorge Luiz Colodette
(Orientador)

À minha mãe, Gilda.
À minha irmã Nayara.
À minha família.
Aos meus amigos.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida, saúde, força e fé para superar todos os obstáculos.

À minha mãe, Gilda, pelo amor incondicional, carinho e incentivo em todos os momentos.

À minha irmã, Nayara, pela amizade, incentivo e carinho.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), e ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) pela oportunidade de realizar o mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador professor Jorge Luiz Colodette, agradeço pelos ensinamentos, amizade e dedicação na orientação dos trabalhos realizados.

Aos meus co-orientadores professores José Lívio Gomide e Rubens Chaves de Oliveira, pela ajuda no presente trabalho, pelos ensinamentos e pela amizade.

À professora Deusanilde pela participação e colaboração na banca de defesa.

Às empresas que forneceram o material utilizado neste estudo.

À Ritinha e ao Alexandre pela constante ajuda e dedicação.

À minha estagiária Dayana, ao Dalton, ao Humberto, ao Marcão e à Teresa pela ajuda neste trabalho e amizade.

Às amigas Valéria, Letícia, Lívia, Eliane e Ana.

Aos funcionários e amigos do Laboratório de Celulose e Papel, pelo apoio, amizade e atenção.

Enfim, agradeço a todos que participaram desta conquista!

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRAS E DE POLPAS DE <i>Eucalyptus</i> spp. DE DIFERENTES ORIGENS	3
1. Introdução	3
2. Material e Métodos.....	4
3. Resultados e discussão	7
4. Conclusões	12
5. Referências bibliográficas	12
CAPÍTULO II: COMPARAÇÃO DA BRANQUEABILIDADE E DA QUALIDADE DE POLPAS DE <i>Eucalyptus</i> spp. PRODUZIDAS EM LABORATÓRIO E EM ESCALA INDUSTRIAL.....	15
1. Introdução	15
2. Material e Métodos.....	16
3. Resultados e discussão	21
4. Conclusões.....	37
5. Referências bibliográficas	37
3. CONCLUSÕES GERAIS	41
APÊNDICES	42
APÊNDICE A	43
APÊNDICE B.....	49

RESUMO

MARTINO, Daniela Correia. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011.
Estudo da branqueabilidade e da qualidade de polpas de *Eucalyptus* spp. de diferentes origens. Orientador: Jorge Luiz Colodette. Co-orientadores: José Lívio Gomide e Rubens Chaves de Oliveira.

A branqueabilidade de polpas pode ser afetada por diferentes fatores, como a composição química da madeira e as condições utilizadas no processo de polpação. Este estudo objetivou identificar os possíveis fatores que afetam a branqueabilidade de polpas de eucalipto de diferentes origens. Determinou-se a densidade e a composição química de madeiras de duas fábricas de celulose, designadas como A e B. Foram avaliados os comportamentos destas madeiras em relação à polpação realizada em laboratório e comparados os parâmetros das polpas não branqueadas laboratoriais com os parâmetros das polpas não branqueadas industriais. Da mesma maneira, compararam-se os parâmetros das polpas pré-deslignificadas laboratoriais e industriais. Os cozimentos e os branqueamentos foram realizados nas mesmas condições. A densidade básica da madeira A foi 480 kg/m³ e a da madeira B foi 473 kg/m³. Os teores de carboidratos das madeiras também foram semelhantes. A variação entre os valores de alvura das polpas não branqueadas laboratoriais foi de 0,3% ISO e a variação entre os valores de alvura das polpas não branqueadas industriais foi superior a 4,0% ISO. A branqueabilidade da polpa pré-deslignificada industrial da fábrica A foi maior que a da fábrica B que apresentou menor alvura inicial. Os principais fatores que afetaram a branqueabilidade das polpas estudadas foram a alvura e o teor de ácidos hexenurônicos iniciais resultantes do cozimento industrial. A polpa industrial B apresentou índice de rasgo significativamente menor que a polpa industrial A.

ABSTRACT

MARTINO, Daniela Correia. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011.
Bleachability and quality study of the pulp of *Eucalyptus* spp. from different sources. Advisor: Jorge Luiz Colodette. Co-advisors: José Lívio Gomide and Rubens Chaves de Oliveira.

The pulp bleachability can be affected by different factors, such as the chemical composition of the wood and the conditions used in the pulping process. This study aimed to identify the possible factors that affect the bleachability of eucalypt pulps from different sources. It was determined the density and the wood chemical composition of two pulp mills, designated A and B. The behavior of these woods was evaluated in relation to pulping performed in the laboratory and the parameters of unbleached laboratorial pulps were compared with the parameters of unbleached industrial pulps. Likewise, the parameters of the laboratorial and industrial pre-delignificated pulps were compared. The pulping and bleaching were carried out at the same conditions. The basic density of the wood A was 480 kg/m³ and B was 473 kg/m³. The carbohydrate contents of the wood were also similar. The variation between the brightness values of the unbleached laboratorial pulps were 0.3% ISO and the variation between the brightness values of the unbleached industrial pulps was more than 4.0% ISO. The bleachability of the industrial pre-delignificated pulp from the factory A was higher than the factory B which showed a lower initial brightness. The main factors affected the studied pulp bleachability were the brightness and the initial hexenuronic acid content resulting from the industrial cooking. The industrial pulp B showed a significantly lower tear index than the industrial pulp A.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Este estudo está dividido em dois artigos: no primeiro são comparadas as composições químicas de duas madeiras e seus comportamentos quanto à polpação e, também, são comparados os parâmetros de polpação das polpas não branqueadas produzidas em laboratório com os parâmetros das polpas não branqueadas industriais; no segundo são comparadas a aptidão ao branqueamento e a qualidade de polpas produzidas em laboratório e polpas industriais e discutido qual (is) possível (is) fator (es) que afeta (m) a branqueabilidade das polpas.

Nos últimos anos, foram realizados vários estudos de branqueabilidade de polpas de eucalipto (COLODETTE et al., 2002; PASCOAL NETO et al., 2002; PASCOAL NETO et al., 2011; COLODETTE et al., 1999). Um dos motivos foi o desenvolvimento do branqueamento ECF (*Elemental Chlorine Free*), com consequente aumento no custo de reagentes químicos de branqueamento. Cortes no custo de operação realizados com a finalidade de aumentar a rentabilidade da produção de polpa foram outro motivo. Estas razões evidenciam a importância da questão da branqueabilidade; entender o que faz uma polpa ser mais difícil de branquear do que outra pode ser de grande valor para o ajuste ou modificação de processos (LACHENAL et al., 2005).

O suprimento heterogêneo de madeira pode afetar a branqueabilidade, o rendimento e a qualidade da polpa (COLODETTE et al., 2002). As condições de cozimento afetam a composição química das polpas produzidas e, conseqüentemente, a aptidão destas polpas ao branqueamento (PASCOAL NETO et al., 2002). A resposta ao

branqueamento também é afetada pelas sequências de branqueamento utilizadas (DUARTE e BAPTISTA, 2003).

Modificações nas hemiceluloses, complexos lignina-carboidratos e teor de ácidos hexenurônicos podem ser devidos às condições de polpação (DUARTE e BAPTISTA, 2003). Polpação com alta carga de álcali efetivo proporciona menor teor de ácidos hexenurônicos na polpa e o grau de retenção desses ácidos afeta o rendimento (COLODETTE et al., 2002).

As principais aplicações da polpa branqueada de eucalipto são para produção de papéis de imprimir e escrever (P & W) e papéis para fins sanitários (*tissue*), no entanto as propriedades desejáveis para papéis P & W e papéis *tissue* podem ser diferentes (PEDRAZZI, 2009). Uma vez que as condições de processo utilizadas afetam determinados parâmetros da polpa, as propriedades do papel também podem ser afetadas.

Fatores como a composição química da madeira e as condições do processo de cozimento, por exemplo, podem afetar a branqueabilidade da polpa. Entretanto, a importância de cada um deles não está claramente entendida (COLODETTE et al., 2002). A análise dos constituintes químicos da madeira e o controle das condições em que são processados os cavacos se fazem pertinentes para que se possa atribuir qual é a responsabilidade de cada um deles na branqueabilidade da polpa.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a composição química de madeiras de diferentes procedências e estudar o comportamento destas madeiras quanto à polpação laboratorial. Outro objetivo foi comparar parâmetros de polpas produzidas em laboratório com parâmetros de polpas industriais. Finalmente, avaliar a demanda de reagentes químicos para branqueamento de polpas de diferentes origens para determinar quais são os possíveis fatores que afetam a branqueabilidade da polpa.

CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRAS E DE POLPAS DE *Eucalyptus* spp. DE DIFERENTES ORIGENS

Resumo: este estudo avaliou a densidade e a composição química de duas madeiras de diferentes origens. Avaliou-se o comportamento das madeiras em relação à polpação laboratorial e compararam-se os parâmetros das polpas não branqueadas laboratoriais com os parâmetros das polpas não branqueadas industriais. A densidade básica da madeira A foi 480 kg/m³ e da madeira B foi 473 kg/m³. As composições dos carboidratos das madeiras foram similares e os teores de lignina total foram os mesmos para ambas as madeiras. O teor de extrativos em acetona da madeira A foi 1,6% e da madeira B foi 1,1%. A variação entre os valores de alvura das polpas não branqueadas laboratoriais foi de 0,3% ISO e a variação entre os valores de alvura das polpas não branqueadas industriais foi de 4,2% ISO. A composição química das madeiras não variou suficientemente para afetar o comportamento das polpas quanto à polpação laboratorial. No geral, as polpas produzidas em laboratório apresentaram características de branqueabilidade superiores às polpas industriais, o que pode ser comprovado pela maior alvura apresentada pelas polpas produzidas em laboratório.

Palavras-chave: composição química, polpação LoSolids[®], *Eucalyptus*.

1. Introdução

O comportamento das polpas no processo de branqueamento está associado às características químicas e estruturais da madeira. Compreender como essa composição e estrutura afeta a sua branqueabilidade é importante para a escolha e melhoria dos clones, para o aperfeiçoamento das condições processuais do branqueamento, para a melhoria na qualidade do produto final e para a redução do impacto ambiental da indústria de papel e celulose (PASCOAL NETO et al., 2011).

Outro aspecto importante e que define a branqueabilidade da polpa é a tecnologia de polpação associada às condições de processo. As condições de polpação afetam a natureza da lignina residual, a composição dos carboidratos da polpa e o conteúdo de lignina lixiviável em álcali, de complexos lignina-carboidratos e de ácidos hexenurônicos presentes em polpas Kraft de folhosas. Todos estes fatores afetam a branqueabilidade e a estabilidade de alvura de polpas branqueadas (COLODETTE et al., 2002).

O objetivo deste estudo foi caracterizar madeiras de diferentes origens quanto à composição química e seu comportamento quanto à polpação LoSolids[®] laboratorial e

industrial. Um objetivo secundário foi comparar os parâmetros das polpas não branqueadas industriais com os parâmetros das polpas produzidas em laboratório.

2. Material e Métodos

Neste estudo foram utilizados cavacos industriais de *Eucalyptus* spp., coletados após a peneira de classificação de duas fábricas de celulose brasileiras, designadas neste trabalho como A e B. Também foram utilizadas polpas não branqueadas (marrons) industriais, respeitando o tempo de residência no digestor, e polpas não branqueadas laboratoriais produzidas com os cavacos mencionados acima. A Figura 1 representa o esquema de trabalho.

Os cavacos industriais foram secos ao ar, com objetivo de atingir um teor de umidade uniforme e estável. Posteriormente, foram classificados em laboratório por sistema de peneiramento (peneiras 12,5 x 12,5 mm). A fração de cavacos aceitos foi novamente classificada, manualmente, para retirar os cavacos exageradamente grandes (over size), nós e cavacos com defeitos de corte. Para a homogeneização dos cavacos, foi utilizado um misturador esférico mecânico com capacidade para 260 L. Após a homogeneização os cavacos foram acondicionados em sacos de polietileno.

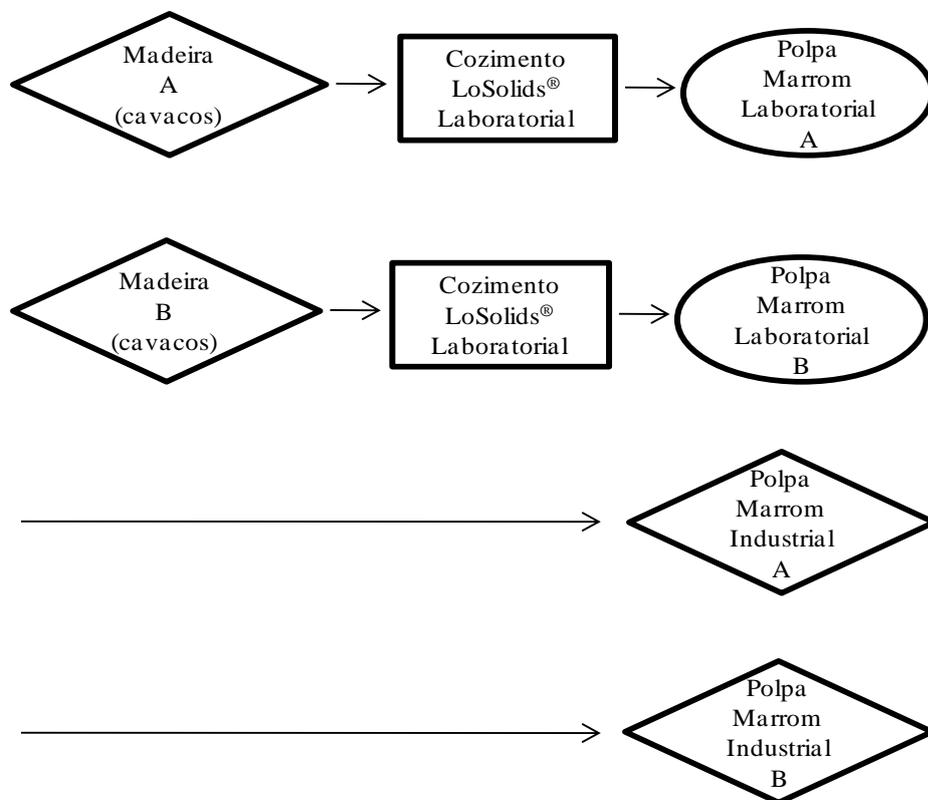


Figura 1 – Esquema de trabalho.

Para cada madeira foram utilizados 250 cavacos para determinação de espessura, realizando-se mensurações com paquímetro.

Para a caracterização química das madeiras, utilizou-se uma amostra de cavacos de cada fábrica. As amostras foram transformadas em serragem utilizando-se o moinho Wiley. A serragem produzida foi classificada em peneiras de malhas de 40 e 60 mesh, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 40 e ficou retida na peneira de 60 mesh.

Os procedimentos utilizados para as análises químicas neste estudo foram: densidade básica dos cavacos (ABNT-NBR 11941); densidade aparente dos cavacos (ABNT 29:004.01-004); lignina insolúvel em ácido conforme Gomide e Demuner (1986); lignina solúvel em ácido conforme Goldschmid (1971); análise de grupos siringil e guaiacil conforme Lin & Dence (1992), por cromatografia líquida após oxidação com nitrobenzeno; grupos acetil segundo Solar et al. (1987) e ácidos urônicos conforme Scott (1979). Os seguintes procedimentos TAPPI foram utilizados: extrativos em acetona (T280 pm-99); extrativos em etanol/tolueno (T204 cm-97); extrativos totais (T264 cm-97) e metais (T266 om- 94). O teor de carboidratos foi determinado de acordo com Wallis et al. (1996b). A fração de glicose proveniente das glicomananas foi estimada a partir do teor de manose, utilizando-se relações glicose/manose relatadas na literatura. Segundo Sjöstrom (1993), essa relação varia de 1/1 a 1/2. Neste estudo, a relação glicose/manose foi assumida como sendo 1/1. O teor d/e celulose foi calculado pela diferença entre a glicose total e a glicose associada às glicomananas. O teor de hemiceluloses foi calculado pelo somatório das xilanas, galactanas, mananas, arabinanas, ácidos urônicos, grupos acetila e a fração de glicanas a ela atribuída.

As análises de fibras foram realizadas no macerado da madeira (cavacos), conforme norma interna do Laboratório de Celulose e Papel 02 pp-97 UFV, após coloração com azul de astra. Posteriormente, foram feitas montagens em lâminas de vidro e medições de largura e espessura de parede (100 medições para cada parâmetro), em microscópio óptico, com aumento de 1000 vezes, e medições de comprimento (100 medições), em lupa, com aumento de 70 vezes. As imagens microscópicas foram digitalizadas com câmara fotográfica e as dimensões, mensuradas utilizando-se o programa Image-Pro Plus versão 3.2.

Foram realizados cozimentos com 5 repetições utilizando 500 g de cavacos absolutamente secos, com objetivo de obter número kappa $17 \pm 0,5$. O sistema de cozimento é dotado de um digestor MK, modelo 1/K409, com capacidade de 7 L, aquecido eletricamente por controles eletrônicos ligados a um computador e dotado de

manômetro, trocador de calor e bomba de circulação. O digestor está conectado a um conjunto de vasos acumuladores aquecidos e pressurizados, os quais possibilitam a injeção parcelada de licor de cozimento.

Antes do cozimento, os cavacos foram vaporizados a 100° C por 20 minutos. As condições utilizadas no cozimento foram as mesmas para ambas as polpas e estão apresentadas na Tabela 1 (PIMENTA, 2006).

Tabela 1 - Condições de cozimento utilizadas no estudo

Parâmetros da polpação	Impregnação	Cozimento Superior	Cozimento Inferior
Tempo até temperatura (min)	15	15	-
Tempo à temperatura (min)	30	60	120
Temperatura (°C)	110	155	156
Divisão alcalina (% AE total)	50	30	20
Licor/madeira	4/1	4/1	4/1
Sulfidez, %	28,7	28,7	28,7

Terminado o cozimento, os cavacos cozidos foram retirados do digestor. As amostras foram lavadas em água à temperatura ambiente, em caixa de aço inox com peneira de 150 mesh ao fundo para remoção do licor residual. As fibras foram individualizadas em “hidrapulper” laboratorial com capacidade de 25 L, em consistência de 0,6%. Após a individualização das fibras, foi realizada a etapa de depuração em depurador laboratorial Voith, dotado de placa com fendas de 0,2 mm. As polpas marrons depois de lavadas, individualizadas e depuradas foram centrifugadas a uma consistência de 30-35%. Foram utilizados os seguintes procedimentos TAPPI para as polpas não branqueadas produzidas em laboratório e para as polpas não branqueadas industriais: formação manual de folhas (T218 sp-97), alvura (T452 om-98), número kappa (T236 om-85) e viscosidade (T230 om-94). O teor de carboidratos foi determinado segundo Wallis et al. (1996b); a análise de grupos siringil e guaiacil foi realizada conforme Lin & Dence (1992), por cromatografia líquida após oxidação com nitrobenzeno; o rendimento depurado e o teor de rejeitos foram determinados por gravimetria; o teor de ácidos hexenurônicos foi realizado conforme Vuorinen et al. (1996) e o álcali efetivo residual foi determinado de acordo com a norma SCAN-N 33:94.

3. Resultados e discussão

3.1 Dimensão das fibras

As fibras das madeiras A e B apresentaram comprimentos médios de 1,0 mm e 1,1 mm, respectivamente (Tabela 2). As larguras médias das fibras das madeiras A e B foram de 21,5 μm e 21,7 μm , respectivamente. Os valores médios das dimensões de diâmetro do lúmen e espessura de parede foram de 13,9 μm e 3,8 μm , para a madeira A e 14,6 μm e 3,6 μm , para a madeira B, respectivamente. Apenas os valores de espessura de parede apresentaram diferenças significativas.

Tabela 2 - Características dimensionais das fibras das madeiras de *Eucalyptus* spp.

Parâmetros	Madeiras			
	A		B	
	Média	CV, %	Média	CV, %
Comprimento, mm	1,0a	17,8	1,1a	13,2
Largura, μm	21,5a	17,2	21,7a	18,7
Diâmetro do lume, μm	13,9a	25,4	14,6a	26,6
Espessura de parede, μm	3,8a	26,8	3,6b	20,7

As médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste “t” ao nível de 5% de probabilidade.

3.2 Caracterização físico-química da madeira de *Eucalyptus*

A caracterização das madeiras utilizadas neste estudo foi feita pelas densidades básica e aparente e por sua constituição química, cujos resultados médios estão apresentados na Tabela 3.

As madeiras estudadas apresentaram valores médios similares de densidade básica e aparente. As densidades básicas das madeiras A e B foram de 480 kg/m^3 e 473 kg/m^3 , respectivamente. Estes resultados mostram que ambas as madeiras estão dentro dos valores praticados pelas fábricas de celulose que têm priorizado o uso de madeiras com densidade básica próxima a 500 kg/m^3 , com tendência para valores um pouco inferiores (GOMIDE et al., 2005).

As madeiras analisadas apresentaram composições de carboidratos semelhantes e as variações apresentadas pelas madeiras foram pequenas. As glicanas representaram quase 50% da constituição química de ambas as madeiras. As xilanas foram a maior fração das hemiceluloses, enquanto que as arabinanas foram a menor fração de carboidratos das madeiras. As madeiras apresentaram uma variação nos teores de celulose e hemiceluloses de 0,5% e 0,4%, respectivamente.

Tabela 3 - Resultados das análises físico-químicas das madeiras de *Eucalyptus* spp.

Características da madeira	Madeiras		
	A	B	
Densidade básica, kg/m ³	480	473	
Densidade aparente, kg/m ³	183	179	
Celulose*, %	47,6	48,1	
Hemiceluloses**, %	21,5	21,1	
Glicanas, %	48,8	49,2	
Xilanas, %	11,8	11,6	
Galactanas, %	0,9	1,0	
Mananas, %	1,2	1,1	
Arabinanas, %	0,2	0,3	
Ácidos urônicos, %	4,0	4,0	
Grupos acetila, %	2,2	2,0	
Extrativos, %	Acetona	1,6	1,1
	Etanol/tolueno	2,6	2,6
	Totais	3,7	3,5
Lignina, %	Insolúvel	24,8	25,3
	Solúvel	4,7	4,2
	Total	29,5	29,5
	Relação S/G	3,0	2,5
Metais, mg/kg	Cu	1,4	1,2
	Fe	9,9	8,5
	Ca	491	356
	Mg	123	183
	K	469	371

*Celulose = glicose total - glicose glicomananas (1/1); ** inclui as glicanas que constituem as hemiceluloses; Hemiceluloses: xilose + manose + galactose + arabinose + glicose (glicomanana) + ácidos urônicos + grupos acetila.

As madeiras analisadas obtiveram mesmo teor de extrativos solúveis em etanol/tolueno. No entanto, os extrativos solúveis em acetona e os extrativos totais da madeira proveniente da fábrica A foram superiores que a madeira da fábrica B.

O teor de lignina total de ambas as madeiras foi o mesmo. Os teores de lignina insolúvel e solúvel apresentaram variações de 0,5 ponto percentual entre as madeiras. A frequência das estruturas siringila foi de 2,5 a 3 vezes maior que a das estruturas guaiacila. Estes valores de relação S/G foram similares aos relatados por Mokfienski et al. (2008) e Gomide et al. (2005). As ligninas que contêm mais estruturas do tipo siringila são mais fáceis de serem deslignificadas durante o processo de cozimento Kraft por serem menos condensadas (GOMIDE et al., 2005).

Verifica-se que ocorreu grande variação nos teores de cobre, ferro, cálcio, magnésio e potássio nas madeiras de eucalipto analisadas. Dentre os componentes inorgânicos medidos na madeira, destaca-se o ferro que reage com compostos oxigenados utilizados no branqueamento da polpa (oxigênio, peróxido de hidrogênio e ozônio), reduzindo a efetividade e aumentando o consumo desses reagentes químicos (Colodette et al., 2002). O ferro apresentou uma variação superior a 14%, sendo que a madeira A apresentou o maior valor para este metal. O magnésio apresentou a maior variação, aproximadamente 33%, sendo superior para a madeira B.

3.3 Características de polpação das madeiras de *Eucalyptus*

Os resultados médios dos cozimentos realizados em laboratório para obtenção de polpas não branqueadas estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Polpação LoSolids[®] das madeiras de *Eucalyptus* spp.

Parâmetros	Polpas Laboratoriais	
	A	B
AE, %	19,5	19,0
Álcali Efetivo Residual, g/L		
Impregnação	8,4	7,1
Cozimento Superior	8,0	7,4
Cozimento Inferior	10,0	9,6
Número kappa	17,2	17,1
Rendimento depurado, %	52,0	52,7
Rejeitos, %	0,0	0,0
Rendimento total, %	52,0	52,7

A madeira A apresentou demanda de álcali efetivo ligeiramente superior a da madeira B (variação de 0,5%), como pode ser observado na Figura 2 e, conseqüentemente, rendimento inferior. A maior demanda de álcali efetivo e o menor rendimento podem ser devidos ao maior teor de extrativos em acetona, uma vez que o teor de lignina (29,5% para ambas as madeiras) e o teor de carboidratos (69,1% e 69,2% para as madeiras A e B, respectivamente) foram praticamente os mesmos (Tabela 3).

Outra razão para a maior demanda de álcali efetivo da madeira A foi a maior espessura apresentada por seus cavacos (4,4 mm) em relação aos cavacos da madeira B (3,8 mm). A maior espessura dos cavacos dificulta a impregnação pelo licor de cozimento, o que torna necessária a utilização de uma maior concentração de álcali para

atingir o mesmo grau de deslignificação, que a alcançada nos cavacos de menor espessura (Queiroz et al., 2004).

A maior espessura de parede apresentada pelas fibras da madeira A (3,8 μm) em relação às fibras da madeira B (3,6 μm) também é outra explicação para a maior dificuldade de impregnação dos cavacos, o que demanda carga de álcali mais elevada.

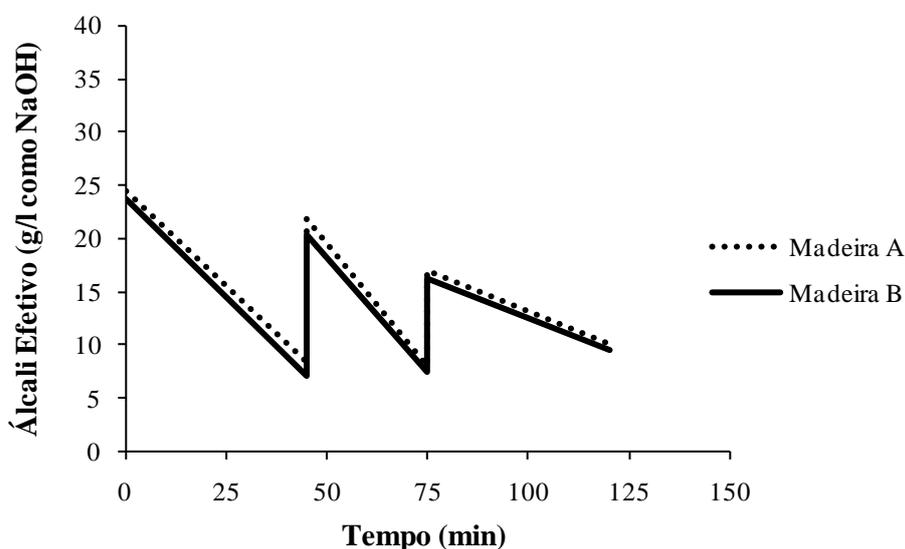


Figura 2 – Perfil do álcali efetivo durante a polpação LoSolids[®] das madeiras de *Eucalyptus* spp.

A Tabela 5 apresenta a caracterização das polpas não branqueadas provenientes das fábricas e das polpas não branqueadas produzidas em laboratório.

Tabela 5 - Características das polpas não branqueadas industriais e laboratoriais

Parâmetros da polpação	Não branqueadas Industriais		Não branqueadas Laboratoriais	
	A	B	A	B
Número kappa	16,8	16,4	17,2	17,1
Alvura, % ISO	36,9	32,7	38,2	37,9
HexA ¹ , mmol/kg	63,3	55,4	61,2	56,7
Viscosidade, dm ³ /kg	1343	1205	1407	1357
Glicanas, %	82,3	82,1	82,7	82,7
Xilanas, %	15,3	15,4	14,7	14,7
Relação S/G	1,4	1,3	1,4	1,4
Fe, mg/kg	306	46,1	26,5	197
Mg, mg/kg	695	212	847	811

¹ HexA = ácidos hexenurônicos

Os cozimentos industriais das madeiras A e B resultaram em polpas de números kappa 16,8 e 16,4, respectivamente, ou seja, seus graus de deslignificação foram similares aos obtidos em laboratório onde números kappa de 17,2 e 17,1 foram obtidos para as madeiras A e B, respectivamente.

Os ácidos hexenurônicos e a lignina residual contribuem na quantificação do número kappa (COSTA e COLODETTE, 2007). Comparando as polpas não branqueadas industriais, a variação da alvura foi de 4,2% ISO, sendo superior para a polpa A. Quando se compara a alvura das polpas não branqueadas laboratoriais esta variação foi de 0,3% ISO, também superior para a polpa A. Este comportamento pode ser explicado pela maior fração de ácidos hexenurônicos retidos na polpa A e, conseqüentemente, menor fração de lignina presente nas polpas de maior alvura (polpa industrial A e polpa laboratorial A). Observando os resultados das polpas industrial e laboratorial da madeira A, a variação de alvura foi de 1,3% ISO, sendo superior para a polpa produzida em laboratório. Fazendo a mesma observação para as polpas da madeira B, a variação de alvura foi de 5,2% ISO entre as polpas B, também com melhores resultados para a polpa laboratorial. A variação na alvura das polpas de mesma origem indica possíveis diferenças nos cozimentos industriais e laboratoriais. Por exemplo, a utilização de licor negro para completar a relação licor/madeira que é típica da operação industrial não foi realizada nos testes laboratoriais, e a seleção manual de cavacos que foi realizada nos testes laboratoriais, não encontra paralelo na operação industrial.

A variação entre as viscosidades das polpas industriais foi de 11,5%, sendo superior para a polpa da madeira A e entre as polpas laboratoriais foi inferior a 4%, também superior para a polpa da madeira A. As variações da viscosidade entre polpas industriais podem ser devidas às variáveis de processo. Comparando as polpas industriais A e laboratorial A, a variação foi aproximadamente 5% e, entre as polpas industrial B e laboratorial B, esta variação foi 12,6%. As variações da viscosidade entre as polpas de mesma origem (industrial A e laboratorial A ou, industrial B e laboratorial B) podem ser devidas às diferentes condições empregadas no processo de polpação industrial e laboratorial.

A composição química das polpas tanto industrial quanto laboratorial, exceto para ácidos hexenurônicos, foi semelhante (Tabela 5).

4. Conclusões

A madeira A apresentou maior teor de extrativos em acetona e consumiu maior carga de álcali efetivo que a madeira B.

Quando produzidas industrialmente, as polpas derivadas das madeiras A e B apresentaram diferenças de alvura, sendo estas diferenças causadas pelo processo de polpação e não pela madeira.

As polpas industriais e laboratorial da fábrica B apresentaram menor alvura e menor teor de ácidos hexenurônicos que as polpas da fábrica A.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realização deste estudo e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de estudo concedida.

5. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnica de Celulose e Papel. ABTCP. Normas. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L. GIRARD, R.; JÄÄSKELÄINEN, A.; ARGYROPOULOS, D. S. Influence of pulping conditions on eucalyptus kraft pulp yield, quality and bleachability. **Tappi Journal**, Vol. 1, n. 1, p. 14-20, 2002.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; ROBLES, Y. A. M.; ALMEIDA, J. M.; BRITO, A. C. H.; MEHLMAN, S. K.; ARGYROPOULOS, D. S. Fatores que afetam a branqueabilidade de polpas kraft de Eucalyptus por seqüências ECF, Z-ECF e TCF: 1: Influencia do processo de polpação . **Revista O Papel**, v. 60, n. 5, p. 46-56, 1999.

COSTA, M. M.; COLODETTE, J. L. The impact of kappa number composition on eucalyptus kraft pulp bleachability. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. V. 24, n. 1, p. 61-71, 2007.

DUARTE, A. P., BAPTISTA, C. Influence of pulping conditions on the bleachability of softwood kraft pulp. Keynote lectures. WPP. p.49-55. 2003.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: **Lignins**: Occurrence, formation, structure and reactions (Ed: K. V. Sarkanen, and C. H. Ludwig), John Wiley and Sons, New York, USA, pp. 241-266, (1971).

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

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de Eucalyptus do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005.

LACHENAL, D.; CHIRAT, C.; BENATTAR, N.; HAMZEH, Y.; MARLIN, N.; MATEO, C.; BROCHIER, B. Influence of pulp color on bleachability. Ways to improve the bleaching response of alkaline pulp. **ATIP**, vol. 59, n. 3, 2005.

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

MOKFIENSKI, A.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. A importância relativa da densidade básica da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 3, p. 401-413. jul.-set. 2008.

PASCOAL NETO, C., EVTUGUIN, D. V., FURTADO, F. P., SOUSA, A. P. M. Effect of pulping conditions on ECF bleachability of Eucalyptus globulus kraft pulps. **Industrial Engineering Chemistry Research**, v. 41, p. 6200-6206, 2002.

PASCOAL NETO, C., EVTUGUIN, D., PINTO, P., SILVESTRE, A., FREIRE, C. Química da madeira de Eucalyptus globulus: especificidades e impacto nos processos de cozimento e branqueamento. **Tecnicelpa.com**. Disponível em: <<http://www.tecnicepa.com/files/CozimentoBranqueamento.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2011.

PIMENTA, L. R. **Comportamento dos componentes químicos da madeira de eucalipto na polpação Lo-Solids[®]**. 2006. 95 f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa Kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 901-906. nov.-dez. 2004.

SCOTT, R. W. Colorimetric determination of hexenuronic acids in plant materials. **Anal. Chem.** 1979, 51(7), 936-941.

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

SOLAR, R.; KACIK, F.; MELCER, I. Simple semimicro method for the determination of o-acetyl group in wood and related materials. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**. v.4, p. 139-141, 1987.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi Standard Methods**. Atlanta: TAPPI 2001.

VUORINEN, T.; FAGERSTRÖM, P.; BUCHERT, J.; TENKANEN, M.; TELEMAN, A. Selective hydrolysis of hexenuronic acid groups and its application in TCF and ECF bleaching of Kraft pulps. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE, 1996, Washington, DC. **Proceedings...**, Washington, DC, 1996. P. 43-51.

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

CAPÍTULO II: COMPARAÇÃO DA BRANQUEABILIDADE E DA QUALIDADE DE POLPAS DE *Eucalyptus* spp. PRODUZIDAS EM LABORATÓRIO E EM ESCALA INDUSTRIAL

Resumo: o objetivo deste estudo foi avaliar a branqueabilidade, Δ kappa/kg cloro ativo total (CAT) e a qualidade de polpas de *Eucalyptus* spp. provenientes de duas diferentes fábricas de celulose Kraft de eucalipto. A polpa industrial pré-deslignificada com oxigênio da fábrica A apresentou maior branqueabilidade (0,197 Δ kappa/kg CAT) que a da fábrica B (0,135 Δ kappa/kg CAT). Os fatores que afetaram a branqueabilidade das polpas estudadas foram a alvura inicial e o teor de ácidos hexenurônicos resultantes dos cozimentos industriais. As polpas industriais da fábrica B apresentaram menores índices de rasgo.

Palavras-chave: polpação LoSolids[®], branqueabilidade, polpas laboratoriais, polpas industriais, *Eucalyptus*.

1. Introdução

No momento, a grande preocupação das indústrias de polpa de celulose é produzir polpas de boa qualidade, alta alvura e alto rendimento com o menor impacto ambiental e maior economia de processo possível. Tendo em vista esse objetivo é importante compreender o desempenho da polpa durante o branqueamento que é uma das etapas mais caras do processo. A branqueabilidade depende da composição química da madeira, da extensão da deslignificação, das condições e do tipo de processo de polpação e das diferentes seqüências e condições operacionais de branqueamento (DUARTE e BAPTISTA, 2003).

A forma como a polpa é produzida afeta na sua aptidão ao branqueamento, pois diferentes condições de polpação provocam alterações na sua composição química e na estrutura dos seus componentes (DUARTE e BAPTISTA, 2003). Por essa razão, controlar as variáveis de álcali ativo, de sulfidez, de temperatura máxima de tempo de cozimento dos processos químicos de produção de celulose são de grande importância. Esses fatores afetam diretamente a taxa de remoção de lignina, a natureza da lignina residual, a qualidade do produto final, a composição de carboidratos e ainda provocam variações nos teores de hemiceluloses e de ácidos hexenurônicos da polpa (CARDOSO et al., 2002, COLODETTE et al., 2002).

Estudos revelam que para uma mesma seqüência de branqueamento os fatores que afetam significativamente a branqueabilidade da polpa são os parâmetros da polpação (PASCOAL NETO et al., 2002).

A qualidade do produto final, polpa ou papel, é dependente da qualidade da madeira e das condições do processo de fabricação. As propriedades das polpas celulósicas se relacionam com os desempenhos operacionais (produtividade, qualidade, eficiência), que dependem da qualidade da madeira e do processo de conversão da madeira em polpa (polpação, branqueamento, secagem) e da relação madeira/processo de produção de celulose, como por exemplo, viscosidade, capacidade de ligação entre fibras (Pedrazzi, 2009). Uma vez que as condições de processo utilizadas afetam determinados parâmetros da polpa, as propriedades do papel também podem ser afetadas.

Neste trabalho, foi comparada a aptidão ao branqueamento de duas amostras de *Eucalyptus* spp., que receberam o mesmo tratamento de branqueamento, a fim de determinar quais são os fatores que realmente determinam a branqueabilidade da polpa dessa espécie e, também, avaliar a qualidade destas polpas.

2. Material e Métodos

Neste estudo foram utilizados cavacos industriais de *Eucalyptus* spp., coletados após a peneira de classificação, de duas fábricas de celulose brasileiras, designadas como A e B. Polpas não branqueadas (marrons) e pré-deslignificadas com oxigênio industriais também foram utilizadas, respeitando o tempo de residência dos equipamentos. Os cozimentos realizados em laboratório com os cavacos mencionados acima produziram as polpas não branqueadas (marrons) laboratoriais. As polpas não branqueadas industriais e laboratoriais produziram as polpas pré-deslignificadas com oxigênio laboratoriais. As polpas pré-deslignificadas industriais e laboratoriais foram branqueadas em laboratório e produziram as polpas branqueadas laboratoriais. A Figura 1 representa o esquema de trabalho.

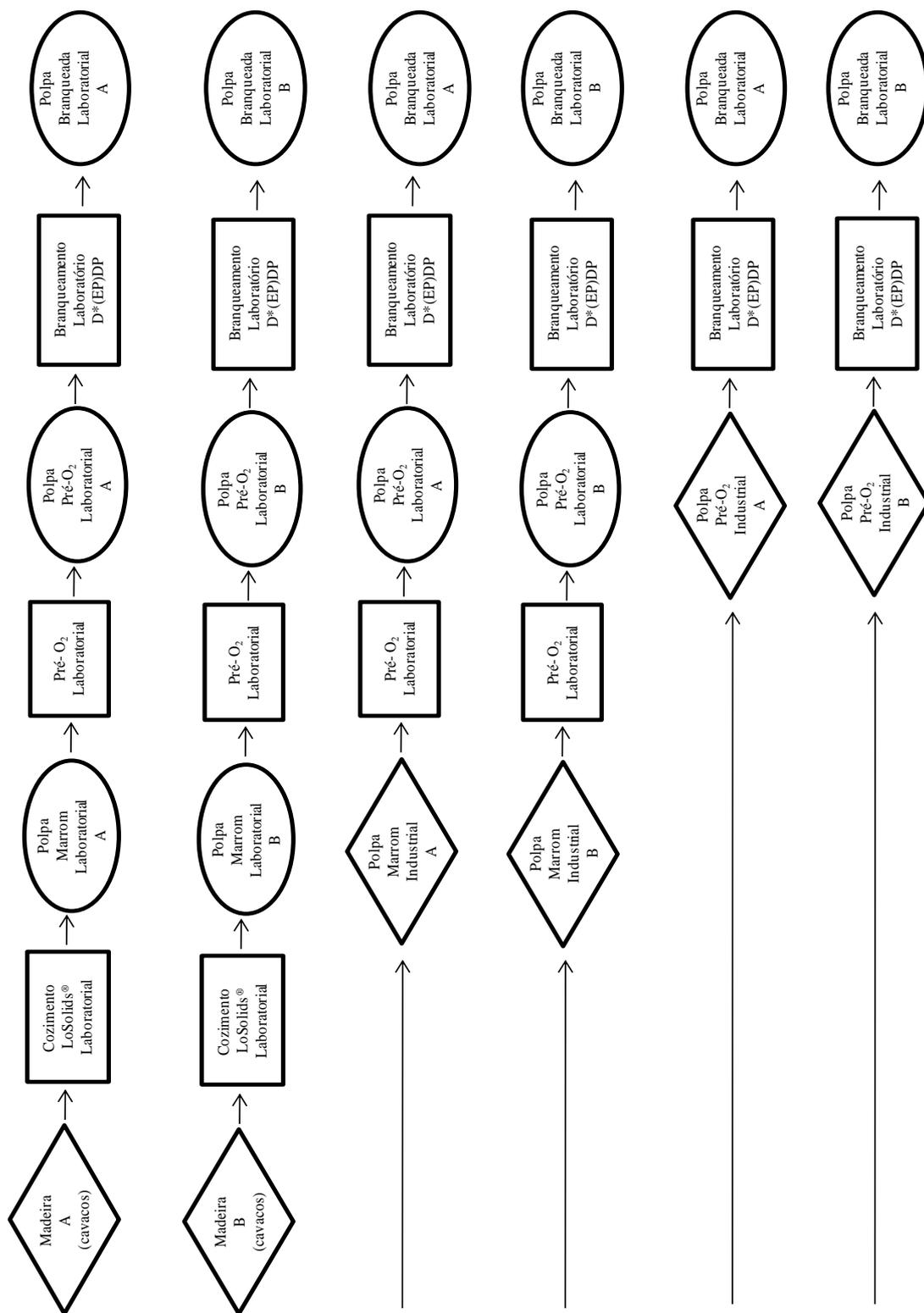


Figura 1 – Esquema de trabalho.

Os cavacos industriais foram secos ao ar, com objetivo de atingir um teor de umidade uniforme e estável. Posteriormente, foram classificados por sistema de

peneiramento em laboratório (peneiras 12,5 x 12,5 mm). A fração de cavacos aceitos foi novamente classificada, manualmente, para retirar os cavacos exageradamente grandes (over size), nós e cavacos com defeito de corte. Para a homogeneização dos cavacos, foi utilizado um misturador esférico mecânico com capacidade para 260 L. Após a homogeneização os cavacos foram acondicionados em sacos de polietileno.

Foram realizados cozimentos com 5 repetições utilizando 500 g de cavacos absolutamente secos, com objetivo de obter número kappa $17 \pm 0,5$. O sistema de cozimento é dotado de um digestor MK, modelo 1/K409, com capacidade de 7 L, aquecido eletricamente por controles eletrônicos ligados a computador e dotado de manômetro, trocador de calor e bomba de circulação. O digestor é conectado a um conjunto de vasos acumuladores aquecidos e pressurizados, os quais possibilitam a injeção parcelada de licor de cozimento.

Antes do cozimento, os cavacos foram vaporizados a 100°C por 20 minutos. As condições utilizadas no cozimento foram as mesmas para ambas as polpas e estão descritas na Tabela 1 (PIMENTA, 2006).

Tabela 1 - Condições de cozimento utilizadas no estudo

Parâmetros da polpação	Impregnação	Cozimento Superior	Cozimento Inferior
Tempo até temperatura (min)	15	15	-
Tempo à temperatura (min)	30	60	120
Temperatura ($^\circ\text{C}$)	110	155	156
Divisão alcalina (% AE total)	50	30	20
Licor/madeira	4/1	4/1	4/1
Sulfidez, %	28,7	28,7	28,7

Terminado o cozimento, os cavacos cozidos foram retirados do digestor. As amostras foram lavadas em água à temperatura ambiente, em caixa de aço inox com peneira de 150 mesh ao fundo para remoção do licor residual. As fibras foram individualizadas em “hidrapulper” laboratorial com capacidade de 25 L, em consistência de 0,6%. Após a individualização das fibras, foi realizada a etapa de depuração em depurador laboratorial Voith, dotado de placa com fendas de 0,2 mm. As polpas marrons depois de lavadas, individualizadas e depuradas foram centrifugadas a uma consistência de 30-35%. Foram utilizados os seguintes procedimentos TAPPI para as polpas não branqueadas produzidas em laboratório e para as polpas não branqueadas

industriais: formação manual de folhas (T218 sp-97), alvura (T452 om-98), número kappa (T236 om-85), viscosidade (T230 om-94) e metais (T266 om- 94); o teor de carboidratos foi determinado segundo Wallis et al. (1996b); a análise de grupos siringil e guaiacil foi realizada conforme Lin & Dence (1992), por cromatografia líquida após oxidação com nitrobenzeno; o rendimento depurado e o teor de rejeitos foram determinados por gravimetria; o teor de ácidos hexenurônicos foi realizado conforme Vuorinen et al. (1996).

A deslignificação com oxigênio (Pré-O₂) e o branqueamento foram realizados nas mesmas condições para todas as polpas. A sequência de branqueamento aplicada a todas as polpas foi OD*(EP)D. A deslignificação com oxigênio foi realizada em reator/misturador modelo Mark V (*Quantum Technologies Inc.*) com amostras de 280 gramas absolutamente secas. Os outros estágios de branqueamento foram realizados em sacos de polietileno pré-aquecidos em um forno de microondas e colocados em um banho de vapor mantido na temperatura constante. As condições de branqueamento estão apresentadas na Tabela 2. As cargas de reagentes químicos utilizadas em cada estágio estão nas Tabelas 1 A a 6 A (Apêndice A).

As reduções de viscosidade e de número kappa foram calculadas com base no valor desses parâmetros antes e após determinado estágio em estudo. A seletividade de uma determinada etapa foi calculada pela relação entre redução do número kappa e redução da viscosidade. A branqueabilidade foi calculada pela redução do número kappa no processo de branqueamento e o consumo de cloro ativo total para alcançar alvura final de 90 % ISO.

Após cada estágio de branqueamento as polpas foram lavadas com água em excesso. Neste estudo foram realizados os seguintes procedimentos TAPPI: formação manual de folhinhas (T218 sp-97), alvura (T452 om-98), reversão de alvura (Tappi UM 200), número kappa (T236 om-85), viscosidade (T230 om-94); o teor de carboidratos foi determinado segundo Wallis et al. (1996b); a análise de grupos siringil e guaiacil foi realizada conforme Lin & Dence (1992), por cromatografia líquida após oxidação com nitrobenzeno; o teor de ácidos hexenurônicos foram determinados de acordo com Vuorinen et al. (1996) .

Tabela 2 - Condições gerais do branqueamento utilizadas no estudo

Condições	Estágios de Branqueamento			
	O	D*	(EP)	D
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	100	90	80	75
Tempo, min	60	120	60	120
Pressão, kPa	600	-	-	-
O ₂ , kg/t	20	-	-	-
Fator kappa	-	0,16	-	-
ClO ₂ , kg/t	-	-	-	10
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	*	-	*
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3	-
NaOH, kg/t	20	*	10	*

* carga de ácido ou base para ajustar o pH.

As análises de fibras foram realizadas na polpa branqueada, conforme norma interna do Laboratório de Celulose e Papel 02 pp-97 UFV, após coloração com azul de astra. Posteriormente, foram feitas montagens em lâminas de vidro e medições de largura e espessura de parede (100 medições para cada parâmetro), em microscópio óptico, com aumento de 1000 vezes, e medições de comprimento (100 medições), em lupa, com aumento de 70 vezes. As imagens microscópicas foram digitalizadas com câmara fotográfica e as dimensões, mensuradas utilizando-se o programa Image-Pro Plus versão 3.2. A determinação de “coarseness” e do número de fibras foi realizada com equipamento automático Galai CIS-100. Para a determinação das propriedades físicas, mecânicas e ópticas das polpas branqueadas, os seguintes procedimentos e testes físicos foram realizados: refino (T248 sp-00), formação de folha para teste físico (T205 sp-95), grau de refino, Schopper-Riegler (°SR) (T200 sp-96), gramatura (T410 om-98), espessura (T411 om-97), índice de rasgo (T414 om-98), índice de tração (T494 om-96), opacidade e coeficiente de dispersão de luz (T519 om-96), volume específico aparente (T220 sp-96), capilaridade Klenm (T441 om-98), capacidade de absorção de água (NBR 15004), módulo de elasticidade (T494 om-96). A determinação da resistência de ligações interfibrilares foi adaptada de Skowronski & Bichard (1997). A medição do índice de retenção de água (IRA) foi determinada de acordo com a norma interna do Laboratório de Celulose e Papel 01 pp-96 UFV. Com relação ao índice de enrijecimento

(hornificação), utilizou-se a correlação demonstrada por Weise e Paulapuro (1998), apresentada a seguir:

$$(\%) = \frac{IRA_0 - IRA_1}{IRA_0}$$

em que: IRA_0 = índice de retenção de água da polpa que não sofreu secagem; IRA_1 = índice de retenção de água da polpa que sofreu secagem.

Para analisar os resultados de morfologia das fibras, índice de retenção de água e hornificação foram realizadas análises de variâncias de duas amostras independentes através do teste F. Posteriormente, realizou-se o teste “t” para comparação das médias ao nível de 5% de probabilidade. Para médias estatisticamente iguais foram usadas letras maiúsculas iguais, e para médias estatisticamente diferentes, letras maiúsculas também diferentes.

Para analisar os resultados de refinabilidade e propriedades físico-mecânicas das polpas branqueadas foi realizada a comparação de equações de regressão lineares nos parâmetros. Utilizou-se o teste F para identidade de modelos, conforme metodologia apresentada por Regazzi (1993) para modelos lineares. As comparações dos parâmetros analisados foram: polpas não branqueadas industriais pré-deslignificadas em laboratório (A e B), polpas pré-deslignificadas industriais (A e B) e polpas não branqueadas laboratoriais pré-deslignificadas em laboratório (A e B). Foram analisadas as duas equações de cada comparação a fim de verificar igualdade entre elas. Em caso afirmativo, as duas equações foram reduzidas a uma única equação. Caso contrário, as equações diferentes estatisticamente não foram reduzidas. As hipóteses testadas foram: H_0 : todas as equações são iguais e podem ser representadas por uma equação reduzida comum; H_1 : as equações são estatisticamente diferentes e não podem ser reduzidas a uma equação comum. Na Tabela 7 as médias seguidas de mesmas letras minúsculas para cada comparação (A e B) representam igualdade de equações e médias seguidas de diferentes letras minúsculas representam diferenças de equações. As equações, reduzidas ou não, estão apresentadas nas Tabelas 1B a 10 B (Apêndice B).

3. Resultados e discussão

3.1 Deslignificação com oxigênio

As polpas não branqueadas industriais e laboratoriais submetidas à deslignificação com oxigênio obtiveram os resultados médios apresentados na Tabela 4.

As comparações foram realizadas entre as fábricas A e B considerando os parâmetros: polpas pré-deslignificadas industriais, polpas não branqueadas industriais pré-deslignificadas em laboratório e polpas não branqueadas produzidas e pré-deslignificadas em laboratório.

Tabela 4 - Resultados após deslignificação com oxigênio

Parâmetros da deslignificação com oxigênio	Não branqueada		Não branqueada		Não branqueada	
	Industrial		Industrial		Laboratorial	
	Pré-O ₂		Pré-O ₂		Pré-O ₂	
	Industrial		Laboratorial		Laboratorial	
	A	B	A	B	A	B
Glicanas, %	82,9	83,7	83,1	83,5	83,7	83,9
Xilanas, %	15,5	14,6	14,9	14,9	14,4	14,1
Relação S/G	1,2	1,2	1,2	1,3	1,1	1,1
Alvura, % ISO	62,2	52,1	55,2	51,1	56,8	57,3
Ganho de alvura, % ISO	25,3	19,4	18,3	18,4	18,6	19,4
Número Kappa	10,3	9,7	10,6	10,3	10,1	10,4
Redução do Kappa, %	38,7	40,9	36,9	37,2	41,3	39,2
Viscosidade, dm ³ /kg	1072	938	1137	899	1167	1148
Perda de viscosidade, %	20,2	22,2	15,3	25,4	17,1	15,4
Seletividade ¹	1,9	1,8	2,4	1,5	2,4	2,5
HexA ² , mmol/kg	60,2	50,2	58,2	51,3	55,4	54,0
Fe, mg/kg	96,5	57,7	284	27,5	125	66,8
Mg, mg/kg	186	86,0	721	77,0	714	712

¹Seletividade = Redução do kappa (%) / Perda de viscosidade (%); ²HexA = ácidos hexenurônicos.

O teor de glicanas e xilanas das polpas deslignificadas com oxigênio assim como as relações siringila/guaiacila (S/G) foram semelhantes (Tabela 4).

A polpa pré-deslignificada industrial A apresentou maior ganho de alvura quando comparada às outras polpas. Este comportamento pode ser devido à presença da maior fração de ácidos hexenurônicos e, conseqüentemente, menor fração de lignina que compõe o número kappa desta polpa. Uma observação importante é que a alvura inicial de seu material de origem, polpa não branqueada industrial A (36,9 % ISO), foi superior em relação à polpa não branqueada industrial B (32,7 % ISO). Isto fez com que

seu desempenho na deslignificação com oxigênio fosse mais pronunciado no que tange ao ganho de alvura.

A eficiência (redução do kappa) da deslignificação com oxigênio foi calculada com base no número kappa antes e depois da Pré-O₂. A maior redução do número kappa foi observada para a polpa laboratorial da madeira A, o que pode ser devido à carga de álcali ligeiramente superior consumida por esta polpa durante o cozimento (Tabela 4 - Capítulo I).

A seletividade foi calculada com base na redução do número kappa e na perda de viscosidade. As polpas que apresentaram maiores seletividades foram ambas as polpas produzidas e pré-deslignificadas em laboratório (A e B) e a polpa não branqueada industrial pré-deslignificada em laboratório A. Estas polpas também apresentaram maior viscosidade, a qual foi mais fortemente influenciada pela ação protetora do magnésio.

3.3 Branqueabilidade da polpa

A sequência de branqueamento D*(EP)D foi aplicada a todas as seis polpas, nas mesmas condições, e os resultados médios estão apresentados na Tabela 5. As comparações foram realizadas entre as fábricas A e B considerando os parâmetros: polpas pré-deslignificadas industriais, polpas não branqueadas industriais pré-deslignificadas em laboratório e polpas não branqueadas produzidas e pré-deslignificadas em laboratório. As polpas industriais foram coletadas respeitando o tempo de residência dos equipamentos nas unidades das fábricas A e B.

As polpas branqueadas, assim como as polpas deslignificadas com oxigênio, apresentaram teores de glicanas e de xilanas semelhantes (Tabela 5).

A reversão de alvura das polpas variou de 3,4% a 4,3% ISO. Os valores de reversão de alvura das polpas estão intimamente relacionados com os teores de ácidos hexenurônicos.

Seletividades mais elevadas foram observadas para as polpas provenientes da fábrica A, as quais apresentaram valores de viscosidades mais elevados (Tabela 5). Viscosidades finais inferiores foram verificadas para as polpas de origem industrial da fábrica B (polpa não branqueada industrial e pré-deslignificada em laboratório, e polpa pré-deslignificada industrial) e refletiram as viscosidades destas polpas antes do branqueamento.

Tabela 5 - Resultados do branqueamento com a sequência D*(EP)D.

Parâmetros do branqueamento	Não branqueada		Não branqueada		Não branqueada	
	Industrial		Industrial		Laboratorial	
	Pré-O ₂		Pré-O ₂		Pré-O ₂	
	Industrial	Laboratorial	A	B	A	B
Glicanas, %	84,3	85,0	84,5	84,5	84,7	85,4
Xilanas, %	15,4	14,2	15,0	15,0	14,8	14,1
Alvura ¹ , % ISO	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0
Reversão de alvura, % ISO	3,4	3,5	3,4	3,5	4,0	4,3
Número Kappa após (EP)	4,9	5,6	5,0	5,3	5,4	5,6
Redução do kappa, %	52,4	42,3	52,8	48,5	46,5	46,2
Viscosidade, dm ³ /kg	979	661	979	626	1046	962
Perda de viscosidade, %	8,7	29,5	13,9	30,4	10,4	16,2
Seletividade ²	6,0	1,4	3,8	1,6	4,5	2,9
HexA ³ , mmol/kg	9,7	12,4	10,9	11,2	11,3	12,3
Branqueabilidade ⁴ , Δ kappa/kg CAT	0,197	0,117	0,176	0,135	0,155	0,154
Cloro ativo total ⁵ , kg/t	27,4	34,9	31,8	37,0	30,3	31,1

¹Calculada por interpolação; ²Seletividade = Redução do kappa (%) / Perda de viscosidade (%); ³HexA = ácidos hexenurônicos; ⁴Branqueabilidade = Δ kappa/kg de cloro ativo total; ⁵Cloro ativo total (CAT) = (ClO₂*2,63 + H₂O₂*2,09)

A branqueabilidade pode ser definida como a facilidade de uma determinada polpa em ser branqueada e, neste estudo, foi calculada pela variação do número kappa após Pré-O₂ e após o estágio EP pelo consumo de cloro ativo total. Isto significa que quanto maior o valor da branqueabilidade, maior é a facilidade de branquear determinada polpa. A polpa pré-deslignificada industrial A apresentou branqueabilidade (0,197 Δ kappa/kg CAT) mais elevada do que a polpa não branqueada industrial pré-deslignificada laboratorial B (0,135 Δ kappa/kg CAT), o que pode ser explicado por sua maior alvura após Pré-O₂ (62,2 % ISO – Tabela 4) e pelo menor consumo de cloro ativo total (27,4 kg/t – Tabela 5). É importante notar que a polpa não branqueada industrial A, que originou a polpa pré-deslignificada industrial A, apresentou maior alvura inicial (36,9 % ISO – Tabela 5 – Capítulo I), em relação à polpa não branqueada industrial B (32,7 % ISO – Tabela 5 – Capítulo I), que originou a polpa não branqueada

industrial pré-deslignificada laboratorial B, e este comportamento foi mantido ao longo da sequência. As polpas produzidas em laboratório apresentaram branqueabilidades semelhantes, sendo 0,155 Δ kappa/kg CAT para a polpa da fábrica A e 0,154 Δ kappa/kg CAT para a polpa da fábrica B. A polpa não branqueada industrial pré-deslignificada em laboratório B apresentou a menor alvura inicial (32,7 % ISO), menor teor de ácidos hexenurônicos iniciais e maior consumo de cloro ativo total (37 kg/t). Em geral, o consumo de cloro ativo total variou de 27,4 a 37,0 kg/tonelada de polpa.

Apesar da grande variação no teor de ferro das madeiras e das polpas não branqueadas e das polpas deslignificadas com oxigênio, esta variação não afetou a branqueabilidade das polpas, visto que as polpas produzidas em laboratório apresentaram branqueabilidade semelhantes.

3.4 Qualidade da polpa

Os resultados médios das análises das fibras e dos testes físico-mecânicos e ópticos das polpas estudadas estão apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente. Os resultados estatísticos e experimentais encontram-se no Apêndice B. As comparações foram realizadas entre as fábricas A e B considerando os parâmetros: polpas pré-deslignificadas industriais, polpas não branqueadas industriais pré-deslignificadas em laboratório e polpas não branqueadas produzidas e pré-deslignificadas em laboratório.

As propriedades das polpas também estão apresentadas em forma de gráficos em função dos correspondentes consumos de energia.

O comprimento e a largura das fibras, o diâmetro do lúmen e a espessura de parede não apresentaram diferenças significativas. O menor teor de finos foi verificado entre as polpas laboratoriais. As polpas pré-deslignificadas industriais e as polpas não branqueadas industriais e pré-deslignificadas laboratoriais apresentaram teores de finos similares (Tabela 6).

Tabela 6 - Características morfológicas das fibras das polpas branqueadas.

Propriedades	Não branqueada		Não branqueada		Não branqueada	
	Industrial		Industrial		Laboratorial	
	Pré-O ₂		Pré-O ₂		Pré-O ₂	
	Industrial	Laboratorial	A	B	A	B
Comprimento, mm	0,70A	0,73A	0,81A	0,76A	0,77A	0,74A
Largura, µm	30,7A	32,1A	30,0A	30,3A	32,0A	32,5A
Diâmetro do lúmen, µm	11,3A	11,3A	11,4A	12,1A	11,5A	11,0A
Espessura de parede, µm	4,97A	4,73A	4,88A	4,78A	5,24A	4,99A
Coarseness, mg/100m	7,83A	6,70A	7,08A	7,29A	6,66A	6,67A
Número de fibras/g (milhões)	18,4B	20,4A	17,6A	18,0A	19,6A	20,3A
Teor de finos, %	9,96	9,30	8,63	9,20	6,22	6,76

As médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste "t" ao nível de 5% de probabilidade.

A Figura 2 mostra o °SR em função do consumo de energia das polpas para serem refinadas. Foram adotados vários níveis de refino, adotando °SR entre 50-60 °SR. O gráfico mostra o comportamento das polpas com a intensificação do refino.

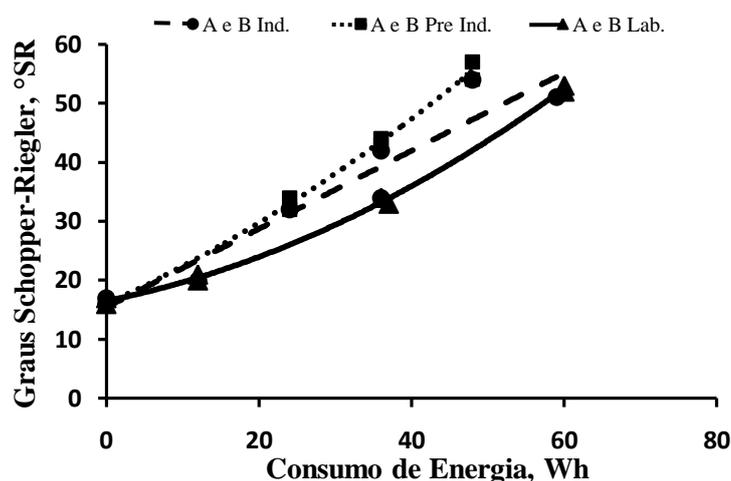


Figura 2 – Curvas comuns ajustadas para °SR em função do consumo de energia para as polpas não branqueadas industriais pré-O₂ laboratorial (A e B Ind.), polpas pré-O₂ industriais (A e B Pre Ind.) e polpas não branqueadas laboratoriais pré-O₂ laboratorial (A e B Lab.).

Tabela 7 - Resultados das propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas branqueadas não-refinadas (NR) e refinadas (R) a 30°SR.

Propriedades		Não branqueada Industrial Pré-O ₂ Industrial		Não branqueada Industrial Pré-O ₂ Laboratorial		Não branqueada Laboratorial Pré-O ₂ Laboratorial			
		A	B	A	B	A	B		
		CE, Wh	R	19,3a	20,7a	29,9a	20,9a	29,9a	31,4a
		IT, N.m/g	NR	17,8a	17,4a	19,7a	17,0a	19,7a	21,8a
	R	57,1a	57,0a	61,4a	50,5a	62,0a	64,0a		
IR, mN.m ² /g	NR	4,05a	3,08b	4,59a	3,93b	4,71a	4,07a		
	R	10,2a	8,05b	11,5a	8,25b	11,1a	11,5a		
M.O.E, MN.m/kg	NR	3,25b	3,27a	3,2a	3,01b	3,17a	3,35a		
	R	5,11b	5,68a	5,70a	5,23b	5,70a	5,61a		
Opacidade, %	NR	80,1a	79,5a	7,08a	80,3a	78,5a	78,4a		
	R	74,5a	74,9a	72,1a	75,4a	72,1a	73,3a		
CDL, m ² /kg	NR	45,2a	43,8a	41,7a	45,4a	42,5a	42,2a		
	R	34,2a	34,4a	31,1a	35,2a	31,5a	32,2a		
LIF, J/m ²	NR	14,7a	11,9b	16,9a	14,0a	15,6a	14,2b		
	R	44,9a	41,7b	54,0a	40,8a	49,9a	48,6b		
V.E.A. cm ³ /g	NR	2,31b	2,35a	2,27b	2,37a	2,26a	2,30a		
	R	1,68a	1,65b	1,51b	1,65a	1,53a	1,52a		
Cap. Klenm, mm/10min à 20°C	NR	11,4a	11,2a	9,90a	11,8a	11,0a	11,5a		
	R	5,55a	5,37a	4,68a	6,30a	3,93a	4,46a		
Cap. abs. de água, g H ₂ O/g papel	NR	5,07a	5,88a	5,13b	7,21a	6,06a	6,11a		
	R	3,56a	3,75a	3,09b	3,79a	2,93a	3,32a		
IRA, %	NR	166A	164A	174A	162B	174A	166B		
	R	-	-	-	-	-	-		
Hornificação, %	NR	37,5B	40,8A	39,7A	37,7A	40,7A	37,4A		
	R	-	-	-	-	-	-		

IT = índice de tração; IR = índice de rasgo; M.O.E. = módulo de elasticidade; CE = consumo de energia; V.E.A. = volume específico aparente; CDL = coeficiente de dispersão de luz; LIF = ligações interfibrilares; Cap. Klenm = capilaridade Klenm; Cap. Abs. de Água = capacidade de absorção de água; IRA = índice de retenção de água; NR = não refinada; R = refinada (à 30°SR). As médias seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem entre si pelo teste "t" ao nível de 5% de probabilidade. As médias seguidas de mesmas letras minúsculas não diferiram no teste de identidade modelo e possuem um modelo comum.

Com base no teste F, a hipótese de igualdade das equações não foi rejeitada, podendo-se concluir que as equações das polpas A e B não branqueadas industriais pré-

deslignificadas laboratoriais (A e B Ind.), assim como as equações das polpas A e B pré-deslignificadas industriais (A e B Pre Ind.) e das polpas A e B não branqueadas e pré-deslignificadas laboratoriais (A e B Lab.) não diferiram significativamente. Dessa forma, uma equação comum pode ser usada com uma estimativa das duas equações envolvidas em cada comparação.

De acordo com a Tabela 7 e pela Figura 2 percebe-se que as polpas produzidas em laboratório consumiram mais energia para serem refinadas, indicando que elas são mais resistentes à drenagem.

Alta resistência à tração é requisito para os papéis de impressão e escrita (P & W) (MOKFIENSKI, 2008) e representa o valor máximo de resistência oferecido por um corpo de prova quando tracionado (CASTANHO e OLIVEIRA, 2000).

A Figura 3 apresenta curvas de índice de tração em função com consumo de energia para as polpas industriais e laboratoriais de ambas as fábricas. Neste estudo as polpas não apresentaram diferenças significativas quanto ao índice de tração entre as comparações realizadas: polpas A e B não branqueadas industriais pré-deslignificadas laboratoriais (A e B Ind.), polpas A e B pré-deslignificadas industriais (A e B Pre Ind.) e polpas A e B não branqueadas e pré-deslignificadas laboratoriais (A e B Lab.).

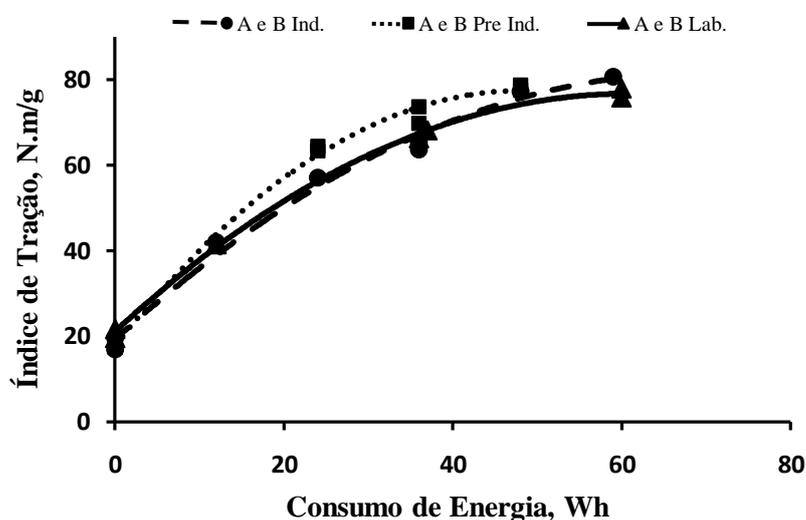


Figura 3 – Curvas comuns ajustadas para índice de tração em função do consumo de energia para as polpas não branqueadas industriais pré-O₂ laboratorial (A e B Ind.), polpas pré-O₂ industriais (A e B Pre Ind.) e polpas não branqueadas laboratoriais pré-O₂ laboratorial (A e B Lab.).

Com base no teste F, a hipótese de igualdade das equações não foi rejeitada, podendo-se concluir que as equações das polpas A e B não branqueadas industriais pré-deslignificadas laboratoriais (A e B Ind.), assim como das polpas pré-deslignificadas industriais (A e B Pre Ind.) e das polpas A e B não branqueadas e pré-deslignificadas laboratoriais (A e B Lab.) não diferiram significativamente. Dessa forma, uma equação comum pode ser usada com uma estimativa de cada duas equações envolvidas nas comparações.

Comparando as polpas em um mesmo grau Schopper Riegler (30°SR), a polpa não branqueada industrial pré-deslignificada em laboratório B apresentou menor índice de tração que a polpa não branqueada industrial pré-deslignificada em laboratório A, o que pode ser devido ao processo de cozimento utilizado na fábrica B, o qual pode ter afetado a resistência das fibras (menor viscosidade, Tabela 5), prejudicando a resistência à tração. No geral, as polpas não branqueadas laboratoriais pré-deslignificadas em laboratório (A e B) apresentaram maior índice de tração em relação às polpas não branqueadas industriais pré-deslignificadas em laboratório (A e B) e pré-deslignificadas industriais (A e B), conforme mostrado na Tabela 7.

A resistência ao rasgo é influenciada pela resistência individual das fibras, pela sua integridade estrutural, pelo comprimento das fibras e espessura de parede celular das fibras (CASTANHO e OLIVEIRA, 2000). As Figuras 4A, 4B e 4C apresentam as curvas de índice de rasgo em função do consumo de energia para as polpas de origem industrial e laboratorial de ambas as fábricas. Com base no teste F, a hipótese de igualdade das equações foi rejeitada para as comparações realizadas entre as polpas A e B não branqueadas industriais e pré-deslignificadas em laboratório (Figura 4A) e para as polpas A e B pré-deslignificadas industriais (Figura 4B), não podendo, portanto, ser estimada uma equação comum para estas comparações. Uma vez que o comprimento das fibras e a espessura da parede das fibras destas polpas não diferenciaram significativamente (Tabela 6), as diferenças de índice de rasgo das polpas de origem industrial podem ser devidas ao processo utilizado na fábrica B que pode ter afetado a resistência das fibras (menor viscosidade, Tabela 5), prejudicando a resistência ao rasgo. As polpas laboratoriais (A e B) não diferiram significativamente. Dessa forma, para estas polpas, uma equação comum pôde ser usada como uma estimativa das duas equações envolvidas nesta comparação (Figura 4C).

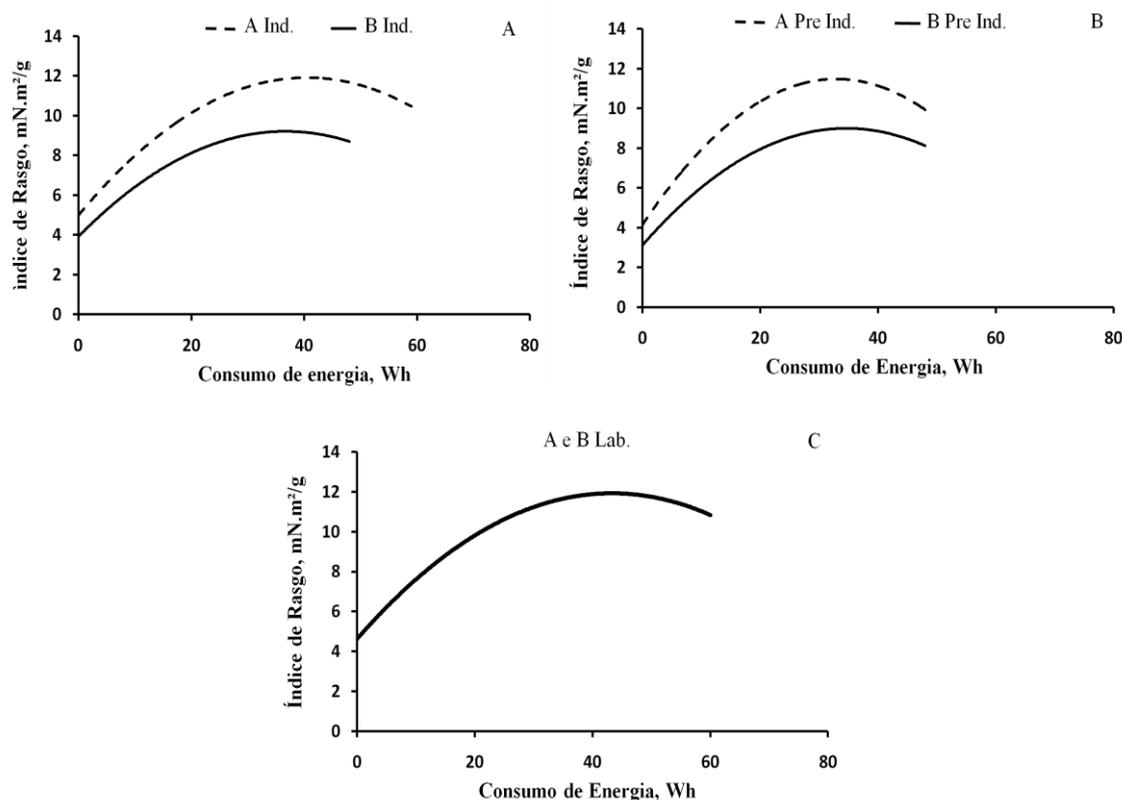


Figura 4 – Curvas ajustadas para índice de rasgo em função do consumo de energia para as polpas não branqueadas industriais e pré-O₂ laboratorial (A e B Ind.), polpas pré-O₂ industriais (A e B Pre Ind.) e para polpas não branqueadas laboratoriais pré-O₂ laboratorial (A e B Lab.).

Como pode ser observado na Tabela 7, para 30 °SR, as polpas laboratoriais apresentaram maiores índices de rasgo em relação às polpas de origem industrial.

O módulo de elasticidade (MOE) expressa a capacidade de um corpo-de-prova em resistir à deformação quando submetido a uma tensão. Maiores valores de MOE indicam a capacidade de um material em absorver força sem, entretanto, sofrer deformações significativas, expressando sua rigidez (SILVA, 2002; SILVA e OLIVEIRA, 2000; CASTANHO e OLIVEIRA, 2000). As Figuras 5A, 5B e 5C apresentam as curvas de módulo de elasticidade em função do consumo de energia para as polpas de origem industrial e laboratorial de ambas as fábricas. Com base no teste F, a hipótese de igualdade das equações foi rejeitada para as comparações realizadas entre as polpas A e B não branqueadas industriais e pré-deslignificadas em laboratório (Figura 5A) e para as polpas A e B pré-deslignificadas industriais (Figura 5B), não podendo, portanto, ser estimada uma equação comum para estas comparações. As polpas laboratoriais (A e B) não diferiram significativamente. Dessa forma, para estas

polpas, uma equação comum pôde ser usada como uma estimativa das duas equações envolvidas nesta comparação (Figura 5C).

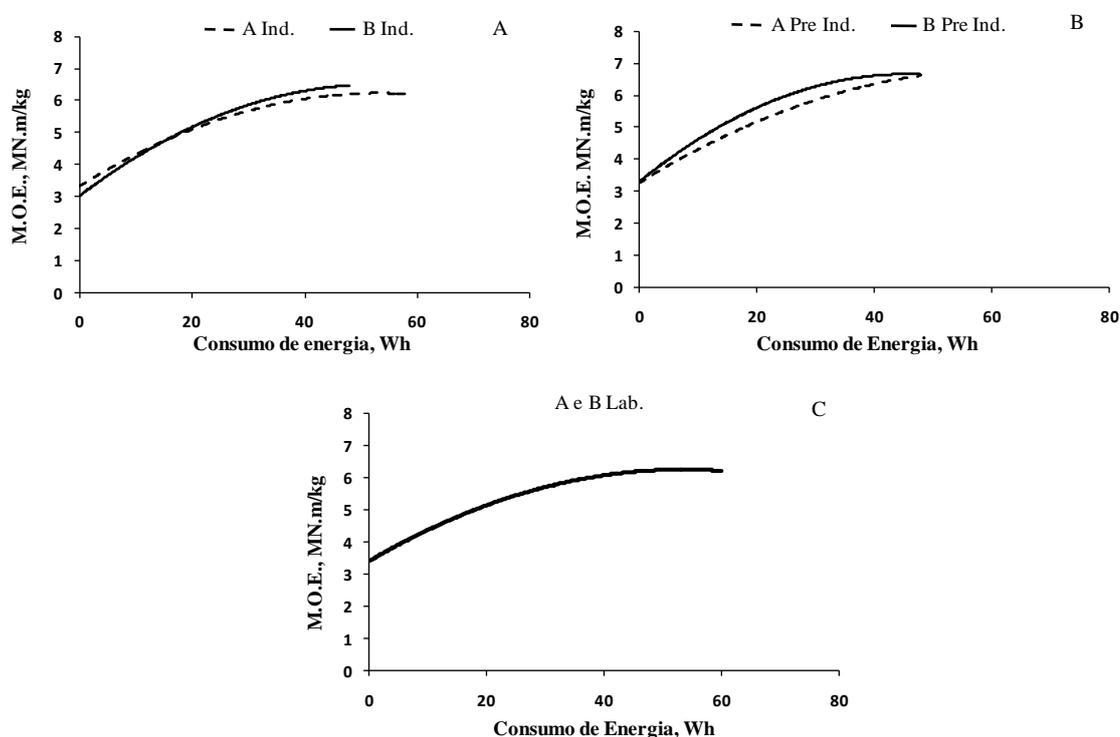


Figura 5 – Curvas ajustadas para módulo de elasticidade em função do consumo de energia para as polpas não branqueadas industriais pré-O₂ laboratorial (A e B Ind.), polpas pré-O₂ industriais (A e B Pre Ind.) e para polpas não branqueadas laboratoriais pré-O₂ laboratorial (A e B Lab.).

As propriedades ópticas das polpas branqueadas, representadas pela opacidade e pelo coeficiente de dispersão de luz, são importantes parâmetros para papéis P & W, uma vez que indicam a habilidade dessa folha em obstruir a passagem de luz (QUEIROZ et al., 2004). Valores mais altos de opacidade são desejáveis para a fabricação de papéis P & W (MARK, 1984).

A Figura 6 apresenta as curvas de opacidade e coeficiente de dispersão de luz (CDL) em função do consumo de energia para as polpas de origem industrial e laboratorial de ambas as fábricas. Com base no teste F, a hipótese de igualdade das equações não foi rejeitada, podendo-se concluir que as equações das polpas A e B não branqueadas industriais pré-deslignificadas laboratoriais (A e B Ind.), assim como das polpas A e B pré-deslignificadas industriais (A e B Pre Ind.) e das polpas não branqueadas e pré-deslignificadas laboratoriais (A e B Lab.) não diferiram

significativamente. Dessa forma, uma equação comum pode ser usada com uma estimativa de cada duas equações envolvidas nas comparações.

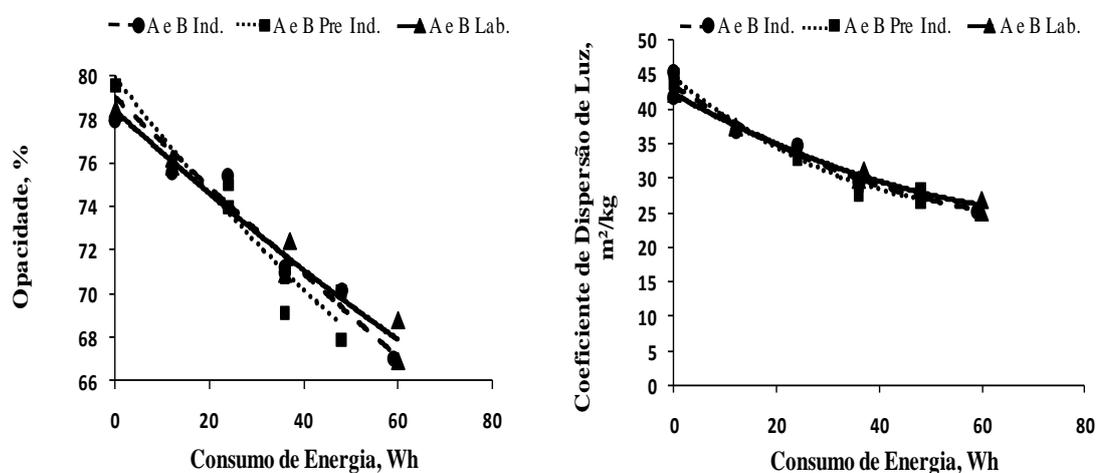


Figura 6 – Curvas comuns ajustadas para opacidade e CDL em função do consumo de energia para as polpas não branqueadas industriais pré-O₂ laboratorial (A e B Ind.), polpas pré-O₂ industriais (A e B Pre Ind.) e para polpas não branqueadas e pré-O₂ laboratorial (A e B Lab.).

As polpas não branqueadas industriais e pré-deslignificadas em laboratório (A e B) assim com as polpas pré-deslignificadas industriais (A e B) e as polpas não branqueadas e pré-deslignificadas laboratoriais (A e B) apresentaram valores de opacidade e de CDL semelhantes para 30 °SR (Tabela 7). A opacidade e o coeficiente de dispersão de luz das polpas refinadas foram inferiores ao das polpas não-refinadas, o que era esperado uma vez que o refino aumenta a superfície de ligação entre as fibras, reduzindo, assim, a opacidade e o CDL (SILVA e OLIVEIRA, 2000).

O teste de resistência das ligações interfibrilares objetiva determinar a habilidade das fibras que formam o papel em estabelecer ligações, uma vez que estas ligações participam na formação estrutural da folha e, conseqüentemente, influenciam no comportamento de propriedades do papel (CASTANHO e OLIVEIRA, 2000).

As Figuras 7A, 7B e 7C apresentam as curvas de ligações interfibrilares em função do consumo de energia para as polpas de origem industrial e laboratorial de ambas as fábricas. Com base no teste F, a hipótese de igualdade das equações não foi rejeitada para as comparações realizadas entre as polpas A e B não branqueadas industriais pré-deslignificadas laboratoriais (Figura 7A) podendo, então, ser estimada uma equação comum para esta comparação. As polpas pré-deslignificadas industriais (A

e B) e as polpas não branqueadas e pré-deslignificadas laboratoriais (A e B) diferiram significativamente. Dessa forma, para estas polpas, uma equação comum não pôde ser usada como uma estimativa das duas equações envolvidas em cada uma destas comparações (Figuras 7B e 7C).

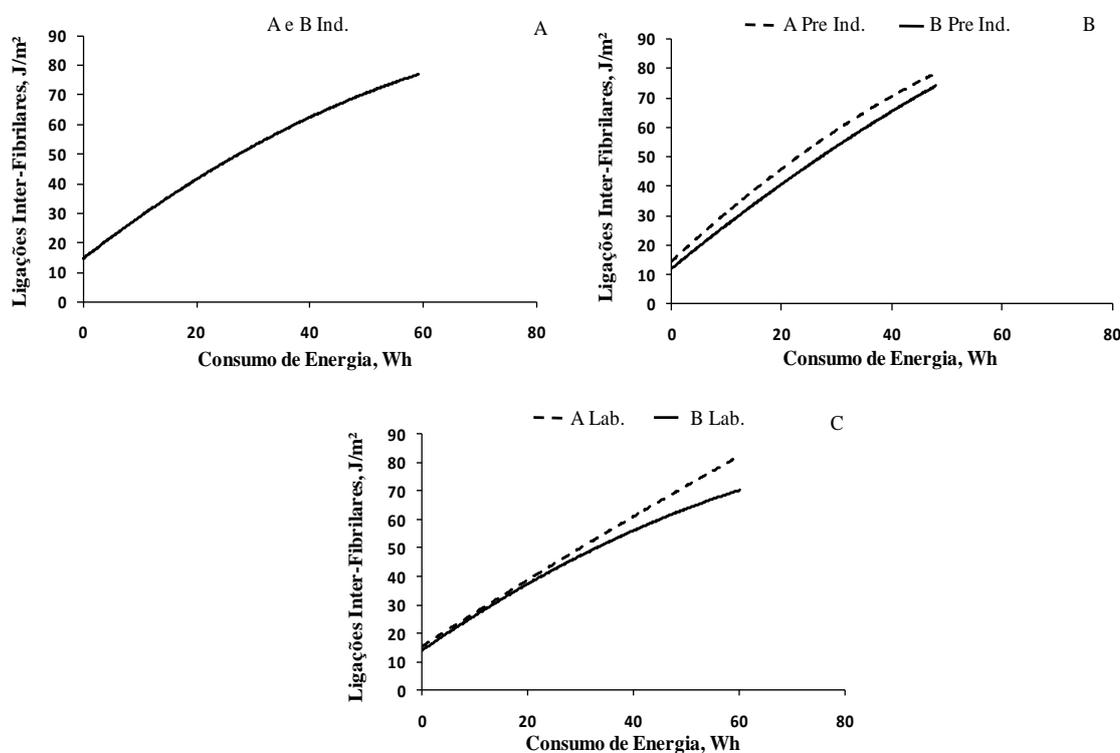


Figura 7 – Curvas ajustadas para ligações interfibrilares em função do consumo de energia para as polpas não branqueadas industriais pré-O₂ laboratorial (A e B Ind.), polpas pré-O₂ industriais (A e B Pre Ind.) e para polpas não branqueadas laboratoriais pré-O₂ laboratorial (A e B Lab.).

Como pode ser observado na Tabela 7, para 30 °SR, as polpas laboratoriais apresentaram a menor variação para a resistência de ligações interfibrilares.

Os papéis *tissue* ou absorventes demandam algumas propriedades especiais, como volume específico aparente (VEA), retenção de líquido, porosidade, entre outras (PEDRAZZI, 2009). O VEA, ou também *bulk*, é influenciado pelas características estruturais das fibras. Esta propriedade é incrementada por fibras mais rígidas por apresentarem menor capacidade de conformação (HOWARD e BICHARD, 1992).

As Figuras 8A, 8B e 8C apresentam as curvas de VEA em função do consumo de energia para as polpas de origem industrial e laboratorial de ambas as fábricas. Com base no teste F, a hipótese de igualdade das equações foi rejeitada para as comparações realizadas entre as polpas A e B não branqueadas industriais pré-deslignificadas

laboratoriais (Figura 8A) e para as polpas A e B pré-deslignificadas industriais (Figura 8B), não podendo, portanto, ser estimada uma equação comum para estas comparações. As diferenças de VEA entre as polpas não branqueadas industriais pré-deslignificadas laboratoriais e pré-deslignificadas industriais pode ser devido às diferentes condições de processo. As polpas não branqueadas e pré-deslignificadas laboratoriais (A e B) não diferiram significativamente. Dessa forma, para estas polpas, uma equação comum pôde ser usada como uma estimativa das duas equações envolvidas nesta comparação (Figura 8C).

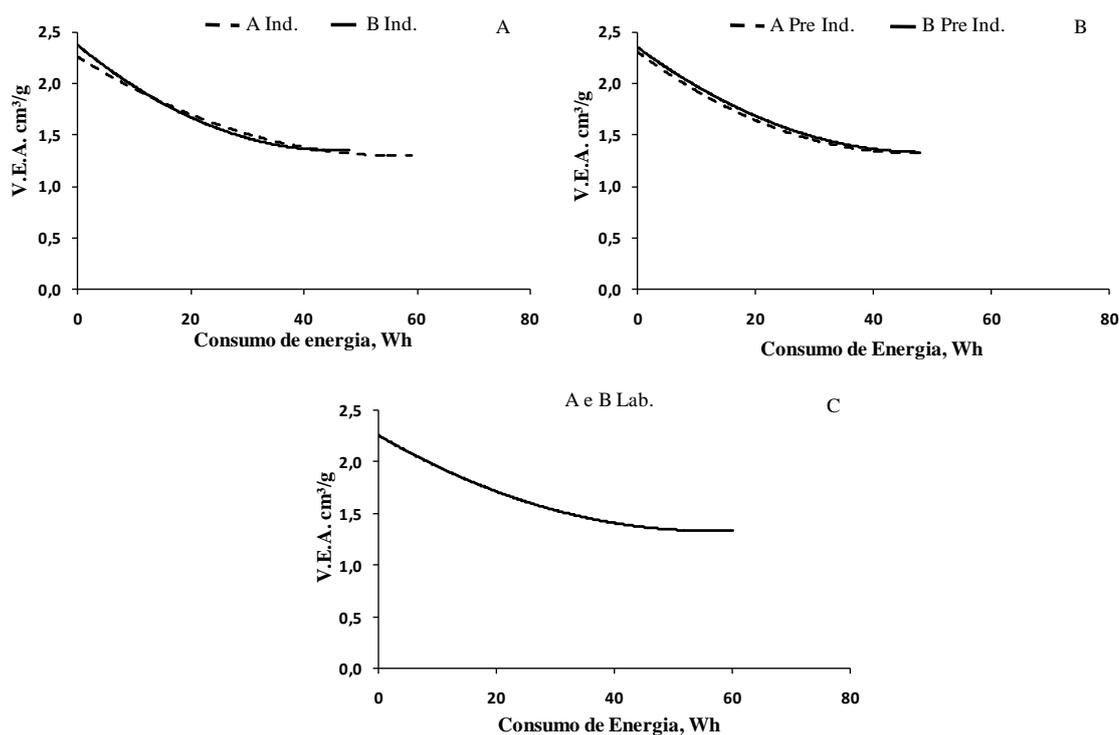


Figura 8 – Curvas ajustadas para volume específico aparente em função do consumo de energia para as polpas não branqueadas industriais pré-O₂ laboratorial (A e B Ind.), polpas pré-O₂ industriais (A e B Pre Ind.) e para polpas não branqueadas laboratoriais pré-O₂ laboratorial (A e B Lab.).

Como pode ser observado na Tabela 7, as polpas laboratoriais apresentaram menor variação nos valores de VEA para o mesmo grau Schopper-Riegler.

A capilaridade Klenm representa outra maneira de avaliar a capacidade absorvente da polpa celulósica. A Figura 9 apresenta curvas de capilaridade Klenm em função com consumo de energia para as polpas industriais e laboratoriais de ambas as fábricas. As polpas não apresentaram diferenças significativas quanto à capilaridade Klenm entre as comparações realizadas (A e B não branqueadas industriais pré-deslignificadas laboratoriais, A e B pré-deslignificadas industriais e A e B não

branqueadas e pré-deslignificadas laboratoriais). Com base no teste F, a hipótese de igualdade das equações não foi rejeitada, podendo-se concluir que as equações das polpas A e B não branqueadas industriais e pré-deslignificadas em laboratório (A e B Ind.), assim como das polpas A e B pré-deslignificadas industriais (A e B Pre Ind.) e das polpas não branqueadas e pré-deslignificadas laboratoriais (A e B Lab.) não diferiram significativamente. Dessa forma, uma equação comum pode ser usada com uma estimativa das duas equações envolvidas em cada comparação.

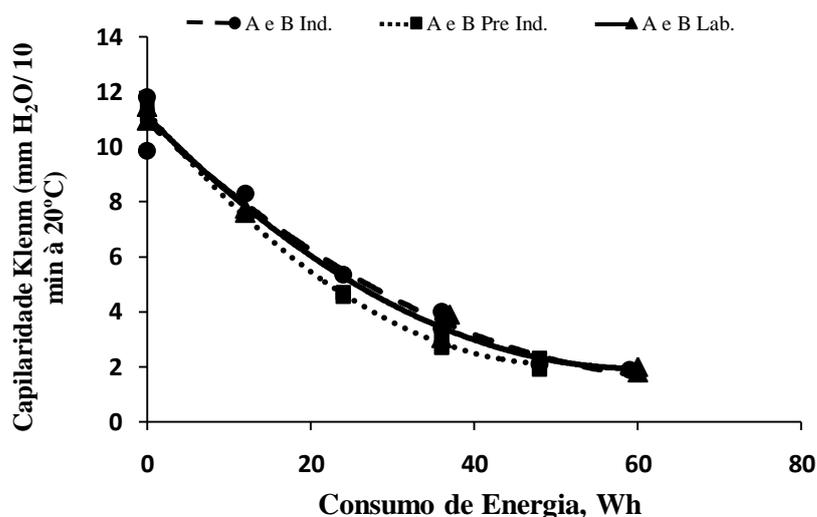


Figura 9 – Curvas comuns ajustadas para capilaridade Klenm em função do consumo de energia para as polpas não branqueadas industriais pré-O₂ laboratorial (A e B Ind.), polpas pré-O₂ industriais (A e B Pre Ind.) e polpas não branqueadas laboratoriais pré-O₂ laboratorial (A e B Lab.).

A polpa não branqueada industrial pré-deslignificada em laboratório da fábrica B apresentou-se degradada (baixa viscosidade, Tabela 5). A ação abrasiva do refino provocou na fibra uma fibrilação externa superior à ação de impacto (fibrilação interna). Com este menor impacto, a fibra não colapsou, dessa forma, o papel manteve sua estrutura, não ganhando densidade e não alterando a conformação e o diâmetro dos capilares no papel (Tabela 7).

A Figura 10 apresenta as curvas de capacidade de absorção de água em função do consumo de energia para as polpas de origem industrial e laboratorial de ambas as fábricas. Com base no teste F, a hipótese de igualdade das equações foi rejeitada para as comparações realizadas entre as polpas A e B não branqueadas industriais e pré-deslignificadas em laboratório (Figura 10A), não podendo, portanto, ser estimada uma

equação comum para esta comparação. As polpas pré-deslignificadas industriais (A e B Pre Ind.) e as polpas não branqueadas e pré-deslignificadas laboratoriais (A e B Lab.) não diferiram significativamente. Dessa forma, para estas polpas, uma equação comum pôde ser usada como uma estimativa das duas equações envolvidas em cada uma destas comparações (Figura 10 B).

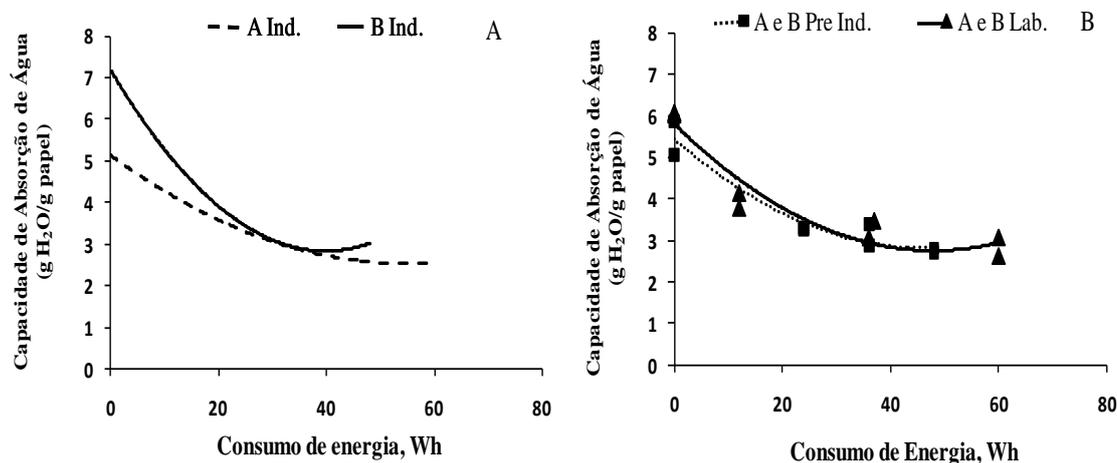


Figura 10 – Curvas ajustadas para capacidade de absorção de água em função do consumo de energia para as polpas não branqueadas industriais pré-O₂ laboratorial (A e B Ind.), polpas pré-O₂ industriais (A e B Pre Ind.) e polpas não branqueadas laboratoriais pré-O₂ laboratorial (A e B Lab.).

O índice de retenção de água (IRA) e a hornificação das fibras são propriedades higroscópicas e físicas da polpa e do papel, respectivamente (PEDRAZZI, 2009). O IRA indica a quantidade de água retida na fibra. A origem do fenômeno de hornificação (índice de enrijecimento da fibra) está diretamente ligada aos processos do cozimento, branqueamento e secagem da pasta, que normalmente acontece em fábricas não integradas. Este fenômeno tem sido associado à formação de irreversíveis ou parcialmente reversíveis, ligações de hidrogênio na polpa celulósica, em virtude da etapa de secagem ou remoção de água (SANTOS, 2005; FERNANDEZ DINIZ et al., 2004). Neste estudo estas propriedades foram determinadas nas polpas branqueadas sem refino.

Para 30 °SR, somente as polpas pré-deslignificadas industriais apresentaram mesmo índice de retenção de água.

Para a polpa pré-deslignificada industrial da fábrica B, as ligações de hidrogênio foram mais irreversíveis que a polpa pré-deslignificada industrial da fábrica A,

apresentando maior índice de enrijecimento (hornificação), o que pode ser comprovado pelo MOE (Tabela 7), produzindo papéis mais rígidos. O mesmo fato ocorreu para a polpa não branqueada industrial pré-deslignificada em laboratório da fábrica A (Tabela 7).

4. Conclusões

A polpa industrial B apresentou menor branqueabilidade que a polpa industrial A.

A polpa pré-deslignificada industrial A apresentou menor consumo de cloro ativo total e a polpa não branqueada industrial pré-deslignificada laboratorial B apresentou maior consumo de cloro ativo total.

Os principais fatores que afetaram as branqueabilidades das polpas industriais foram suas alvuras iniciais e seus conteúdos de ácidos hexenurônicos.

A polpa industrial B apresentou índice de rasgo significativamente menor que a polpa industrial A.

5. Referências bibliográficas

CARDOSO, G. V., FRIZZO, S. M. B., ROSA, C. A. B., FOELKEL, C. E. B., ASSIS, T. F., OLIVEIRA, P. Otimização das condições do cozimento kraft de Eucalyptus globulus em função do teor de lignina da madeira. In: Congresso Anual e Exposição de Celulose e Papel, 35., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2002.

CASTANHO, C. G., OLIVEIRA, R. C. Estudos de aproveitamento de rejeito fibroso industrial da polpação Kraft de eucalipto na produção de papéis reciclados. In: Congresso Anual e Exposição de Celulose e Papel, 33., 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2000.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; GIRARD, R.; JÄÄSKELÄINEN, A.; ARGYROPOULOS, D. S. Influence of pulping conditions on eucalyptus kraft pulp yield, quality and bleachability. **Tappi Journal**, Vol. 1, n. 1, p. 14-20, 2002.

DUARTE, A. P., BAPTISTA, C. Influence of pulping conditions on the bleachability of softwood kraft pulp. Keynote lectures. WPP. p. 49-55. 2003.

FERNANDES DINIZ, J. M. B.; GIL, M. H.; CASTRO, J. A. A. M. Hornification - its origin and interpretation in wood pulps. **Wood Sci. Technol.**, v. 37, p. 489-494, 2004.

HOWARD, R. C.; BICHARD, W. The basic effects of recycling on pulp properties. **Journal of Pulp and Paper Science**, v. 18, n. 4, p. 151-159, 1992.

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

MARK, R. **Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard**. New York: State University of New York. Syracuse: College of Environmental Science and Forests, 1984. v. 2.

MOKFIENSKI, A.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. A importância relativa da densidade básica da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 401-413, jul.-set. 2008.

PASCOAL NETO, C., EVTUGUIN, D. V., FURTADO, F. P., SOUSA, A. P. M. Effect of pulping conditions on ECF bleachability of *Eucalyptus globulus* kraft pulps. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. v. 41, p. 6200-6206, 2002.

PEDRAZZI, C. **Influência das xilanas na produção e nas propriedades de polpas de eucalipto para papéis**. 2009. 195 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

PIMENTA, L. R. **Comportamento dos componentes químicos da madeira de eucalipto na polpação Lo-Solids[®]**. 2006. 95 f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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

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

SANTOS, F. R. **Efeito do teor e estrutura de xilana de pastas brancas de E. globulus na sua tendência para a hornificação**. 2005. 102 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia dos processos de produção de pasta para papel). Universidade de Aveiro, Portugal.

SILVA, R. P. **Utilização de vibrações ultra-sônicas para o refino de celulose Kraft de eucalipto**. 2002. 77 f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

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.

SKOWRONSKI, J.; BICHARD, W. Fibre-to-fibre bond in paper. Part 1. Measurements of bond strength and specific bond strength. **Journal of Pulp and Paper Science**, v. 13, n. 5, p. : 165-169, 1997.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi Standard Methods**. Atlanta: TAPPI 2001.

VUORINEN, T.; FAGERSTRÖM, P.; BUCHERT, J.; TENKANEN, M.; TELEMAN, A. Selective hydrolysis of hexenuronic acid groups and its application in TCF and ECF bleaching of Kraft pulps. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE, 1996, Washington, DC. **Proceedings...**, Washington, DC, 1996. P. 43-51.

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

WEISE, U. and PAULAPURO, H. Hornification mechanisms and terminology. **Paperi
Ja Puu-Paper and Timber**, v. 80, n. 2, 1998.

3. CONCLUSÕES GERAIS

A madeira A apresentou maior teor de extrativos em acetona e consumiu maior carga de álcali efetivo que a madeira B. Quando produzidas industrialmente, as polpas derivadas das madeiras A e B apresentaram diferenças de alvura, sendo estas diferenças causadas pelo processo de polpação e não pela madeira.

As polpas industriais e laboratorial da fábrica B apresentaram menor alvura e menor teor de ácidos hexenurônicos que as polpas da fábrica A.

A polpa industrial B apresentou menor branqueabilidade que a polpa industrial A. A polpa pré-deslignificada industrial A apresentou menor consumo de cloro ativo total e a polpa não branqueada industrial pré-deslignificada laboratorial B apresentou maior consumo de cloro ativo total.

Os principais fatores que afetaram as branqueabilidades das polpas industriais foram suas alvuras iniciais e seus conteúdos de ácidos hexenurônicos.

A polpa industrial B apresentou índice de rasgo significativamente menor que a polpa industrial A.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela 1 A - Condições gerais dos estágios de branqueamento da polpa pré-deslignificada industrial A.

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	O	D*	(EP)	D1
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	100	90	80	75
Tempo, min	60	120	60	120
Pressão, KPa	600	-	-	-
O ₂ , kg/t	20	-	-	-
Fator kappa	-	0,16	-	-
ClO ₂ , como Cl ₂ , kg/t	-	16,48	-	10
¹ Cloro ativo total kg/t		27,4		
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	-	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3	-
NaOH, kg/t	20	1,5	10	-
pH final	-	4,5	11,2	4,8
Reagente consumido,%	-	98,5	59,2	100
Kappa	10,3	-	4,9	-
Alvura AD, %ISO	62,2	77,9	87,4	91,3
Alvura OD, %ISO	-	-	-	87,9
Reversão	-	-	-	3,4
Viscosidade, dm ³ /kg	1072	-	1004	979
HexA, mmol/kg	60,2	29,7	-	9,7

¹ Cloro ativo total = (ClO₂*2,63 + H₂O₂*2,09)

Tabela 2 A - Condições gerais dos estágios de branqueamento da polpa pré-deslignificada industrial B.

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	O	D*	(EP)	D1
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	100	90	80	75
Tempo, min	60	120	60	120
Pressão, KPa	600	-	-	-
O ₂ , kg/t	20	-	-	-
Fator kappa	-	0,16	-	-
ClO ₂ , como Cl ₂ , kg/t	-	15,52	-	10
¹ Cloro ativo total kg/t		34,9		
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	0,9	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3	-
NaOH, kg/t	20	-	10	0,5
pH final	-	4,7	11,2	5,1
Reagente consumido,%	-	99,2	93,9	100
Kappa	9,7	-	5,6	-
Alvura AD, %ISO	52,1	73,1	81,8	89
Alvura OD, %ISO	-	-	-	85,5
Reversão	-	-	-	3,5
Viscosidade, dm ³ /kg	938	-	676	661
HexA, mmol/kg	50,2	29,6	-	12,4

¹ Cloro ativo total = (ClO₂*2,63 + H₂O₂*2,09)

Tabela 3 A - Condições gerais dos estágios de branqueamento da polpa não branqueada industrial pré-deslignificada laboratorial A.

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	O	D*	(EP)	D1
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	100	90	80	75
Tempo, min	60	120	60	120
Pressão, KPa	600	-	-	-
O ₂ , kg/t	20	-	-	-
Fator kappa	-	0,16	-	-
ClO ₂ , como Cl ₂ , kg/t	-	16,96	-	10
¹ Cloro ativo total kg/t		31,8		
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	3	-	0,087
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3	-
NaOH, kg/t	20	-	10	-
pH final	11,5	4,7	11,4	4,8
Reagente consumido,%	-	99,2	73,5	100
Kappa	10,6	-	5	-
Alvura AD, %ISO	55,2	75,1	87	90,4
Alvura OD, %ISO	-	-	-	87
Reversão	-	-	-	3,4
Viscosidade, dm ³ /kg	1137	-	1063	979
HexA, mmol/kg	58,2	31,4	-	10,9

¹ Cloro ativo total = (ClO₂*2,63 + H₂O₂*2,09)

Tabela 4 A - Condições gerais dos estágios de branqueamento da polpa não branqueada industrial pré-deslignificada laboratorial B.

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	O	D*	(EP)	D1
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	100	90	80	75
Tempo, min	60	120	60	120
Pressão, KPa	600	-	-	-
O ₂ , kg/t	20	-	-	-
Fator kappa	-	0,16	-	-
ClO ₂ , como Cl ₂ , kg/t	-	16,32	-	10
¹ Cloro ativo total kg/t		37,0		
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	0,52	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3	-
NaOH, kg/t	20	-	10	0,5
pH final	10,7	4,8	11,1	5
Reagente consumido,%	-	98,4	93,9	100
Kappa	10,2	-	5,3	-
Alvura AD, %ISO	51,1	71,8	80,9	88,5
Alvura OD, %ISO	-	-	-	85
Reversão	-	-	-	3,5
Viscosidade, dm ³ /kg	899	-	653	626
HexA, mmol/kg	51,3	28,2	-	11,2

¹ Cloro ativo total = (ClO₂*2,63 + H₂O₂*2,09)

Tabela 5 A - Condições gerais dos estágios de branqueamento da polpa não branqueada laboratorial pré-deslignificada laboratorial A.

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	O	D*	(EP)	D1
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	100	90	80	75
Tempo, min	60	120	60	120
Pressão, KPa	600	-	-	-
O ₂ , kg/t	20	-	-	-
Fator kappa	-	0,16	-	-
ClO ₂ , como Cl ₂ , kg/t	-	16,16	-	10
¹ Cloro ativo total kg/t		30,3		
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	2,52	-	-
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3	-
NaOH, kg/t	20	-	10	-
pH final	11,7	4,6	11,2	4,8
Reagente consumido,%	-	98,4	73,5	100
Kappa	10,1	-	5,4	-
Alvura AD, %ISO	56,8	75,1	86,1	90,3
Alvura OD, %ISO	-	-	-	86,3
Reversão	-	-	-	4
Viscosidade, dm ³ /kg	1167	-	1079	1046
HexA, mmol/kg	55,4	31,1	-	11,3

¹ Cloro ativo total = (ClO₂*2,63 + H₂O₂*2,09)

Tabela 6 A - Condições gerais dos estágios de branqueamento da polpa não branqueada laboratorial pré-deslignificada laboratorial B.

Condições e Resultados	Estágios de Branqueamento			
	O	D*	(EP)	D1
Consistência, %	10	10	10	10
Temperatura, °C	100	90	80	75
Tempo, min	60	120	60	120
Pressão, KPa	600	-	-	-
O ₂ , kg/t	20	-	-	-
Fator kappa	-	0,16	-	-
ClO ₂ , como Cl ₂ , kg/t	-	16,64	-	10
¹ Cloro ativo total kg/t		31,1		
H ₂ SO ₄ , kg/t	-	2,52	-	0,087
H ₂ O ₂ , kg/t	-	-	3	-
NaOH, kg/t	20	-	10	-
pH final	11,7	4,6	11,2	5,1
Reagente consumido,%	-	98,5	75,5	97,4
Kappa	10,4	-	5,6	-
Alvura AD, %ISO	57,3	74,3	86,2	90,5
Alvura OD, %ISO	-	-	-	86,2
Reversão	-	-	-	4,3
Viscosidade, dm ³ /kg	1148	-	1010	962
HexA, mmol/kg	54	29,9	-	12,3

¹ Cloro ativo total = (ClO₂*2,63 + H₂O₂*2,09)

APÉNDICE B

Tabela 1 B - Equações ajustadas para °SR em função do consumo de energia (wh).

Amostras	Equações ajustadas	R ²
Pré-O ₂ industrial A	$\hat{y} = - 0,0078x^2 + 1,7418x - 25,94$	0,9998
Pré-O ₂ industrial B	$\hat{y} = - 0,0092x^2 + 1,895x - 27,834$	0,9993
Comum ^{ns}	$\hat{y} = -0,009x^2 + 1,8501x - 27,284$	0,9971
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial A	$\hat{y} = - 0,0192x^2 + 2,931x - 40,745$	0,9974
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial B	$\hat{y} = - 0,013x^2 + 2,2142x - 33,832$	0,9999
Comum ^{ns}	$\hat{y} = -0,0158x^2 + 2,4887x - 35,386$	0,9432
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial A	$\hat{y} = - 0,022x^2 + 3,1684x - 45,374$	0,9938
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial B	$\hat{y} = - 0,0276x^2 + 3,5299x - 49,631$	0,9999
Comum ^{ns}	$\hat{y} = - 0,0251x^2 + 3,3667x - 47,743$	0,9964

H0 = as duas equações são idênticas; ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 2 B - Equações ajustadas para índice de tração (N.m/g) em função do consumo de energia (wh).

Amostras	Equações ajustadas	R ²
Pré-O ₂ industrial A	$\hat{y} = - 0,0267x^2 + 2,5407x + 17,971$	0,9991
Pré-O ₂ industrial B	$\hat{y} = - 0,0246x^2 + 2,404x + 17,725$	0,9944
Comum ^{ns}	$\hat{y} = - 0,0256x^2 + 2,4723x + 17,848$	0,9952
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial A	$\hat{y} = - 0,012x^2 + 1,715x + 20,882$	0,9957
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial B	$\hat{y} = - 0,0135x^2 + 1,8671x + 17,384$	0,9897
Comum ^{ns}	$\hat{y} = - 0,0129x^2 + 1,7962x + 19,277$	0,9911
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial A	$\hat{y} = - 0,0158x^2 + 1,8674x + 20,272$	0,9988
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial B	$\hat{y} = - 0,0141x^2 + 1,7786x + 22,003$	0,9998
Comum ^{ns}	$\hat{y} = - 0,0149x^2 + 1,8233x + 21,135$	0,9981

H0 = as duas equações são idênticas; ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 3 B - Equações ajustadas para índice de rasgo (mN.m²/g) em função do consumo de energia (wh).

Amostras		Equações ajustadas	R ²
Pré-O ₂ industrial A*		$\hat{y} = - 0,0068x^2 + 0,4456x + 4,1508$	0,9681
Pré-O ₂ industrial B*		$\hat{y} = - 0,0049x^2 + 0,3394x + 3,1225$	0,9912
Comum		$\hat{y} = - 0,0058x^2 + 0,3925x + 3,6366$	0,8530
Não branqueada industrial O ₂ laboratorial A*	pré-	$\hat{y} = - 0,0042x^2 + 0,3418x + 4,9946$	0,9622
Não branqueada industrial O ₂ laboratorial B*	pré-	$\hat{y} = - 0,0039x^2 + 0,2884x + 3,9249$	0,9998
Comum		$\hat{y} = - 0,0028x^2 + 0,2514x + 4,7519$	0,7936
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial A		$\hat{y} = - 0,0034x^2 + 0,3116x + 4,8139$	0,9978
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial B		$\hat{y} = - 0,0044x^2 + 0,3638x + 4,4244$	0,9759
Comum ^{ns}		$\hat{y} = - 0,0039x^2 + 0,3373x + 4,6202$	0,9781

H0 = as duas equações são idênticas; ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 4 B - Equações ajustadas para módulo de elasticidade específico (MN.m/kg) em função do consumo de energia (wh).

Amostras		Equações ajustadas	R ²
Pré-O ₂ industrial A*		$\hat{y} = - 0,0009x^2 + 0,1128x + 3,2699$	0,9935
Pré-O ₂ industrial B*		$\hat{y} = - 0,0016x^2 + 0,1478x + 3,3044$	0,9825
Comum		$\hat{y} = - 0,0013x^2 + 0,1303x + 3,2871$	0,9763
Não branqueada industrial O ₂ laboratorial A*	pré-	$\hat{y} = - 0,001x^2 + 0,109x + 3,3315$	0,9798
Não branqueada industrial O ₂ laboratorial B*	pré-	$\hat{y} = - 0,0013x^2 + 0,1321x + 3,0349$	0,9907
Comum		$\hat{y} = - 0,0012x^2 + 0,1256x + 3,1763$	0,9788
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial A		$\hat{y} = - 0,0011x^2 + 0,1145x + 3,3563$	0,9622
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial B		$\hat{y} = - 0,0009x^2 + 0,0972x + 3,4466$	0,9885
Comum ^{ns}		$\hat{y} = - 0,001x^2 + 0,1059x + 3,4016$	0,9720

H0 = as duas equações são idênticas; ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 5 B - Equações ajustadas para opacidade (%) em função do consumo de energia (wh).

Amostras		Equações ajustadas	R ²
Pré-O ₂ industrial A		$\hat{y} = 0,0011x^2 - 0,3195x + 80,209$	0,9800
Pré-O ₂ industrial B		$\hat{y} = 0,0008x^2 - 0,2478x + 79,674$	0,9657
Comum ^{ns}		$\hat{y} = 0,001x^2 - 0,2836x + 79,941$	0,9451
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial A		$\hat{y} = 0,0004x^2 - 0,2088x + 78,011$	1,0000
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial B		$\hat{y} = 0,0007x^2 - 0,2551x + 80,434$	0,9777
Comum ^{ns}		$\hat{y} = 0,0002x^2 - 0,2099x + 79,015$	0,9515
Não branqueada laboratorial O ₂ laboratorial A	pré-	$\hat{y} = 0,0007x^2 - 0,2348x + 78,537$	0,9999
Não branqueada laboratorial O ₂ laboratorial B	pré-	$\hat{y} = 0,0001x^2 - 0,1634x + 78,293$	0,9996
Comum ^{ns}		$\hat{y} = 0,0004x^2 - 0,199x + 78,412$	0,9757

H0 = as duas equações são idênticas; ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 6 B - Equações ajustadas para coeficiente de dispersão de luz (%) em função do consumo de energia (wh).

Amostras		Equações ajustadas	R ²
Pré-O ₂ industrial A		$\hat{y} = 0,0061x^2 - 0,6896x + 45,233$	0,9966
Pré-O ₂ industrial B		$\hat{y} = 0,0041x^2 - 0,5303x + 43,934$	0,9780
Comum ^{ns}		$\hat{y} = 0,0051x^2 - 0,6099x + 44,584$	0,9747
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial A		$\hat{y} = 0,0026x^2 - 0,4337x + 41,727$	1,0000
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial B		$\hat{y} = 0,0045x^2 - 0,5851x + 45,503$	0,9938
Comum ^{ns}		$\hat{y} = 0,0031x^2 - 0,4839x + 43,358$	0,9699
Não branqueada laboratorial O ₂ laboratorial A	pré-	$\hat{y} = 0,0026x^2 - 0,4476x + 42,5$	1,0000
Não branqueada laboratorial O ₂ laboratorial B	pré-	$\hat{y} = 0,0022x^2 - 0,3778x + 41,947$	0,9979
Comum ^{ns}		$\hat{y} = 0,0024x^2 - 0,4125x + 42,22$	0,9903

H0 = as duas equações são idênticas; ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 7 B - Equações ajustadas para resistência de ligações interfibrilares (J/m²) em função do consumo de energia (wh).

Amostras		Equações ajustadas	R ²
Pré-O ₂ industrial A*		$\hat{y} = - 0,0086x^2 + 1,7442x + 14,485$	0,9985
Pré-O ₂ industrial B*		$\hat{y} = - 0,0051x^2 + 1,5394x + 12,009$	0,9987
Comum		$\hat{y} = - 0,0069x^2 + 1,6418x + 13,247$	0,9894
Não branqueada industrial O ₂ laboratorial A	pré-	$\hat{y} = - 0,0088x^2 + 1,5573x + 15,296$	0,9928
Não branqueada industrial O ₂ laboratorial B	pré-	$\hat{y} = - 0,0043x^2 + 1,3795x + 13,832$	0,9976
Comum ^{ns}		$\hat{y} = - 0,0074x^2 + 1,49x + 14,685$	0,9927
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial A*		$\hat{y} = - 0,0013x^2 + 1,1943x + 15,377$	0,9999
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial B*		$\hat{y} = - 0,0057x^2 + 1,2815x + 13,977$	0,9998
Comum		$\hat{y} = - 0,0035x^2 + 1,2354x + 14,693$	0,9820

H0 = as duas equações são idênticas; ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 8 B - Equações ajustadas para volume específico aparente (cm³/g) em função do consumo de energia (wh).

Amostras		Equações ajustadas	R ²
Pré-O ₂ industrial A*		$\hat{y} = 0,0005x^2 - 0,0422x + 2,3039$	0,9977
Pré-O ₂ industrial B*		$\hat{y} = 0,0004x^2 - 0,042x + 2,3507$	0,9973
Comum		$\hat{y} = 0,0004x^2 - 0,0421x + 2,3273$	0,9958
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial A*		$\hat{y} = 0,0003x^2 - 0,0337x + 2,2529$	0,9966
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial B*		$\hat{y} = 0,0005x^2 - 0,0448x + 2,3674$	0,9991
Comum		$\hat{y} = 0,0004x^2 - 0,038x + 2,3039$	0,9900
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial A		$\hat{y} = 0,0003x^2 - 0,033x + 2,2466$	0,9984
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial B		$\hat{y} = 0,0003x^2 - 0,0329x + 2,2573$	0,9753
Comum ^{ns}		$\hat{y} = 0,0003x^2 - 0,033x + 2,2519$	0,9864

H0 = as duas equações são idênticas; ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 9 B - Equações ajustadas para capilaridade Klenm (mm H₂O/10 min à 20 °C) em função do consumo de energia (wh).

Amostras	Equações ajustadas	R ²
Pré-O ₂ industrial A	$\hat{y} = 0,0036x^2 - 0,3729x + 11,4$	1,0000
Pré-O ₂ industrial B	$\hat{y} = 0,0035x^2 - 0,3511x + 11,146$	1,0000
Comum ^{ns}	$\hat{y} = 0,0036x^2 - 0,362x + 11,273$	0,9982
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial A	$\hat{y} = 0,0015x^2 - 0,2291x + 10,193$	0,9829
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial A	$\hat{y} = 0,0024x^2 - 0,3109x + 11,751$	0,9950
Comum ^{ns}	$\hat{y} = 0,002x^2 - 0,2736x + 10,919$	0,9754
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial A	$\hat{y} = 0,0029x^2 - 0,3229x + 10,988$	0,9998
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial B	$\hat{y} = 0,0022x^2 - 0,285x + 11,243$	0,9952
Comum ^{ns}	$\hat{y} = 0,0025x^2 - 0,3043x + 11,116$	0,9933

H0 = as duas equações são idênticas; ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 10 B - Equações ajustadas para capacidade de absorção de água (g H₂O/g papel) em função do consumo de energia (wh).

Amostras	Equações ajustadas	R ²
Pré-O ₂ industrial A	$\hat{y} = 0,0011x^2 - 0,0993x + 5,0654$	0,9996
Pré-O ₂ industrial B	$\hat{y} = 0,0014x^2 - 0,1296x + 5,836$	0,9647
Comum ^{ns}	$\hat{y} = 0,0012x^2 - 0,1145x + 5,4507$	0,9391
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial A*	$\hat{y} = 0,0009x^2 - 0,0951x + 5,1322$	1,0000
Não branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial B*	$\hat{y} = 0,0027x^2 - 0,218x + 7,1698$	0,9850
Comum	$\hat{y} = 0,0015x^2 - 0,141x + 6,0277$	0,8446
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial A	$\hat{y} = 0,0014x^2 - 0,1367x + 5,7677$	0,9250
Não branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial B	$\hat{y} = 0,0012x^2 - 0,1183x + 5,856$	0,9289
Comum ^{ns}	$\hat{y} = 0,0013x^2 - 0,1276x + 5,8112$	0,9073

H0 = as duas equações são idênticas; ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade; * = significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 11 B - Resultados dos testes físicos-mecânicos e ópticos das polpas branqueadas

Amostra	Revolução	Consumo de energia (Wh)	°SR	Espessura (µm)	Gramatura (g/m²)	PEA (Kg/cm³)	VEA (cm³/g)	M.O.E (MN.m/Kg)	IT (N.m/g)	IR (mN.m²/g)	LIF (J/m²)	Opacidade (%)	CDL (m²/kg)	IRA inicial (%)	IRA final (%)	Hornificação (%)	Cap. Klenm (mm/10 min à 20°C)	Cap. Abs. Água (gH ₂ O/g papel)
Pré-O ₂ industrial A	0	0	16	144	62,5	433	2,3	3,3	17,8	4,1	14,7	80,1	45,2	166	104	37,5	11,4	5,1
	2000	24	34	95	61,8	653	1,5	5,6	64,4	11,6	50,4	74,0	32,7	-	-	-	4,6	3,3
	3000	36	44	86	61,5	712	1,4	6,0	73,7	10,6	67,5	69,1	27,6	-	-	-	2,7	2,9
	4000	48	57	82	62,5	758	1,3	6,7	78,8	10,2	77,9	67,9	26,4	-	-	-	1,9	2,7
Pré-O ₂ industrial B	0	0	16	145	61,6	425	2,4	3,3	17,4	3,1	11,9	79,5	43,8	164	97	40,8	11,2	5,9
	2000	24	32	99	63,4	638	1,6	6,1	63,3	8,7	47,0	75,0	34,6	-	-	-	4,7	3,3
	3000	36	43	89	61,8	698	1,4	6,2	69,8	8,7	59,5	70,8	28,8	-	-	-	3,1	3,4
	4000	48	54	85	64,1	757	1,3	6,8	77,5	8,3	74,6	70,1	28,6	-	-	-	2,3	2,8
Não-branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial A	0	0	16	143	63,1	440	2,3	3,2	19,7	4,6	16,9	78,0	41,7	174	105	39,7	9,9	5,1
	1000	12	20	117	62,8	538	1,9	4,7	42,0	9,3	29,7	75,6	36,9	-	-	-	8,3	4,1
	3000	36	34	90	62,4	691	1,4	5,8	65,5	11,3	61,9	71,0	29,5	-	-	-	3,4	2,8
	5000	59	51	80	62,3	775	1,3	6,3	80,6	10,6	75,8	67,1	25,2	-	-	-	1,9	2,6
Não-branqueada industrial pré-O ₂ laboratorial B	0	0	17	148	62,6	423	2,4	3,0	17,0	3,9	14,0	80,3	45,4	162	101	37,7	11,8	7,2
	2000	24	32	99	62,4	629	1,6	5,6	57,0	8,6	43,3	75,4	34,7	-	-	-	5,4	3,3
	3000	36	42	84	61,4	727	1,4	6,0	63,7	9,3	59,5	71,3	29,4	-	-	-	4,0	3,2
	4000	48	54	86	63,0	735	1,4	6,6	77,3	8,7	69,6	70,2	28,1	-	-	-	2,1	2,9
Não-branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial A	0	0	17	142	63,1	443	2,3	3,2	19,7	4,7	15,6	78,5	42,5	174	103	40,7	11,0	6,1
	1000	12	20	120	64,0	535	1,9	4,9	41,5	8,3	29,1	75,9	37,5	-	-	-	7,6	3,8
	3000	36	34	92	63,0	687	1,5	5,8	66,3	11,5	56,9	70,9	29,8	-	-	-	3,1	3,1
	5000	60	52	83	62,9	755	1,3	6,3	75,8	11,4	82,2	66,9	25,2	-	-	-	2,0	2,6
Não-branqueada laboratorial pré-O ₂ laboratorial B	0	0	16	145	62,9	434	2,3	3,4	21,8	4,1	14,2	78,4	42,2	166	104	37,4	11,5	6,1
	1000	12	21	115	63,2	550	1,8	4,7	41,8	8,8	28,1	76,2	37,3	-	-	-	7,8	4,1
	3000	37	33	96	63,6	666	1,5	5,8	68,2	11,4	53,9	72,5	31,2	-	-	-	3,9	3,5
	5000	60	53	84	63,7	756	1,3	6,3	77,9	10,5	70,2	68,8	26,9	-	-	-	1,8	3,1

Nota: °SR = graus Schopper-Riegler; PEA = peso específico aparente; V.E.A. = volume específico aparente; M.O.E. = módulo de elasticidade específico; IT = índice de tração; IR = índice de rasgo; LIF = ligações inter-fibrilares; CDL = coeficiente de dispersão de luz; IRA = índice de retenção de água; Cap. Klenm = capilaridade klenm; Cap. Abs. de Água = capacidade de absorção de água.