

ISABEL CRISTINA NOGUEIRA ALVES

**POTENCIAL DA MADEIRA DO *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage  
VISANDO À PRODUÇÃO DE CELULOSE KRAFT**

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  
2010

ISABEL CRISTINA NOGUEIRA ALVES

**POTENCIAL DA MADEIRA DO *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage  
VISANDO À PRODUÇÃO DE CELULOSE KRAFT**

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: 22 de fevereiro de 2010.

---

Prof. Jorge Luiz Colodette  
(Co-orientador)

---

Prof. Rubens Chaves de Oliveira  
(Co-orientador)

---

Dr. Alfredo Mokfienski

---

Prof. Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho

---

Prof. José Lívio Gomide  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

A Deus por guiar meus passos e me acalantar nos momentos mais difíceis.  
Aos meus pais por não medirem esforços para que eu alcançasse meus objetivos, esta conquista é dedicada a vocês.

Aos meus irmãos, Sara e Sandro, por todo apoio.

Ao Lucas pelo amor, incentivo e companheirismo em todos os momentos, você sabe o quanto foi importante durante estes dois anos de curso, mesmo estando a distância no último ano, sempre foi meu refúgio.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal pela oportunidade de realização deste curso.

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

Ao professor José Lívio Gomide pela orientação e pelos ensinamentos.

Aos professores Jorge Colodette e Rubens Chaves Oliveira pela co-orientação e contribuições para realização deste trabalho.

Ao professor Hélio Garcia Leite pelo auxílio durante as análises estatísticas.

Aos amigos e funcionários do Laboratório de Celulose e Papel, pelas colaborações durante a realização deste trabalho, em especial ao pessoal do Laboratório de Polpação da Madeira.

Ao Joel do Laboratório de Propriedades da Madeira pelo auxílio durante as análises anatômicas da madeira.

À Cooperativa Agrária Agroindustrial e a Golden Tree Reflorestadora pelo fornecimento das amostras de *Eucalyptus benthamii*.

Às companheiras de república, Fernanda e Nara, que se tornaram grandes amigas.

Às amigadas conquistadas em Viçosa.

## **BIOGRAFIA**

ISABEL CRISTINA NOGUEIRA ALVES, filha de Sebastião Alves Pinto e Cordélia das Graças Nogueira Alves, nasceu em 30 de novembro de 1984, em Bom Sucesso, Estado de Minas Gerais.

Em 1995, concluiu o primário, realizado na Escola Estadual Protásio Guimarães, cursou o ginásio na Escola Estadual Benjamim Guimarães terminando em 1999, concluiu o segundo grau no Centro Educacional Padre José Elias Negreiros, no ano de 2002, em Bom Sucesso.

Ingressou no curso de Engenharia Florestal em março de 2003 pela Universidade Federal de Lavras – Lavras, MG. Diplomou-se Engenheira Florestal em fevereiro de 2008.

Em março de 2008, iniciou o Curso de Mestrado em Ciência Florestal, Área de Concentração em Celulose e Papel, pela Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2010.

## CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Gênero <i>Eucalyptus</i> .....	3
2.2. <i>Eucalyptus benthamii</i> .....	4
2.3. <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> .....	7
2.4. Qualidade da Madeira para Produção de Celulose e Papel.....	8
2.4.1. Densidade Básica.....	9
2.4.2. Componentes anatômicos.....	10
2.4.3. Componentes químicos.....	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15

3.1. Material Experimental.....	15
3.2. Caracterização física.....	16
3.3. Caracterização anatômica.....	16
3.4. Caracterização química.....	17
3.5. Polpação kraft.....	18
3.6. Determinação da fração parenquimatosa.....	19
3.7. Pré-deslignificação.....	20
3.8. Branqueamento ECF pela sequência D(EP)DP.....	21
3.9. Refino e testes físico-mecânicos.....	23
3.10. Análise estatística.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1. Descrição anatômica e dimensões das fibras.....	26
4.2. Densidade básica e composição química.....	28
4.3. Polpação Kraft.....	31
4.4. Determinação do teor de células de parênquima.....	33
4.5. Deslignificação com oxigênio.....	34
4.6. Branqueamento ECF.....	36
4.7. Comportamento das propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas branqueadas.....	36
5. CONCLUSÕES.....	46
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
ANEXOS.....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição geográfica de <i>Eucalyptus benthamii</i> antes do desmatamento.....	4
Figura 2 - Danos causados por geadas em <i>Eucalyptus dunnii</i> (à direita) em relação ao <i>Eucalyptus benthamii</i> (à esquerda) na região de Lages – SC.....	6
Figura 3 – Amostragem de toretes ao longo do fuste.....	15
Figura 4 - Imagens dos planos transversal (A), tangencial (B) e radial (C) da madeira de <i>Eucalyptus benthamii</i> .....	26
Figura 5 – Estabelecimento da carga de álcali efetivo requerida para atingir número kappa 17.....	31
Figura 6 – Viscosidade da polpa em função do número kappa.....	32
Figura 7 – Rendimento depurado da polpa x número kappa.....	32
Figura 8 - Consumo de energia no refino em função do índice de tração.....	38
Figura 9 – Curva comum ajustada para graus Schopper-Riegler em função do índice de tração.....	39
Figura 10 – Curvas ajustadas para índice de rasgo em função do índice de tração.....	40

Figura 11 – Curva comum ajustada para índice de arrebentamento em função do índice de tração.....	41
Figura 12 – Curva comum ajustada para módulo de elasticidade em função do índice de tração.....	41
Figura 13 – Curva comum ajustada para energia de deformação em função do índice de tração.....	42
Figura 14 – Curva comum ajustada para resistência à passagem de ar em função do índice de tração.....	43
Figura 15 – Curva comum ajustada para peso específico aparente em função do índice de tração.....	43
Figura 16 – Volume específico aparente em função do índice de tração.....	44
Figura 17 – Opacidade em função do índice de tração.....	45
Figura 18 – Coeficiente de dispersão de luz em função do índice de tração.....	45



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exigências climáticas para <i>Eucalyptus benthamii</i> .....	5
Tabela 2 – Proporção dos componentes químicos estruturais da madeira de folhosas.....	11
Tabela 3 – Análises químicas da madeira.....	18
Tabela 4 – Procedimentos analíticos.....	19
Tabela 5 – Condições da Pré-O <sub>2</sub> .....	20
Tabela 6 – Condições do estágio de dióxido de cloro.....	21
Tabela 7 – Condições do estágio de extração alcalina com peróxido.....	22
Tabela 8 – Condições do estágio de dióxido de cloro.....	23
Tabela 9 – Condições do estágio de peróxido.....	23
Tabela 10 – Testes físico-mecânicos e ópticos realizados nas polpas.....	24
Tabela 11 – Valores médios de frequência (mm <sup>-2</sup> ) e diâmetro dos vasos da madeira de <i>Eucalyptus benthamii</i> .....	27
Tabela 12 – Resultados da análise de fibras do <i>Eucalyptus benthamii</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> .....	28
Tabela 13 - Densidade básica e teor de extrativos das madeiras.....	29

Tabela 14 – Teor de lignina e relação S/G das madeiras.....	30
Tabela 15 – Resultados da análise de carboidratos.....	30
Tabela 16 – Resultados dos cozimentos das madeiras para produção de polpa com número kappa 17.....	33
Tabela 17 – Resultados das frações prosenquimatosa e parenquimatosa das polpas das madeiras.....	34
Tabela 18 – Deslignificação com oxigênio das polpas das madeiras de baixa (BD) e alta densidade (AD).....	35
Tabela 19 – Características das polpas após deslignificação com oxigênio das madeiras do <i>Eucalyptus benthamii</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i> .....	35
Tabela 20 – Características das polpas após sequência ECF de branqueamento.....	36
Tabela 21 – Análises morfológicas das fibras de polpa branqueada determinadas no Galai CIS-100.....	37

## RESUMO

ALVES, Isabel Cristina Nogueira. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2010. **Potencial da madeira do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage visando à produção de celulose Kraft.** Orientador: José Lívio Gomide. Co-Orientadores: Jorge Luiz Colodette e Rubens Chaves de Oliveira.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose kraft. Suas características foram comparadas com as de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* que é, provavelmente, o clone mais plantado no Brasil e, portanto, de grande importância no setor nacional de celulose e papel. As características avaliadas na madeira foram a densidade básica, composição anatômica, dimensões das fibras e composição química. Foram realizados cozimentos em escala laboratorial onde se avaliou o teor de álcali efetivo no licor residual, o rendimento depurado e a viscosidade da polpa celulósica. As polpas foram branqueadas pela seqüência OD(EP)DP, a uma alvura final de  $90\pm 1\%$  ISO, sendo, depois, refinadas e testadas suas propriedades físico-mecânicas e ópticas. A madeira do *Eucalyptus benthamii* apresentou estrutura anatômica bastante semelhante às outras espécies do gênero e, ainda, densidade básica e dimensões das fibras dentro dos parâmetros dos clones de *Eucalyptus* utilizados atualmente pela indústria nacional de celulose e papel. Do ponto de vista de constituição química, o *Eucalyptus benthamii* demonstrou possuir qualidade tecnológica inferior à do

híbrido urograndis, pois apresentou maiores teores de extrativos e de lignina, menor teor de glucanas, maior teor de galactanas e menor relação S/G, características que possivelmente contribuíram para o menor rendimento em polpa apresentado pela espécie. Durante a deslignificação com oxigênio a polpa do *Eucalyptus benthamii* obteve maior ganho de alvura e maior queda do número kappa, entretanto apresentou menor seletividade. A diferença entre as viscosidades iniciais das polpas marrom e pré-O foi reduzida após o branqueamento. A madeira do *Eucalyptus benthamii* demonstrou ser menos atraente para a produção de celulose, pois proporcionou menor rendimento depurado, menor viscosidade e requerendo maior carga de álcali no cozimento. Entretanto, após branqueamento e o refino as desvantagens foram minimizadas, uma vez que as polpas apresentaram comportamentos bem semelhantes, inclusive para as propriedades físico-mecânicas das polpas.

## ABSTRACT

ALVES, Isabel Cristina Nogueira. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2010. **Potential of *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage wood for kraft pulp production.** Adviser: José Lívio Gomide. Co-Advisers: Jorge Luiz Colodette and Rubens Chaves de Oliveira.

The purpose of this study was to evaluate the quality of *Eucalyptus benthamii* wood for kraft pulp production. Probably the most planted *Eucalyptus* clone in Brazil, a hybrid of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, was also analyzed for comparison purposes. The wood characteristics analyzed were the basic density and chemical composition. Laboratory pulping was carried out to obtain pulps with kappa number 17 and their effective residual alkali, screen yield and viscosity of pulp. The pulps were bleached by OD(EP)DP sequence to reach  $90\pm 1\%$ ISO. The bleached pulps were refined and their optical and physico-mechanical properties were determined. The *Eucalyptus benthamii* wood presented an anatomical structure, basic density and fiber dimensions quite similar to those of other eucalypts species planted by the Brazilian pulp industry. However, it presented poorer wood quality characteristics when compared to the hybrid urograndis species, with higher amounts of extractives and lignin, lower amount of glucans, more galactans and lower S/G ratio, characteristics favoring lower pulping yield. During oxygen delignification *Eucalyptus benthamii* pulp resulted in higher brightness gain and higher kappa number decrease, but lower selectivity. The viscosity difference between the initial

brown pulp and oxygen delignified pulp was reduced after bleaching. The *Eucalyptus benthamii* wood proved to be less attractive for kraft pulp production because presented lower screened yield, lower viscosity and requiring greater alkali charge for cooking. However, after bleaching and refining the disadvantages were minimized, since the bleached pulps behaved very similar, including physical and mechanical properties.

## 1. INTRODUÇÃO

Após encerrar 2008 com uma produção superior a 12,8 milhões de toneladas, o Brasil alcançou a posição de quarto maior produtor mundial de celulose, ultrapassando nesse ano a Suécia e a Finlândia (FALEIROS, 2009). Ainda segundo esta autora, em 2008 o setor nacional de celulose e papel exportou quase 6 bilhões de dólares, crescendo 30,6% nas exportações de celulose e 14,6% nas exportações de papel.

A produção nacional de celulose é predominantemente de *Eucalyptus*, representando mais de 85% do total. Esta posição de destaque no mercado mundial foi alcançada graças à elevada produtividade das florestas nacionais de *Eucalyptus* e a alta qualidade desta madeira, conforme demonstrado por Gomide et al. (2005). O grande crescimento futuro da produção nacional de celulose de *Eucalyptus*, com previsão de instalação de novas e grandes fábricas nos Estados do Maranhão, Piauí, Bahia, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul, deverá proporcionar aumento de produção superior a 13 milhões de toneladas anuais até o ano de 2015. Para que o Brasil possa concretizar este grande aumento de produção de celulose será indispensável a contínua melhoria de produtividade das florestas clonais de *Eucalyptus* e da qualidade desta madeira, além do estabelecimento de florestas com novas espécies não convencionais no Brasil.

O grande crescimento previsto da indústria nacional de celulose irá demandar plantio de extensas áreas de florestas de *Eucalyptus* e, certamente, estudos de espécies resistentes ao frio, para plantio nos Estados da região sul do Brasil, serão de grande importância para o setor. Os Estados desta região

apresentam condições climáticas bastante peculiares, com invernos bem rigorosos sendo comum a ocorrência de geadas em algumas áreas. Dessa forma, a escolha de espécies do gênero *Eucalyptus* aptas ao cultivo nestes locais fica limitada a apenas algumas poucas espécies, dentre elas o *Eucalyptus viminalis* e o *Eucalyptus dunnii*, mas novos estudos têm demonstrado a potencialidade do plantio de *Eucalyptus benthamii*.

O *Eucalyptus benthamii* é uma espécie nativa da Austrália e sua área de ocorrência natural está, atualmente, limitada a pequenas populações a oeste da cidade de Sidney devido, principalmente, às pressões de causas antrópicas. Esta espécie foi introduzida no Brasil no final da década de 90 e a partir dos resultados de plantios experimentais tem sido observado seu potencial para plantios nos estados da região sul do Brasil, áreas montanhosas de Minas Gerais e em países de clima temperado da América do Sul.

Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade tecnológica para produção de celulose do *Eucalyptus benthamii* visando obter maiores informações sobre a qualidade da sua madeira. Suas características foram comparadas a um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* que apresenta grande importância no setor nacional de celulose e papel, sendo plantado pelas principais empresas brasileiras produtoras de celulose kraft branqueada. A avaliação das madeiras baseou-se na análise de características físicas, químicas e anatômicas; na produção de polpa kraft ao mesmo número kappa; no branqueamento das polpas no mesmo nível de alvura pela seqüência ECF de branqueamento (OD(EP)DP); no refino dessas polpas branqueadas em moinho PFI; na confecção de folhas e na medição de suas propriedades físico-mecânicas.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* é formado por aproximadamente 600 espécies e apresenta grande importância no setor florestal em todo o mundo devido à sua alta variabilidade genética e adaptabilidade a diferentes regiões (ELDRIDGE et al., 1993).

O eucalipto é uma árvore nativa da Austrália, do Timor e da Indonésia, sendo exótico em todas as outras partes do mundo. Os primeiros plantios datam do início do século XVIII, na Europa, na Ásia e na África. Já no século XIX, começou a ser plantado em países como Espanha, Índia, Brasil, Argentina e Portugal (FAO, 1981).

Relatos indicam que as primeiras mudas de eucalipto chegaram ao Brasil em 1825, referências no Jardim Botânico de São Paulo, porém a introdução do gênero só tomou impulso com a exploração para fins econômicos no início do século XX, quando passou a ser empregado na produção de dormentes ferroviários e na alimentação das locomotivas da época, como lenha (PEREIRA et al., 2000).

Atualmente as espécies do gênero *Eucalyptus* são conhecidas não só pelo seu rápido crescimento, mas também pela grande diversidade, tornando possível atender aos requisitos tecnológicos dos mais diversos segmentos da produção industrial madeireira, além de apresentar grande plasticidade quanto às áreas de plantio.

Apesar dos grandes avanços obtidos no setor florestal brasileiro, novas espécies de eucalipto e outras essências devem ser pesquisadas, avaliando-se seu potencial para os mais diversos fins. A introdução de novas espécies deve ser realizada de acordo com cada local e também características próprias da árvore, como resistência às geadas e outros fatores ambientais, além de qualidades referentes à madeira.

## 2.2. *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage

Segundo levantamentos recentes, a área de ocorrência natural do *Eucalyptus benthamii* na Austrália limita-se a uma pequena população e alguns indivíduos isolados em planícies ao longo do rio Nepean e seus afluentes entre as localidades de Wallacia e Camden e de uma população maior em Kedumba Creek (33° 49' Latitude Sul; 150° 22' Longitude Oeste), de acordo com Higa e Pereira (2003) (Figura 1). Este fato é consequência do desmatamento da população original visando à formação de pastagens e da inundação de algumas áreas para construção da represa de Warragamba. Aliado a esses fatores, a preferência por solos férteis tornou a espécie vulnerável, chegando a ser considerada extinta (PRYOR, 1981). Benson (1985), citado por Higa (1999), relata ainda a ocorrência de três incêndios que dizimaram parte da população original.

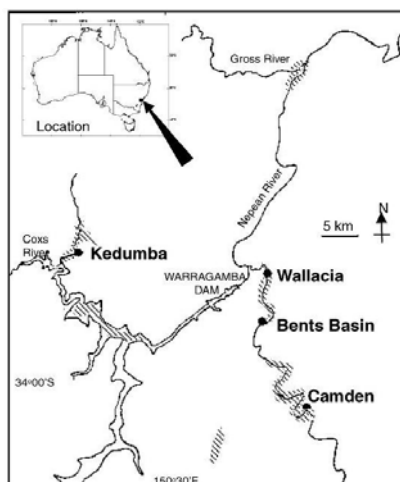


Figura 1 - Distribuição geográfica de *Eucalyptus benthamii* antes do desmatamento. Fonte: BUTCHER (2005).

A Tabela 1 apresenta as exigências climáticas para o *Eucalyptus benthamii* em função da região de ocorrência natural na Austrália.

**Tabela 1** – Exigências climáticas para *Eucalyptus benthamii*

Parâmetros bioclimáticos	Indicadores	
	Mínimo	Máximo
Precipitação média anual	730 mm	1.010 mm
Temperatura média das máximas do mês mais quente	26°C	30°C
Temperatura média das mínimas do mês mais frio	-1°C	3°C
Temperatura média anual	13°C	17°C
Número de meses sem chuvas	0	5
Regime de chuvas	Regular no verão	Regular no verão

Fonte: Jovanovic e Booth (2002).

Em 1988 a EMBRAPA FLORESTAS importou sementes de *Eucalyptus benthamii* da Austrália e obteve a partir destas, uma área de produção de sementes. Das sementes produzidas, realizou-se o plantio da espécie em regiões de ocorrência de geadas severas nos três estados da Região Sul. Os resultados iniciais mostraram que a espécie é bastante tolerante à geadas, chegando a suportar temperaturas negativas na fase inicial de desenvolvimento sem causar efeitos negativos às plantas. Além disso, a espécie apresentou também um bom crescimento, atingindo incremento médio anual de 45 m<sup>3</sup>.

Higa e Carvalho (1990) observaram na região de Dois Vizinhos, no Estado do Paraná, altura média de 16 m e DAP médio de 15 cm aos 45 meses de idade e concluíram que a espécie merece atenção especial dos melhoristas florestais. A espécie é, também, apontada como promissora em áreas montanhosas do Estado de Minas Gerais (EMBRAPA, 1988).

Graça et al. (1999) relatam que além do crescimento rápido e resistência às geadas, a espécie apresentou boa forma de fuste e alta homogeneidade do talhão em plantios experimentais da EMBRAPA FLORESTAS em Colombo, PR.

Higa (1999) salienta que apesar de muitas espécies do gênero *Eucalyptus* vegetarem naturalmente em regiões de geadas severas, um número reduzido de espécies deste gênero *Eucalyptus* é indicado para plantios em regiões susceptíveis às geadas severas no Brasil. Esse comportamento deve-

se ao fato das temperaturas nas áreas de ocorrência natural das espécies diminuírem gradativamente no inverno, em contraste ao observado em áreas de altitude das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, onde as temperaturas caem abruptamente e as plantas não têm tempo para se aclimatarem e adquirirem resistência às geadas. Vários estudos já comprovaram que as mudas de *Eucalyptus benthamii*, se plantadas em época adequada, não são danificadas por geadas severas.

A espécie demonstrou superioridade ao *Eucalyptus dunnii*, espécie que também apresenta potencial para plantio nas regiões de clima temperado do sul do país, com relação à tolerância as geadas e crescimento em plantios localizados nos municípios de Colombo e Guarapuava, no Estado do Paraná (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2006). Na África do Sul a espécie é considerada potencial para plantios em regiões de ocorrência de geadas e foi incluída no programa de melhoramento do ICFR (Instituto for Commercial Forestry Research) a partir de 1994 (SWAIN, 1997). Na China a espécie também tem apresentado bons resultados na província de Yunnan, embora tenha sido afetada pelo déficit hídrico (YONQI et al., 1994).

A Figura 2 mostra uma planta de *Eucalyptus dunnii* e outra de *Eucalyptus benthamii*, após a ocorrência de geada na região de Lages – SC, evidenciando a maior tolerância do *Eucalyptus benthamii* à geada.



Figura 2 - Danos causados por geadas em *Eucalyptus dunnii* (à direita) em relação ao *Eucalyptus benthamii* (à esquerda) na região de Lages - SC. FONTE: SANTOS (2007), citado por SILVA (2008).

Apesar do potencial silvicultural demonstrado do *Eucalyptus benthamii*, ainda são poucas as áreas de plantio ao redor do mundo e, conseqüentemente, há carência de estudos mais detalhados sobre esta espécie para fins industriais.

No setor de energia a espécie tem mostrado bom desempenho, apresentando alto rendimento em carvão. Já para construção civil e indústria moveleira a espécie não obteve sucesso devido aos seus altos níveis de tensões de crescimento, as quais provocam rachaduras e empenamentos (HIGA e PEREIRA, 2003).

Na área de papel e celulose não há muitos trabalhos publicados utilizando esta espécie. Little e Gardner (2003) analisaram o crescimento, em locais de elevadas altitudes, de 20 espécies de *Eucalyptus* destinadas à produção de madeira para celulose e observaram bom potencial do *Eucalyptus benthamii*, mas deve-se considerar que os autores basearam-se somente no seu incremento médio anual. Clark e Hicks (2003), estudando o potencial de 13 espécies menos conhecidas de *Eucalyptus*, plantadas em diferentes regiões da Austrália, concluíram que o *Eucalyptus benthamii* não apresentava um bom desempenho, resultando em baixos rendimentos em polpa.

### **2.3. *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***

Dentre as principais espécies de eucaliptos utilizadas nos reflorestamentos brasileiros, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e seus híbridos interespecíficos, principalmente com a espécie *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, são as mais importantes, por causa de seu uso intensivo e crescente nos mais diversos segmentos industriais (PINTO JÚNIOR e GARLIPP, 2008).

Segundo Busnardo (1981), o *Eucalyptus urophylla* e seus híbridos (como o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) já constituíam na década de 1980 uma das principais fontes de matéria-prima para a indústria brasileira de celulose, apresentando excelente desenvolvimento em altura e em diâmetro e densidade básica intermediária entre as madeiras de média densidade básica (0,460 g.cm<sup>-3</sup> - *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*) e as madeiras de alta

densidade (acima de  $0,570 \text{ g.cm}^{-3}$  – *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus paniculata*).

A susceptibilidade ao cancro do eucalipto, aliada a baixa capacidade de rebrota em climas sujeitos a deficiências hídricas, limitaram a utilização extensiva do *Eucalyptus grandis*. Como conseqüência, a síntese do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, passou a ser a base da silvicultura intensiva clonal brasileira (RUY, 1998).

Estudos realizados por Oda e Ferreira (1982) mostraram que híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, plantados no Estado de São Paulo, apresentavam uma superioridade em relação ao *Eucalyptus grandis*, obtendo ainda maior retidão de fuste e melhores características de ramificação.

No Brasil, as espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* e o seu híbrido adquiriram grande importância para a produção de papel e celulose de fibra curta. Martins e Ikemori, citados por Carvalho e Nahuz (2001), estudando vários cruzamentos entre espécies de eucalipto, destacam que o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* foi o híbrido que mais se destacou, devido suas características desejáveis para a produção de celulose, sua boa produtividade relacionada à adaptação ecológica, às condições do local e apresentando, inclusive, resistência ao cancro.

Os programas de melhoramento florestal que utilizam a hibridação são bastante aplicados em empresas do setor que dispõem hoje de milhares de hectares plantados com indivíduos clonados de híbridos. Segundo Ikemori e Campinhos Jr. (1983) e Bertolucci et al. (1993), nestes plantios o híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destaca-se por apresentar alta produtividade no campo e excelentes características de qualidade da fibra.

#### **2.4. Qualidade da Madeira para Produção de Celulose e Papel**

Nos processos de seleção de clones para indústria de papel e celulose a qualidade da madeira apresenta grande importância. Pode-se definir qualidade como uma adequação ao uso que se pretende. Para a madeira, os principais parâmetros de qualidade são as características físicas, químicas e anatômicas,

além de outros fatores relacionados à própria árvore como forma do fuste, incremento médio anual, resistência a doenças, uniformidade, etc.

Dentre os parâmetros de qualidade citados, a uniformidade, tanto dos plantios como das características da madeira, constitui-se num dos mais importantes, pois afeta direta ou indiretamente o comportamento da madeira nos processos de polpação e de branqueamento e na qualidade da celulose produzida.

#### **2.4.1. Densidade Básica**

Segundo Foelkel (1990), a densidade básica da madeira pode ser considerada como um dos mais importantes parâmetros para a avaliação da sua qualidade. Esta propriedade pode ser determinada através de métodos de fácil execução, o que tem encorajado seu uso como índice de qualidade da madeira.

A densidade básica é uma propriedade de grande importância na produção de celulose e de produtos sólidos da madeira. É resultado da proporção entre madeira de lenho inicial e tardio e das dimensões das fibras e vasos. A variabilidade da densidade básica entre e dentro das espécies é significativa e suficiente para melhoria via cruzamento clássico.

Correlações entre densidade básica e outras características da madeira variam grandemente, sendo que a correlação com o teor de lenho tardio e com a espessura de parede da fibra é positiva e forte. Diversos estudos mostram correlações levemente negativa ou positiva com o índice de crescimento da árvore.

Estudos feitos por Foelkel et al. (1983), Dias e Silva Jr. (1985) e Silva Jr. et al. (1996) mostraram que madeiras com densidade básica na faixa de 470 a 490 kg.m<sup>-3</sup> proporcionam rendimentos mais altos. No entanto, os projetos de melhoramento florestal e os critérios de projeto de novas fábricas de celulose priorizam madeiras com densidades superiores a 500 kg.m<sup>-3</sup>. Madeiras mais densas normalmente requerem cozimentos mais drásticos, em termos de temperatura e carga de álcali, com redução de rendimento. Mesmo assim, o

custo-benefício é atrativo, tendo em vista a maior produtividade do processo quanto à produção de polpa por volume do digestor.

#### **2.4.2. Componentes anatômicos**

As madeiras de folhosas apresentam o tecido básico de sustentação mecânica constituído por fibras libriformes e fibrotraqueóides e a condução de líquidos na árvore é realizada através dos elementos de vasos. Existem, ainda, as células parenquimáticas, que desempenham a função de armazenamento, transformação e condução de substâncias nutritivas (BURGER e RICHTER, 1991).

As dimensões das fibras de madeiras de folhosas são menores que os traqueóides de coníferas, daí a denominação fibras curtas. Ocupam de 20-80% do lenho, constituindo-se no elemento anatômico mais abundante. Dentre suas dimensões fundamentais, a largura e o comprimento são relativamente similares para as polpas de eucaliptos e, segundo Florsheim (1992) e Urbinati (1998), são também os parâmetros anatômicos mais intensamente estudados. A espessura da parede varia bastante e constitui uma das propriedades mais importantes. Conforme variam as dimensões das fibras e a sua morfologia, importantes características nos processos de fabricação do papel também são afetadas (FOELKEL, 2007).

Os vasos são muito importantes tanto para a fisiologia e crescimento das árvores como para os processos de conversão da madeira a celulose. Sua presença nas madeiras de folhosas favorece o processo de impregnação dos cavacos pelo licor de cozimento. Como são elementos grandes e ocos, facilitam a movimentação do licor de cozimento para o interior dos cavacos. Além disso, a comunicação dos vasos com as células adjacentes (parênquimas radial e axial), através das pontuações, permite que o licor de cozimento migre para o interior dos cavacos usando essas vias de acesso. Por essas razões, a penetração e impregnação dos cavacos de folhosas pelo licor de cozimento kraft é bastante favorecida.



### 2.4.3. Componentes químicos

A madeira é um material muito heterogêneo, constituída por vários compostos químicos. As grandes variações em sua composição química podem ser atribuídas às variações entre espécies, embora existam variações dentro de uma mesma espécie, devido a fatores genéticos e condições ecológicas de crescimento, e até em diferentes regiões na mesma árvore (TRUGILHO et al., 2006).

Os vários componentes químicos da madeira podem ser agrupados em polissacarídeos, ligninas, extrativos e constituintes inorgânicos (cinzas). Dentre estes componentes a fração polissacarídeos se destaca, constituída principalmente por celulose e hemiceluloses. A Tabela 2 apresenta as proporções em que tais componentes se apresentam na madeira de folhosas.

**Tabela 2** - Proporção dos componentes químicos estruturais da madeira de folhosas

Componente	Teor (%)
Celulose	43-47
Hemicelulose	25-35
Lignina	16-24
Extrativos	2-8

Fonte: SIXTA (2006)

A celulose é o componente majoritário, perfazendo aproximadamente a metade das madeiras, tanto em coníferas como em folhosas. Pode ser brevemente caracterizada como um polissacarídeo linear constituído de unidades anidro pirano glicose com ligações glicosídicas do tipo  $\beta(1-4)$ , com alto grau de polimerização (KLOCK e MUNIZ, 1998).

A celulose é o principal constituinte da polpa, determinando a maioria das propriedades do papel. Exerce influência na resistência da fibra individual e nas ligações entre as fibras e, associada com as hemiceluloses, determina as características da polpa celulósica, em termos de rendimento e de resistência.

As hemiceluloses são polissacarídeos de baixo grau de polimerização, constituídos por diferentes açúcares e ácidos. Apresentam-se em estruturas

ramificadas e amorfas e estão associadas à lignina e a celulose. Localizam-se em toda parede celular, principalmente nas camadas S1 e S3. São responsáveis por importantes propriedades das polpas celulósicas, pois devido a ausência de cristalinidade, baixa massa molecular e configuração ramificada, absorvem água mais facilmente. Este fato contribui para redução do tempo e da energia requeridos no refino de pastas celulósicas e o aumento da área específica ou de ligações entre as fibras (PHILIPP e D'ALMEIDA, 1988).

Nos eucaliptos, destacam-se as metilglucoronoxilanas. Estas hemiceluloses, ricas em grupos acetila (5-8 grupos por cada 10 unidades de xilana) e ácidos urônicos, exercem impacto no rendimento, no consumo de álcali e na qualidade da polpa marrom (WALLIS et al., 1996). A partir destas hemiceluloses são formados os ácidos hexenurônicos (AHexs) durante o processo de polpação alcalina pela modificação de ácidos 4-O-metilglucurônicos. As condições de polpação que mais influenciam o conteúdo de AHexs na polpa são álcali ativo, sulfidez e temperatura. Os AHexs protegem as xilanas contra a reação de despolimerização terminal e portanto sua presença na polpa preserva o rendimento em etapas alcalinas. Entretanto, as ligações duplas conjugadas na estrutura dos AHexs influenciam o processo de branqueamento da polpa. Os AHexs formam ligações covalentes com a lignina, consomem reagentes químicos eletrofílicos de branqueamento (cloro, dióxido de cloro, ozônio e perácidos), ligam-se a íons metálicos, causam reversão de alvura de polpas branqueadas e são uma importante fonte de ácido oxálico que é gerado quando os AHexs são oxidados durante a operação de branqueamento (ALMEIDA, 2003).

Quantitativamente, a lignina é a terceira substância macromolecular componente da madeira. Suas moléculas são formadas completamente diferentes dos polissacarídeos, pois são constituídas por um sistema aromático composto de unidades de fenilpropano. A estrutura da lignina é bastante heterogênea e consiste numa rede de anéis aromáticos unidos, principalmente, por ligações alquil-aril-éter (ligação  $\beta$ -O-4), arilpropano, bifenila e outras, formando uma estrutura amorfa, bastante resistente à clivagem por muitos agentes. Diferentemente da celulose e de outros polímeros naturais, as ligninas apresentam uma estrutura macromolecular em que as unidades monoméricas

não se repetem de forma regular e encontram-se entrelaçadas por diferentes tipos de ligações (MORAIS, 1992).

Sua distribuição nas várias partes das plantas não é uniforme, o que dificulta sua retirada no processo de polpação. A maior concentração de lignina está na lamela média, porém a maior quantidade está dispersa nas camadas da parede secundária das fibras (MOKFIENSKI, 2004).

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

É conveniente diferenciar os componentes da parede celular, que são polissacarídeos e lignina, dos componentes acidentais. Os componentes acidentais são substâncias consideradas como não integrantes da parte estrutural da parede celular ou lamela média. A maioria dos componentes acidentais, também conhecidos como extrativos, são facilmente solúveis em água quente, benzeno, álcool e outros solventes (KLOCK e MUNIZ, 1998).

Os extrativos da madeira, embora se apresentem em quantidades pequenas, podem exercer influência negativa durante o processo de produção de polpa e de fabricação de papel. A remoção de maior quantidade possível desses constituintes da madeira na etapa de polpação é um aspecto favorável no sentido de minimizar problemas processuais. Os extrativos ocasionam maior demanda de reagentes químicos na polpação, com conseqüente redução do rendimento e qualidade da polpa, e causam inibições de reações, incrustações de materiais na polpa e nos equipamentos.

Complementando a composição química da madeira, existem os componentes minerais, cujo teor é normalmente baixo, e incluem cálcio, potássio, magnésio, fosfato, sulfato, carbonato e silicato com pequenas

quantidades de outros elementos e grupos aniônicos. Segundo Fengel e Wegener (1989), esses compostos possuem funções associadas ao sistema fisiológico, exercendo importante papel no metabolismo da planta.

A determinação do teor destes componentes inorgânicos na madeira é feita por incineração para remover os compostos orgânicos, motivo pelo qual são também conhecidos como “cinzas”. Nas madeiras do gênero *Eucalyptus*, a quantidade de cinzas raramente chega a 1 % do seu peso seco. Moreira (2006) relata que estes componentes ganharam maior relevância nos últimos 10 anos devido ao maior fechamento de circuitos de água nas fábricas de papel e celulose, o que causou aumento em suas retenções e concentração no processo. Além disso, Colodette et al. (1999) comentam que a presença de alguns metais pode ser prejudicial, principalmente para a etapa de branqueamento da celulose.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material experimental

Para realização desse estudo foram utilizadas cinco árvores de *Eucalyptus benthamii*, procedentes de um povoamento experimental da EMBRAPA FLORESTAS, localizado no distrito de Entre Rios, Guarapuava, PR e três árvores de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos sete anos de idade, provenientes de um plantio localizado no sul da Bahia, da empresa Suzano Papel e Celulose S/A.

Em cada árvore selecionada retirou-se toretes de 50 cm na base e nas alturas de 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (Figura 3). Os toretes foram transformados em cavacos e, posteriormente, classificados, sendo selecionada a fração que atravessou a peneira de 32 x 32 mm e ficou retida em peneira de 16 mm x 16 mm. Os nós, as cunhas e as cascas detectadas visualmente foram eliminados. Os cavacos, após classificados, foram secos ao ar livre e armazenados em sacos de polietileno, para prevenir a umidade e o ataque de microrganismos.

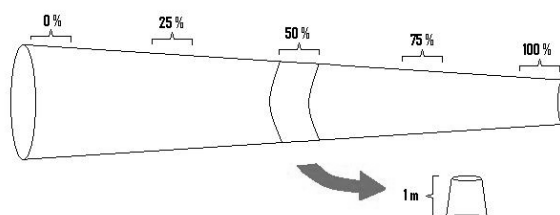


Figura 3 – Amostragem de toretes ao longo do fuste.

### **3.2. Caracterização física**

A densidade básica dos cavacos foi determinada pela relação entre o peso absolutamente seco e o volume saturado dos cavacos, utilizando-se o método da balança hidrostática estabelecido na norma NBR 11941, da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

### **3.3. Caracterização anatômica**

Para a descrição anatômica da madeira de *Eucalyptus benthamii*, retirou-se amostras da região mediana do cerne, do cerne periférico e do alborno de cada árvore, provenientes da parte superior do torete retirado na base da árvore. Esse procedimento foi uma adaptação da norma COPANT (1974). As amostras foram confeccionadas com formato retangular, apresentando dimensões de 2,0 x 2,0 e 3,0 cm no sentido longitudinal. As amostras foram tratadas com água quente, por 48 horas, para amolecimento e, em seguida, foram cortadas em micrótomo para a retirada de finas lâminas nas seções transversal, radial e tangencial.

Os cortes foram realizados com espessura de 16  $\mu\text{m}$ , utilizando um micrótomo de deslize horizontal. Os cortes anatômicos foram desidratados em série alcoólica e, a seguir, corados com solução de safranina, em concentração de 1 %, e as lâminas foram fixadas com Entelan. Cada lâmina permanente constou de três cortes corados. Após a secagem da lâmina, por um período médio de vinte e quatro horas, esta foi levada ao microscópio onde foram observadas as diferentes células lenhosas e sua organização e realizadas as medições de frequência e da área dos vasos.

A preparação de macerado para a análise das fibras, visando à determinação das suas dimensões, foi feita de acordo com a norma técnica do Laboratório de Celulose e Papel da Universidade Federal de Viçosa, (LCP 02 pp- 97). Este método utiliza como solução macerante ácido acético e ácido nítrico, na proporção 5:1. Adicionou-se a solução macerante aos palitinhos de madeira retirados dos cavacos e deixou-se por 6 horas em capela e, a seguir, a amostra foi lavada em água corrente e posteriormente diluída com água destilada. Desagregou-se a amostra

com agitador mecânico a uma velocidade lenta e constante. Diluiu-se a amostra até que as fibras atingissem boa dispersão. Adicionou-se uma pequena quantidade de corante (azul de astra) e agitou-se por mais 10 minutos, até que o corante se fixasse à amostra, em seguida retirou-se uma pequena quantidade da suspensão para o preparo das lâminas provisórias.

Com auxílio de um vídeo microscópio computadorizado (analisador de imagens) mensurou-se 100 fibras para cada amostra. Na mensuração das fibras determinou-se o comprimento, largura e diâmetro do lume das fibras. A espessura da parede celular da fibra foi determinada matematicamente pela metade da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume.

Determinou-se, também, o número de material fibroso/grama, coarseness e teores de finos da polpa branqueada. Para realização destas análises foi preparada uma suspensão do material fibroso em água na consistência de 0,001%. A preparação das suspensões foi feita utilizando balão volumétrico, água destilada e dispersante (2,0 % base polpa). Após a hidratação do material fibroso, por no mínimo 4 horas, as análises do número de fibras por grama, coarseness e teor de finos das polpas foram determinadas em equipamento Galai CIS-100.

A suspensão da amostra, equivalentemente a 700 ml, foi inserida no referido equipamento. O sistema computadorizado realiza a circulação da suspensão fibrosa através de uma cubeta de quartzo numa velocidade constante onde há incidência de um feixe de laser gerador das imagens. As imagens são coletas por uma vídeo câmera, armazenadas e analisadas com ajuda do software *Wshape*, apropriado para análises de material fibroso. Os resultados das análises foram fornecidos pelo próprio software (*Wshape*) e transferidos para o programa *Excel*, utilizado para tabulação dos dados e confecção gráfica.

### **3.4. Caracterização química**

A composição química da madeira foi determinada em serragem obtida em moinho Willey, a partir de cavacos representando toda a árvore (base, 25,

50, 75 e 100%), conforme a norma TAPPI T 257 om-85 (2000). As análises foram efetuadas na fração de serragem que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira de malha de 60 mesh (ASTM). Após classificação, a serragem foi acondicionada em ambiente climatizado e, em seguida, armazenada em frasco hermeticamente fechado. A determinação do teor absolutamente seco foi realizada de acordo com a norma TAPPI 664 cm-97 (2000).

Na Tabela 3 estão apresentadas as análises químicas e as respectivas normas utilizadas.

**Tabela 3 – Análises químicas da madeira**

Características	Metodologia
Extrativos em acetona	TAPPI 280 pm-99 (2000)
Solubilidade em diclorometano	TAPPI 204 cm-97 (2000)
Lignina solúvel	Goldschmid (1971)
Lignina insolúvel	Gomide e Demuner (1986)
Relação siringila/guaiacila (S/G)	Lin e Dence (1992)
Grupos acetil	Solar et al. (1987)
Ácidos urônicos	Englyst e Cummings (1984)
Análise de carboidratos	Wallis et al., (1996)

### 3.5. Polpação Kraft

Para deslignificação da madeira foi utilizado o processo Kraft convencional. Os reagentes foram expressos como hidróxido de sódio (NaOH), base madeira absolutamente seca. Os cozimentos foram realizados em digestor rotativo, com 4 reatores individuais de 2 litros cada um, aquecido eletricamente e dotado de termômetro e manômetro, possibilitando a realização, numa única batelada, de quatro cozimentos simultaneamente. O tempo e a temperatura de cozimento foram monitorados por meio de controlador eletrônico acoplado a um computador, em que um sensor de temperatura (PT100) mantém-se em contato direto com os cavacos e o licor de cozimento.

A sulfidez utilizada foi de 30%, relação licor:madeira de 4:1 e uma carga de álcali efetivo necessária para obter polpas com número kappa  $\pm$  17. Para



alcançar o número kappa desejado realizaram-se quatro cozimentos preliminares para cada espécie, de forma a obter a respectiva curva de deslignificação em relação ao álcali efetivo aplicado. A temperatura máxima de cozimento utilizada foi 165°C, com tempo até a temperatura máxima de 60 minutos e tempo à temperatura máxima de 60 minutos.

Após os cozimentos, os cavacos foram descarregados em um lavador de polpa com tela de aço inox de 150 mesh e lavados com água abundantemente. A individualização das fibras foi realizada “hidrapulper” laboratorial de 25 litros de capacidade. A celulose foi depurada em depurador laboratorial Voith de placa com fendas de 0,2 mm, a seguir foi desaguada em centrífuga até uma consistência de aproximadamente 30% e armazenada em sacos de polietileno. Foi feita a caracterização do licor negro proveniente das polpações e formou-se as folhas para determinação do número kappa e viscosidade, seguindo os procedimentos analíticos descritos na norma TAPPI, conforme.

**Tabela 4 – Procedimentos analíticos**

Procedimento	Normas
pH do licor negro	TAPPI T 625 cm-85
Álcali residual	TAPPI T 625 cm-85
Formação de folhas manuais	TAPPI T218 sp-97
Número kappa	TAPPI T236 om-99
Viscosidade	TAPPI T230 om-99

### 3.6. Determinação da fração parenquimatosa

Após realizados cozimentos, conforme descrito no item 3.5, tomou-se a polpa com menor teor de deslignificação, ou seja as polpas com maiores números kappa (*Eucalyptus benthamii* número Kappa 24,1 e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* 21,3) para realizar a análise do teor de células parenquimáticas, pois desta forma pressupõe-se que estas células tenham sido menos degradadas devido ao cozimento menos drástico a que foram submetidas. Tomaram-se 40 gramas absolutamente secas de cada polpa, que após serem desintegradas em hidrapulper foram utilizadas para formar uma espessa folha utilizando o funil de Buchner forrado com papel filtro. Em seguida,

as folhas foram acondicionadas em ambiente climatizado com umidade relativa do ar de  $50\% \pm 2\%$  e temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Foram pesados 15 gramas absolutamente seca, desintegradas novamente e classificadas no depurador Voith, dotado com uma tela de 300 mesh, por vinte minutos. Na saída do depurador, foi colocada uma sacola de tecido de nylon, onde foi retida a fração de 'finos' constituída pelas células de parênquima. Ao final de vinte minutos, foi retirado o material fibroso que não passou na tela de 300 mesh. As frações parenquimatosa e prosenquimatosa (fibras e vasos) foram desaguadas em centrífuga e desagregadas para determinação quantitativa destas frações das polpas.

### 3.7. Pré-deslignificação

A deslignificação com oxigênio foi realizada em um reator/misturador Quantum – Mark V, fabricado por Quantum Technologies, com amostras de 300g a.s (absolutamente seca) de polpa, estando as condições gerais utilizadas demonstradas na Tabela 5.

**Tabela 5** – Condições da Pré-O<sub>2</sub>

Consistência do estágio, %	10
Temperatura, °C	95
Tempo de residência, min	60
Peso seco, g	300
Carga O <sub>2</sub> , Kg/tsa	20
Carga NaOH, Kg/tsa	18

A polpa foi depositada na consistência adequada no reator e aquecida até a temperatura desejada. Atingida a temperatura, e sob o efeito de agitação constante, foi injetada a dosagem pré-estabelecida de NaOH ao sistema e aplicada a pressão de reação com O<sub>2</sub> no valor desejado e pelo tempo pré-determinado.

Terminada a reação, foram extraídas amostras do licor residual para análise de pH. A polpa foi transferida para o descarregador de polpa e, então, lavada com equivalente a 9 m<sup>3</sup> de água destilada por tonelada de polpa seca, simulando uma lavagem industrial.

Após este estágio determinou-se a eficiência, a seletividade e o ganho de alvura no estágio O<sub>2</sub> usando as seguintes equações:

Eficiência:  $(\text{kappa de entrada} - \text{kappa de saída}) / \text{kappa entrada} \times 100$

Seletividade:  $\text{viscosidade} / \text{kappa no estágio O}_2$

Ganho de alvura:  $\text{alvura da polpa marrom} - \text{alvura da polpa após o estágio O}_2$

### 3.8. Branqueamento ECF pela sequência D(EP)DP

Após a deslignificação com oxigênio, as polpas foram branqueadas, em duplicatas, por uma seqüência ECF visando alvura de 90%  $\pm$  1 ISO. Após cada etapa do branqueamento a polpa foi lavada com o equivalente a 9 m<sup>3</sup> de água destilada por tonelada de polpa seca. Depois de lavadas, as polpas foram centrifugadas, desagregadas manualmente e acondicionadas em sacos de polietileno. Determinou-se a alvura e a viscosidade das polpas e extraiu-se amostras do licor residual, para as análises de pH e álcali residual, conforme metodologia TAPPI citada nas Tabelas 4 e 10.

### Deslignificação com Dióxido de Cloro (D<sub>0</sub>)

A etapa de deslignificação com dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) foi realizada em sacos de polietileno, contendo aproximadamente 270 g a.s. (absolutamente seca) de polpa, nas condições apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6** – Condições do estágio de dióxido de cloro

Condições	<i>E. benthamii</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Consistência do estágio, %	10	10
Temperatura, °C	95	95
Tempo de residência, min	120	120
Peso seco, g	275	270
Carga H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Kg/tsa	7,5	5,5
Carga ClO <sub>2</sub> , Kg/tsa	21,0	22,5

A carga de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> necessária para o ajuste do pH final da polpa foi estabelecida em estudos prévios com pequenas amostras de 5 gramas a.s. (absolutamente seca) de polpa. O licor de branqueamento, contendo ClO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, foi adicionado à polpa em temperatura ambiente. Após a

homogeneização da mistura, o material foi aquecido em forno de microondas até a temperatura desejada e transferido para um banho de vapor com controle de temperatura, onde foi mantido pelo tempo pré-estabelecido.

### **Extração Oxidativa com Peróxido de Hidrogênio (EP)**

Esta etapa foi realizada em sacos de polietileno com amostras de aproximadamente 250 g a.s de polpa, nas condições apresentadas na Tabela 7. O licor de branqueamento contendo H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NaOH e H<sub>2</sub>O foi adicionado à polpa em temperatura ambiente. Após a homogeneização da mistura, o material foi transferido para um banho de vapor com controle de temperatura, onde foi mantido pelo tempo pré-estabelecido.

**Tabela 7** – Condições do estágio de extração alcalina com peróxido

Condições	<i>E. benthamii</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Consistência do estágio, %	10	10
Temperatura, °C	85	85
Tempo de residência, min	120	120
Peso seco, g	260	255
Carga NaOH, Kg/tsa	10	10
Carga H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Kg/tsa	3	3

### **Branqueamento com Dióxido de Cloro (D)**

O branqueamento com dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) foi efetuado em sacos de polietileno nas condições apresentadas na Tabela 8. O licor de branqueamento contendo ClO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> foi adicionado à polpa em temperatura ambiente. A utilização de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para controle de pH foi estabelecido em estudo prévio, com amostras de 15 g a.s de polpa. Foram testadas 4 cargas diferentes de dióxido de cloro (1, 2, 3 e 5 Kg/tsa), visando atingir ao final da seqüência alvura de 90% ISO. Após a homogeneização da mistura, a polpa foi aquecida em forno de microondas até a temperatura desejada e transferida para um banho de vapor com controle de temperatura, que foi mantida pelo tempo pré-estabelecido.

**Tabela 8 – Condições do estágio de dióxido de cloro**

Condições	<i>E. benthamii</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Consistência do estágio, %	10	10
Temperatura, °C	80	80
Tempo de residência, min	120	120
Peso seco, g	255	250
Carga H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Kg/tsa	1	1
Carga ClO <sub>2</sub> , Kg/tsa	3	5

### Branqueamento com Peróxido de Hidrogênio (P)

O branqueamento com peróxido de hidrogênio foi efetuado em sacos de polietileno com amostras de aproximadamente 250 g a.s de polpa, nas condições apresentadas na Tabela 9.

**Tabela 9 – Condições do estágio de peróxido**

Condições	<i>E. benthamii</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Consistência do estágio, %	10	10
Temperatura, °C	80	80
Tempo de residência, min	120	120
Peso seco, g	255	250
Carga NaOH, Kg/tsa	3	3
Carga H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Kg/tsa	2	2

O licor de branqueamento contendo H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NaOH e H<sub>2</sub>O foi adicionado à polpa em temperatura ambiente. Após homogeneização da mistura, a polpa foi transferida para um banho de vapor com controle de temperatura, que foi mantida pelo tempo pré-estabelecido.

### 3.9. Refino e testes físico-mecânicos

As polpas branqueadas foram submetidas ao refino em moinho PFI, conforme norma TAPPI T 248 sp-00 (2000). Durante o refino variou-se o número de revoluções (0, 1000, 2000, 3000, 4000) visando o desenvolvimento de curvas de refinação. Após o refino foram confeccionadas 11 folhas manuais em formadora TAPPI, com gramatura aproximada de 60 g.m<sup>-2</sup>. Em seguida, as folhas foram acondicionadas em ambiente climatizado com umidade relativa do

ar de 50%  $\pm$  2% e temperatura de 23°C  $\pm$  1°C, para realização dos testes físico-mecânicos e ópticos.

Os testes físicos-mecânicos e ópticos foram realizados conforme procedimentos e metodologias padronizadas nas normas técnicas da “Technical Association of Pulp and Paper Industry” (TAPPI), mostradas na Tabela 10, com no mínimo 5 repetições cada teste.

**Tabela 10 – Testes físico-mecânicos e ópticos realizados nas polpas**

<b>Testes</b>	<b>Normas</b>
Gramatura	TAPPI T410 om-98
Espessura	TAPPI T411 om-97
Alvura *	TAPPI T452 om-98
Opacidade e coeficiente de dispersão de luz	TAPPI T 519 om-96
Resistência à passagem de ar	TAPPI T460 om-96
Índice de arrebentamento	TAPPI T403 om-97
Índice de rasgo	TAPPI T414 om-98
Índice de tração, módulo de elasticidade específico, alongamento e energia de deformação	TAPPI T494 om-96
Peso específico aparente	TAPPI T220 sp-96
Volume específico aparente	TAPPI T220 sp-96

\*Teste realizado no aparelho Datacolor E2000.

O teste de resistência à tração foi realizado em equipamento do tipo Instron modelo 4204 com sistema computadorizado de aquisição, análise e saída de dados, com distância entre garras de 100 mm, velocidade de teste de 25 mm min<sup>-1</sup> e capacidade da célula de carga de 1.000 N. Este teste fornece, simultaneamente, os resultados das seguintes propriedades: força ao ponto de ruptura, índice de tração, tensão e deformação no limite de proporcionalidade (elasticidade), energia de deformação (TEA) e módulo de elasticidade específico (MOE).

### **3.10. Análises estatísticas**

Para análise das dimensões das fibras das madeiras, procedeu-se análises de variância e a realização dos testes de médias usando o programa

estatístico SisVar (FERREIRA, 2000). Quando a análise de variância (ANOVA) mostrava diferença significativa entre os tratamentos, era aplicado o teste de Tukey para descobrir quais tratamentos se distinguiam uns dos outros. Para médias estatisticamente iguais foram usadas letras iguais e para médias estatisticamente diferentes, letras também diferentes.

Para análise dos resultados finais dos testes físico-mecânicos das polpas em diferentes níveis de refino (0, 1000, 2000, 3000 e 4000 revoluções) foi utilizado o programa CurveExpert 1.3. Com auxílio desse software foram testados modelos de regressão que melhor se ajustassem aos dados. As equações ajustadas foram comparadas pelo teste F, utilizando-se o teste de identidade de modelos e adotando-se um nível de significância de até 5% de probabilidade.

Foram comparadas as duas equações, a fim de verificar igualdade entre elas. Em caso afirmativo, as equações foram reduzidas a uma equação única. Caso fosse confirmada diferença significativa entre as equações, foram mantidas as duas equações para cada polpa. As hipóteses testadas foram:  
H<sub>0</sub>: as equações são iguais e podem ser representadas por uma equação reduzida comum; e  
H<sub>a</sub>: as equações são estatisticamente diferentes e não podem ser reduzidas a uma equação comum.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Descrição anatômica e dimensões das fibras

Análises dos cortes anatômicos demonstraram que a estrutura anatômica do *Eucalyptus benthamii* é bastante semelhante às de outras espécies do gênero (Figura 4). Observou-se a presença de três tipos de parênquima axial: paratraqueal vasicêntrico, paratraqueal confluyente e, em menor quantidade, paratraqueal lateral. O parênquima radial é caracterizado pela presença de raios unisseriados e bisseriados. Os raios são homogêneos e formados somente por células procumbentes.

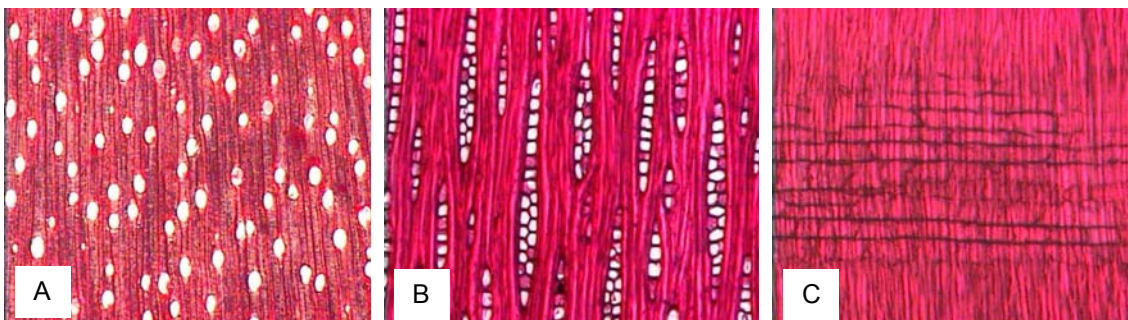


Figura 4 – Imagens dos planos transversal (A), tangencial (B) e radial (C) da madeira de *Eucalyptus benthamii*.

Os vasos apresentaram formato circular, predominantemente solitários, com porosidade difusa e arranjo tendendo a diagonal, as placas de perfuração são simples, característica comum do gênero, com ocorrência de tiloses. Na Tabela 11 pode ser observado que a região do cerne apresentou maior frequência de vasos e os vasos com maiores diâmetros estavam localizados na



região do alburno. Silva et al. (2007) encontraram comportamento semelhante estudando a influência da posição radial nas dimensões dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. Os diâmetros dos vasos do *Eucalyptus benthamii* foram, em geral, um pouco menores que os encontrados por estes autores, o que pode ser explicado pela diferença entre espécies e idades.

**Tabela 11** - Valores médios de frequência ( $\text{mm}^{-2}$ ) e diâmetro dos vasos da madeira de *Eucalyptus benthamii*

Região do xilema	Vasos ( $\text{mm}^{-2}$ )			Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )		
	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Cerne	9,3	0,65	6,94	104,4	12,68	12,15
Cerne periférico	7,8	0,51	6,69	105,7	12,08	11,43
Alburno	7,7	0,96	12,38	109,4	12,66	11,57

Os vasos são muito importantes tanto para a fisiologia e crescimento das árvores, como para os processos de conversão da madeira a celulose. Sua presença nas madeiras de folhosas favorece a penetração e impregnação dos cavacos de folhosas pelo licor de cozimento kraft. Entretanto, não é desejável que a madeira utilizada para produção de celulose apresente alto teor destas células pois alto teor de vasos, pode resultar em madeira de menor densidade, proporcionando menor produtividade na fábrica e maior consumo específico de madeira, além disso os vasos são responsáveis pelo fenômeno conhecido como vessel picking, no qual alguns elementos de vasos presentes na superfície da folha tendem a sofrer remoção por efeito de adesão à tinta de impressão, o que ocasiona pontos de falha na impressão (ALVES, 2005).

Os resultados apresentados na Tabela 12 mostram que houve diferença significativa para todas as dimensões das fibras, sendo que a madeira do *Eucalyptus benthamii* apresentou fibras mais curtas (0,96 mm) e mais estreitas (17,9  $\mu\text{m}$ ) que o híbrido urograndis (1,07 mm e 20,1  $\mu\text{m}$ , respectivamente). Nisgoski et al. (1998) encontraram comprimento médio das fibras menores numa amostra de *Eucalyptus benthamii* proveniente de Colombo, Paraná (0,818 mm). O comprimento médio encontrado para o híbrido urograndis está em conformidade ao relatado por Carvalho e Nahuz (2001).

Alguns autores relatam que o comprimento e a espessura da parede celular das fibras são os parâmetros anatômicos mais intensamente estudados, pois as variações nas dimensões das fibras podem ter influência na qualidade da madeira e na produção de papel. Fibras de maiores comprimentos favorecem a resistência ao rasgo enquanto as de menores comprimentos propiciam melhor formação da folha de papel. Gomide et al. (2005) relatam que fibras com parede celular mais espessa conferem maior opacidade e melhor maciez aos papéis para impressão e escrita e papéis “tissue”, respectivamente.

**Tabela 12** – Resultados da análise de fibras do *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*

Amostra	Comprimento (mm)	Largura ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro Lume ( $\mu\text{m}$ )	Espessura ( $\mu\text{m}$ )
<i>E. benthamii</i>	0,96 a	17,92 a	9,84 a	4,04 a
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	1,07 b	20,06 b	10,59 b	4,73 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

#### 4.2. Densidade básica e composição química

Conforme pode ser observado na Tabela 13, a madeira do *Eucalyptus benthamii* apresentou densidade básica inferior ( $472 \text{ kg.m}^{-3}$ ) a do híbrido urograndis ( $499 \text{ kg.m}^{-3}$ ) mas dentro da faixa de estudo realizado por Trugilho et al. (2004). Estes autores, estudando madeiras de 15 clones de *Eucalyptus* para produção de celulose, encontraram valores médios de densidade básica de  $477 \text{ kg.m}^{-3}$ , sendo o valor máximo  $571 \text{ kg.m}^{-3}$  e o mínimo  $405 \text{ kg.m}^{-3}$ .

A densidade básica da madeira é a quantificação direta do material lenhoso por unidade de volume, estando relacionada com as propriedades e características tecnológicas para a produção e utilização de produtos florestais. Para produção de papel e celulose é desejável que a madeira possua densidade uniforme, pois a velocidade de impregnação e de deslignificação dos cavacos é influenciada pela massa específica.

Existem divergências quanto aos valores mais adequados de densidade básica para o processo de polpação. Wehr e Barrichelo (1992) sugerem que para produção de polpa celulósica a madeira de *Eucalyptus* deve possuir

densidade básica entre 450 a 550 Kg.m<sup>-3</sup>. Densidades mais elevadas podem proporcionar maior produtividade devido a maior carga por um determinado volume do digestor. Entretanto, é necessário uma maior carga de álcali na polpação e, além disso, Ferreira et al. (2006b) comentam que madeiras mais densas podem causar perdas de características desejáveis para produção de papel para imprimir e escrever.

Segundo Gomide et al. (2005), as madeiras com densidades básicas mais baixas apresentam algumas vantagens, como a necessidade de utilização de menor carga alcalina, com reflexos favoráveis no rendimento e viscosidade da polpa celulósica e, também, carga mais baixa de sólidos para o setor de recuperação. Entretanto, densidades mais baixas resultam em consumo específico de madeira mais elevado, o que constitui significativa desvantagem.

**Tabela 13** – Densidade básica e teor de extrativos das madeiras

Amostra	Densidade Básica (Kg.m <sup>-3</sup> )	Solubilidade Acetona (%)	Solubilidade Diclorometano (%)
<i>E. benthamii</i>	472	2,25	0,20
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	499	0,87	0,58

O teor de extrativos solúveis em acetona do *Eucalyptus benthamii* foi aproximadamente 160% superior ao do urograndis, porém o teor de extrativos hidrofóbicos solúveis em diclorometano, responsáveis pela formação de “pitch”, grande fonte de problemas na indústria de papel e celulose, foi 65% inferior. Gomide et al. (2005) comentam que madeiras com altos teores de extrativos tendem a apresentar menor rendimento em polpa.

Conforme pode ser observado na Tabela 14, as duas madeiras analisadas apresentaram teores de lignina típicos das madeiras de *Eucalyptus* plantadas no Brasil. O híbrido urograndis apresentou teor de lignina total ligeiramente inferior (29,6%) ao do *Eucalyptus benthamii* (30,3%) e uma maior relação siringil/guaiacil (2,9 e 2,4, respectivamente). Barbosa et al. (2008) relataram que a velocidade de deslignificação da madeira é influenciada pela estrutura da lignina, sendo diretamente proporcional à relação S/G, uma vez que a estrutura siringil da lignina é mais reativa e, portanto, mais fácil de ser removida durante o processo de polpação kraft.

**Tabela 14 – Teor de lignina e relação S/G das madeiras**

Amostra	Lignina, %			S/G
	Insolúvel	Solúvel	Total	
<i>E. benthamii</i>	26,2	4,1	30,3	2,4
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	26,1	3,5	29,6	2,9

Gomes et al. (2008), estudando clones comerciais de *Eucalyptus*, encontraram boas correlações entre a relação S/G e o rendimento depurado e ressaltam que a madeira desejável para produção de celulose kraft deve apresentar baixo teor de lignina associado a uma alta relação S/G.

A constituição da fração de carboidratos das madeiras estudadas está apresentada na Tabela 15. As glicanas foram responsáveis por pouco menos de 50% da constituição química das madeiras, seguidas das xilanas com 11,2% e 10,8% para o *Eucalyptus benthamii* e o híbrido urograndis, respectivamente. Os teores das outras hemiceluloses foram todos inferiores a 1% nas duas madeiras, valores típicos para madeiras de eucalipto no Brasil.

**Tabela 15 – Resultados da análise de carboidratos**

Amostra	Glicanas	Xilanas	Galactanas	Mananas	Arabinanas	Ac. Urônico	Grupos
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	Acetil (%)
<i>E. benthamii</i>	46,6	11,2	1,8	0,6	0,2	5,5	2,1
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	48,5	10,8	0,9	0,6	0,3	5,6	1,9

As principais diferenças, em termos de carboidratos, entre as madeiras de *Eucalyptus benthamii* e o híbrido urograndis foram o teor significativamente superior de glucanas (celulose) do urograndis (48,5 e 46,6%), o teor de xilanas ligeiramente superior do *Eucalyptus benthamii* (11,2 e 10,8%) e o teor de galactanas duas vezes maior do *Eucalyptus benthamii* (1,8 e 0,90%). O teor de celulose está diretamente associado ao rendimento de polpação, constituindo, portanto, numa desvantagem do *Eucalyptus benthamii*. O teor mais elevado de galactanas nesta espécie também constitui uma característica desvantajosa, uma vez que as galactanas são facilmente degradadas na polpação, prejudicando o rendimento do processo.

Os teores de ácidos urônicos e de grupos acetilas nas duas madeiras foram muito semelhantes e, portanto, seus efeitos na qualidade da madeira

para polpação kraft deverão ser similares. Os ácidos urônicos, geradores de ácidos hexenurônicos durante a polpação kraft, que afetam negativamente o branqueamento (COSTA, et al., 2001), não deverão apresentar efeito diferenciado no processamento das duas madeiras.

Os teores de grupos acetilas determinados foram relativamente baixos, quando comparados aos teores encontrados em alguns clones de eucalipto plantados no Brasil (Gomide et al., 2005; Ferreira et al. 2006a), constituindo uma vantagem de qualidade para ambas as madeiras. Os grupos acetila são desvantajosos na produção de celulose por serem facilmente removidos durante o cozimento, causando perda de rendimento e consumindo álcali. Em estudos realizados por Gomide e Fantuzzi Neto (2000) com madeiras de híbrido urograndis, foi demonstrado que os grupos acetilas já haviam sido completamente removidos quando a temperatura máxima de cozimento era alcançada.

### 4.3. Polpação Kraft

Foram realizados quatro cozimentos preliminares para cada espécie, visando obter a respectiva curva de designificação em relação ao álcali efetivo aplicado, para alcançar número kappa desejado  $\pm 17$ , conforme mostrado na Figura 5.

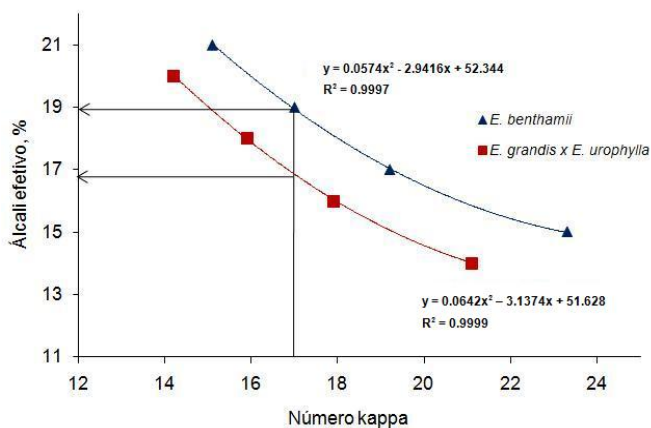


Figura 5 – Estabelecimento da carga de álcali efetivo requerida para atingir número kappa 17.

A carga de álcali efetivo necessária para atingir mesmo número Kappa para as duas madeiras foi diferente, sendo que a madeira do *Eucalyptus benthamii* necessitou de uma carga de 18,9% de álcali efetivo enquanto a carga necessária do híbrido foi de 16,8%. Tal fato pode ser decorrente do maior teor de lignina e da menor relação S/G apresentada pelo *Eucalyptus benthamii*.

O processo kraft de produção de celulose apresenta seletividade baixa nas reações de remoção da lignina, resultando em significativa degradação dos carboidratos durante a deslignificação da madeira (GOMIDE e FANTUZZI NETO, 2000). Assim, a maior carga de álcali requerida pelo *Eucalyptus benthamii* para atingir número kappa 17, resultou em grande queda de viscosidade e rendimento da polpa conforme pode ser observado nas Figura 6 e 7, respectivamente.

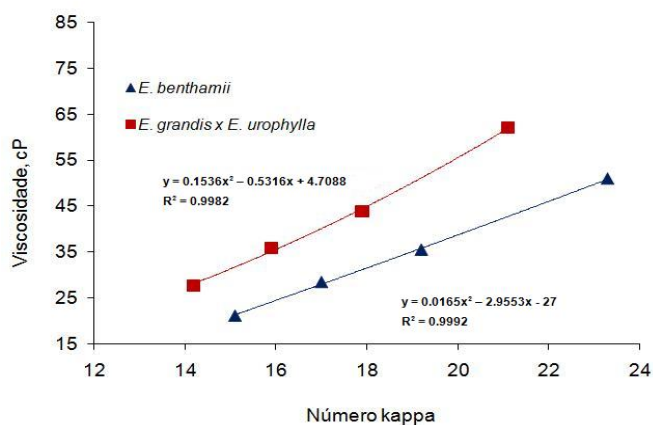


Figura 6 – Viscosidade da polpa em função do número kappa.

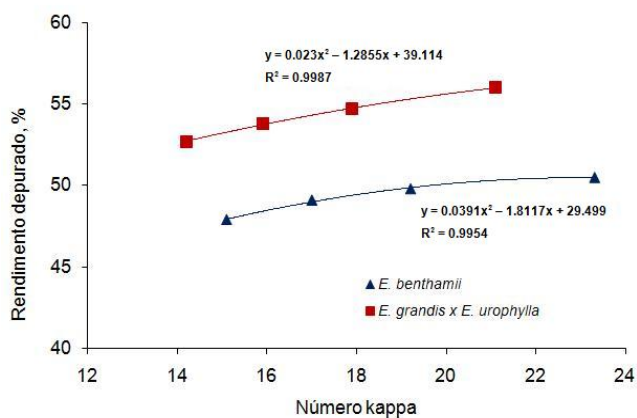


Figura 7 – Rendimento depurado da polpa x número kappa.

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos para as polpas produzidas com número Kappa 17. Foram observadas desvantagens da nova espécie em relação ao híbrido utilizado. O menor rendimento depurado apresentado pelo *Eucalyptus benthamii* é, possivelmente, consequência da constituição química de sua madeira conforme explicitado anteriormente. O maior teor de lignina e a menor relação S/G desta espécie tornaram necessária uma maior carga de álcali efetivo para que se atingisse o mesmo número kappa para as duas madeiras, o que possivelmente contribuiu também para a menor viscosidade da polpa.

Os resultados das análises de pH e álcali efetivo do licor residual também estão apresentados na Tabela 16. O pH dos licores residuais ficou em torno de 13, pois, como esperado, uma quantidade de álcali permaneceu como resíduo, a fim de evitar uma reprecipitação da lignina nas fibras ao final do cozimento.

**Tabela 16** – Resultados dos cozimentos das madeiras para produção de polpa com número kappa 17

Amostra	Álcali efetivo c/(NaOH) (%)	Número Kappa	Viscosidade (cP)	Rendimento Depurado (%)	Licor residual	
					pH	AE(g/L) (NaOH)
<i>E. benthamii</i>	18,9	17,3	29,3	49,1	13,1	9,4
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	16,8	17,3	42,8	54,1	13	8,4

#### 4.4. Determinação do teor de células de parênquima

Após a realização dos cozimentos kraft, as polpas foram classificadas em tela de 300 mesh para separação das frações prosenquimatosa e parenquimatosa. Como fração prosenquimatosa, foram consideradas as fibras e os elementos de vasos, já a fração parenquimatosa, que atravessou a tela de 300 mesh, era constituída principalmente por células de parênquima. Uma análise visual em microscópio demonstrou que o uso de tela de 300 mesh foi eficiente para a separação das células de parênquimas.

A Tabela 17 apresenta os resultados da classificação do material prosenquimatoso e parenquimatoso das polpas das madeiras do *Eucalyptus benthamii* e do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

É importante ressaltar que as polpas utilizadas durante esta análise foram submetidas a cozimentos com diferentes cargas de álcali efetivo, as cargas utilizadas foram 15% e 14%, para a polpa do *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, respectivamente. Estas polpas apresentavam número kappa superior a 21, considerado alto para polpa de madeira de eucalipto. Entretanto como o objetivo desta análise era determinar o teor de células parenquimáticas, polpas com maiores números kappa eram desejáveis pois foram submetidas a cozimentos menos severos, preservando assim a fração parenquimatosa, constituída por células de paredes finas e menos lignificadas. Os resultados apresentados na Tabela 17 mostram que mesmo submetida a um cozimento com maior carga de álcali a polpa do *Eucalyptus benthamii* apresentou fração parenquimatosa ligeiramente superior (5,4%) que a polpa do híbrido (5,1%).

**Tabela 17** – Resultados das frações prosenquimatosa e parenquimatosa das polpas das madeiras

Madeira	Fração prosenquimatosa, (%)	Fração parenquimatosa, (%)
<i>Eucalyptus benthamii</i>	94,6	5,4
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	94,9	5,1

#### 4.5. Deslignificação com oxigênio

Como pode ser observado na Tabela 18, após a deslignificação com oxigênio a polpa da madeira do *Eucalyptus benthamii* apresentou menor número kappa (10,5) do que a madeira do híbrido urograndis (11,2). A queda do número kappa foi de 39,3% para madeira do *Eucalyptus benthamii* e de 35,3% para a polpa da madeira do híbrido urograndis. Observa-se, entretanto, que a maior remoção da lignina na polpa do *Eucalyptus benthamii* não resultou em maior alvura de sua polpa. Apesar de ter sido observada uma menor queda da viscosidade da polpa do *Eucalyptus benthamii* (36,5%) em relação à polpa do



*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (42,5%), a polpa da madeira do híbrido continuou apresentando maior viscosidade.

**Tabela 18** – Deslignificação com oxigênio das polpas das madeiras do *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*

Amostra	Número Kappa		Alvura, (%ISO)		Viscosidade, (cP)	
	Polpa marrom	Polpa Pré-O <sub>2</sub>	Polpa marrom	Polpa Pré-O <sub>2</sub>	Polpa marrom	Polpa Pré-O <sub>2</sub>
<i>E. benthamii</i>	17,3	10,5	37,1	51,2	29,3	18,6
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	17,3	11,2	40,7	52,8	42,8	24,6

Na Tabela 19 são apresentadas as características das polpas após a deslignificação com oxigênio. Observa-se que após a pré-O a polpa do *Eucalyptus benthamii* apresentou menor seletividade, maior eficiência e maior ganho de alvura.

**Tabela 19** – Características das polpas na deslignificação com oxigênio das madeiras do *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*

Amostra	Seletividade	Eficiência, (%)	Ganho de Alvura, (%ISO)
<i>E. benthamii</i>	1,57	39,3	14,1
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	2,98	35,3	12,1

#### 4.6. Branqueamento ECF

Após a deslignificação com oxigênio as polpas foram submetidas a uma seqüência de branqueamento do tipo ECF. As condições de processo em todos os estágios da seqüência D(EP)DP foram idênticas para todas as polpas, com exceção da carga de dióxido de cloro. Para determinar a carga dióxido de cloro a ser aplicada nos estágios D<sub>0</sub> e D foram feitos alguns testes com as polpas, sendo que no estágio D foi feita uma otimização da carga de ClO<sub>2</sub> para obtenção de polpa branqueada com alvura de 90% ISO.

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos após o branqueamento das polpas. Observa-se que as polpas apresentaram alvura final bastante similar. A

branqueabilidade da polpa do híbrido foi ligeiramente superior à do *Eucalyptus benthamii*. A branqueabilidade foi determinada através da relação entre o consumo total de dióxido de cloro usado no branqueamento e o número kappa após a deslignificação com oxigênio. A polpa do híbrido apresentou maior reversão de alvura, determinada pelo número de cor posterior (NCP), que a polpa do *Eucalyptus benthamii*.

Após o cozimento e pré-deslignificação com oxigênio, a polpa do *Eucalyptus benthamii* apresentou menor viscosidade mas a diferença apresentada nas Tabelas 16 e 18 foi minimizada ao final do branqueamento, como mostrado na Tabela 20.

**Tabela 20** – Características das polpas após sequência ECF de branqueamento

Amostra	Alvura, (%ISO)	Branqueabilidade*	NCP**	Viscosidade, cP
<i>E. benthamii</i>	90,8	2,3	0,152	9,78
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	90,7	2,5	0,213	10,50

\* Carga de ClO<sub>2</sub> aplicada na sequência/número kappa após a pré-O

\*\* NCP (Número de cor posterior)

#### **4.7. Refino e propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas branqueadas**

Após o branqueamento, as polpas foram submetidas ao refino em moinho PFI utilizando cinco níveis de revoluções (0, 1000, 2000, 3000, 4000) para o desenvolvimento de curvas de refinação.

As propriedades físico-mecânicas e ópticas das polpas foram avaliadas em função do índice de tração, especificamente em 65 N.m/g. A escolha do índice de tração para relacionar graficamente com as outras propriedades é que este índice é uma das propriedades mais exigidas durante a produção de diversos tipos de papéis. Além disso, Salvador et al. (2000) relatam que esta propriedade é influenciada pelas variáveis dos processos usados na produção do papel, as quais podem alterar o número de ligações interfibras, a resistência das ligações e outras características importantes da estrutura dos papéis que dependem da composição química e física das polpas.

Foram ajustadas equações de regressão para todas as propriedades analisadas e, com base no teste F, foram testadas as hipóteses de igualdade das duas curvas (duas madeiras) a um nível de probabilidade de 5% ( $P > 0,05$ ). Assim, quando não houve diferença significativa entre as equações, usou-se uma equação comum, sendo desta forma a representação gráfica feita por uma única curva para as duas madeiras.

A Tabela 21 apresenta os resultados de mensuração das dimensões das fibras de polpas branqueadas, determinadas em equipamento automático Galai-CIS-100. Observa-se que as médias dos comprimentos de fibras mensurados com o GALAI CIS-100 foi menor que as médias obtidas em videomicroscópio (Tabela 12). Na técnica GALAI, a contagem de grande número de fibras, de pedaços de fibras e de finos reduzem a média do comprimento das fibras. Pela técnica microscópica, apresentada na Tabela 12, mediu-se somente fibras inteiras, obtidas a partir da maceração da madeira, o que possibilita a individualização com mínimo dano às mesmas.

**Tabela 21** – Análises morfológicas das fibras de polpa branqueada determinadas no Galai CIS-100

Amostra	Número de revoluções	Coarseness (mg/100m)	Nº fibras/g (milhões)	Comp.esp médio(mm)	Largura Média(µm)	Teor de Finos* ( %)
<i>Eucalyptus benthamii</i>	0	5,52	26,49	0,69	26,37	8,26
	1000	5,17	29,32	0,66	24,38	9,54
	2000	5,24	28,50	0,66	24,21	9,87
	3000	5,17	29,29	0,66	24,15	9,97
	4000	5,13	30,67	0,64	23,98	10,77
<i>Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla</i>	0	7,88	15,20	0,84	29,40	8,57
	1000	7,96	15,05	0,84	29,33	8,84
	2000	7,26	16,60	0,83	24,94	9,03
	3000	7,79	16,04	0,80	24,70	9,62
	4000	7,21	17,44	0,80	23,83	10,38

\*Teor de finos  $\leq 0,070$  mm

Os efeitos da refinação sobre as fibras podem ser classificados em primários e secundários. Os efeitos primários são a fibrilação interna, fibrilação externa, formação de finos e encurtamento das fibras. Já os efeitos secundários são as mudanças na estrutura da fibra decorrentes do efeito primário. A Tabela 21 mostra que o aumento da intensidade do refino (aumento do número de

revoluções) provocou danos à estrutura das fibras, como decréscimo da largura média e do comprimento médio, aumentando, conseqüentemente, o teor de finos na polpa.

A polpa do híbrido apresentou maior coarseness, fato que pode ser explicado pelas fibras de menores dimensões do *Eucalyptus benthamii*.

### Consumo de Energia no Refino

A operação de refino é uma das etapas mais importantes na fabricação de papel pois nesta fase são desenvolvidas as propriedades desejadas para o papel, objetivando a melhoria da sua qualidade. Este processo consome grande quantidade de energia e o consumo de energia durante o refino é um parâmetro importante nos custos de fabricação do papel.

A Figura 8 ilustra o consumo de energia durante o refino de cada polpa estudada, em função do índice de tração.

Os resultados mostram que houve diferença significativa no consumo de energia para refinar as polpas, sendo que a polpa do *Eucalyptus benthamii* demandou aproximadamente 10 W/h a menos que o híbrido urograndis para atingir o índice de tração 65 N.m/g.

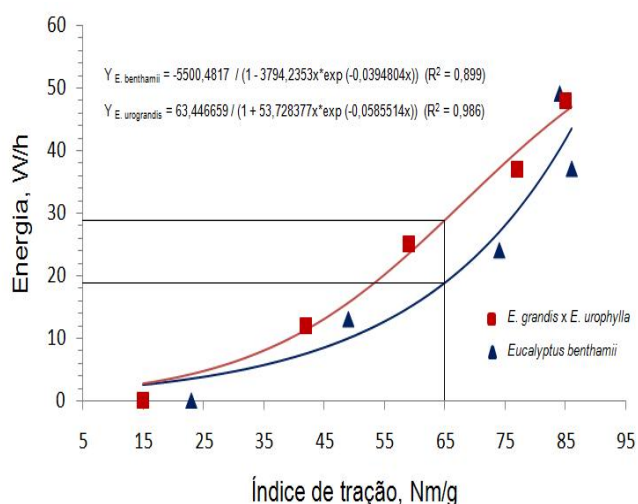


Figura 8 - Consumo de energia no refino em função do índice de tração.

## Graus Schopper-Riegler

Na Figura 9 está representada graficamente a tendência da curva do grau Schopper-Riegler, em função do índice de tração.

Em geral, a ação do refino provoca delaminações superficiais que favorecem o aparecimento de novas superfícies de contato, aumentando, assim, a capacidade de formar ligações de hidrogênio e, conseqüentemente, aumentando o índice de tração (SILVA e OLIVEIRA, 2000). A intensificação do refino por sua vez, resulta em maior compactação das fibras e diminuição dos poros ou espaços vazios interfibrilares, dificultando a passagem de água e, conseqüentemente, reduzindo a drenabilidade da polpa. Não houve diferença estatística entre as duas polpas, sendo, portanto, utilizada uma curva comum para representá-las.

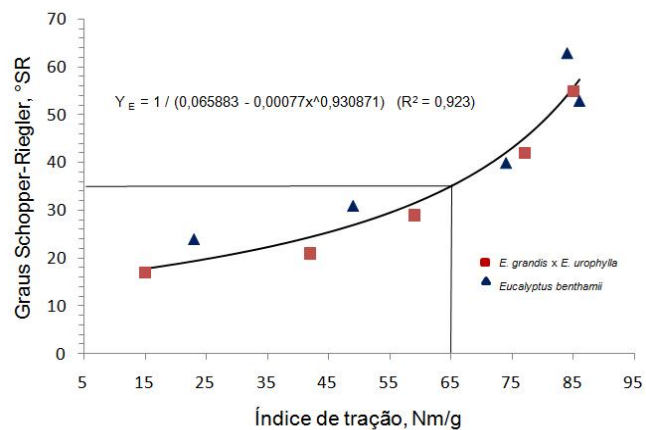


Figura 9 – Curva comum ajustada para graus Schopper-Riegler em função do índice de tração.

## Índice de rasgo

A Figura 10 mostra as curvas de resposta para índice de rasgo. A escolha do índice de tração 65 N.m/g como ponto de referência foi feita analisando-se o índice de rasgo, pois a partir deste valor observa-se uma queda da resistência ao rasgo do papel. O índice de rasgo é, assim como o índice de tração, uma propriedade de grande importância durante a fabricação do papel e a polpa é refinada até atingir a resistência máxima ao rasgo. As duas polpas

diferiram estatisticamente, sendo portanto, representadas por duas curvas. A maior resistência ao rasgo apresentada pelo híbrido pode ser explicada pelo maior comprimento de suas fibras (Tabela 21). Philipp e D’Almeida (1988) relatam que o comprimento de fibra é uma dimensão importante no desenvolvimento da resistência ao rasgo, uma vez que fibras de maior comprimento possuem maior potencial de ligações interfibras, aumentando a área de ligações e, conseqüentemente, o número destas, favorecendo o índice de rasgo.

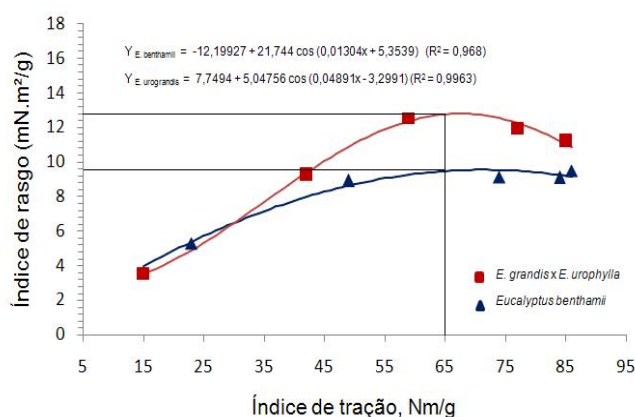


Figura 10 – Curvas ajustadas para índice de rasgo em função do índice de tração.

### Índice de arrebatamento

O índice de arrebatamento é influenciado pelo número de ligações interfibras e pelas forças dessas ligações. Com a evolução do refino, ocorre um colapsamento das fibras, o que favorece o número e as forças das ligações entre as fibras, resultando em maior compactação e maior área de contato das mesmas e, conseqüentemente, em aumento no índice de arrebatamento (QUEIROZ, 2002). Segundo Philipp e D’Almeida (1988), a resistência ao arrebatamento aumenta com a intensificação do refino, mas decresce com refino excessivo. Uma baixa resistência ao arrebatamento pode ser atribuída, em parte, ao corte das fibras. Neste trabalho as polpas não foram refinadas excessivamente quanto ao arrebatamento, pois não houve decréscimo deste índice conforme a Figura 11. Observa-se também que o comportamento das

polpas no índice de arrebentamento não diferiu estatisticamente, sendo representadas por uma só curva.

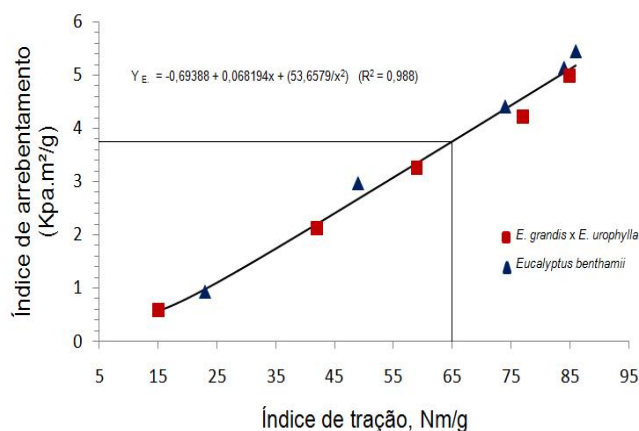


Figura 11 – Curva comum ajustada para índice de arrebentamento em função do índice de tração.

### Módulo de Elasticidade Específico (MOE)

O módulo de elasticidade específico (MOE) é uma propriedade que expressa a capacidade do material em resistir à deformação, quando é aplicada uma força, sem que ocorra deformação permanente. Na Figura 12, que ilustra o comportamento do MOE das polpas em relação ao índice de tração, pode ser observado que não houve diferença significativa para esta propriedade.

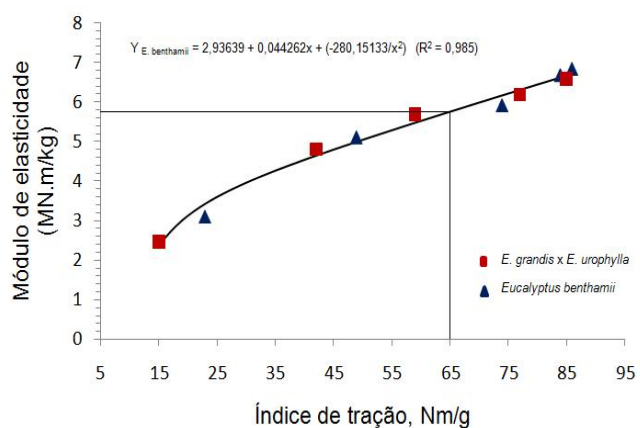


Figura 12 – Curva comum ajustada para módulo de elasticidade em função do índice de tração.

## Energia de Deformação (TEA)

A energia de deformação (TEA) expressa a habilidade do papel em absorver energia quando submetido a esforços de tração até a sua ruptura total. O TEA é representado pela área sob a curva de força *versus* deformação, que corresponde nas regiões de comportamento elástico e plástico do papel. Assim como o módulo de elasticidade específico (MOE), as polpas não apresentaram diferença na energia de deformação.

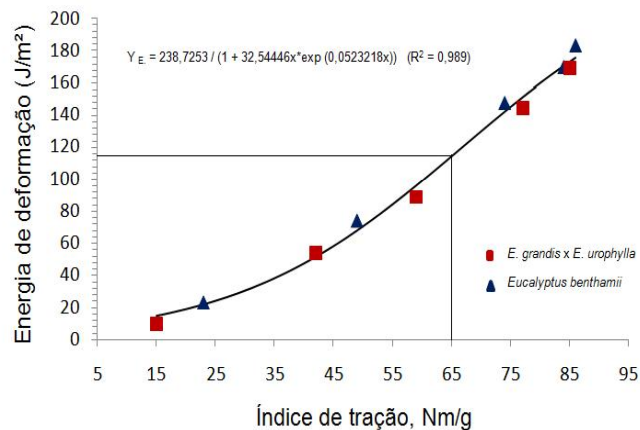


Figura 13 – Curva comum ajustada para energia de deformação em função do índice de tração.

## Resistência à passagem de ar

A resistência à passagem de ar (RPA) representa a dificuldade que um determinado volume de ar encontra para passar através de uma folha de papel e é dependente do número, tamanho, forma e distribuição dos poros no material. É, também, influenciada pelas características morfológicas da fibra, principalmente a espessura da parede, pelo número de elementos celulares e pelo número de fibras por grama presente na polpa. A intensificação do refino resulta em maior compactação das fibras e diminuição dos poros ou espaços vazios interfibrilares, dificultando a passagem de ar. Apesar das diferenças significativas na morfologia das fibras das madeiras (Tabela 12 e Tabela 21) não houve diferença significativa em relação a esta propriedade para as duas polpas estudadas.



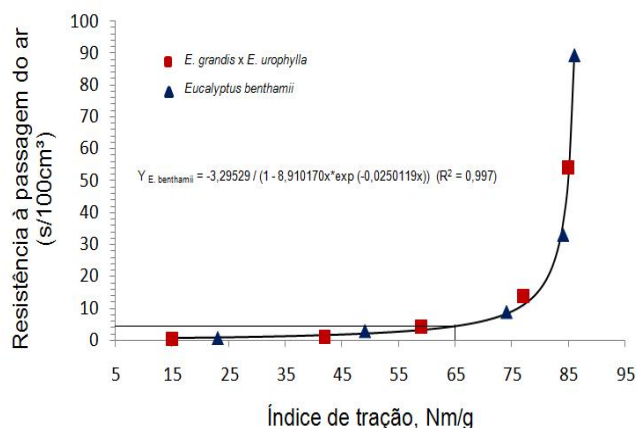


Figura 14 – Curva comum ajustada para resistência à passagem de ar em função do índice de tração.

### Peso Específico Aparente e Volume Específico Aparente

O peso específico aparente (PEA) e o volume específico aparente (VEA) são propriedades importantes em papéis de impressão, uma vez que estão intimamente ligadas com a opacidade do papel (MOREIRA, 2006). Estas propriedades são inversamente proporcionais, pois a medida que se aumenta o volume específico aparente tem-se uma diminuição no peso específico aparente do papel.

Conforme pode ser observado na Figura 15, o peso específico aparente apresentou tendência de elevação com o aumento do refino e não foi detectada diferença entre as duas polpas, tendo sido utilizada uma única curva para as duas espécies.

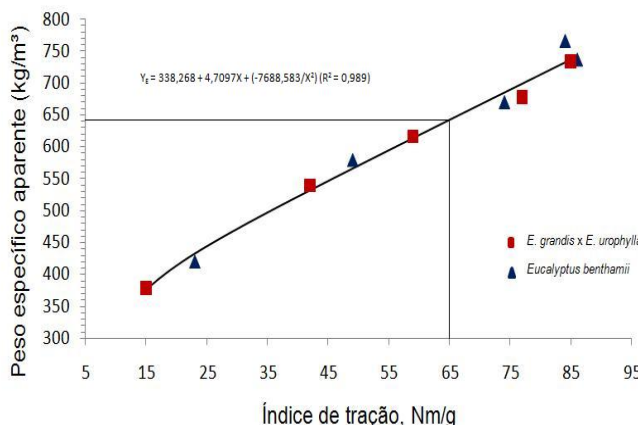


Figura 15 – Curva comum ajustada para peso específico aparente em função do índice de tração.

O volume específico aparente demonstrou tendência de diminuir com a intensidade do refino. Observou-se diferença significativa no comportamento das polpas, que foram representadas por duas curvas distintas.

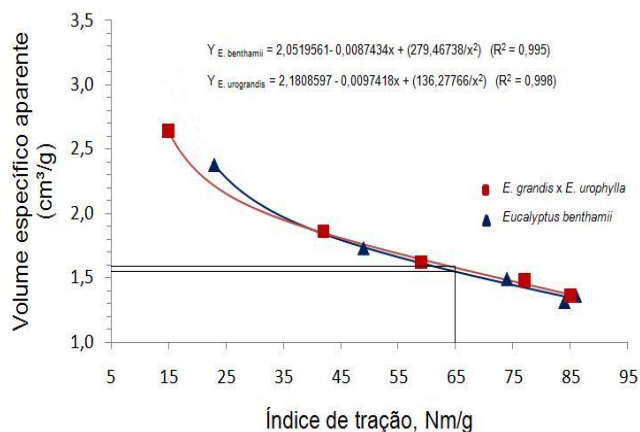


Figura 16 – Volume específico aparente em função do índice de tração.

### Opacidade e Coeficiente de Dispersão de Luz

A opacidade é a propriedade que está relacionada com a quantidade de luz transmitida através do papel. Assim, um papel perfeitamente opaco é aquele que não permite a passagem de luz visível. A opacidade de uma folha depende da quantidade de material de enchimento, do grau de branqueamento, do material de revestimento, da gramatura e da espessura do papel. Portanto, a opacidade é uma propriedade essencial para papéis de impressão e de escrever e, comumente, consta de sua especificação (PHILIPP e D'ALMEIDA, 1988).

O refino tende a diminuir a opacidade e o coeficiente de dispersão de luz das polpas, como pode ser verificado, respectivamente, nas Figuras 17 e 18. Queiroz (2002) obteve resultados semelhantes estudando polpas de eucaliptos de baixa e alta densidade e comenta que a diminuição da opacidade e do coeficiente de dispersão de luz podem ser explicados pelo aumento na compactação da estrutura da folha de teste, o que reduz o número de interfaces fibra-ar. Gomide et al. (2005) relatam que a opacidade pode ser melhorada com a utilização de polpa com maior número de fibras por grama, em razão do maior número de superfícies ópticas para a dispersão de luz na estrutura do papel,

pelos expostos a polpa do *Eucalyptus benthamii* apresentou opacidade e coeficiente de dispersão de luz superior ao híbrido urograndis, o que pode ser explicado pelo maior número de fibras/grama apresentado pelo *Eucalyptus benthamii* (Tabela 21).

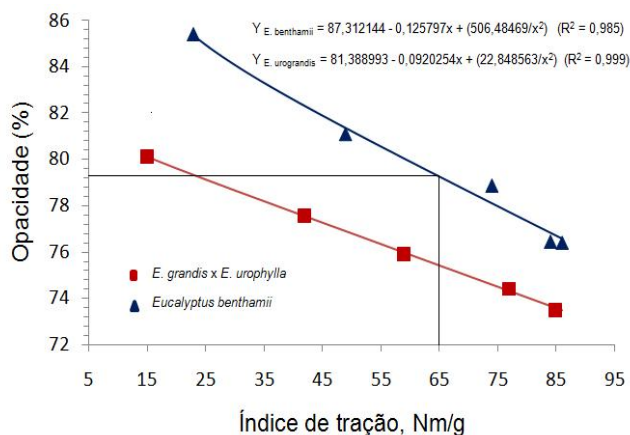


Figura 17 – Opacidade em função do índice de tração.

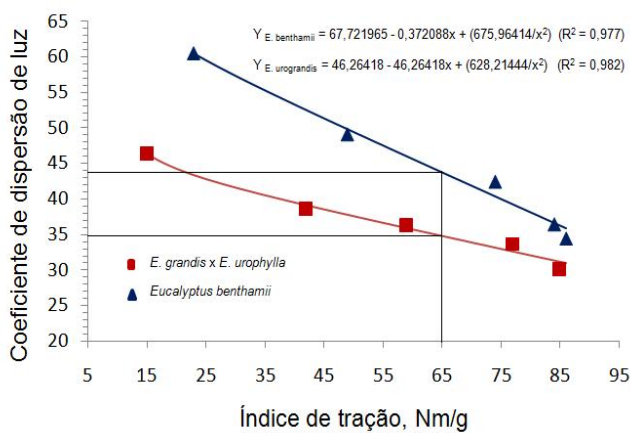


Figura 18 – Coeficiente de dispersão de luz em função do índice de tração.

## 5. CONCLUSÕES

A madeira do *Eucalyptus benthamii* apresentou estrutura anatômica bastante semelhante às de outras espécies do gênero e densidade básica e dimensões das fibras dentro dos parâmetros dos clones utilizados atualmente pela indústria nacional de celulose e papel.

Do ponto de vista de constituição química, o *Eucalyptus benthamii* apresentou qualidade inferior à do híbrido, fator que certamente contribuiu para um menor rendimento em polpa.

A madeira do *Eucalyptus benthamii* apresentou potencial para produção de celulose kraft, pois apesar de ter proporcionado menor rendimento depurado e menor viscosidade, após o branqueamento e o refino as desvantagens foram minimizadas, uma vez que a polpa do *Eucalyptus benthamii* teve bom desempenho durante o branqueamento e teve um menor consumo de energia durante o refino, apresentando comportamento semelhante ao híbrido urograndis, inclusive para as propriedades físico-mecânicas das polpas.

É importante ressaltar que o *Eucalyptus benthamii* foi comparado com um clone de alta qualidade e grande importância no cenário nacional, ou seja, o híbrido urograndis utilizado já foi submetido a vários programas de seleção e melhoramento genético, práticas usuais nas empresas nacionais do setor florestal, sendo assim investimentos em pesquisas podem tornar esta espécie apta a produção de celulose Kraft no Brasil.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.S., **Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-Solids para madeiras de eucalipto**. Piracicaba: ESALQ – USP, 2003. 131p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade Federal de São Paulo, 2003.

ALVES, E.F. **Interação de fibras e elementos de vasos de polpa kraft de eucalipto com tintas de impressão offset**. Viçosa, 2005. 117p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941** – Madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

BARBOSA, L.C.A.; MALTHA, C.R.A.; SILVA, V.L.; COLODETTE, J.L. Determinação da relação Siringila/Guaiacila da lignina em madeiras de eucalipto por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (PI-CG/EM). **Química Nova**, v. 31, n. 8, p. 2035-2041, 2008.

BERTOLUCCI, F.; REZENDE, G.;PENCHEL, R. Produção e utilização de híbridos de eucalipto. **Silvicultura**, v.13, n.51, p.12-18, 1993.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. 154 p. São Paulo. Nobel, 1991.

BUSNARDO, C.A. **Estudos sobre a deslignificação da madeira de *Eucalyptus urophylla* de origem híbrida, pelo processo Kraft para a**

**produção de celulose.** Viçosa, 1981. 251p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 1981.

BUTCHER, P. A.; SKINNER, A. K.; GARDINER, C. A. Increased inbreeding and inter-species gene flow in remnant populations of the rare *Eucalyptus benthamii*. **Conservation Genetics**, v. 6, n. 2, p. 213-226, 2005.

CARVALHO, A.M.; NAHUZ, M.A.R. Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis x urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 59, p. 61-76, 2001.

CLARK, N.B.; HICKS, C.C. Evaluation of the pulpwood quality of 13 lesser known eucalypt species. **Appita Journal**, Melbourne, v.56, n.1, p.53-60, 2003.

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

COPANT – Descripción de características generales, macroscópicas de las maderas angiospermas dicotiledóneas. **COPANT**, v. 30, p. 1-19, 1974.

COSTA, M.M.; MOUNTEER, A.H.; COLODETTE, J.L. Ácidos hexenurônicos; Parte I: origem, quantificação, reatividade e comportamento durante a polpação kraft. **O Papel**, São Paulo, v.62, n.5, p.75-85, 2001.

DIAS, V. R. L., CLAUDIO-DA-SILVA JR., E. A influência da densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* em suas características químicas e propriedades de polpação e do Papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 18., 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, p. 31-56, 1985.

ELDRIDGE, K.; DAVIDSON, J.; HARDWOOD, H.; WYK, G. van. **Eucalypt domestication and breeding**. Oxford: Clarendon, 1993. 288 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Florestas. (Colombo, PR). **Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado de Santa Catarina.** Colombo, 1988. 113p. (EMBRAPA-CNPF. Documentos, 21).

ENGLYST, H.N.; CUMMINGS, J.H. Simplified method for the measurement of total non-starch polysaccharide by gas-liquid chromatography of constituent sugars as alditol-acetates. **Analyst**, v.109, n.7, p.937-942. 1984.

FALEIROS, M. Brasil alcança a posição de quarto maior produtor mundial de celulose. **O Papel**, São Paulo, v.70, n.1, p.7-8, 2009.

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

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SisVar para Windows versão 4.0. In...45<sup>a</sup> Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade internacional de Biometria. UFSCar, São Carlos, SP, Julho de 2000. p.255-258.

FERREIRA, C.R.; FANTINI JUNIOR, M.; COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L.; CARVALHO A.M.M.L. Avaliação tecnológica de clones de eucalipto: parte 1 - qualidade da madeira para produção de celulose Kraft. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.70, p. 161-170, 2006a.

FERREIRA, C.R.; FANTINI JUNIOR, M.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C.; GOMIDE, J.L.; CARVALHO, A.M.M.L. Avaliação tecnológica de clones de eucalipto: parte 2 – qualidade da celulose branqueada Kraft para papel de imprimir e escrever. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.71, p. 09-18, 2006b.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATION. **Eucalyptus for planting.** Italy: FAO, 1981. 677p.

FOELKEL, C.E.B.; BUSNARDO, C. A.; DIAS, C. E C.; SCHIMIDT, R. M. R.; SILVA, E.; VESZ, J. B. V. Variabilidade radial da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Silvicultura**, v. 8, n. 28, p. 726-731, 1983.

FOELKEL, C.E.B.; MORA, E.; MEMOCHELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão, SP: Sociedade Brasileira de Silvicultura, p.719-728, 1990.

FOELKEL, C. **As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para a fabricação de papel.** Eucalyptus Online Book. Capítulo 03, p. 48, 2007.

Disponível em: [http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT03\\_fibras.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT03_fibras.pdf)

FLORSHEIM, S.M.B. **Variações da estrutura anatômica e densidade básica da madeira de árvore de aroeira *Myracrodruon urundeuva* F.F. & M.F. Alemão (ANACARDIACEAE).** 252p, 1992. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1992.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. (Eds). **Lignins.** New York, Wiley-Interscience, p.241-266, 1971.

GOMES, F.J.B.; GOUVÊA, A.F.G.; COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L.; CARVALHO, A.M.M.L.; TRUGILHO, P.F.; GOMES, C.M.; ROSADO, A.M. Influência do teor e da relação S/G da lignina da madeira no desempenho da polpação Kraft. **O Papel**, São Paulo, v.69, n.12, p.95-105, 2008.

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.

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

GOMIDE, J.L.; FANTUZZI NETO, H. Aspectos fundamentais da polpação kraft de madeira de *Eucalyptus*. **O Papel**, São Paulo, v.61, n.3, p.62-68, 2000.



GRAÇA M.E.C.; CARAMORI, P.H.; BOOTSMA, A.; OLIVEIRA, D.; GOMES, J. Capacidade de rebrota de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim de pesquisa Florestal**, Colombo, n. 39, p. 135-138, jul./dez. 1999.

HIGA, A.R.; CARVALHO, P.E.R. Sobrevivência e crescimento de doze espécies de eucalipto em Dois Vizinhos, Paraná. **Silvicultura**, São Paulo, v. 2, n. 42, p. 459-461, 1990.

HIGA, R.C.V., **Aspectos Ecológicos e Silviculturais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n. 38, p. 121-123, Jan./Jun. 1999.

HIGA, R.C.V.; PEREIRA, J.C.D. **Usos Potenciais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 4p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 100).

IKEMORI, Y. K.; CAMPINHOS JÚNIOR., E. Produção de sementes de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* por polinização aberta: resultados preliminares. **Silvicultura**, v.8, n.28, p.306-308, 1983.

JOVANOVIC, T.; BOOTH, T. H. **Improved species climatic profiles**. Australia: Union Offset Printing: Joint Venture Agroforestry Program, Rural Industries Research and Development Corporation, 2002. 68 p.

KLOCK, H., MUNIZ, G.I.B. **Química da Madeira**. Série Didática da FUPEF/PR, 2ª. Edição. Curitiba- PR, 1998.

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

LITTLE, K.M.; GARDNER, R.A.W., Coppicing ability of 20 *Eucalyptus* species grown at two high-altitude sites in South Africa. **Canadian Journal of Forest Research**, Canada, v.33, n.2, p.181-189, 2003.

MOKFIENSKI, A. **Importância relativa da densidade básica e da constituição química de madeira de *eucalyptus* spp. no rendimento,**

**branqueabilidade e qualidade da polpa kraft.** 2004. 136 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

MORAIS, S. A . L. **Contribuição ao estudo químico e espectroscópico da lignina de madeira do *Eucalyptus grandis*:** solamento, quantificação e análise estrutural. 1992. 260 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1992.

MOREIRA, E. **Efeito da lixiviação ácida de cavacos de eucalipto no processo Kraft.** 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

NISGOSKI, S.; MUÑIZ, G.B.; KLOCK,H. Características anatômicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v.8, n.1, p.67-76, 1998.

ODA, S.; FERREIRA, M. Produção de híbridos interespecíficos de eucalipto por polinização aberta. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4, Belo Horizonte/MG, 1982. **Silvicultura**, n.28, p.407-408, 1982.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTO, P.E.T.; FERREIRA, C.A. Eucaliptos indicados para plantio no estado do Paraná. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 45 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 129).

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y.; **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil.** Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M.L.O. **Celulose e Papel – Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**, 2ªed. Vol.1. Senai – IPT,. 599 p, 1988.

PINTO JÚNIOR, J.E.; GARLIPP, R.C.D. Eucalipto. In: ALBUQUERQUE, A.C.S.; SILVA.A.G. **Agricultura tropical: Quatro décadas de inovações**

**tecnológicas, institucionais e políticas.** Brasília: Embrapa Informações Tecnológica, 2008. p.801-822.

PRYOR, L.D. **Australian endangered species: *Eucalyptus*.** Canberra: Commonwealth of Australia. 1981, 139p.

QUEIROZ, S.C.S. **Efeito das características anatômicas e químicas na densidade básica da madeira e na qualidade da polpa de clones híbridos de *Eucalyptus grandis x urophylla*.** Viçosa, 2002. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, 2002.

RUY, O. F. **Variação da qualidade da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake da Ilha de Flores, Indonésia.** Piracicaba, 1998. 69p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1998.

SALVADOR, E.; OLIVEIRA, R. C.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L. Efeito da deslignificação com oxigênio nas propriedades físico-mecânicas de polpas kraft. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL. 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2000. 24 p.

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

SILVA, L.D. **Melhoramento genético de *Eucalyptus benthamii* maiden et cambage visando a produção de madeira serrada em áreas de ocorrência de geadas severas.** Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVA, R. P.; OLIVEIRA, R. C. Efeitos da ação do refino e da reciclagem nas propriedades de papéis de Pinus e Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 24, n. 2, p. 349-360, 2000.

SILVA, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J.T.S.; CASTRO, V.R. Influência de idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos

da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p.1081-1090, 2007.

SIXTA, H. **Handbook of Pulp**, Volume 1, 608 p. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. (2006).

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

SWAIN, T. An overview of the status of cold tolerant eucalypt trials in South Africa. In: CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS, 1997: Salvador. **Anais...** Colombo: IUFRO, 1997. p.69-76.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY-TAPPI. **Tappi test methods**: 2000-2001. Atlanta: 2000.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

TRUGILHO, P.F.; BIANCHI, M.L.; GOMIDE, J.L.; SCHUCHARDT, U. Classificação de clones de *Eucalyptus* sp visando à produção de polpa celulósica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p.895-899, 2004.

URBINATI, C.V. **Variação estrutural no lenho de *Terminalia ivorensis* A.Chev.- Combretaceae**. 1998. 70p. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

WALLIS, A.; WEARNE, R.; WRIGHT, P.J. Analytical characteristics of plantation eucalypt woods relating to kraft pulp yields. **Appita Journal**, v. 49, n. 5, p. 427-432, 1996.

WEHR, T.R.; BARRICHELO, L.E.G. Cozimento kraft com madeiras de *eucalyptus grandis* de diferentes densidades básicas e dimensões de cavacos.

In CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP. 1992, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1992. v.25. p.1-17.

YONQI, Z.; HUORAN, W.; RONGGUI, Z.; QINGSHENG, M. Trials of *Eucalyptus smithii* and other eucalypt species in Yunnan province, China. In: BROWN, A.G., ed. **Australian tree species research in China: Proceedings...** Canberra: **ACIAR**, 1994. p.116-122. (ACIAR Proceedings, 48).

## **ANEXOS**

Quadro 1 – Densidade básica, teor de extrativos, teor de lignina e relação S/G das madeiras

Amostra	Dens. Básica (Kg.m <sup>-3</sup> )	Solubilidade em DCM* (%)	Solubilidade em Acetona (%)	Extrativos totais (%)	Lignina Klason, %			S/G
					Insolúvel	Solúvel	Total	
<i>E. benthamii</i>	466,0	0,18	2,18	2,36	26,2	4,1	30,3	2,4
	477,0	0,21	2,31	2,52	26,2	4,1	30,3	2,3
<b>Média</b>	<b>471,5</b>	<b>0,20</b>	<b>2,25</b>	<b>2,45</b>	<b>26,2</b>	<b>4,1</b>	<b>30,3</b>	<b>2,4</b>
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	499,0	0,59	0,88	1,47	26,0	3,6	29,6	2,9
	499,0	0,57	0,85	1,42	26,2	3,4	29,6	2,8
<b>Média</b>	<b>499,0</b>	<b>0,58</b>	<b>0,87</b>	<b>1,45</b>	<b>26,1</b>	<b>3,5</b>	<b>29,6</b>	<b>2,9</b>

Quadro 2 – Análise dos carboidratos das madeiras

Amostra	Glicanas (%)	Xilanas (%)	Galactanas (%)	Mananas (%)	Arabinanas (%)	Ac. Urônico (%)	Grupos Acetila (%)
<i>E. benthamii</i>	46,7	11,0	1,7	0,5	0,2	5,5	2,0
	46,5	11,3	1,8	0,6	0,2	5,4	2,1
<b>Média</b>	<b>46,6</b>	<b>11,2</b>	<b>1,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,2</b>	<b>5,5</b>	<b>2,1</b>
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	48,3	10,7	0,9	0,5	0,3	5,6	1,9
	48,7	10,8	0,9	0,6	0,3	5,6	1,9
<b>Média</b>	<b>48,5</b>	<b>10,8</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>5,6</b>	<b>1,9</b>

Quadro 3 – Condições do branqueamento da polpa do *E. benthamii* com a sequência ODEPDP

<b>Propriedades / Condições</b>	<b>Pré O<sub>2</sub></b>	<b>D</b>	<b>EP</b>	<b>D</b>	<b>P</b>
Consistência (%)	10	10	10	10	10
Tempo (minuto)	60	120	120	120	120
Temperatura (°C)	95	95	85	80	80
Pressão (Bar)	600	-	-	-	-
Carga O <sub>2</sub> (kg/tas)	20,0	-	-	-	-
Fator kappa	-	0,2	-	-	-
Carga ClO <sub>2</sub> (como Cl <sub>2</sub> kg/tas)	-	21,1	-	3,0	-
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (kg/tas)	-	-	3,0	-	2
NaOH (kg/tas)	18,0	-	10,0	-	3
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (kg/tas)	-	7,5	-	1,0	-

Quadro 4 – Condições do branqueamento da polpa do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com a sequência ODEPDP

<b>Propriedades / Condições</b>	<b>Pré O<sub>2</sub></b>	<b>D</b>	<b>EP</b>	<b>D</b>	<b>P</b>
Consistência (%)	10	10	10	10	10
Tempo (minuto)	60	120	120	120	120
Temperatura (°C)	95	95	85	80	80
Pressão (Bar)	600	-	-	-	-
Carga O <sub>2</sub> (kg/tas)	20,0	-	-	-	-
Fator kappa	-	0,2	-	-	-
Carga ClO <sub>2</sub> (como Cl <sub>2</sub> kg/tas)	-	22,4	-	5,0	-
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (kg/tas)	-	-	3,0	-	2
NaOH (kg/tas)	18,0	-	10,0	-	3
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (kg/tas)	-	5,5	-	1,0	-



Quadro 5 – Características das fibras do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*

Fibras	Unidade de medida	Número de medições	Valores determinados				
			Máximo	Mínimo	Médias	Desvio padrão	CV, %
Comprimento	mm	100	1,38	0,73	1,07	0,11	10,42
Largura	µm	100	26,91	14,44	20,064	3,03	15,10
Diâmetro Lume	µm	100	19,63	5,86	10,59	2,69	25,37
Espessura das paredes	µm	100	2,83	7,02	4,73	0,869	18,26

Quadro 6 – Características das fibras do *Eucalyptus benthamii*

Fibras	Unidade de medida	Número de medições	Valores determinados				
			Máximo	Mínimo	Médias	Desvio padrão	CV (%)
Comprimento	mm	100	1,44	0,71	0,96	0,12	12,85
Largura	µm	100	26,81	12,07	17,92	2,76	15,39
Diâmetro Lume	µm	100	18,12	4,37	9,84	2,46	24,98
Espessura das paredes	µm	100	5,86	2,38	4,04	0,74	18,20

Quadro 7 – Análises morfológicas das fibras de polpa do *Eucalyptus benthamii* branqueada determinadas no Galai CIS-100

Número de revoluções	Coarseness (mg/100m)	Nº fibras/g (milhões)	Nº de fibras	Comp,esp médio(mm)	Largura Média(µm)	Finos (% de mm)
0	5,60	25,53	56313	0,70	24,23	8,44
	5,44	27,45	60568	0,67	28,50	8,08
<b>Média</b>	<b>5,52</b>	<b>26,49</b>	<b>58441</b>	<b>0,69</b>	<b>26,37</b>	<b>8,26</b>
1000	5,14	29,47	65026	0,66	24,23	10,07
	5,20	29,16	64327	0,66	24,52	9,01
<b>Média</b>	<b>5,17</b>	<b>29,32</b>	<b>64677</b>	<b>0,66</b>	<b>24,38</b>	<b>9,54</b>
2000	5,25	28,44	62752	0,66	24,22	10,00
	5,23	28,56	63010	0,67	24,19	9,73
<b>Média</b>	<b>5,24</b>	<b>28,50</b>	<b>62881</b>	<b>0,66</b>	<b>24,21</b>	<b>9,87</b>
3000	5,19	29,19	64402	0,66	24,20	9,78
	5,16	29,39	64829	0,66	24,09	10,16
<b>Média</b>	<b>5,17</b>	<b>29,29</b>	<b>64616</b>	<b>0,66</b>	<b>24,15</b>	<b>9,97</b>
4000	5,07	30,80	67956	0,64	24,00	11,27
	5,20	30,55	67398	0,63	23,95	10,27
<b>Média</b>	<b>5,13</b>	<b>30,67</b>	<b>67677</b>	<b>0,64</b>	<b>23,98</b>	<b>10,77</b>

Quadro 8 – Análises morfológicas das fibras de polpa do *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla* branqueada determinadas no Galai CIS-100

Número de revoluções	Coarseness (mg/100m)	Nº fibras/g (milhões)	Nº de fibras	Comp,esp médio(mm)	Largura Média(µm)	Finos (% de mm)
0	7,09	18,91	41729	0,79	29,27	8,37
	7,04	17,53	38671	0,81	29,53	8,76
<b>Média</b>	<b>7,06</b>	<b>18,20</b>	<b>36634</b>	<b>0,80</b>	<b>29,40</b>	<b>8,57</b>
1000	5,59	22,08	48709	0,80	29,34	9,07
	5,90	21,18	46719	0,80	29,32	8,61
<b>Média</b>	<b>5,75</b>	<b>21,61</b>	<b>47714</b>	<b>0,80</b>	<b>29,33</b>	<b>8,84</b>
2000	7,31	16,28	35910	0,80	24,99	9,00
	7,10	16,96	37416	0,81	24,89	9,06
<b>Média</b>	<b>7,21</b>	<b>16,61</b>	<b>36663</b>	<b>0,80</b>	<b>24,94</b>	<b>9,03</b>
3000	7,16	17,68	39002	0,79	24,69	9,56
	6,84	18,76	41377	0,78	24,71	9,67
<b>Média</b>	<b>7,00</b>	<b>18,20</b>	<b>40190</b>	<b>0,79</b>	<b>24,70</b>	<b>9,62</b>
4000	7,40	17,11	37739	0,79	25,93	10,78
	7,44	17,01	37519	0,79	25,73	9,98
<b>Média</b>	<b>7,42</b>	<b>17,06</b>	<b>37629</b>	<b>0,79</b>	<b>25,83</b>	<b>10,38</b>

Quadro 9 – Resultados dos testes físico-mecânicos e ópticos

<i>Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla</i>					
Número de revoluções	0	1000	2000	3000	4000
Consumo de energia (Wh)	0	12	25	37	48
° Schopper Riegler	17	21	29	42	55
Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	64,47	64,43	63,33	62,69	63,18
Índice de tração (N,m/g)	15,05	42,24	58,5	76,79	84,62
Índice de arrebentamento (Kpa,m <sup>2</sup> /g)	0,58	2,11	3,24	4,22	4,98
Índice de rasgo (mN,m <sup>2</sup> /g)	3,52	9,28	12,58	11,93	11,25
Alongamento (%)	1,36	2,74	3,33	4,33	4,55
Resistência à passagem do ar (s/100cm <sup>3</sup> )	0,25	1,04	4,06	13,75	54,19
Espessura (µm)	170,4	119,5	102,8	92,6	86,1
Peso específico aparente (kg/m <sup>3</sup> )	378,19	539,15	616,17	677,59	734
Volume específico aparente (cm <sup>3</sup> /g)	2,64	1,86	1,62	1,48	1,36
Energia de deformação (J/m <sup>2</sup> )	9,56	54,05	88,81	144,26	169,42
Módulo de elasticidade (MN,m/kg)	2,46	4,8	5,68	6,18	6,58
Alvura (% ISO)	90,18	87,56	87,4	86,7	83,72
Brancura CIE	83,44	78,61	78,35	77,61	72,69
Opacidade (%)	80,11	77,55	75,91	74,42	73,5
Coefficiente de dispersão de luz	46,4	38,59	36,33	33,66	30,11
Coordenada L*	97,16	96,42	96,38	96,08	95,11
Coordenada a*	-0,07	0	-0,03	0	0,27
Coordenada b*	2,11	2,77	2,81	2,81	3,35

Quadro 10 – Resultados dos testes físico-mecânicos e ópticos

<i>Eucalyptus benthamii</i>					
Número de revoluções	0	1000	2000	3000	4000
Consumo de energia (Wh)	0	13	24	37	49
° Schopper Riegler	24	31	40	53	63
Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	65,47	64,03	63,18	63,93	63,58
Índice de tração (N,m/g)	22,93	49,1	73,75	86,41	83,91
Índice de arrebentamento (Kpa,m <sup>2</sup> /g)	0,93	2,97	4,41	5,14	5,45
Índice de rasgo (mN,m <sup>2</sup> /g)	5,29	8,91	9,13	9,5	9,1
Alongamento (%)	2,06	3,18	4,5	4,75	4,48
Resistência à passagem do ar (s/100cm <sup>3</sup> )	0,71	2,92	8,88	33,03	89,24
Espessura (µm)	155,8	110,6	94,36	86,84	83,08
Peso específico aparente (kg/m <sup>3</sup> )	420,27	579,19	669,67	736,27	765,39
Volume específico aparente (cm <sup>3</sup> /g)	2,38	1,73	1,49	1,36	1,31
Energia de deformação (J/m <sup>2</sup> )	22,91	73,85	147,61	182,96	169,51
Módulo de elasticidade (MN,m/kg)	3,1	5,10	5,9	6,7	6,83
Alvura (% ISO)	89,29	89,52	87,73	86,63	84,07
Brancura CIE	81,09	81,12	78,14	76,38	72,27
Opacidade (%)	85,4	81,09	78,87	76,45	76,4
Coefficiente de dispersão de luz	60,5	49,1	42,43	36,44	34,43
Coordenada L*	97,04	97,15	96,58	96,22	95,38
Coordenada a*	-0,06	-0,19	-0,14	-0,08	0,16
Coordenada b*	2,57	2,62	2,97	3,15	3,6