

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Avaliação da madeira de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de
Eucalyptus grandis x *Eucalyptus urophylla* destinadas à produção de polpa
celulósica kraft**

Francismara Aparecida Sanches Duarte

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Recursos Florestais com opção em
Tecnologia de Produtos Florestais**

**Piracicaba
2006**

Francismara Aparecida Sanches Duarte
Química

**Avaliação da madeira de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de
Eucalyptus grandis x *Eucalyptus urophylla* destinadas à produção de polpa
celulósica kraft**

Orientador:
Prof. Dr. FRANCIDES GOMES DA SILVA JÚNIOR

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Recursos Florestais com opção em
Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2007

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Duarte, Francismara Aparecida Sanches

Avaliação da madeira de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destinadas à produção de polpa celulósica Kraft / Francismara Aparecida Sanches Duarte. - - Piracicaba, 2007.
107 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Árvore florestal 2. Celulose sulfato 3. Eucalipto 4. Melhoramento genético vegetal
5. Polpa de madeira 6. Polpação I. Título

CDD 676.126

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

**É JUSTAMENTE A POSSIBILIDADE DE REALIZAR
UM SONHO QUE TORNA A VIDA
INTERESSANTE.**

(PAULO COELHO)

**JAMAIS PODEREMOS SER SUFICIENTEMENTE
GRATOS A DEUS, NOSSOS PAIS
E NOSSOS MESTRES.**

(ARISTÓTELES)

DEDICATÓRIA

A Deus, pelo dom da vida e pelo refúgio nos momentos de alegria e tristeza.

Aos meus pais, Francismir e Araci pelos ensinamentos, pelo apoio nos meus estudos e por colaborarem na realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Ao Jefferson, pelo carinho, paciência e por saber transformar os pequenos momentos em ocasiões especiais.

Ao Fábio e Lílian, pelo carinho, pela amizade e pela ajuda nos momentos de dificuldades.

Aos meus avós, que irradiam ternura com um pequeno gesto.

Ao professor Francides Gomes da Silva Junior, pela orientação desde a graduação, pelas oportunidades de crescimento, pelos conselhos e amizade.

Ao professor Luiz Ernesto George Barrichelo, pelo apoio, pela atenção nos momentos de dúvidas e amizade.

Ao Eng^o Augusto Milanez, pelo apoio na orientação do desenvolvimento desse trabalho, pela atenção e amizade.

Ao professor Mário Tomazello, pelo apoio nos momentos de dúvidas e auxílio no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Laboratório de Química Celulose e Energia, por colaborar no meu desenvolvimento profissional e aos companheiros de trabalho Camila, Fabiana, Fernando, Fernanda, Gustavo, Gláucia, Juliana, Natália, Regina, Tadeu, Udemilson e Wilian, pela amizade e colaboração no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Laboratório de Anatomia da Madeira e sua equipe, Carlos, Cláudio, Maria e Matheus, pela paciência e colaboração no desenvolvimento desse trabalho.

A equipe da Biblioteca do IPEF e Eventos, Marialice, Paulo, Olicina, Aline e Evelyn, pela atenção, amizade e pelas oportunidades proporcionadas no meu crescimento profissional.

Ao Leandro Siqueira e Fábio Luiz Barbosa pela colaboração na coleta das matérias-primas da Companhia Suzano Papel e Celulose.

A empresa CELBI - Celulose Beira Industrial, que cedeu a matéria-prima de *Eucalyptus globulus*.

A Empresa Mesta-Botnia – Finlândia pelo envio das amostras de *Betula pendula*.

A Companhia Suzano Papel e Celulose, por ceder às matérias-primas e pelo financiamento desse trabalho.

A todos que de uma maneira direta ou indireta colaboraram no desenvolvimento desse trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT... ..	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 DESENVOLVIMENTO.....	15
2.1 Revisão Bibliográfica.....	15
2.1.1 Matéria-prima fibrosa para produção de celulose	15
2.1.2 Densidade básica da madeira	17
2.1.3 Caracterização anatômica	19
2.1.4 Característica química.....	20
2.1.5 Compostos inorgânicos na madeira.....	22
2.1.6 Polpação kraft	23
2.2 Material e Métodos.....	25
2.2.1 Material	25
2.2.1.2 <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	26
2.2.1.3 <i>Eucalyptus globulus</i>	27
2.2.1.4 <i>Betula pendula</i>	27
2.2.1.5 Amostragem	28
2.2.2 Métodos.	29
2.2.2.1 Caracterização da madeira	29
2.2.2.1.1 Densidade básica	29
2.2.2.1.2 Variação radial da densidade do lenho por densitometria de Raios X	31
2.2.2.1.3 Caracterização morfológica das fibras	32
2.2.2.1.4 Caracterização da anatomia da madeira	34
2.2.2.1.5 Caracterização química	34
2.2.2.1.6 Caracterização dos elementos inorgânicos.....	34
2.2.2.2 Polpação	34

2.2.2.3 Parâmetros determinados no processo de polpação.....	36
2.2.2.4 Delineamento experimental e análise estatística.....	36
2.3 Resultados e Discussões.....	37
2.3.1 Densidade básica na madeira.....	37
2.3.1.2 Densidade aparente da madeira por densitometria Raio X.....	48
2.3.2 Composição química da madeira	52
2.3.2.1 Características Básicas	52
2.3.2.2 Compostos inorgânicos na madeira	56
2.3.3 Dimensões das fibras	58
2.3.4 Microscopia eletrônica	62
2.3.5 Polpação	71
3 CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	85
APÊNDICES.....	94

RESUMO

Avaliação da madeira de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destinadas à produção de polpa celulósica kraft

A madeira é a principal variável de custo na produção de polpa celulósica. A polpa celulósica obtida a partir da madeira de folhosas é principalmente utilizada para produção de papéis de escrita e impressão assim como, a produção de papéis para fins sanitários; para estes usos normalmente a polpa celulósica deve ser branqueada. Mundialmente, várias espécies de madeira de folhosas são utilizadas para produção de polpa celulósica de fibra curta, estando entre as principais o híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (Brasil), *Betula pendula* (Finlândia) *Eucalyptus globulus* (Portugal). Este projeto teve por objetivo: i-avaliar e comparar o desempenho de madeiras de principais espécies utilizadas mundialmente, para produção de polpa celulósica de fibra curta, considerando os aspectos relacionados à qualidade da madeira e polpa, o consumo de reagentes químicos na polpação e também os aspectos relacionados ao rendimento e a capacidade de produção de polpa celulósica; ii-fornecer informações estratégicas para o setor celulósico nacional com relação as possíveis ameaças e as oportunidades apresentadas pelos materiais não utilizados no Brasil, visando o conhecimento e posicionamento em competitividade destas madeiras no mercado mundial de celulose e papel; iii-fornecer subsídios para o programa genético e de melhoramento florestal; iv-posicionar a polpa celulósica de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em relação as suas principais concorrentes. Para realização deste trabalho foram coletadas 5 árvores de todas as espécies, sendo considerado o diâmetro médio do povoamento, transportando a madeira em forma de discos e transformadas em cavacos de forma manual; com relação à madeira foram determinadas, densidade básica, dimensões de fibras, composição química e análise anatômica através da microscopia eletrônica de varredura; as condições de cozimento foram ajustadas visando à obtenção de polpa branqueável (número kappa de 17 ± 0.5). Os resultados obtidos mostraram que as espécies de *Eucalyptus globulus* e *E. grandis* x *E. urophylla* 2 apresentaram melhor desempenho no processo de polpação; atingiram a mesma intensidade deslignificação (expressa como número kappa), sendo necessário menor nível de álcali ativo. As matérias-primas citadas apresentaram maior rendimento, maior viscosidade e menor teor de ácidos hexenurônicos. As diferentes matérias-primas estudadas neste trabalho apresentaram características bastante distintas que implicam em diferentes eficiências nos processos de polpação e branqueamento.

Palavras-chave: Matérias-primas; *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*; *Betula pendula*; *Eucalyptus globulus*; Processo de Polpação kraft

ABSTRACT

Evaluation of the wood of *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* and of hybrid of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* as a raw-material for kraft pulp production

Wood is the main variable in the cost of pulp production, besides being a strong component in the final quality of the paper product. Pulps obtained from hardwoods are mainly used in the production of printing and writing papers as well as tissue papers; for these uses, the pulp must be bleached. Several species of hardwoods are used in the production of pulp worldwide. The main ones are the hybrid *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* (Brazil), *E. globulus* (Portugal), *Betula pendula* (Finland). The objectives of this research was: 1) to evaluate and compare the performance of woods from the main species used worldwide for hardwood cellulose pulp production, considering the aspects regarding the quality of the wood and pulp, chemicals consumption during pulping, and aspects related to the yield and capacity pulp production; 2) to supply strategic information for the Brazilian pulp and paper sector regarding possible threats and opportunities presented by materials which are not used in Brazil in order to know and compete with these woods in the world market of pulp and paper. In order to accomplish this work, chips were manually obtained from disks. Regarding the wood, the basic density, fibers dimensions, chemical composition and anatomic analysis were conducted. The cooking conditions were adjusted in order to obtain the bleachable pulp (kappa number 17 ± 0.5). The results had shown that the species of *Eucalyptus globulus* from Portugal and hybrid of *E. grandis* x *E. urophylla* 2 had better performance in the kraft pulping process; they had reached the same delignification level, as number kappa, requiring lesser active alkali. The mentioned raw materials showed higher yield, greater viscosity and minor levels of acid hexenurônicos. The raw-materials considered in the research showed clearly distinct characteristics that lead to differences in the pulping and bleaching processes efficiencies and strategies.

Keywords: Raw materials; *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*; *Betula pendula*; *Eucalyptus glubulus*; pulping process

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Países que foram realizados as amostras, (1) Brasil, (2) Portugal e (3).....	26
Figura 2 -	Local de coleta das espécies de <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> do Brasil: (1) São Miguel - SP, (2) Itatinga – SP e (3) Mucuri –	26
Figura 3 -	Local de coleta em Portugal da espécie de <i>Eucalyptus globulus</i>	27
Figura 4 -	Representação do local de coleta na Finlândia da espécie de <i>Betula pendula</i>	27
Figura 5 -	Amostragem dos discos por árvore.....	28
Figura 6 -	Amostragem dos discos para determinar densidade básica.....	29
Figura 7 -	Descrição da metodologia de raios X e a obtenção das imagens radiográficas do lenho das árvores.....	32
Figura 8 -	Variação longitudinal – densidade básica total.....	43
Figura 9 -	Variação longitudinal – densidade básica da madeira.....	43
Figura 10 -	Variação longitudinal – % de casca em peso.....	45
Figura 11 -	Variação longitudinal – % de casca em volume.....	46
Figura 12 -	Índice de heterogeneidade.....	47
Figura 13 -	Correlação linear entre a densidade aparente média do DAP e a densidade básica média da árvore.....	49
Figura 14 -	Variação da densidade nas espécies <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 1, 2 e 3 (figura A, B e C), <i>Betula pendula</i> (figura D) e <i>E. globosus</i> (figura E).....	51
Figura 15 -	Comprimento das fibras.....	60
Figura 16 -	Espessura das fibras.....	60
Figura 17 -	Largura das fibras.....	61
Figura 18 -	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 1- Corte transversal (aumento-150x).....	63
Figura 19 -	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 1- Corte transversal (aumento- 400x).....	63
Figura 20 -	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 1- Corte transversal (aumento-1000x).....	64
Figura 21 -	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 2- Corte transversal (aumento-150x).....	64
Figura 22 -	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 2- Corte transversal (aumento-400x).....	65
Figura 23 -	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 2- Corte transversal (aumento-1000x).....	65

Figura 24 - <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 3- Corte transversal (aumento-150x).....	66
Figura 25 - <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 3- Corte transversal (aumento-400x).....	66
Figura 26 - <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 3- Corte transversal (aumento-1000x).....	67
Figura 27 - <i>Betula pendula</i> - Corte transversal (aumento-150x).....	68
Figura 28 - <i>Betula pendula</i> - Corte transversal (aumento-400x).....	68
Figura 29 - <i>Betula pendula</i> - Corte transversal (aumento-1000x).....	69
Figura 30 - <i>Eucalyptus globulus</i> - Corte transversal (aumento-150x).....	70
Figura 31 - <i>Eucalyptus globulus</i> - Corte transversal (aumento-400x).....	70
Figura 32 - <i>Eucalyptus globulus</i> - Corte transversal (aumento-1000x).....	71
Figura 33 - Álcali-ativo aplicado- base NaOH.....	72
Figura 34 - Rendimento bruto e depurado.....	73
Figura 35 - Teor de rejeito.....	74
Figura 36 - Ácidos Hexenurônicos.....	76
Figura 37 - Número kappa x número kappa corrigido.....	77
Figura 38 - Viscosidade para diferentes matérias-primas.....	78
Figura 39 - Seletividade.....	79
Figura 40 - Teor de sólidos gerados por tonelada de polpa produzida.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de cozimento.....	35
Tabela 2 - Parâmetros determinados no processo de polpação.....	36
Tabela 3 - Densidade básica ponderada - Dbt (madeira+casca), Db madeira, Db casca e percentagem de casca em peso e volume.....	37
Tabela 4 - Densidade básica - Dbt (madeira+casca), Db madeira, Db casca e percentagem de casca em peso e volume nas diferentes alturas.....	42
Tabela 5 - Densidade aparente obtida por densitometria de Raio X.....	49
Tabela 6 - Características químicas da madeira.....	52
Tabela 7 - Compostos inorgânicos na madeira.....	56
Tabela 8 - Dimensões das fibras.....	59
Tabela 9 - Análises Químicas das polpas.....	75
Tabela 10 - Análises do licor negro.....	80

1 INTRODUÇÃO

A produção de polpa celulósica a partir da madeira de folhosas é destinada basicamente a dois diferentes tipos de papéis: (i) escrita e impressão e (ii) sanitários - *tissue*.

Mundialmente as matérias-primas utilizadas para esses fins diferem entre si no que diz respeito à espécies, idade, tipo de florestas (plantada e nativa), bem como as características químicas, físicas e anatômicas da madeira.

Entre as diferentes matérias-primas utilizadas para produção de polpa celulósica, destaca-se no Brasil o híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*; em Portugal o *Eucalyptus globulus*; no Chile o *Eucalyptus globulus* e mais recentemente o *Eucalyptus nitens*; no norte da Europa, a principal espécie utilizada para produção de polpa celulósica é a *Betula pendula*; no Canadá e Estados Unidos destacam-se as espécies do gênero *Populus*; na Indonésia, além do *Eucalyptus* as madeiras do gênero *Acacia* são bastante utilizadas para produção de polpa celulósica. Cabe salientar que parte das matérias-primas utilizadas no norte da Europa e América do Norte são oriunda de florestas nativas com idade de aproximadamente 60 anos.

As espécies utilizadas para produção de polpa celulósica kraft de fibra curta apresentam diferenças que vão desde os aspectos silviculturais até as propriedades que determinam a qualidade de suas madeiras; estas diferenças conferem às respectivas polpas celulósicas propriedades diferenciadas, que podem ser exploradas para produção de papéis com características específicas, atingindo mercados mais exigentes e proporcionando maiores retornos sobre os investimentos realizados pelas indústrias de celulose e papel.

O mercado mundial de polpa celulósica de fibra curta tem mostrado um crescimento consistente nos últimos anos. O conhecimento das principais características das madeiras e polpas obtidas a partir da madeira de folhosas utilizadas comercialmente pelos principais países produtores de polpa de fibra curta é de fundamental importância para o setor brasileiro de celulose e papel, seja para detectar ameaças ou mesmo oportunidades. Neste contexto, os objetivos deste trabalho são:

- i. avaliar e comparar o desempenho da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus globulus* e *Betula pendula*, considerando-se os aspectos relacionados à qualidade da madeira, da polpa celulósica produzida e o desempenho

frente ao processo kraft de polpação (carga alcalina, rendimento, geração de sólidos, entre outros);

- ii. fornecer informações estratégicas para o setor celulósico nacional com relação às possíveis ameaças e oportunidades apresentadas pelos materiais não utilizados no Brasil, visando o conhecimento e posicionamento em termos de potencial de competitividade destas madeiras e polpas celulósicas no mercado mundial de celulose e papel.
- iii. fornecer subsídios para programas de melhoramento genético e utilização de tecnologia genômica florestal.
- iv. posicionar a polpa celulósica de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em relação as suas principais concorrentes.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 Matéria-prima de folhosas para produção de celulose

De acordo com Rocha (2000) à medida que a humanidade avançou, a madeira tornou-se cada vez mais estudada e compreendida, o que permitiu usos mais adequados e nobres.

Monteiro (1996) menciona que a madeira pode ser considerada um material universal, por atender a grande necessidade humana. Destina-se na maior parte ao abastecimento de indústrias secundárias, tais como celulose e papel, construção civil, movelaria, geração de energia, entre outras.

Foelkel (1977) descreve que há um grande número de espécies compondo o grupo de vegetais do tipo folhosas, com ampla variação na estrutura de suas madeiras, como vasos, parênquimas, fibras, e outras células especializadas que se arranjam em inúmeras formas para comporem as madeiras.

Silva (1996) salienta que as matérias-primas tradicionais utilizadas como fontes de fibra para produção de polpa celulósica são oriundas de espécies de coníferas e de folhosas, entretanto, por um longo período, a madeira de folhosa, foi considerada por muitos fabricantes de polpa celulósica um material de qualidade inferior comparada as de fibra longa; Martins (1983) salienta que esse desinteresse se dava por apresentarem fibras curtas, o que por muitos anos, foi considerado indesejável para a produção de papel, pois se associava que a resistência da polpa estava ligada ao comprimento das fibras.

A indústria brasileira de celulose e papel fundamenta-se principalmente, na utilização de madeiras de eucalipto, que dado ao desenvolvimento da silvicultura em seu sentido mais amplo, as florestas obtiveram maiores produtividades e em geral matéria-prima com características (químicas, físicas e anatômicas) adequadas. O desenvolvimento nacional nas áreas de silvicultura de florestas plantadas e de produção de polpa celulósica permitiu que o Brasil se transformasse em um dos maiores exportadores mundiais de polpa celulósica de fibra curta, sendo as principais espécies utilizadas o *E. grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla* e híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* e *E. globulus*.

De acordo com Pásztor (1990), o *E. urophylla* foi introduzido no Brasil em 1919 por Edmundo Navarro de Andrade, em Rio Claro - SP, sendo erroneamente identificado como *E. alba*. Segundo Busnardo (1978), devido a problemas diversos, referentes principalmente à alta

capacidade para hibridação, existiram muitas dificuldades para se precisar a exata espécie do material; a descrição da espécie só foi oficialmente adotada em 1977, após estudos de S.T. Blakely.

Aproximadamente 20 anos depois da introdução do *E. urophylla* ocorreu à primeira plantação de *Eucalyptus globulus* localizada no sul da Europa e norte da África realizado pelo naturalista Billarolierè entre 1791 e 1792. Considera-se que a partir desta, outras plantações estabeleceram-se fora do continente Australiano e atualmente em Portugal, Califórnia, Chile, Sul da África, Índia e Argentina (IGARTÚA et al.2004). Atualmente Portugal tem uma área de 8,9 milhões de hectares plantados de *Eucalyptus globulus* sendo esta a principal matéria-prima utilizada para produção de polpa celulósica neste país.

No Norte da Europa a matéria-prima utilizada para a produção de polpa celulósica é a *Betula pendula* conhecida “vulgarmente” como viodeiro branco. Tal espécie é oriunda de florestas nativas com solos pobres sendo não tolerando a solos mal arejados e alagados (BHAT et al. 1981).

Apesar da madeira de eucalipto ser a principal matéria-prima para produção de polpa celulósica no Brasil, Foelkel em 1978 citou que o ideal seria que a indústria de celulose e papel pudesse contar com outros gêneros de madeira de qualidade adequada, o que permitiria obter tipos distintos no produto final e maior flexibilidade na produção.

Segundo Silva Junior (2002), o termo qualidade de madeira tem apresentado uma evolução histórica em termos de conceituação, ou visão. De uma maneira bastante sucinta as visões sobre qualidade da madeira podem ser agrupadas em:

- i. visão "transcendental" - a qualidade da madeira é um conceito empírico e não claramente definido;
- ii. visão de processo - adequação das características da madeira ao processo e instalações disponíveis na unidade fabril;
- iii. visão de valor - impacto das características da madeira no custo de produção;
- iv. visão de uso - características da madeira que levam a produção de polpa celulósica e papel que atendem as necessidades dos clientes.

Até a década passada o maior objetivo na implantação de uma floresta comercial, era obter a máxima produção volumétrica. Hoje, há uma crescente preocupação com a qualidade

da madeira, no que se refere à adequação e determinado uso ou a sua capacidade para atender aos requisitos necessários à fabricação de um dado produto.

A qualidade da matéria-prima é altamente influenciada pelos aspectos químicos, físicos e anatômicos da madeira (FOELKEL 1978; ALENCAR 2002). Além disso, a qualidade da madeira tem grande relação com a silvicultura, com o melhoramento genético, bem como com os aspectos ambientais, tais como condições climáticas, atributos químicos e físicos do solo e a nutrição das árvores, estando interligados na obtenção de polpa celulósica e papel com características específicas.

Segundo Barrichelo (1983), quando se menciona qualidade da madeira, os trabalhos salientam a densidade básica, pelo fato de ser uma das principais características de avaliação de qualidade, salientando também a facilidade de amostragem e mensuração. Além da densidade básica, outros parâmetros devem ser considerados para a caracterização da qualidade da madeira como: as características das fibras, parênquimas e vasos, bem como os teores de celulose, lignina, pentosanas e extrativos.

A qualidade da polpa celulósica é altamente dependente dos aspectos químicos, anatômicos e físicos da matéria-prima; quando se afirma que uma polpa celulósica possui qualidade, quer se referir que ela possui os requisitos necessários para certos usos finais.

2.1.2 Densidade básica da madeira

A densidade básica é uma propriedade física da madeira definida como a relação entre o peso absolutamente seco de madeira e o seu volume saturado, sendo a mesma de fundamental importância para o processo de polpação, tendo em vista os aspectos econômicos relacionados a consumo específico de madeira, influencia nas variáveis do processo de polpação e nas características da polpa celulósica (SILVA JÚNIOR, 2005).

Foelkel (1992) salienta que a densidade básica é um parâmetro de aferição da qualidade, e possui ampla aceitação pelo fato de ser correlacionada com diversas características e propriedades de uso do produto final e pela simplicidade de sua determinação.

Teixeira (1995) descreve que a densidade básica é aceita como um dos principais parâmetros utilizados na avaliação da qualidade da madeira para os diversos usos, além de apresentar alta herdabilidade genética e apresentar correlação com outras características de qualidade da madeira.

Foelkel (1992) e Santos (2005) relatam que a densidade básica apresenta correlação com as propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira; sua variação esta associada ao teor de holocelulose, lignina e extrativos, com a frequência de vasos e parênquimas, a espessura da parede celular, a proporção do lenho tardio entre outros.

Foelkel et al. (1992) descreve que a densidade básica tem-se constituído como um índice universal para avaliar a qualidade da madeira, porém esta medida não deve ser considerada absoluta. Isso porque a densidade básica é um fator resultante, é a consequência, e não a causa da distribuição, tipos e composição dos elementos anatômicos que compõe a madeira.

Barrichelo (1979) e Brasil (1983) salientam que está ao relacionada com rendimento do processo, rendimento volumétrico no digestor, velocidade de impregnação da madeira, refinação da celulose e propriedade da celulose e do papel.

Segundo Foelkel (1992) a densidade básica para madeiras de *Eucalyptus*, pode variar de 0,300 a 0,800 g/cm³; entretanto para a produção de polpa celulósica é recomendado o uso de madeiras com densidade básica de 0,450 a 0,550 g/cm³. Tal fato se justifica devido às matérias-primas com densidade básica acima de 0,650 g/cm³ apresentarem dificuldades na picagem, aumento no consumo de reagentes químicos e aumento no teor de rejeitos embora, demonstrem vantagens quanto aos níveis de resistência.

Assis (1996) descreve que a polpa celulósica produzida com madeiras de menor densidade básica apresenta fibras com menor espessura de parede e baixo rendimento volumétrico; esse mesmo autor afirma que madeira com menor espessura de parede é mais adequada produção de papéis de escrita e impressão.

O aumento da densidade básica está correlacionado de forma positiva com o maior teor de lignina; devido a essa característica o consumo de reagentes químicos no processo de polpação é maior e proporciona a redução no rendimento depurado, bem como o aumento no teor de rejeitos; madeiras com essas características são consideradas adequadas para fabricação de papéis absorventes.

De acordo com Higgins¹ et al. (1979); Jankowsky (1979), uma das características da madeira que se acreditam exercer influências na densidade básica das folhosas são os diâmetros da fibra e a frequência dos elementos de vasos e a relação entre diâmetro da fibra e espessura da parede celular.

Diante disso, conforme mencionado, diferentes gêneros e espécies apresentam densidade básica diferenciadas. Mansilla et al. (1991), realizou estudos com a espécie de *E. globulus* e apresentou resultado de densidade básica de 0,710 g/cm³; entretanto Alencar (2002) realizou um estudo com *E. urophylla* x *grandis* e apresentou como resultado de densidade básica 0,503 g/cm³, já para a espécie *B. pendula*, Bhat (1981) relata densidade básica da madeira de 0,520 g/cm³.

2.1.3 Características anatômicas

Segundo Monteiro (1996), com a identificação e a caracterização dos elementos anatômicos, é possível conhecer melhor o universo da madeira e assim direcionar de forma adequada o seu uso.

Alencar (2002) salienta que as características anatômicas da madeira, tais como comprimento da fibra, espessura da parede, diâmetro do lume, proporção dos vários tipos de células e tecidos, como vasos e parênquimas, possuem relação com a densidade básica.

Brasil (1976) descreve que os anatomistas da madeira consideram a variação dos elementos estruturais de três formas distintas, as diferenças entre espécies, gêneros e famílias, bem como as variações observadas entre indivíduos da mesma espécie e as variações no sentido tangencial, radial e transversal da árvore. As dimensões, proporções e arranjo dos vários tipos de células formam um módulo estrutural característico para cada espécie.

¹ HIGGINS, H. G. et al. The density and structure of hardwoods in relation to paper surface characteristics and other properties. **TAPPI**, Atlanta, v. 56, p. 127 – 31, 1979.

As características básicas e dimensões das fibras são bastante variáveis na madeira; o comprimento, a largura, a espessura da parede e o diâmetro do lume das fibras representam diferentes estágios de desenvolvimento e são controlados por diferentes processos fisiológicos distintos. Tomazello (1985) confirma que as dimensões das fibras podem ser influenciadas também pela idade, pois com o aumento da idade as células cambiais passam a produzir elementos com maiores dimensões ao longo do raio até atingirem a estabilização em idades mais avançadas.

As características das fibras podem ser relacionadas com as propriedades físicas do papel. Foelkel e Barrichelo (1975) relataram que a resistência do papel à tração, arrebentamento e rasgo é altamente influenciada pelo comprimento da fibra.

Tomazello (1983) realizou um estudo com 8 espécies de eucaliptos e entre elas o resultado do comprimento da fibra para *E. globulus* foi de 0,81 mm e para *E. grandis* de 1,03 mm. Alencar (2002) salientou que para espécie de *E. grandis* x *E. urophylla* com idade de 7 anos o comprimento médio das fibras foi de 1,15 mm.

De acordo com Barrichelo e Brito (1976), a espessura da parede das fibras, apresentada pelas espécies de eucalipto, se encontra na faixa de 2,5 a 6,0 μm ; para largura geralmente observam-se valores entre 12 a 20 μm .

Wher (1991) salienta que fibras com paredes delgadas combinadas com maiores diâmetros de fibras são encontradas em madeiras de menor densidade básica. As fibras com essas características são mais suscetíveis ao colapso, favorecendo as ligações entre fibras e ainda apresentam uma maior facilidade no refino na fabricação do papel.

Os papéis fabricados com fibras de menor diâmetro e maior espessura de paredes, em geral levam à melhores resultados de resistência ao rasgo e uma maior opacidade.

2.1.4 Características químicas

Quimicamente, a madeira caracteriza-se por ser um material constituído por compostos de elevados graus de polimerização e pesos moleculares, tais como celulose, hemicelulose e lignina. Para determinação da qualidade da madeira, visando à produção de polpa celulósica e papel os parâmetros químicos como teores de celulose, lignina, pentosanas e extrativos tem sido considerado os mais relevantes e normalmente são relacionados com os aspectos

quantitativos de rendimento e consumo de produtos químicos durante o processo de deslignificação.

Barrichelo e Brito (1976), salientam que a madeira de eucalipto apresenta de 40 a 55% de celulose, e 20 a 40% de hemicelulose e o teor de lignina na faixa de 15 a 25%, do peso total da madeira. Entretanto, sabe-se que, quanto menor o teor de lignina melhor a deslignificação e menor o consumo de produtos químicos durante o processo de polpação e o branqueamento.

Foelkel (1977) afirma que o conhecimento da natureza química da madeira é de grande importância, pois está relacionado com as exigências da mesma nos processos de polpação e branqueamento da polpa celulósica.

Almeida e.t al. (2001), destaca que o teor de holocelulose está relacionado com o rendimento do processo de polpação, e as hemiceluloses facilitam no refino da polpa celulósica, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento das propriedades de resistência físico-mecânica da polpa.

Santos (2000) e Alencar (2002) descrevem que madeiras com maior teor de lignina podem exigir maior quantidade de álcali para atingir níveis desejáveis de deslignificação no processo de polpação kraft. Tal fato implica em uma maior degradação dos carboidratos e dissolução dos polissacarídeos de baixo peso molecular, causando redução no rendimento, queda de viscosidade e resistência física da polpa celulósica; além de gerar também, maior quantidade de sólidos para queima em caldeira de recuperação.

Smook (1997) salienta que os extrativos na madeira também variam dentro da árvore, podendo ser encontrados principalmente em regiões como a casca, folhas, frutos, sementes, acículas. Segundo o autor os extrativos são representados, principalmente, por ácidos graxos e ácidos resinosos, sendo que diferentes solventes podem ser utilizados na quantificação dos mesmos, porém os mais comuns são o tolueno e o diclorometano. O autor menciona que os extrativos são compostos indesejáveis no processo de polpação, uma vez que os mesmos podem consumir reagentes químicos e provocar incrustações, “pitch”, em tubulações e causar problemas de adsorção de lignina e de cargas durante o processo de fabricação do papel.

Almeida (2001) destaca que os teores de extrativos e de lignina presentes na madeira influenciam diretamente no consumo de álcali, no rendimento e na taxa de deslignificação, podendo os mesmos definir o potencial de uma matéria-prima para produção de polpa celulósica.

As polpas celulósicas de diferentes espécies de folhosas apresentam elevada variabilidade de composição e estrutura conforme salientado, afetando significativamente o seu comportamento durante o processo de polpação. Espécies de folhosas distintas requerem diferentes condições de operação no processo de polpação e branqueamento, para atingirem o mesmo grau de deslignificação (expresso na forma de número kappa e alvura respectivamente). Adicionalmente, a compreensão das características química das madeiras, torna-se crucial para possíveis otimizações nos processos de polpação e branqueamento, melhoria na qualidade do produto final e redução do impacto ambiental causado pelas indústrias de polpa celulósica e papel.

2.1.5 Compostos inorgânicos na madeira

A nutrição mineral representa um fator importante na fisiologia da árvore, uma vez que o suprimento adequado dos elementos minerais é essencial para o sucesso do crescimento. Na grande maioria dos plantios de eucalipto no Brasil, a fertilização mineral é uma prática necessária para aumentar ou manter os índices de produtividade.

Segundo Freddo, et al. (1999) e Resende et al. (1999), os elementos minerais variam com as espécies, disponibilidade dos elementos no solo, região geográfica, idade da planta e o próprio beneficiamento desde o corte até a produção de cavacos.

Kimo (1986) destaca que a determinação quantitativa e qualitativa dos elementos minerais na madeira pode ser de grande importância tecnológica, podendo prevenir e até mesmo evitar uma série de problemas, dentre os quais incrustação nas superfícies de equipamentos e tubulações da seção de recuperação do licor, entupimentos e corrosões, causando uma redução na vida útil dos equipamentos e reduzindo a capacidade de produção de unidades fabris de polpa celulósica e papel.

Devido aos problemas que os elementos minerais podem causar, sua quantificação tornou-se bastante freqüente nas indústrias de polpa celulósica para fornecer subsídios às medidas preventivas, uma vez que grandes quantidades destes compostos inorgânicos adentram nas fábricas através da madeira.

Resende et al. (1999) salientam que a principal fonte de metais na polpa celulósica é a madeira e estima-se que esta matéria-prima contribui com aproximadamente 95% do total de

íons metálicos presentes na polpa celulósica, quer pelos aspectos do incremento inerente ao crescimento das árvores (fisiologia), quer pela contaminação durante a operação florestal.

Albert (1996)² descreve que os elementos que entram no sistema de produção de polpa celulósica podem ser classificados em processuais e não processuais. Entre os processuais estão sódio e sulfeto, que derivam do próprio processo de polpação, e os não-processuais, são os elementos que entram na fábrica através da madeira, de reagentes químicos e da água, sendo eles cálcio, magnésio, potássio, cloro, carbono, fósforo, manganês, alumínio, silício, ferro em menores quantidades zinco, cobre, chumbo, prata, níquel e cadmo, podendo ainda ocorrer outros elementos.

Entre os elementos não processuais, aproximadamente 60% entram via madeira, 35% como forma de produtos químicos processuais ou suas impurezas e 5% entram através da água utilizada no processo Freddo (1999).

Entre os compostos inorgânicos o cálcio tem grande facilidade em formar carbonato de cálcio, durante o processo de polpação, e posteriormente chegar a causar incrustações nos equipamentos.

Brasileiro et al. (2001) e Kramarski (2004) descrevem que alguns íons metálicos de transição, principalmente ferro, cobre e manganês decompõe o peróxido de hidrogênio durante o branqueamento de polpa celulósica e os mesmos podem estar presentes na polpa associados aos ácidos hexenurônicos, fazendo com que haja um maior consumo de reagentes químicos, bem como uma redução de alvura da polpa branqueada.

2.1.6 Polpação Kraft

O processo kraft de polpação é o mais utilizado para produção de polpa celulósica a partir da madeira e tal fato se justifica, entre outros, devido à alta qualidade da polpa celulósica obtida.

O processo kraft de polpação tem por objetivo a individualização das fibras pela dissolução da lignina presente na madeira principalmente na lamela média. O processo kraft envolve o tratamento de cavacos de madeira com solução aquosa de hidróxido de sódio e

² Albert, R. J. Technical and economic feasibility of the effluent-free bleached Kraft pulp Mill. In: INTERNATIONAL NON-CHLORINE BLEACHING CONFERENCE, 1993. 23 p.

sulfeto de sódio a elevadas temperaturas (de 145°C a 175°C) por períodos de tempo que variam de 1 hora a 6 horas.

Fantuzzi Neto (1997) e Silva Júnior (2005) destacam as vantagens do processo de polpação kraft, sendo elas:

- qualidade da polpa celulósica;
- eficiência na recuperação dos reagentes químicos;
- grande flexibilidade com relação às espécies da madeira;
- auto-suficiência na produção de energia.

Entretanto, o processo kraft, apresenta algumas desvantagens, sendo as principais:

- alto custo de investimento na construção da fábrica;
- problema de odor devido aos gases produzidos;
- baixo rendimento de polpação;
- alto custo de branqueamento.

Segundo Silva Júnior (2005), a duração do cozimento depende do grau de deslignificação que se pretende atingir, sendo este usualmente traduzido pelo número kappa da polpa celulósica. No processo de cozimento, remove-se cerca de 90% da lignina original o que corresponde a um número kappa da polpa celulósica entre 14 a 20 para as folhosas.

Bassa (2002) cita que durante a polpação kraft a remoção de hemicelulose e de lignina favorece a difusão de reagentes para o interior da parede das fibras e conseqüentemente o acesso destes a lamela média, provocando alterações estruturais que afetarão a resistência intrínseca e a conformabilidade das fibras. Além disso, as reações dos polissacarídeos (celulose e hemicelulose) localizados principalmente na parede secundária das células têm um efeito acentuado no rendimento e nas características da polpa (como na viscosidade e nas propriedades físico-mecânicas), bem como no consumo de reagentes químicos.

A remoção de lignina no processo de polpação kraft pode ser dividida em três etapas distintas, sendo elas, fase inicial, fase principal e fase final.

O início do ciclo de polpação que envolve parte do período de elevação de temperatura é caracterizado como fase inicial de deslignificação; nesta fase ocorre cerca de 20 a 25% da dissolução da lignina.

Na etapa principal do processo de polpação, ocorre a maior intensidade deslignificação da madeira, ou seja, solubilização de aproximadamente 60 % da lignina original; esta etapa corresponde ao final da fase de aquecimento e ao início do período à temperatura máxima.

Na fase final do processo de polpação a dissolução de aproximadamente 10 a 13% da lignina original (ALMEIDA, 2006).

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Material

Na realização deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

1- Híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*, com idade de 6 anos plantados em Itatinga/SP/Brasil (1);

2- Híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com idade de 5 anos plantados em São Miguel/SP/Brasil (2);

3- Híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* com idade de 5 anos plantados em Mucuri/BA/Brasil (3);

4- *Eucalyptus globulus* com idade de 12 anos plantados em Foradouro/Portugal;

5- *Betula pendula* com idade de 67 anos originária de floresta natural da Finlândia.

Nas figuras 1, 2, 3 e 4 estão representados os locais de coleta das amostras utilizadas na realização deste trabalho.

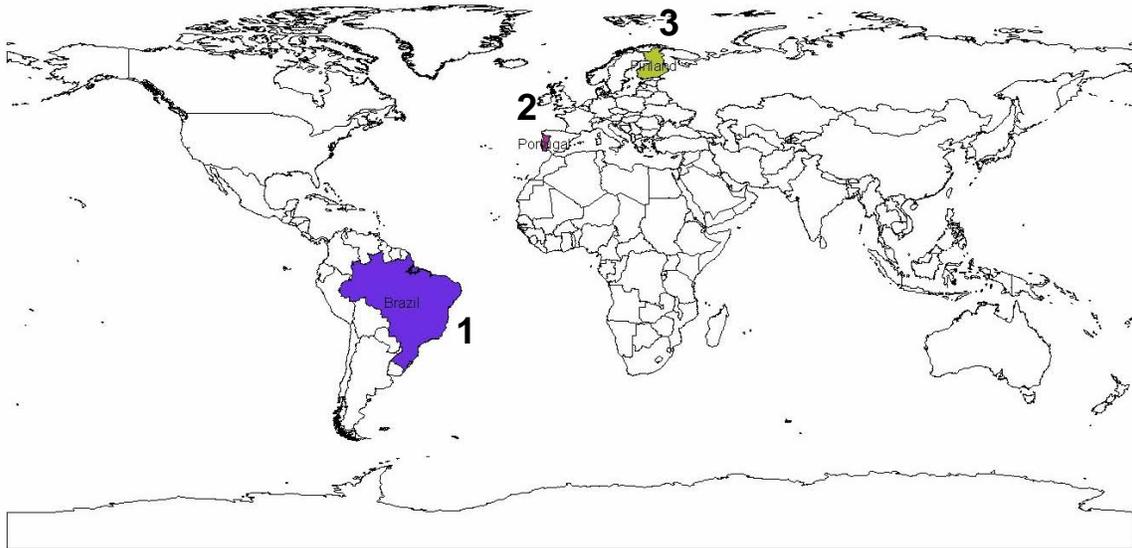


Figura 1 - Representação dos países em que foram coletadas as amostras de madeira utilizadas na realização deste trabalho; (1) Brasil, (2) Portugal e (3) Finlândia

2.2.1.2 *Eucalyptus grandis* x *urophylla*



Figura 2 - Local de coleta das espécies de *E. grandis* x *E. urophylla* no Brasil: (1) São Miguel - SP, (2) Itatinga - SP e (3) Mucuri - BA

2.2.1.3 *Eucalyptus globulus*



Figura 3 - Local de coleta em Portugal da espécie de *Eucalyptus globulus*

2.2.1.4 *Betula pendula*

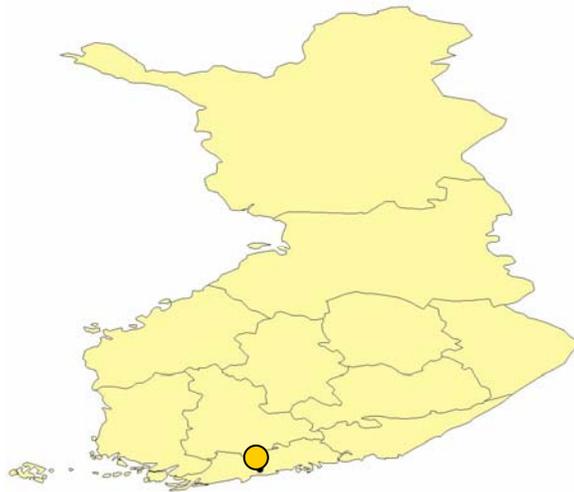


Figura 4 - Local de coleta na Finlândia da espécie de *Betula pendula*

2.2.1.5 Amostragem

Para realização deste trabalho foram abatidas 5 árvores de cada espécie considerada; selecionaram-se árvores com o diâmetro médio do povoamento com base nos dados de

inventário florestal. Em termos de delineamento experimental, deve-se destacar que neste trabalho, para cada espécie, a árvore é considerada como o elemento de repetição.

Para cada árvores foram retirados 6 discos com aproximadamente 2,5 cm de espessura de cada altura (base, 25%, 50%, 75% e 100%), considerando a altura comercial de 6 cm (Figura 5). Foram retirados também 2 discos com aproximadamente 2,5 cm de espessura à altura do peito (1,3m). Os discos foram devidamente identificados por espécie, árvore e altura, secos ao ar e encaminhados ao Laboratório de Química, Celulose e Energia da Universidade de São Paulo – USP/ESALQ em Piracicaba – SP.

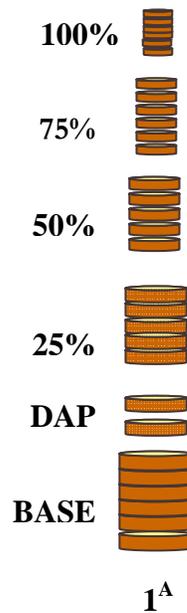


Figura 5 - Amostragem de discos por árvore

Para cada árvore e cada altura utilizou-se 1 disco para determinação da densidade básica e 4 discos (total de 20 discos/árvore) para produção de cavacos manualmente, os quais, após picados, foram selecionados visualmente para retirada de nós ou qualquer outra anormalidade, homogeneizados (1 amostra composta por árvore) sendo então acondicionados em sacos de polietileno.

2.2.2 Métodos

2.2.2.1 Caracterização da madeira

2.2.2.1.1 Densidade básica total (madeira+casca), densidade básica da madeira, da casca e porcentagem de casca em peso e volume.

Conforme mencionado no (apêndice B), cada disco destinado à determinação de densidade teve, inicialmente, o seu diâmetro com e sem casca medida (duas medições ortogonais, sendo o diâmetro reportado como as médias destas determinações); após esta etapa os discos foram subdivididos em 4 cunhas, sendo utilizadas 2 partes opostas, para a determinação de densidade básica, conforme representado na figura 6.

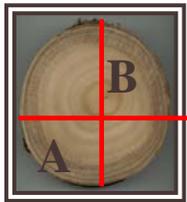


Figura 6 - Amostragem de discos para densidade básica

A densidade da madeira foi determinada pelas expressões:

$$\text{Densidade Básica Total (Dbt) - g/cm}^3 = \left[\frac{PSM}{PUT - PIT} \right]$$

$$\text{Densidade Básica da Madeira (Dbm) - g/cm}^3 = \left[\frac{PSM}{PUM - PIM} \right]$$

$$\text{Densidade Básica da Casca (Dbc) - g/cm}^3 = \left[\frac{1}{PUC / PSC} \right] - 0,346$$

$$\text{Porcentagem da Casca em Peso (Pcp)} - \% = \left[\frac{PSC}{PSM + PSC} \right] \times 100$$

$$\text{Porcentagem de Casca em Volume (Pcv)} - \% = \left[\frac{PUM - PIM}{PUT - PIT} \right] \times 100$$

As médias ponderadas da densidade básica da madeira das árvores foram determinadas pela expressão:

$$Dbp = \frac{1}{2} \frac{(D^2_{B} + D^2_{25\%})(d_B + d_{25\%}) + (D_{25\%} + D_{50\%})(d_{25\%} + d_{50\%}) + (D_{50\%} + D_{75\%})(d_{50\%} + d_{75\%}) + (D^2_{75\%} + D^2_{100\%})(d_{75\%} + d_{100\%})}{D^2_B + D^2_{100\%} + 2(D^2_{25\%} + D^2_{50\%} + D^2_{75\%})}$$

Onde:

- $D_{(base)}$, $D_{(25\%)}$, $D_{(50\%)}$, $D_{(75\%)}$ e $D_{(100\%)}$ - diâmetro dos discos em diferentes alturas com casca e sem casca;
- $d_{(base)}$, $d_{(25\%)}$, $d_{(50\%)}$, $d_{(75\%)}$ e $d_{(100\%)}$, densidade básica a diferentes alturas.

Para cada árvore foi calculado o Índice de Heterogeneidade para densidade básica da madeira que procura expressar a maior ou menor variabilidade da densidade no sentido longitudinal, a partir das densidades obtidas dos discos (Barrichelo & Brito, 1984). Segundo os autores, a variação é tanto mais significativa quanto mais próxima estiverem os pontos de amostragem e quanto mais na parte inferior da árvore, considerando-se o fator de forma típico de árvores – tronco de cone. Assim estipula-se, arbitrariamente, peso 4 para a diferença de densidade entre a base e 25% da altura, peso 3 para a diferença entre valor da base e 50% da altura, peso 2 para a diferença entre valor da base e 75% da altura, peso 1 para a diferença entre valor da base e 100% da altura comercial.

O Índice de heterogeneidade (IH) é expresso pela equação:

$$IH = (|A - B| \times 4) + (|A - C| \times 3) + (|A - D| \times 2) + (|A - E|) + (|B - C| \times 3) + (|B - D| \times 2) + (|B - E|) + (|C - D| \times 2) + (|C - E|) + (|D - E|)$$

Onde:

- A= base;
- B=25%;
- C=50%;
- D=75%;
- E=100%

2.2.2.1.2 Variação radial da densidade do lenho por densitometria de raios X

Para cada árvore utilizou-se 1 disco do DAP para determinação da densidade da madeira através da técnica de densitometria de raios X, que consiste na obtenção de radiografias de uma fina secção transversal de madeira sobre um filme radiográfico. No filme exposto a fonte de raios X e pela passagem da radiação através da amostra de madeira forma-se uma imagem de sua estrutura transversal (AMARAL, 1994).

Preparo das amostras do lenho: na seção transversal do lenho das árvores foram demarcadas e cortadas amostras diametrais (20x10 mm, largura x altura), coladas em suporte de madeira e seccionadas no sentido transversal (2,0 mm de espessura), em aparelho de dupla serra circular paralela. As seções transversais do lenho foram acondicionadas em câmara de climatização (12 h, 20°C, 50% UR) até atingir 12% de umidade.

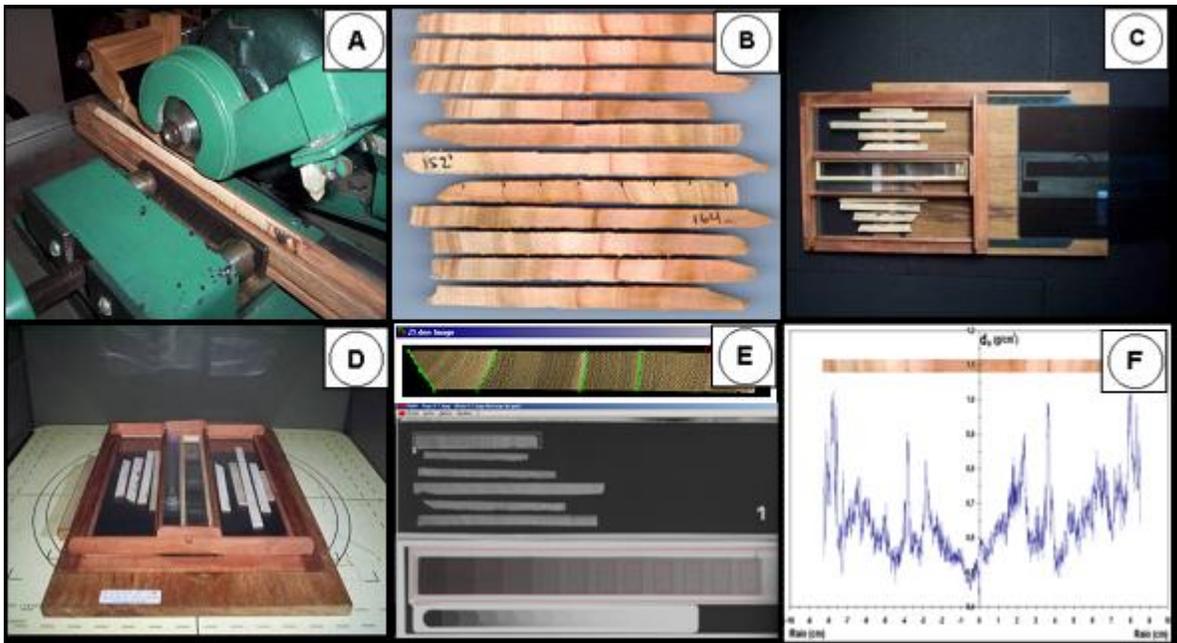


Figura 7 - Descrição da metodologia de raios X e a obtenção das imagens radiográficas do lenho das árvores: (a) corte das amostras em equipamento de dupla serra; (b) seções transversais das amostras; (c) suporte com as amostras sobre o filme radiográfico; (d) irradiação das amostras em equipamento de raios X; (e) imagem radiográfica e sua análise nos programas CRAD e CERD e (f) perfil da densidade e respectiva amostra do lenho

Análise dos filmes radiográficos: os filmes radiográficos das amostras do lenho foram digitalizados em scanner Hewlett Packard ScanJet 6100C/T a uma resolução de 1000 dpi (pixel por polegada) em escala de cinza de 256 graus. Na imagem digitalizada foram feitas comparações entre a escala de cinza das amostras de madeira com a da curva padrão (com valores conhecidos de densidade: $1,48 \text{ g/cm}^3$), sendo determinados os valores de densidade através da utilização de programas de computador específicos para análise de imagens conforme descrito por Arango (2004).

2.2.2.1.3 Caracterização morfológica das fibras

Para determinação das dimensões de fibras, dos cavacos de cada árvore, foram retirados, com o auxílio de um estilete, cerca de 50 fragmentos para maceração pelo processo nítrico-acético, o qual se constitui em submeter o material a ser dissociado a um tratamento com solução de ácido acético, ácido nítrico e água na proporção (5:2:1) aquecida em banho-

maria a 100°C por um período de tempo suficiente para que as fibras se individualizem. Após o término do tratamento, o material foi lavado com excesso de água destilada.

Após a maceração foram montadas 10 lâminas por material, sendo que em cada lâmina foram medidas as dimensões de 10 fibras, totalizando 100 fibras por amostras; o número de fibras a ser medido foi definido com base na estabilização do desvio-padrão em função do número de fibras medido. Para cada fibra foram medidas as seguintes dimensões: comprimento (C), largura (L), espessura de parede (E) e diâmetro do lume (DL) sendo os resultados expressos como a média aritmética das 100 determinações.

A partir das médias das dimensões de fibra foram calculadas as seguintes relações:

Fração parede (FP): relação percentual entre duas vezes a espessura da parede celular e a largura da fibra.

$$FP = \left(\frac{2 \times E}{L} \right) \times 100$$

Coefficiente de flexibilidade (CF): relação percentual entre o diâmetro do lume e a largura da fibra.

$$CF = \left(\frac{DL}{L} \right) \times 100$$

Índice de Runkel (IR): relação entre duas vezes a espessura da parede celular e o diâmetro do lume.

$$IR = \left(\frac{2 \times E}{DL} \right)$$

onde:

- C = comprimento da fibra;
- E = espessura da parede;
- L = largura da fibra;
- DL = diâmetro do lume.

2.2.2.1.4 Caracterização anatômica da madeira

Com o objetivo de caracterizar anatomicamente as diferentes espécies realizou-se a análise anatômica das madeiras. Para este objetivo selecionaram-se as amostras do lenho do DAP com aproximadamente 2,5 cm de espessura.

Os discos foram lixados para melhor visualização e posteriormente foi demarcada a área do cerne e alborno onde foram retirados corpos de prova orientados para obtenção de amostras para análise sob microscopia eletrônica de varredura.

2.2.2.1.5 Caracterização química

Amostras de cavacos foram reduzidas à serragem em moinho e devidamente acondicionadas para realização das seguintes análises de acordo com a metodologia descrita pela Technical Association of Pulp and Paper Industry – TAPPI.

O material foi analisado quimicamente com relação aos seguintes parâmetros: teor de extrativos, teor de lignina e teor de Holocelulose (H). O método encontra-se descrito no apêndice.

2.2.2.1.6 Caracterização dos elementos inorgânicos

Para a caracterização dos compostos inorgânicos utilizou-se do processo de digestão nítrico-perclórica segundo a metodologia proposta por Malavolta et al. (1989) e Ferreira, (2001), as leituras foram realizadas em espectrofotômetro de absorção atômica. As determinações dos metais foram realizadas no Laboratório de Ecologia Aplicada-LEA (ESALQ – USP).

2.2.2.2 Polpação

Para obtenção de polpa celulósica kraft utilizou-se autoclave rotativa com capacidade para 20 litros contendo 8 cápsulas de aço inoxidável individualizadas com capacidade para 70g de cavacos absolutamente seco cada. As condições de cozimento utilizadas encontram-se apresentadas na tabela 1. Destaca-se que a carga alcalina foi ajustada visando à obtenção de polpa com número kappa de $17,0 \pm 0,5$.

Considerou-se como repetição cada árvore amostrada, ou seja, para cada espécie estudada realizou-se um total de 5 repetições, sendo 1 repetição de cada árvore amostrada.

Tabela 1 - Condições de cozimento

Parâmetros	Condições
Álcali ativo, (% como NaOH)	Variável
Sulfidez, %	25
Relação licor/madeira	4/1
Temperatura máxima, °C	166
Tempo de aquecimento, min.	90
Tempo de cozimento, min.	60

Após cada cozimento, os cavacos cozidos foram lavados com água em abundância, e desagregados em hidrapulper laboratorial; em seguida procedeu-se a depuração em depurador laboratorial com fenda de 0,2 mm. Após a depuração, os rejeitos foram coletados na superfície da tela e secos em estufas a 105 °C; com os valores do teor de rejeito seco calcularam-se rendimento bruto e rendimento depurado (vide descrição tabela 2); após a depuração a polpa celulósica foi centrifugada e armazenada sob refrigeração em sacos de polietileno para análises posteriores.

2.2.2.3 Parâmetros determinados no processo de polpação

Para avaliação do desempenho dos diferentes materiais considerados neste trabalho frente ao processo de polpação foram considerados os parâmetros apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros determinados no processo de polpação

Parâmetro	Norma / Cálculos
Rendimento bruto, %	Relação entre peso seco de polpa e peso seco de madeira
Rendimento depurado, %	Relação entre peso seco de polpa depurada e peso seco de madeira
Teor de rejeitos, %	Relação entre peso seco de rejeitos (material retido em peneira com fenda de 0,2mm de depurador laboratorial) e peso seco de madeira
Número kappa	Tappi Methods – T236cm-85
Viscosidade, cP	Tappi Methods – T230 om-94
Seletividade	Relação entre viscosidade e número kappa
Teor de sólidos, %	Tappi Methods – T625 cm-85
Teor de sólidos secos gerados por tonelada de celulose (tss/odt)	$tss / odt = \frac{(100 - RB) + AA}{RD}$
Álcali ativo residual no licor negro, g/L como NaOH	Tappi Methods – T625 cm-85
Teor de ácidos hexenurônicos, µmol/g	CHAI et al., 2001

Observações:

- 1 - Teor de sólidos gerados por tonelada de celulose (Tss/odt):** cabe salientar que para essa equação não foi considerada a perda alcalina.

2.2.2.4 Delineamento experimental e análise estatística

Neste trabalho adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, aplicando-se a análise da variância para os principais parâmetros considerados neste trabalho considerando-se as 5 diferentes árvores de cada matéria-prima como repetição. Quando a análise de variância foi significativa, utilizou-se o teste de Tukey.

As análises estatísticas foram realizadas com o Programa SAS (Statistical Analysis System).

Para melhor facilitar a leitura, visualização dos resultados e discussão, as tabelas com as análises da variância foram colocadas em apêndices.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.2 Densidade básica da madeira

Quando se visa à industrialização da madeira, é de grande importância o conhecimento de suas características e propriedades, uma vez que estas contribuem para determinar a eficiência dos processos de transformação bem como as características dos produtos finais obtidos.

A densidade básica da madeira é uma característica complexa, resultante da combinação de diversos fatores; a mesma apresenta relação com a composição química e as dimensões das fibras (particularmente a espessura da parede), o diâmetro / frequência de vasos e parênquimas.

Na tabela 3 são apresentados os resultados médios (5 repetições) da densidade básica total, densidade básica da madeira, densidade básica da casca, porcentagem de casca em peso e em volume das espécies consideradas neste trabalho. Deve-se destacar que cada árvore de cada material foi considerada uma repetição; efetivamente, os dados de cada árvore representam à média ponderada para cada parâmetro, conforme descrito na metodologia.

Tabela 3 - Densidade básica ponderada - Dbt (madeira+casca), Db madeira, Db casca e porcentagem de casca em peso e volume.

Espécies	Dbt (g/cm ³)	Db_{madeira} (g/cm ³)	Db casca (g/cm ³)	Casca/peso (%)	Casca/volume (%)
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 1	0,454 c	0,478 b c	0,290 d	11,35 b c	7,175 c
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 2	0,441 c	0,460 c	0,349 c	15,01 a	11,937 a
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 3	0,442 c	0,458 c	0,341 c	12,91 b	9,791 b
<i>Betula pendula</i>	0,502 b	0,505 b	0,515 a	10,81 c	10,272 b
<i>E. globulus</i>	0,590 a	0,630 a	0,383 b	16,10 a	10,476 b

*Os valores apresentados com a mesma letra não se difere significativamente ao nível de 5% de probabilidade

Os resultados apresentados na tabela 3 mostram que os híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* não apresentam diferença significativa com relação à densidade básica da madeira,

sendo que os valores variaram de 0,458 a 0,478. Este fato está relacionado com a intensidade das atividades de melhoramento genético que estes materiais vêm sofrendo visando o aumento de produtividade florestal bem como a uniformização dos principais parâmetros qualitativos da madeira, como por exemplo, a densidade básica. O trabalho de melhoramento genético considera não apenas os aspectos puramente genéticos, mas as interações destes materiais com os ambientes onde serão implantados; desta forma, em regiões edafoclimaticamente diferentes como Bahia e São Paulo, obtém-se materiais com características bastante semelhantes conforme observado nos resultados obtidos para densidade básica neste trabalho.

Os valores de densidade básica obtidos para os híbridos *E. urophylla* x *E. grandis* estão consoante com os valores apresentados por Almeida (2003) e Queiroz (2003), cujos valores de densidade básica foram 0,499 g/cm³ e 0,447g/cm³, respectivamente com as idades de 7 e 6 anos.

Cabe salientar que Alencar 2002, realizou um estudo de densidade básica com madeiras de eucalipto com idades de 1 a 7 anos, a autora destacou que a densidade básica da madeira de eucalipto se estabiliza com 5 anos. Tal informação justifica o estudo das espécies de eucalipto do Brasil ter sido realizado com madeiras de 5 e 6 anos de idade. Associado a este fato, os avanços silviculturais dos plantios florestais de eucalipto no Brasil indicam a possibilidade de redução da idade de corte, sendo que algumas empresas brasileiras já estão cortando madeiras de eucalyptus com idade de 5 anos para produção de polpa celulósica.

Os resultados obtidos para densidade básica dos materiais genéticos de híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* podem ser considerados representativos dos materiais comercialmente utilizados no Brasil para produção de polpa celulósica.

O *Eucalyptus globulus* com 12 anos de idade, apresentou resultados de densidade básica mais elevada quando comparado às outras espécies, conforme representado na tabela 4. O valor da densidade básica total para o *E. globulus* foi de 0,590 g/cm³ e densidade básica da madeira de 0,630 g/cm³. Hernán (1983) encontrou resultados de densidade básica de 0,570 g/cm³ com idade de 9 anos para o *Eucalyptus globulus*. Contudo o resultado de densidade básica da espécie que está sendo avaliada é superior aos valores descritos pelo autor citado. Entretanto Resquin (2002) salienta que a espécie de *E. globulus* pode apresentar densidade básica na faixa de 0,430 a 0,710 g/cm³.

Os resultados de densidade básica para *E. globulus* quando comparados aos de eucalipto normalmente utilizados no Brasil para produção de polpa celulósica podem ser considerados elevados; no entanto os dados de literatura disponíveis para *E. globulus* mostram que a densidade básica obtida para este material neste trabalho é coerente; deve-se ainda considerar que a idade do material de *E. globulus* utilizado neste trabalho, 12 anos, pode ter um efeito nos valores de densidade obtidos.

Considerando-se que o *E. globulus* é a principal matéria-prima de folhosas utilizada para produção de polpa celulósica nos países ibéricos e que o material considerado neste trabalho representa o material comercialmente utilizado nestes países, depreende-se que a silvicultura de *E. globulus* nos países ibéricos, especialmente no que diz respeito aos ciclos de produção, é significativamente distinta das técnicas utilizadas no Brasil para produção de madeira de eucalipto destinadas a indústria de celulose e papel. Cabe salientar que neste ponto em particular, fica nítida a vantagem do Brasil em relação aos países ibéricos, pois no Brasil tem-se um ciclo médio de rotação do eucalipto de 7 anos enquanto que nos países ibéricos este período é de aproximadamente 12 anos.

Diferente das espécies de *Eucalyptus*, a matéria-prima de *Betula pendula* correspondente à idade de 67 anos, apresentou uma densidade básica total de $0,502 \text{ g/cm}^3$ e densidade da madeira de $0,505 \text{ g/cm}^3$. Bhat et al. (1981) realizou um estudo da anatomia e propriedades físicas da madeira de várias espécies de *Betula spp* dentre elas a espécie de *B. pendula*, sendo que a mesma apresentou densidade básica da madeira de $0,520 \text{ g/cm}^3$ onde as idades das árvores variavam entre 24 a 53 anos. Diante disso é possível observar que a espécie *B. pendula* estudada neste trabalho, apresentou resultados consoantes aos dados apresentados por este autor.

A análise dos resultados de densidade básica obtidos para *B. pendula* mostram um valor intermediário entre os resultados de densidade básica dos híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* e *E. globulus*. No entanto esta comparação deve-se deter ao campo da tecnologia de madeiras, uma vez que os materiais em questão são oriundos de gêneros distintos e uma comparação com base em fundamentos silviculturais e fisiológicos não faz muito sentido.

Os resultados das densidades básicas encontradas nas diferentes matérias-primas comercialmente utilizadas para produção de polpa celulósica mostram que a amplitude deste

parâmetro é grande e que conseqüentemente, um conceito de densidade básica ideal para matérias-primas destinadas a produção de polpa celulósica não deve ser estabelecido.

A densidade básica não deve ser considerada como parâmetro único de avaliação da qualidade de madeiras destinadas à produção de polpa celulósica, uma vez que outros parâmetros também apresentam influência sobre a eficiência do processo de polpação tais como teor de lignina, carboidratos e extrativos.

A diferença na densidade básica observada entre os materiais estudados neste trabalho, pode ter impacto frente ao desempenho do processo de polpação tanto em termos de produção como de qualidade da polpa obtida.

Na tabela 4 também foi apresentado os resultados de casca na madeira, onde a mesma é caracterizada como um material poroso, cuja estrutura celular contém extrativos, especialmente carboidratos solúveis. No caso das folhosas a casca pode apresentar-se com aspecto e espessura variáveis. Como é conhecido que a densidade da madeira varia dentro de uma mesma árvore, entre árvores de uma mesma espécie e entre espécies, a casca também mostra essa variação.

A casca presente na madeira normalmente é expressa como percentagem em volume ou em peso, a percentagem de casca da madeira é bastante variável com limites entre 10 a 35% em volume; tal fato depende da espécie, da idade, da posição nas árvores e até das dimensões das árvores (BARRICHELO et al., 1979, 1982).

Nunes (1981) realizou um estudo de análise do volume e da percentagem de casca em povoamentos de eucaliptos e salientou que existe uma tendência do aumento do volume de casca com o aumento da idade. O mesmo autor encontrou valores de porcentagem de casca em peso variando de 12 a 17% para plantios de 7 anos de *Eucalyptus grandis*; os valores determinados para o teor de casca dos materiais genéticos de *E. grandis* x *E. urophylla* utilizados neste trabalho estão coerentes aos citados pelo autor.

Miranda (2002) destaca que a casca da madeira pode ser considerada um problema para algumas empresas florestais, pois há poucas alternativas econômicas de aproveitamento da mesma, assim gerando custos adicionais, uma vez que as empresas são responsáveis pelo destino final desse material. O mesmo autor salienta que o volume da casca de eucalipto corresponde de 10 a 20% do volume comercial da árvore e em alguns casos, contribui com

uma parcela no custo final da madeira; ou seja, no custo do transporte, quando a casca é transportada juntamente com a madeira, aumentando o volume transportado.

Diante disso pode-se concluir que a espécie de *E. grandis* x *E. urophylla* – 2 , assim como a espécie de *E. globulus* acarretará em maior gasto no transporte, devido ao maior teor no volume de casca. Entretanto cabe salientar que a matéria-prima de *Betula* apresentou menor teor de casca, comparado às demais espécies, fator positivo quando relacionar esse dado com o transporte de madeira à fábrica.

Barrichelo (1979) destacou que na árvore, a densidade básica varia no sentido longitudinal (base-topo), e no sentido transversal (medula-casca). Na secção transversal, é comum a densidade básica da madeira aumentar no sentido medula-casca.

Neste trabalho foram consideradas as variações longitudinais. Na tabela 4 são apresentados os resultados de densidade básica total, densidade básica da madeira, densidade básica da casca, porcentagem de casca em peso e volume médio por altura das 5 árvores utilizadas para cada material neste trabalho.

Tabela 4 - Densidade básica - Dbt (madeira+casca), Db madeira, Db casca e percentagem de casca em peso e volume nas diferentes alturas

Espécies	Altura	Dbt (g/cm ³)	Db _{madeira} (g/cm ³)	Dbc (g/cm ³)	Casca peso (%)	Casca volume (%)
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 1	Base	0,441	0,474	0,244	14,52	8,05
	25%	0,449	0,468	0,279	10,64	6,08
	50%	0,439	0,485	0,302	10,77	6,37
	75%	0,425	0,487	0,338	11,20	8,29
	100%	0,456	0,500	0,349	14,80	10,44
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 2	Base	0,434	0,455	0,346	19,33	10,51
	25%	0,448	0,464	0,359	15,29	12,31
	50%	0,433	0,450	0,331	13,44	10,21
	75%	0,441	0,472	0,350	11,88	9,44
	100%	0,456	0,469	0,365	13,26	10,78
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 3	Base	0,436	0,457	0,322	14,85	10,79
	25%	0,438	0,451	0,338	11,19	8,56
	50%	0,450	0,467	0,336	12,38	9,17
	75%	0,445	0,461	0,361	13,94	10,44
	100%	0,437	0,450	0,386	15,97	13,56
<i>Betula pendula</i>	Base	0,510	0,517	0,515	14,98	13,81
	25%	0,495	0,497	0,518	8,62	8,24
	50%	0,484	0,485	0,517	8,89	8,82
	75%	0,504	0,504	0,549	10,67	10,70
	100%	0,494	0,490	0,558	13,80	13,48
<i>E. globulus</i>	Base	0,554	0,604	0,383	21,79	14,71
	25%	0,593	0,633	0,375	15,25	9,61
	50%	0,603	0,637	0,382	13,21	8,33
	75%	0,607	0,642	0,393	14,16	9,27
	100%	0,609	0,643	0,418	15,95	11,27

Com o objetivo de facilitar a avaliação da variação da densidade básica da madeira no sentido longitudinal para cada espécie bem como a comparação entre as espécies consideradas neste trabalho, os dados da tabela 4 como densidade básica total, densidade básica da madeira e casca em peso e volume foram plotados em gráficos e encontram-se apresentados nas figuras 8, 9, 10, 11.

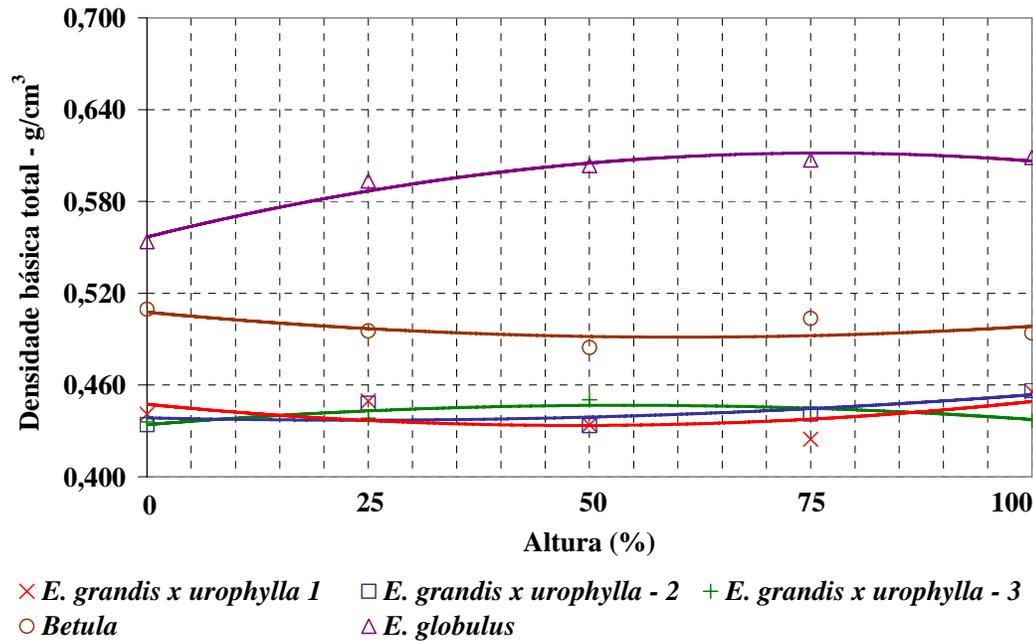


Figura 8 - Variação longitudinal - densidade básica total

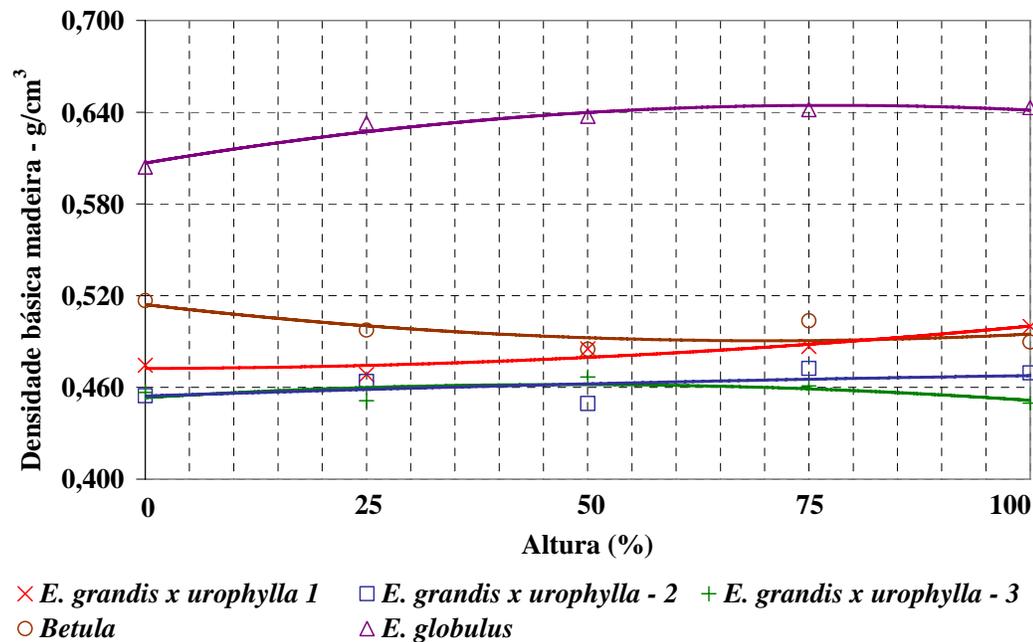


Figura 9 - Variação longitudinal - densidade básica da madeira

Barrichelo et al. (1982), descreve que na área de tecnologia de polpa celulósica, é importante o estudo da variabilidade da densidade básica dentro da árvore, uma vez que a madeira varia quer seja no sentido radial ou longitudinal, dentro da árvore, entre as espécies e entre os gêneros. Barrichelo et al. (1983), menciona que a variação da densidade básica no sentido longitudinal das árvores de eucalipto, tende a ser elevada na base; diminuindo a 25% da altura comercial e crescendo novamente a partir deste ponto. Entretanto Souza et al. (1985) e Shimoyama (1991), observaram que os modelos de variação da densidade básica dentro da árvore são bastante diversos entre as espécies.

Os resultados apresentados na figura 8 mostram que a diferença na densidade básica ao longo do fuste para os materiais de *E. grandis* x *E. urophylla* estudados neste trabalho pode ser considerada relativamente pequena, sendo um indicativo de homogeneidade do material e que pode ser fruto dos intensos trabalhos de melhoramento genético e manejo silvicultural que vem sendo dispensados ao eucalipto no Brasil. Para o *E. globulus* observa-se uma tendência de aumento da densidade básica da madeira com a altura até aproximadamente 50% da altura comercial, tendendo a uma estabilização a partir deste ponto. Para a *B. pendula*, observa-se pequena redução da densidade básica com a altura da árvore e que provavelmente está relacionada à elevada idade da madeira que é responsável não só pelo nivelamento dos valores de densidade, mas provavelmente de outras propriedades da madeira, uma vez que a proporção lenho juvenil e lenho adulto diminui significativamente em função da idade; adicionalmente também deve ser considerados os aspectos fisiológicos e silviculturais inerentes a este gênero/espécies que conforme já mencionados anteriormente são distintos dos do gênero/espécies de *Eucalyptus*.

Os trabalhos disponíveis na literatura técnica do setor florestal sobre variação longitudinal da densidade básica da madeira de eucalipto são oriundos do final dos anos 1980 e início dos anos 1990, e desta forma pode-se considerar que os materiais utilizados nestes trabalhos foram desenvolvidos pelo menos 7 anos antes; associando-se estes fatos aos resultados obtidos para os materiais utilizados neste trabalho para madeira de eucalipto, denota-se que há pelo menos 2 gerações de materiais genéticos; os ganhos genéticos incorporados neste período são bastante significativos especialmente quando se considera produtividade florestal e também se reveste nas características tecnológicas da madeira conforme já mencionado anteriormente.

Os baixos resultados de variação longitudinal da densidade básica obtidos para os materiais considerados neste trabalho são importantes para o processamento destes materiais na produção de polpa celulósica, pois levarão a menores variações no processo de polpação e conseqüentemente a uma maior possibilidade e facilidade de otimização do processo como um todo contribuindo para uma maior capacidade de produção de polpa celulósica, redução de custos operacionais e obtenção de produtos com qualidade uniforme.

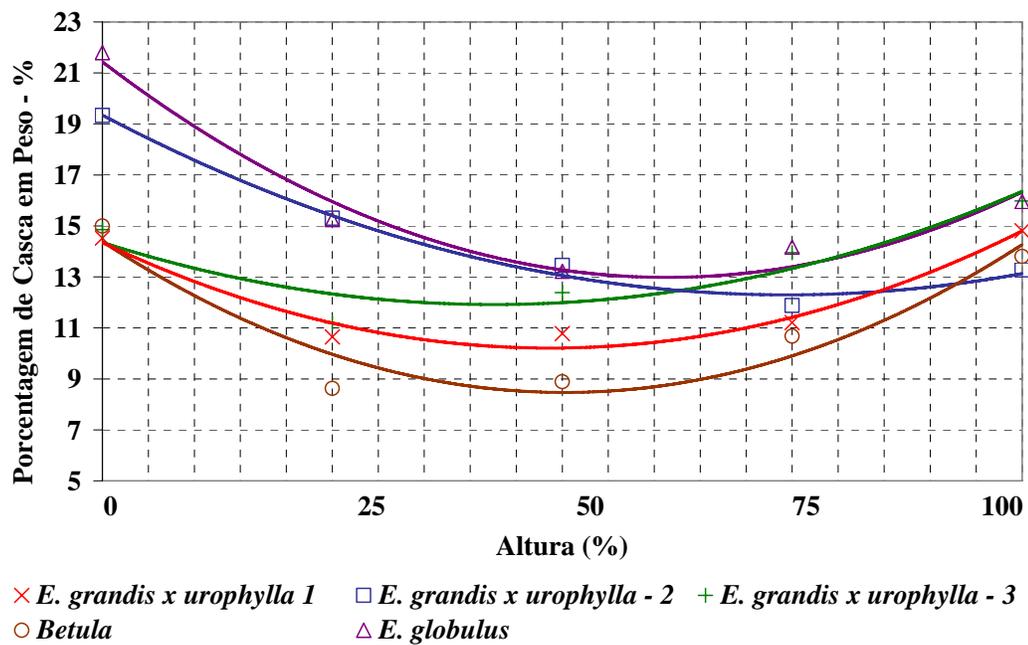


Figura 10 - Variação longitudinal – Porcentagem da casca em peso

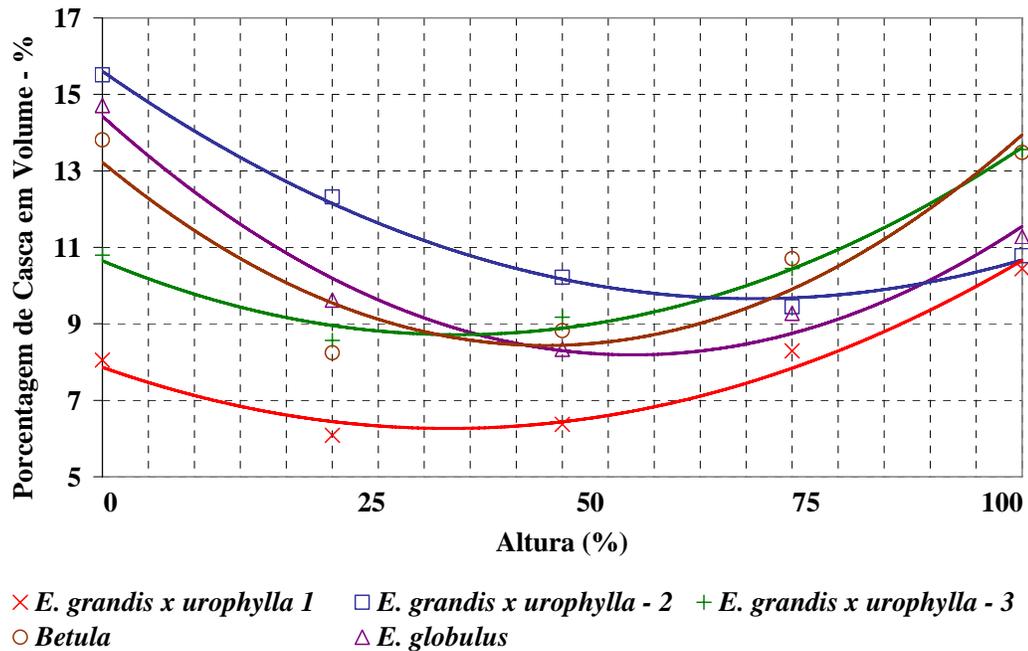


Figura 11 - Variação longitudinal – Porcentagem da casca em volume

Paulo Neto et al. (1992) e Lopes et al. (2000), destacam que a porcentagem de casca em volume ou peso varia com a espécie, entre as árvores de uma mesma espécie, ao longo do tronco da árvore, podendo também variar de acordo com as condições ambientais dos locais de plantio. O mesmo autor estudou a variação de porcentagem da casca ao longo do fuste e entre as árvores de eucalipto, destacando que a porcentagem de casca difere entre as árvores, sendo porcentagem maior nas menores alturas do tronco (próximo à base), e estabilizando-se nas maiores alturas.

Os resultados apresentados na figura 11 mostram que para as espécies consideradas neste trabalho o padrão de variação longitudinal foi bastante semelhante com valores elevados de porcentagem de casca em volume na base com redução entre 40 e 60% da altura comercial, observando-se para as demais alturas um aumento de porcentagem de casca em volume.

Segundo Miranda (2002) destaca que a casca da madeira pode ser considerada um problema para algumas empresas florestais, pois há poucas alternativas econômicas de aproveitamento da mesma, assim gerando custos adicionais, uma vez que as empresas são responsáveis pelo destino final desse material. O mesmo autor salienta que o volume da casca de eucalipto corresponde de 10 a 20% do volume comercial da árvore e em alguns casos,

contribui com uma parcela no custo final da madeira; ou seja, no custo do transporte, quando a casca é transportada juntamente com a madeira, aumentando o volume transportado; entretanto cabe salientar que atualmente as empresas estão preferindo descascar as árvores na própria floresta, utilizando a mesma como serrapilheira e matéria orgânica para o solo.

Os valores médios de porcentagem de casca em volume para os materiais considerados neste trabalho são bastante semelhantes e por este motivo não devem ser considerados como possível item de comparação de impacto na eficiência global de toda a cadeia de produção de polpa celulósica.

A comparação entre diferentes materiais destinados à produção de polpa celulósica no que diz respeito à variação longitudinal da densidade básica é complexa; na busca de simplificar esta comparação utiliza-se índices de heterogeneidade como os descrito no item 2.2.2.1.1 de materiais e métodos. Na figura 12 são apresentados os resultados do índice de heterogeneidade para densidade básica da madeira.

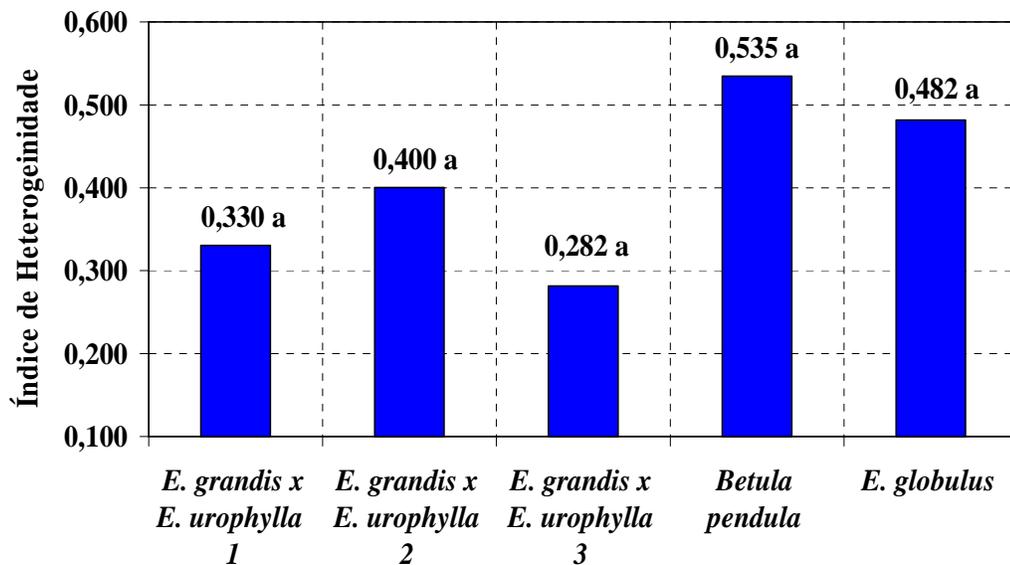


Figura 12 - Índice de heterogeneidade

Observa-se na figura 12 que os maiores níveis de heterogeneidade para densidade básica são relativos às das espécies *B. pendula*, *E. globulus* e *E. urophylla x E. grandis* (2). As análises estatísticas calculada para o índice de heterogeneidade não demonstraram diferenças significativas. Entretanto cabe salientar que apesar da análise estatística considerar que não

existe diferença estatística entre os valores obtidos para o índice de heterogeneidade, na prática tais diferenças se tornam significativas; uma vez que o mesmo representa o quanto heterogêneo é a madeira.

O índice de heterogeneidade pode ser considerado um reflexo da intensidade das atividades de melhoramento genético e manejo florestal que pode levar a redução do índice de heterogeneidade.

As espécies de *E. urophylla* x *E. grandis* (1) e *E. urophylla* x *E. grandis* (3), foram as quais apresentaram menor índice de heterogeneidade. Segundo Souza et al. (1986), é desejável que a madeira destinada ao processamento industrial seja menos heterogênea possível, para facilitar o controle de operação do digestor e proporcionar uma melhor qualidade ao produto final.

2.3.1.2 Densidade aparente da madeira por densitometria de raios X

A densitometria de raios X aplicada à tecnologia de madeira é uma técnica moderna e mais acurada que possibilita determinar a variação da densidade aparente da madeira ao longo das micro-variações da estrutura anatômica da madeira, ou determinar o seu perfil radial (ROQUE, 2005).

Deve-se destacar que a técnica de densitometria de raios-X preconiza a utilização da madeira com umidade equivalente à umidade de equilíbrio, ou seja, não se obtém resultados de densidade básica; no entanto, a densidade aparente guarda correlação com a densidade básica.

Observa-se na tabela 5 os valores de densidade aparente médios, máximos e mínimos obtidos da altura do DAP por densitometria de raios-X das diferentes matérias-primas, entretanto é possível verificar uma grande variação entre esses valores; deve se considerar que a técnica de densitometria de raios-X permite a obtenção de valores de densidade em intervalos lineares da amostras em mm; desta forma, os valores que se apresentam muito baixo podem ser um ponto com presença de vaso ou parênquima; já os altos valores podem ser de um ponto correspondente a parede de uma fibra, por exemplo.

Tabela 5 - Densidade aparente obtida por densitometria de Raios-X

Espécies	Densidade aparente g/cm^3		
	Média	Máxima	Mínima
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 1	0,613	0,993	0,451
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 2	0,638	0,950	0,466
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 3	0,583	1,008	0,388
<i>Betula pendula</i>	0,706	0,911	0,540
<i>E. globulus</i>	0,899	1,380	0,599

Conforme mencionado anteriormente a densidade aparente obtida por densitometria de raios-X apresenta correlação com a densidade básica. Na figura 13 apresenta-se a correlação entre a densidade aparente média dos discos dos DAP obtidos das 5 árvores de cada material considerado neste trabalho a densidade básica média ponderada dos respectivos materiais.

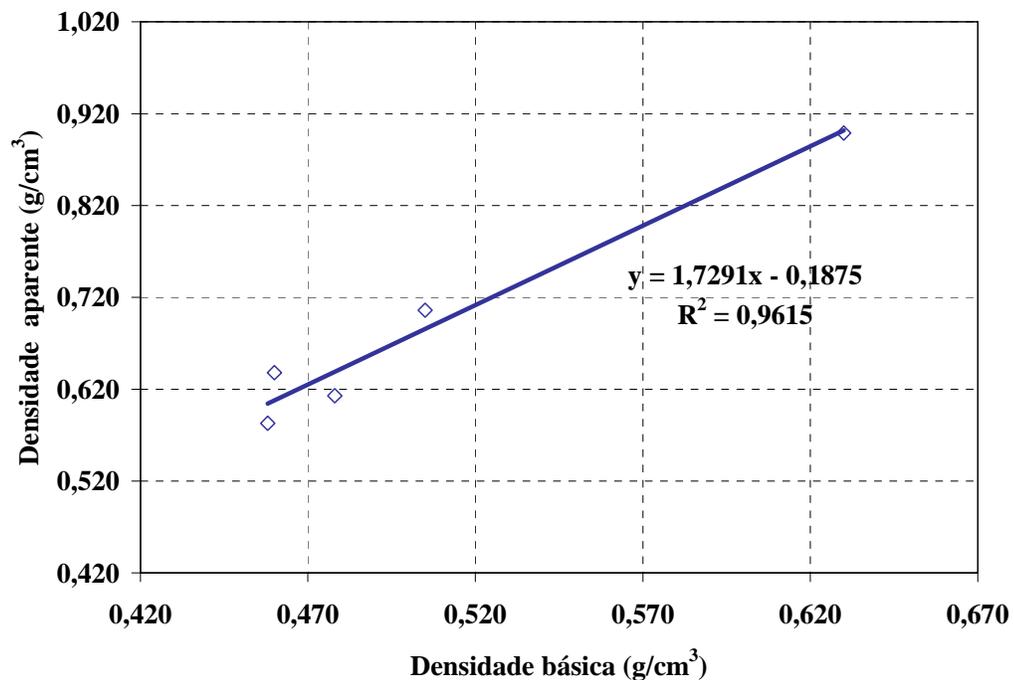


Figura 13 - Correlação linear entre a densidade aparente média do DAP e a densidade básica média da árvore

Os resultados apresentados na figura 13 mostram, conforme já mencionado, uma elevada correlação entre densidade média aparente obtida por densitometria de raios-X e densidade básica; A determinação da densidade por raios-X é um parâmetro que pode ser considerada alternativa para avaliação da qualidade da madeira para produção de polpa celulósica, além de gerar os resultados que representam a densidade da madeira da árvore como um todo, proporciona informações a cerca da variação radial deste parâmetro e quando confrontados com informações edafoclimáticas permitem compreender o efeito destes sobre a densidade, fornecendo assim informações úteis para as áreas de manejo florestal e melhoramento genético.

Arango (2004) caracterizou a variação da densidade aparente por densitometria de raios-X nas espécies de *E. grandis*, *E. saligna* e *E. grandis x E. urophylla* e observou o seu aumento no sentido medula-casca.

A figura 14 representa a variação radial da densidade aparente ao nível do DAP das espécies estudadas, e vale ressaltar que as matérias-primas seguiram modelos diferenciados. Entretanto os resultados estão consoantes à citação da Arango (2004), destacando-se que a densidade aumenta no sentido medula-casca.

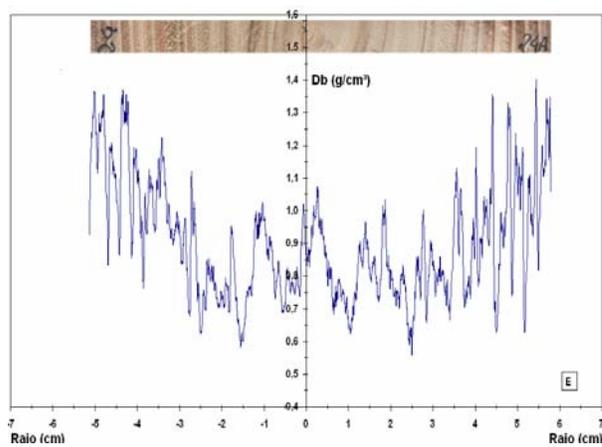
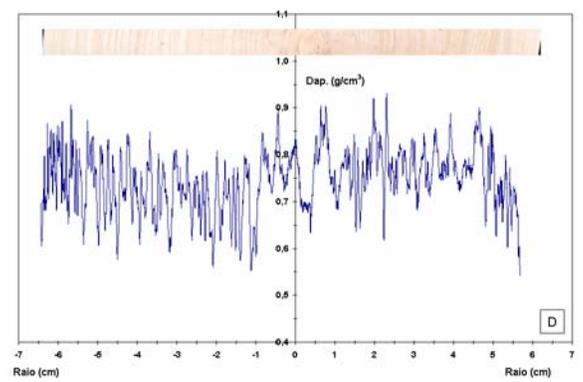
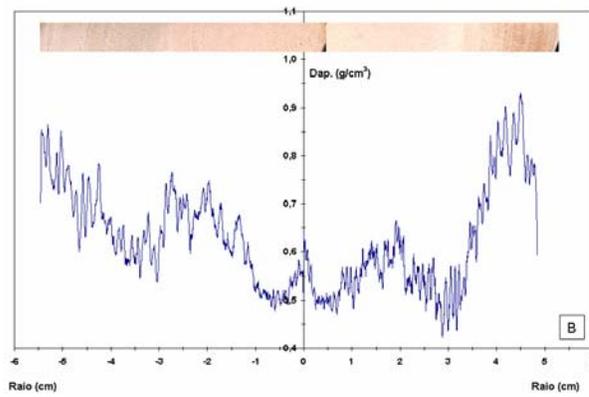
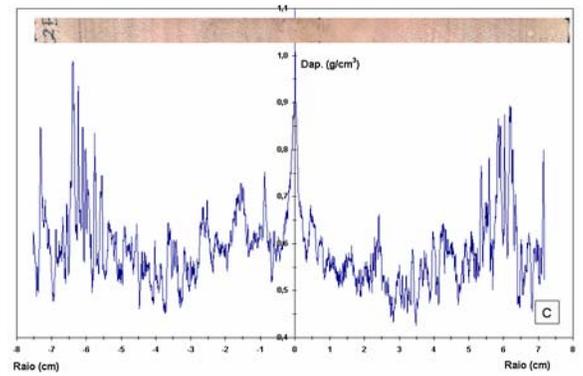
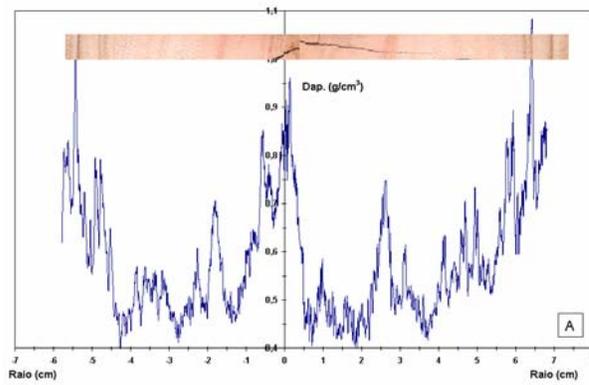


Figura 14 - Variação da densidade nas espécies *E. grandis* x *E. urophylla* 1, 2 e 3 (figura A, B e C), *Betula pendula* (figura D) e *E. globulus* (figura E)

Ainda com relação à variação radial da densidade obtida por densitometria de raios-X, a madeira de *Betula pendula* se destaca das demais por apresentar um padrão diferenciado de densidade, o que por sua vez, pode ser conseqüência das condições edafoclimáticas da região de onde a matéria-prima foi coletada. Outro fator relevante e pode ter colaborado nas variações é a idade da matéria-prima.

2.3.2 Composição Química da Madeira

2.3.2.1 Características básicas

A caracterização química de madeiras destinadas à produção de polpa celulósica é de grande importância, pois está fortemente relacionada com a eficiência do processo de polpação, influenciando no consumo de reagentes químicos, no rendimento de polpa celulósica e na quantidade de sólidos gerados.

A eficiência da conversão de madeira em polpa celulósica está intimamente relacionada à escolha da matéria-prima, visando uniformidade e qualidade do produto final obtido. O conhecimento das características básicas das matérias-primas destinadas à produção de polpa celulósica é uma ferramenta fundamental para a compreensão dos processos de polpação. Na tabela 6 são apresentadas às características químicas das espécies de *E. grandis* x *E. urophylla* 1, 2, e 3, *B. pendula* e *E. globulus*. Deve-se mencionar que os resultados apresentados representam a média aritmética das 5 árvores de cada material considerado neste trabalho.

Tabela 6 - Características químicas das madeiras

Parâmetros	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 1	<i>E. grandis</i> x <i>E. Urophylla</i> 2	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 3	<i>Betula</i> <i>pendula</i>	<i>E.</i> <i>globulus</i>
Extrativos Totais,%	2,65 c	2,30 c	3,98 b	6,97a	3,64 b
Lignina solúvel, %	3,77 c	5,62 a	3,55 c	4,28 bc	5,21ab
Lignina insolúvel, %	20,76 b	20,17 b	26,52 a	14,33 c	16,59 c
Lignina total, %	24,53 b	25,79 b	30,06 a	18,61 d	21,80 c
Holocelulose, %	72,82 ab	71,91 b	65,96 c	74,42 ab	74,56 a

*Os valores apresentados com a mesma letra não se difere significativamente ao nível de 5% de probabilidade

Os materiais avaliados apresentaram variação com relação á composição química da madeira. A análise de variância dos resultados da tabela 6 pode ser visualizada no apêndice.

Considerando as características químicas avaliadas para as matérias-primas em questão, observa-se que entre os resultados médios de extrativos existe uma variabilidade significativa entre as diferentes espécies. A madeira dos híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* oriundos do estado de São Paulo (1 e 2) apresentam teores de extrativos totais baixos sem diferença estatística significativa. Bassa (2002) estudou o *E. grandis* x *E. urophylla* com 7 anos de idade plantados na região de Luiz Antônio-SP e observou valores de 2,06 %. Já a madeira do híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* oriundos da região de Mucuri-BA (3), apresenta teores de extrativos totais mais elevados quando comparados aos demais materiais híbridos considerados neste trabalho.

A madeira de *E. globulus* apresentou teores de extrativos totais semelhantes ao da madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* oriundo de Mucuri-BA (3).

Quando comparado às madeiras do gênero *Eucalyptus* utilizados neste trabalho, observa-se que os teores de extrativos foram diferentes, porém significativamente menores que os teores apresentados pela madeira de *B. pendula*, cujo valor foi de 6,97%.

Smook (1997) menciona que os extrativos são compostos indesejáveis no processo de polpação, uma vez que os mesmos podem consumir reagentes químicos e provocar incrustações resinosas do tipo “pitch” em tubulações.

Milanez et al. (2005) salientou que ocorre uma queda de extrativos de acordo com o tempo de estocagem da matéria-prima. Diante disso cabe salientar que a comparação dos resultados de extrativos deve ser cautelosa, uma vez que o período compreendido entre o corte da madeira e o seu processamento influencia nos teores de extrativos.

Almeida et al. (2001) salientam que o teor de extrativos e de lignina presentes na madeira influencia diretamente no consumo de álcali, no rendimento e na taxa de deslignificação, podendo os mesmos definir o potencial de uma matéria-prima para a produção de polpa celulósica.

Os valores de lignina apresentados na tabela 6 das madeiras de *E. grandis* x *E. urophylla* estão consoantes com os resultados encontrados no estudo de Queiroz (2003), que apresentou valores de lignina insolúvel de 23,7%, lignina solúvel de 3,5% e lignina total de 27,2%. Com relação ao teor de lignina a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* oriunda da

região de Mucuri-BA (3), quando comparada às demais madeiras destes híbridos considerados neste trabalho apresentou teores aproximadamente 5 pontos percentuais mais elevados. Esta diferença pode estar relacionada à aspectos genéticos, silviculturais e edafoclimáticos.

Alencar (2002) comenta que a madeira com maior teor de lignina pode exigir uma maior quantidade de álcali para que possa atingir o mesmo nível de deslignificação da polpa, o que implica numa maior degradação dos carboidratos e dissolução dos polissacarídeos de baixo peso molecular. Tal fato pode causar redução no rendimento, queda de viscosidade e de resistências físico-mecânicas da polpa, além de gerar também maior quantidade de sólidos para queima em caldeira de recuperação.

Segundo Bassa (2002) maior teor de lignina presente na madeira pode exigir maiores cargas de reagentes químicos durante o processo de cozimento, assim como maiores teores de extrativos que também colaboram para tal, além de possuírem maior potencial para formação de “pitch”. Associando os teores de extrativos e o teor de lignina total é provável que a matéria-prima de *E. grandis x E. urophylla* 3, necessite de condições mais drásticas para a obtenção de polpa celulósica com o mesmo grau de deslignificação, expresso pelo número kappa, podendo resultar em menor rendimento.

O teor de lignina total da madeira de *E. globulus* considerada neste trabalho está consoante com o valor encontrado por Reis et al. (2002), que estudou a mesma espécie com 7 anos de idade e encontrou 22,35% de lignina total. Carvalho (1999) em estudo com a madeira de *Eucalyptus globulus* para produção de polpa celulósica salienta que os teores de lignina encontrados são diferentes de acordo com as origens das madeiras; esta autora apresenta valores de lignina insolúvel variando de 17 a 24% para madeira de *Eucalyptus globulus* de Portugal, diante disso pode ser observado que a espécie em questão está consoante com a citação de Carvalho (1999).

O valor de lignina total da madeira de *E. globulus* oriunda de Portugal utilizada neste trabalho pode ser considerado baixo frente aos materiais de eucalipto normalmente utilizados no Brasil para produção de polpa celulósica; além do teor de lignina ser uma característica relacionada à espécie, os valores obtidos neste trabalho para madeira de *E. globulus* podem estar relacionados à idade (12 anos) e conseqüentemente a maior proporção de madeira adulta na árvore.

A madeira de *Betula pendula* apresentou teor de lignina inferior comparada às espécies de *Eucalyptus*, tanto pelas características intrínsecas à espécie como pela idade da madeira; Trugilho (1996) salientou que a lignina tende a diminuir com o aumento da idade, pois as espécies mais jovens tendem a possuir uma maior proporção de madeira juvenil que é mais rica em lignina do que a madeira madura. Conforme já mencionado anteriormente o menor teor de lignina encontrado para a madeira de *B. pendula* pode ter efeitos positivos sobre o processo de polpação.

Os principais grupos de componentes químicos da madeira que apresentam efeito sobre a eficiência do processo de polpação podem ser reunidos em extrativos totais, lignina (solúvel e insolúvel) e holocelulose. Com base na metodologia utilizada neste trabalho o teor de holocelulose é obtido a partir da subtração dos teores de lignina e extrativos totais.

Vários autores têm demonstrado uma relação positiva entre o teor de holocelulose e o rendimento do processo kraft de polpação. Sob esta ótica, os materiais de *B. pendula* e *E. globulus* se destacam por apresentarem um elevado teor de holocelulose e devem apresentar um bom desempenho frente ao processo de polpação. Entre os materiais híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, o material 3 (Mucuri – BA) apresenta o menor teor de holocelulose, basicamente em função do elevado teor de lignina total apresentado.

Com base nos aspectos mencionados anteriormente relacionados à composição química dos materiais considerados neste trabalho, a madeira de *B. pendula* e *E. globulus* se destacam das demais por apresentarem elevados teores de holocelulose e baixos teores de lignina; estas características estão relacionadas às características intrínsecas das espécies, mas também com a idade das árvores. Ainda com relação à madeira de *B. pendula* quando utilizada para produção de polpa celulósica, atenção especial deve ser dada ao controle de pitch em função do elevado teor de extrativos totais.

Entre as madeiras de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* consideradas neste trabalho os materiais oriundos do Estado de São Paulo (1 e 2) apresentam níveis de holocelulose que podem ser considerados elevados e comparáveis os de *E. globulus*; já o material oriundo de Mucuri – BA apresenta níveis de holocelulose menores que as demais espécies consideradas neste trabalho indicando ser necessário a busca de materiais genéticos superiores para plantios nesta região.

2.3.2.2 Compostos inorgânicos na madeira

A madeira é a principal fonte de elementos inorgânicos na polpa celulósica e estima-se que esta matéria-prima contribui com 95% do total de íons metálicos presentes na mesma (REZENDE et al. 1999).

A determinação quantitativa e qualitativa dos metais pode ser de grande importância tecnológica, podendo prevenir e até evitar uma série de problemas no processo de polpação, dentre os quais incrustações nas paredes e tubulações da seção de recuperação do licor residual. Conforme salientado, sua quantificação tornou-se bastante útil nas indústrias de polpa celulósica para fornecer subsídios às medidas preventivas, uma vez que uma grande quantidade destes compostos inorgânicos adentra nas fábricas através da madeira (KIMO, 1986).

Na tabela 7 são apresentados o teor dos principais componentes inorgânicos, Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Cobre (Cu), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) das diferentes espécies de madeira estudadas.

Tabela 7 - Compostos inorgânicos na madeira

Espécies	Metais				
	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn
	mg/Kg ⁻¹				
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 1	530 b	103b	2,9 c	72 a	17 c
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 2	677 a	112b	3,8 ab	95 a	19 c
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 3	808 a	195 a	2,0 c	158 a	6 c
<i>Betula pendula</i>	702 a	113b	4,9 a	141 a	68b
<i>E. globulus</i>	831 a	171 a	3,4 b a c	143 a	114 a

*Os valores apresentados com a mesma letra não se difere significativamente ao nível de 5% de probabilidade

As diferentes espécies estudadas diferem significativamente entre os elementos químicos avaliados.

O cálcio e o magnésio são materiais que estão relacionados à incrustação no ciclo de licor negro, incluindo desde as peneiras de extração dos digestores até os trocadores de calor

do sistema de recuperação; baixos teores de cálcio na madeira contribuem para a redução de problemas relacionados às incrustações de carbonato de cálcio. Os teores de elementos inorgânicos encontrados nas madeiras utilizadas neste trabalho apresentaram valores próximos e que podem ser considerados normais. O cálcio é um elemento que, fisiologicamente, está relacionado com a deposição de lignina nas células vegetais; seu teor está relacionado tanto com as características genéticas do material em questão bem como da sua disponibilidade no solo bem como os fatores edafoclimáticos que contribuem para a sua absorção pelas raízes.

Freddo et al. (1999), realizou um estudo com elementos inorgânicos em madeiras de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus grandis*, destacando sua influência na indústria de celulose e papel. Os dados obtidos para *Eucalyptus globulus* estão análogos aos valores apresentados por Freddo (1999). Entretanto a espécie de *Eucalyptus grandis x urophylla* apresentaram valores inferiores, comparado aos estudos do autor.

O ferro, cobre e manganês são elementos que catalisam a degradação do peróxido de hidrogênio; desta forma em processos de branqueamento onde o peróxido de hidrogênio representa um importante componente, o controle dos teores dos íons metálicos de ferro, cobre e manganês é de fundamental importância na otimização do processo de branqueamento, seja pelos ganhos de alvura, seja pelo consumo específico de peróxido de hidrogênio que impacta diretamente no custo do branqueamento de polpas celulósicas.

O resultado para os teores de ferro apresentados na tabela 8 mostra que não existe diferença estatística entre as madeiras, porém quando comparado as matéria-prima em relação aos teores de magnésio observa-se variações estatísticas para as espécies de *E. grandis x E. urophylla* (3) e *E. globulus*; no entanto, em termos de processo, as diferenças encontradas para ferro e magnésio é bastante significativa e pode impactar o processo de branqueamento conforme discutido anteriormente; os resultados do teste de Tukey para os teores de ferro pode ser reflexo da elevada variabilidade do teor de metais entre árvores.

A associação entre os teores de ferro, cobre e manganês para os materiais *E. globulus* e *B. pendula* indicam que atenção especial deve ser dada ao processo de branqueamento de polpas obtidas a partir destas espécies se o uso de peróxido de hidrogênio for relevante.

Os resultados encontrados para a espécie *Betula* estão consoantes com os resultados apresentados por Lang et al. (1982), que estudou as características químicas de *Betula papyrifera*.

Freddo 1999, explica que diferenças encontradas entre os teores de metais podem ocorrer devido variação com as espécies, bem como com a disponibilidade dos metais no solo.

2.3.3 Dimensões das Fibras

Para uma completa caracterização da matéria-prima destinada à produção de polpa celulósica é necessária a determinação das dimensões de suas fibras. Segundo Silva Junior (1996) tal fato se justifica, pois as propriedades físico-mecânicas da polpa obtida são em grande parte determinadas pelas características das fibras, sendo suas principais dimensões o comprimento, largura, espessuras de parede e diâmetro do lume.

Barrichelo e Brito (1976) citam que muitas vezes as dimensões das fibras isoladamente, podem não mostrar correlações significativas, porém a utilização de índices e relações pode indicar resultados interessantes; entre estes índices estão o índice de enfiamento, coeficiente de flexibilidade, índice de Runkel e fração parede. Entretanto os autores descrevem que esses índices e coeficientes relacionados às dimensões das fibras não devem ser utilizados de forma isolada para indicação de uma determinada propriedade do papel.

Na tabela 8 estão apresentados os resultados médios das análises de dimensões das fibras dos materiais utilizados neste trabalho realizado através do material dissociado. Os resultados mostram que algumas propriedades tiveram diferenças significativas, conforme representado pelo teste de Tukey.

Tabela 8 - Dimensões das fibras

Espécies	C (mm)	L (μm)	DI (μm)	E (μm)	FP (%)	CF (%)	IR
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 1	1,19 bc	18,78 bc	10,38 b	4,21 bc	45 b	55 b	0,812 b
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 2	1,12 c	17,72 c	10,41 b	3,65 c	42 bc	58 ab	0,702 b
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 3	1,14 c	17,81 c	10,44 b	3,69 c	41 bc	59 ab	0,708 b
<i>Betula pendula</i>	1,38 a	24,76 a	15,20 a	4,78 ab	39 c	61 a	0,634 b
<i>E. globulus</i>	1,24 b	20,29 b	9,74 b	5,29 a	52 a	48 c	1,160 a

C = comprimento das fibras; L = largura das fibras; DI = diâmetro do lume; E = espessura da parede; FP = fração parede; CF = coeficiente de flexibilidade; IR = índice de Runkel.

*Os valores apresentados com a mesma letra não se difere significativamente ao nível de 5% de probabilidade

Conforme apresentado na tabela 8, as fibras de *E. grandis* x *E. urophylla* 1, 2 e 3, estão consoantes aos resultados obtidos por Bassa (2002), e Silva Júnior. (2005). As fibras de *E. globulus* e *B. pendula* apresentaram em média, comprimento cerca de 20% maior que dos híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*; este fato pode estar relacionado com as características diferenciadas das espécies, assim como a maior idade das matérias-primas em questão.

A espécie de *E. globulus*, apresentou resultados de dimensões das fibras superiores a estudo realizado por Hernán, (1983). Entretanto, Tomazello Filho (1987) estudou a estrutura anatômica do *E. globulus* e os resultados de fibras estão de acordo com os dados do autor. Barrichelo e Brito (1976) salientam que as espécies de *Eucalyptus* normalmente apresentam valores de comprimento de fibras entre 0,75 a 1,30mm. As diferenças observadas para comprimento das fibras entre as espécies de *Eucalyptus* e a espécie *Betula* são estatisticamente significativas.

Segundo Barrichelo & Brito (1976) e Trugilho (1996), o aumento da idade da madeira, bem como os fatores genéticos e ambientais estão diretamente relacionados ao comprimento da fibra e espessura da parede.

Para permitir uma melhor visualização e interpretação dos dados apresentados na tabela 8, plotou-se gráficos para os valores de comprimento, espessura e largura da parede para as diferentes matérias-primas que estão apresentadas nas figuras 15, 16 e 17.

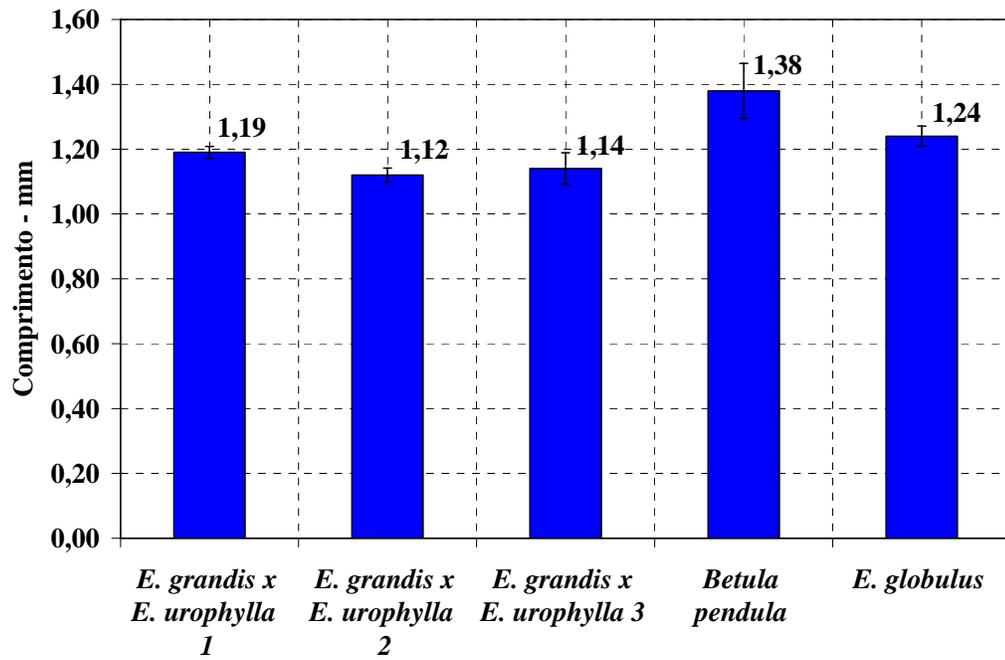


Figura 15 - Comprimento das fibras

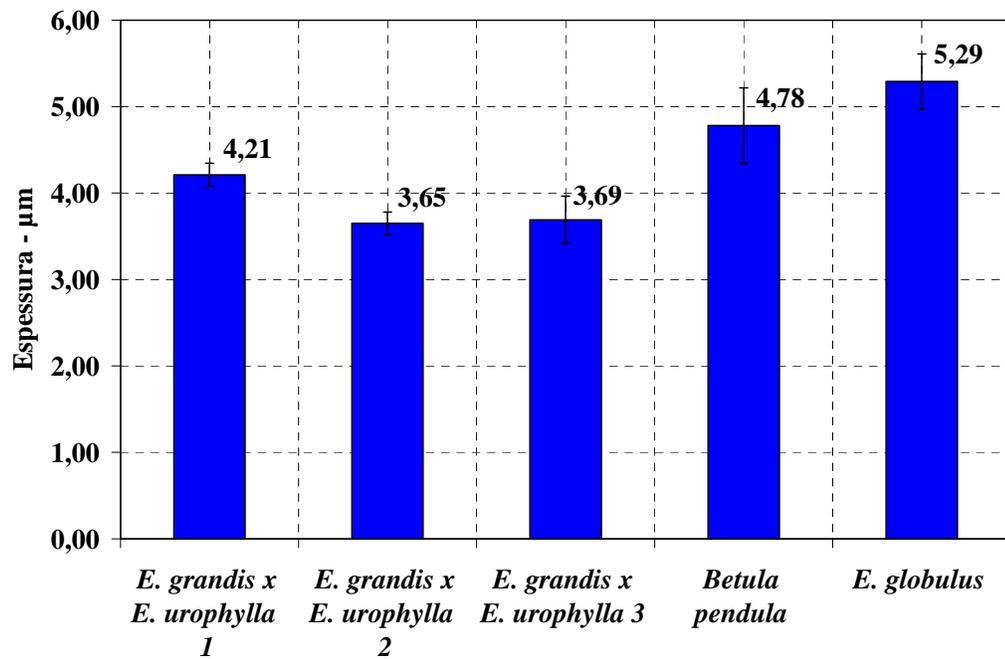


Figura 16 - Espessura das fibras

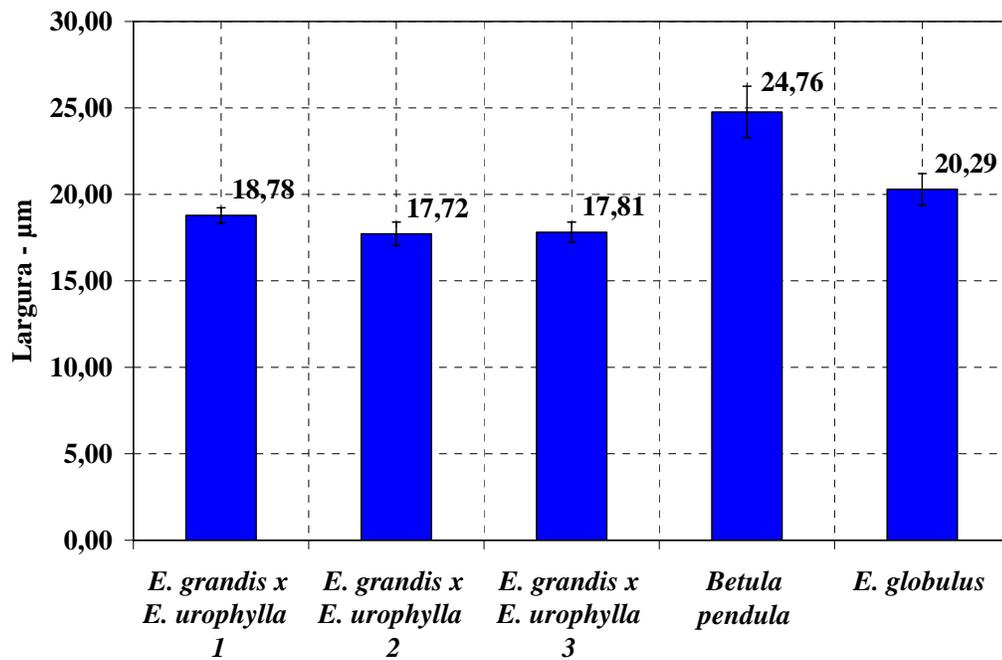


Figura 17 - Largura das fibras

Conforme salientado por Tomazello (1985), as dimensões das fibras podem ser influenciadas pela idade, pois com o aumento da mesma as células cambiais passam a produzir elementos com maiores dimensões ao longo do raio até atingirem a estabilização em idades mais avançadas; pode ser observado que as matérias-primas estudadas neste trabalho seguiram a tendência salientada pelo autor, quanto maior a idade maior o comprimento, espessura e largura da fibra.

Nas espécies de *Eucalyptus* do Brasil as idades variam de 5 a 6 anos, o comprimento da fibra se manteve entre 1,0 a 1,19 mm, enquanto que o *Eucalyptus globulus* de Portugal com idade de 12 anos apresentou 1,24 mm de comprimento, diferentemente da espécie *Betula pendula* que apresentou 1,38 mm com idade de 67 anos.

As características básicas e dimensões das fibras são bastante variáveis na madeira; o comprimento, a largura, a espessura da parede e o diâmetro do lúmen das fibras representam diferentes estágios de desenvolvimento e são controlados por diferentes processos fisiológicos distintos.

Segundo Shimoyama (1990) fibras com maior espessura de parede contribuem para o incremento da resistência ao rasgo e se correlacionam de forma negativa com o número de fibras por grama de polpa, porém de forma positiva com o coarseness e o volume específico do papel. A mesma autora salienta que para matéria-prima de *Eucalyptus* os valores da espessura de parede variam de 2,5 a 6,0 μ m e diâmetro do lume de 6 a 10 μ m; estes valores estão coerentes com os resultados apresentados na tabela 8.

Entre as diferenças destacadas nas dimensões de fibras e suas relações para as espécies estudadas são indicativos de que as polpas celulósicas e papéis obtidos a partir dessas espécies podem apresentar características diferentes nas propriedades físico-mecânicas levando a obtenção de produtos diferenciados.

2.3.4 Microscopia eletrônica

O conhecimento do arranjo estrutural dos elementos anatômicos que compõe a madeira é de fundamental importância para a compreensão e desenvolvimento de processos de transformação da madeira. Neste sentido avaliou-se a estrutura anatômica da madeira via microscopia eletrônica nas diferentes espécies estudadas.

Nas figuras 18, 19 e 20 são apresentadas fotomicrografias do plano transversal obtido em microscópio ótico para a espécie de *E. grandis* x *E. urophylla* 1.

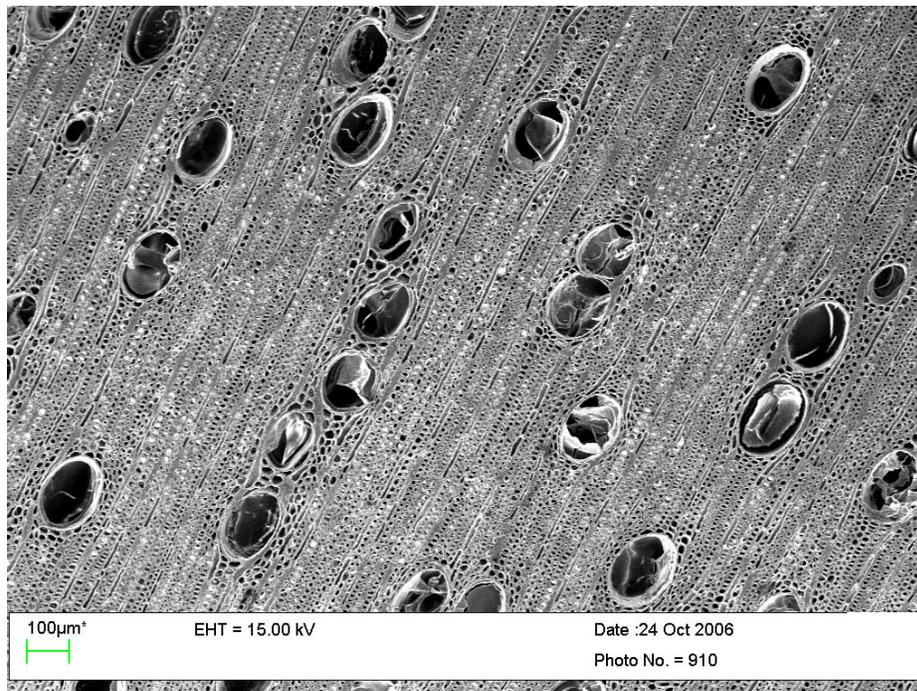


Figura 18 - *E. grandis* x *E. urophylla* 1- Corte transversal (aumento-150x)

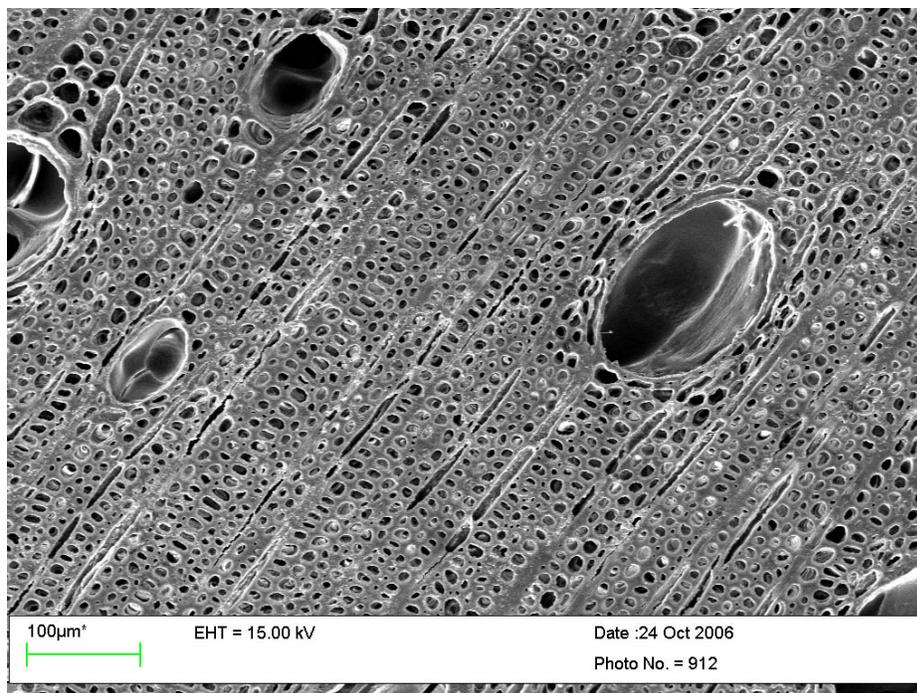


Figura 19 - *E. grandis* x *E. urophylla* 1- Corte transversal (aumento-400x)

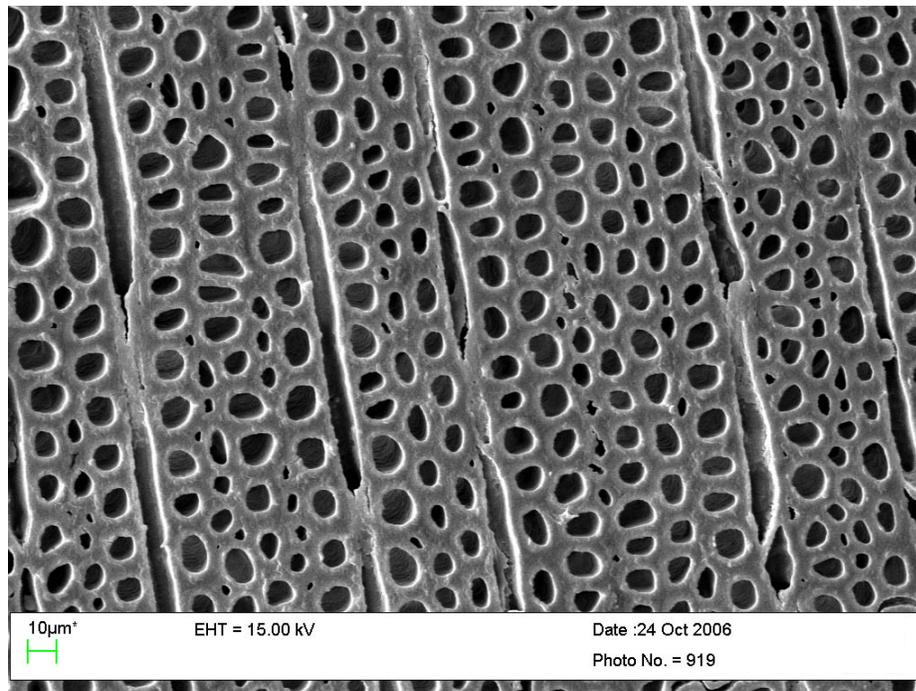


Figura 20 - *E. grandis* x *E. urophylla* 1-Corte transversal (aumento-1000x)

Nas figuras 21, 22 e 23 são apresentadas fotomicrografias do plano transversal obtido em microscópio óptico para a espécie de *E. grandis* x *E. urophylla* 2.

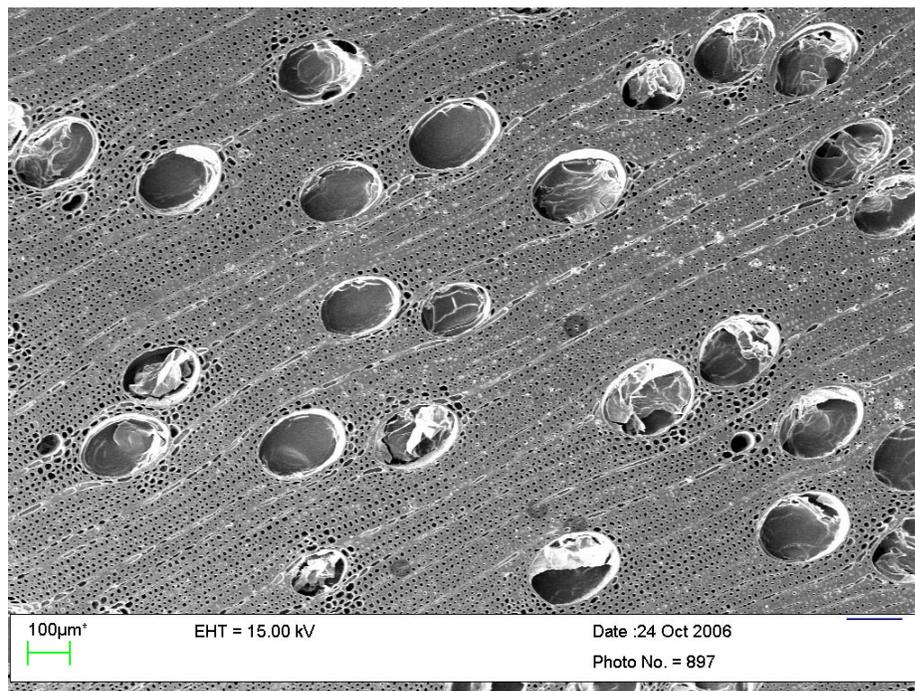


Figura 21 - *E. grandis* x *E. urophylla* 2- Corte transversal (aumento-150x)

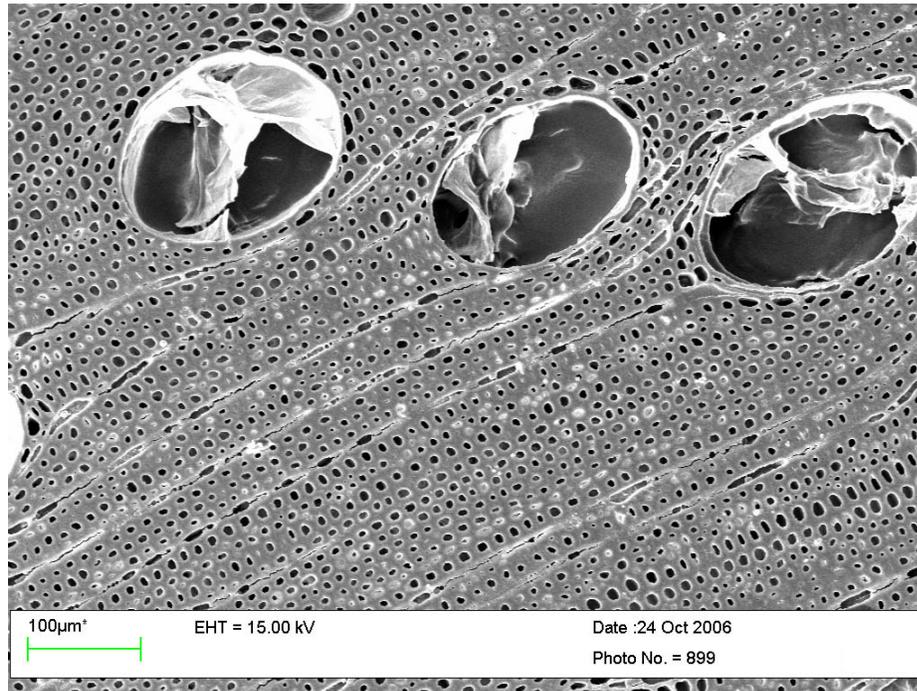


Figura 22 - *E. grandis* x *E. urophylla* 2- Corte transversal (aumento-400x)

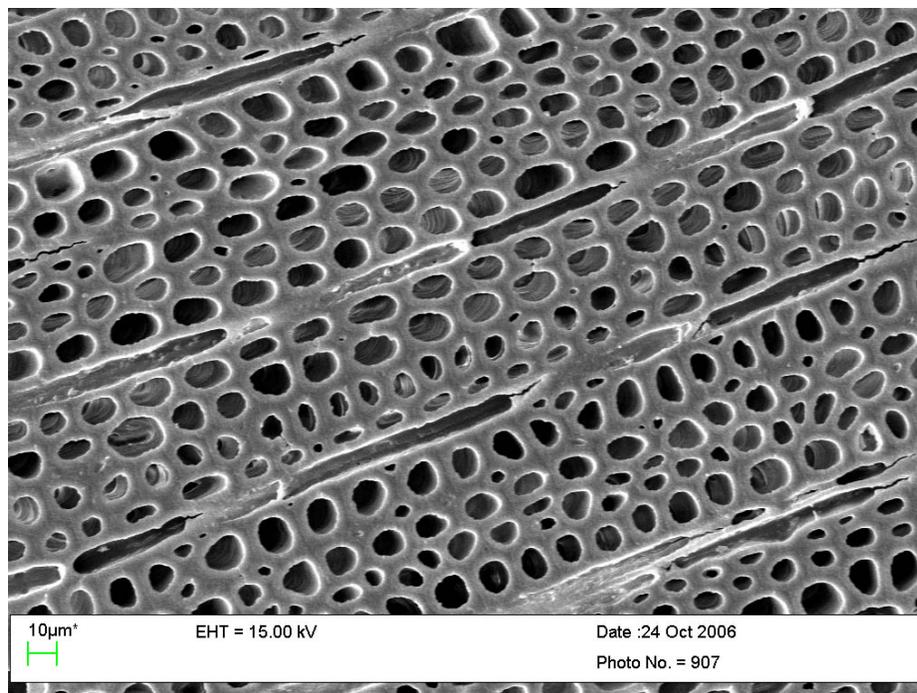


Figura 23 - *E. grandis* x *E. urophylla* 2-Corte transversal (aumento1000x)

Nas figuras 24, 25 e 26 são apresentadas fotomicrografias do plano transversal obtido em microscópio ótico para a espécie de *E. grandis* x *E. urophylla* 3.

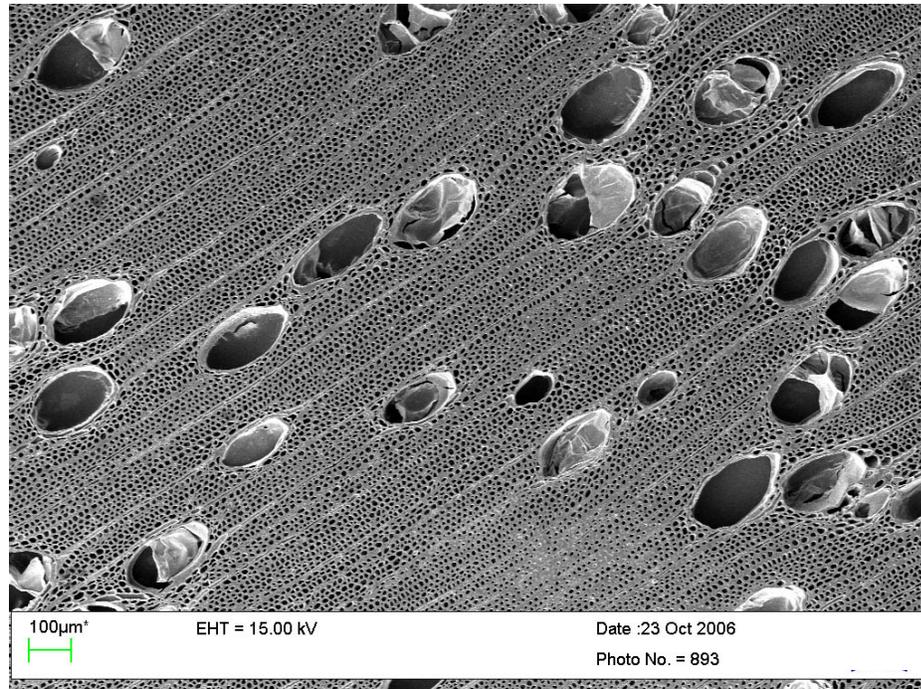


Figura 24 - *E. grandis* x *E. urophylla* 3- Corte transversal (aumento-150x)

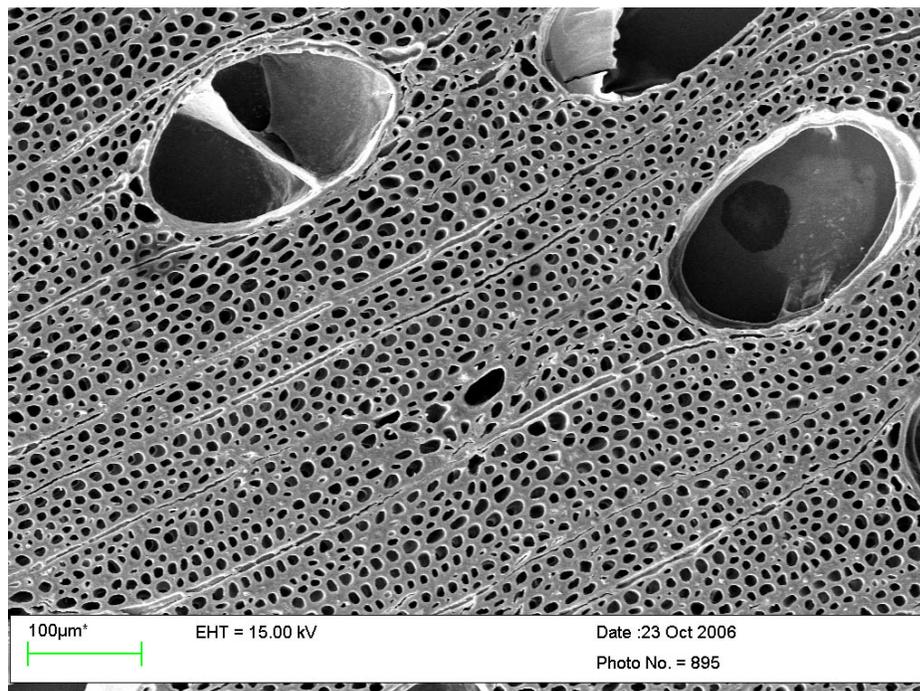


Figura 25 - *E. grandis* x *E. urophylla* 3 - Corte transversal (aumento 400x)

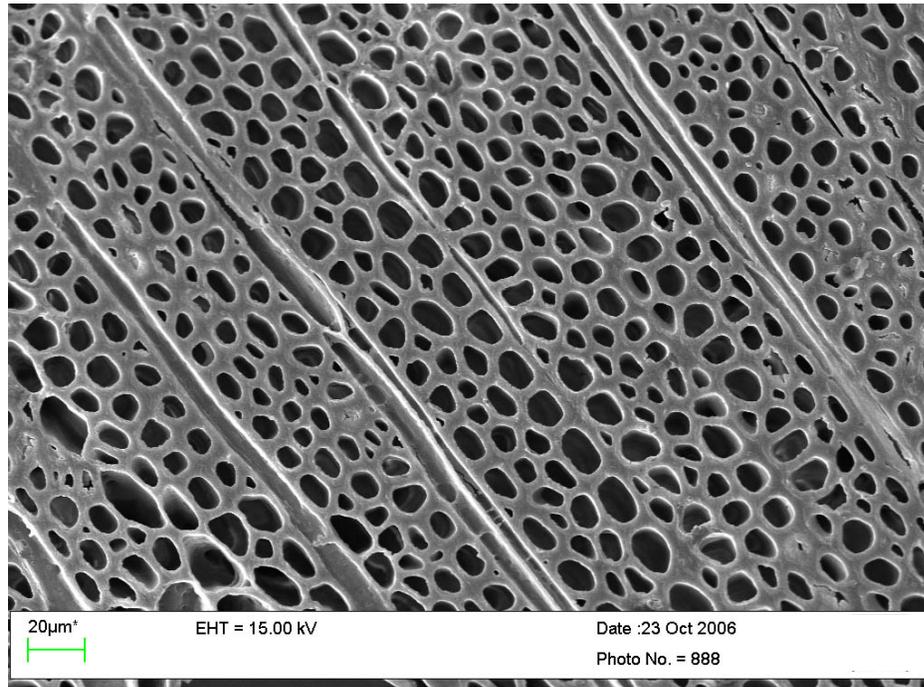


Figura 26 - *E. grandis* x *E. urophylla* 3- Corte transversal (aumento-1000x)

Apresentou-se nas figuras 18 a 26 as fotomicrografias do plano transversal para as espécies de *E. grandis* x *E. urophylla* do Brasil.

Pode ser observado que as três matérias-primas apresentam vasos com distribuição difusa, sendo predominante os vasos solitários; com variação de tamanho de médio a grande. A quantidade de células parenquimatosas (raios) é relativamente pequena e o tecido compreendido por fibras libriformes é predominante.

Nas figuras 27, 28 e 29 são apresentadas fotomicrografias do plano transversal obtido em microscópio ótico para a espécie de *Betula pendula*.

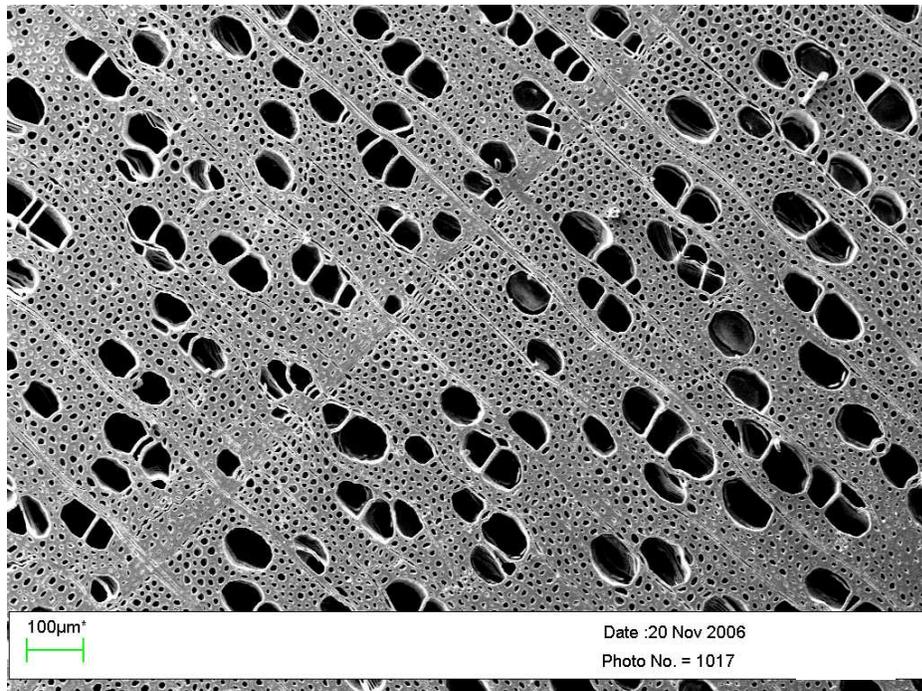


Figura 27 - *Betula pendula*- Corte transversal (aumento-150x)

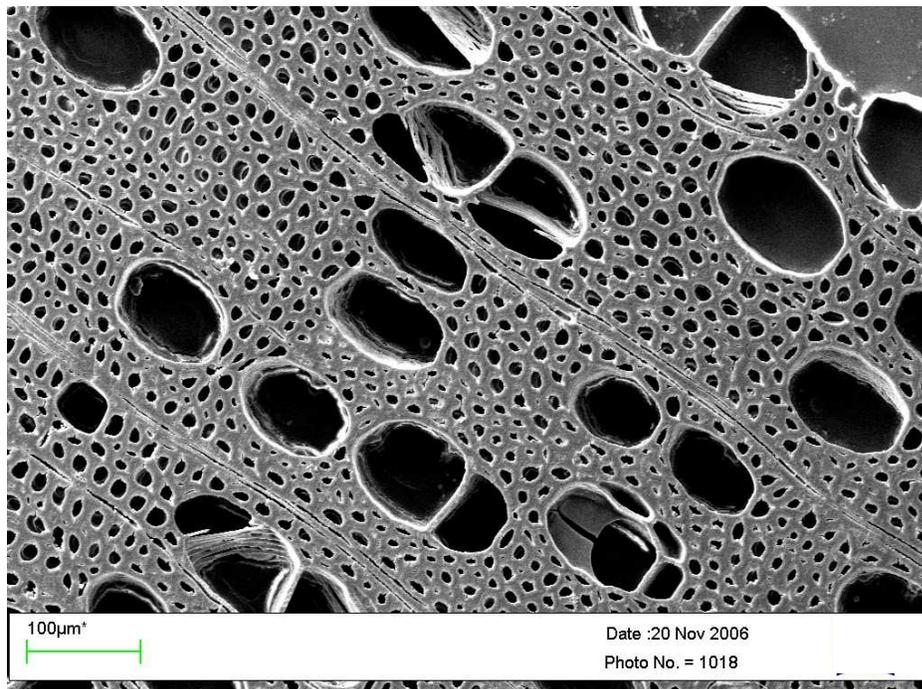


Figura 28 - *Betula pendula*- Corte transversal (aumento 400x)

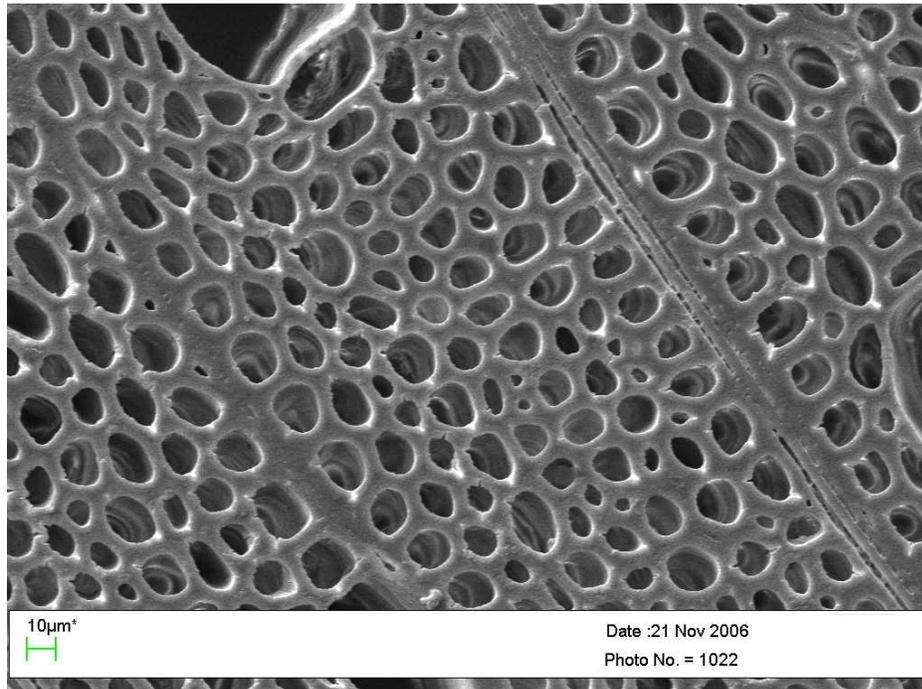


Figura 29 - *Betula pendula* Corte transversal (aumento-1000x)

Apresentou-se nas figuras 27, 28 e 29 as fotomicrografias do plano transversal para as espécies de *Betula pendula* da Finlândia.

Pode ser observado que a matéria-prima apresenta numerosos vasos com distribuição difusa, sendo predominante os vasos múltiplos de 3 a 4, poucos se apresentam solitários; sendo a maior parte deles classificados como pequenos; observa-se nítido anel de crescimento.

Nas figuras 30, 31 e 32 são apresentadas fotomicrografias do plano transversal obtido em microscópio ótico para a espécie de *Eucalyptus globulus*.

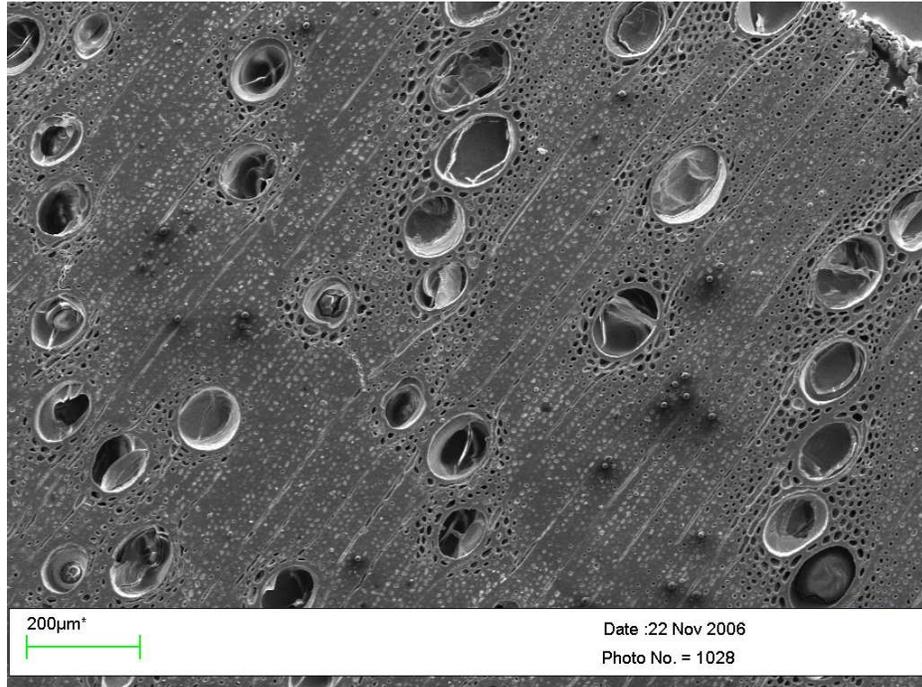


Figura 30 - *Eucalyptus globulus* - Corte transversal (aumento - 150x)

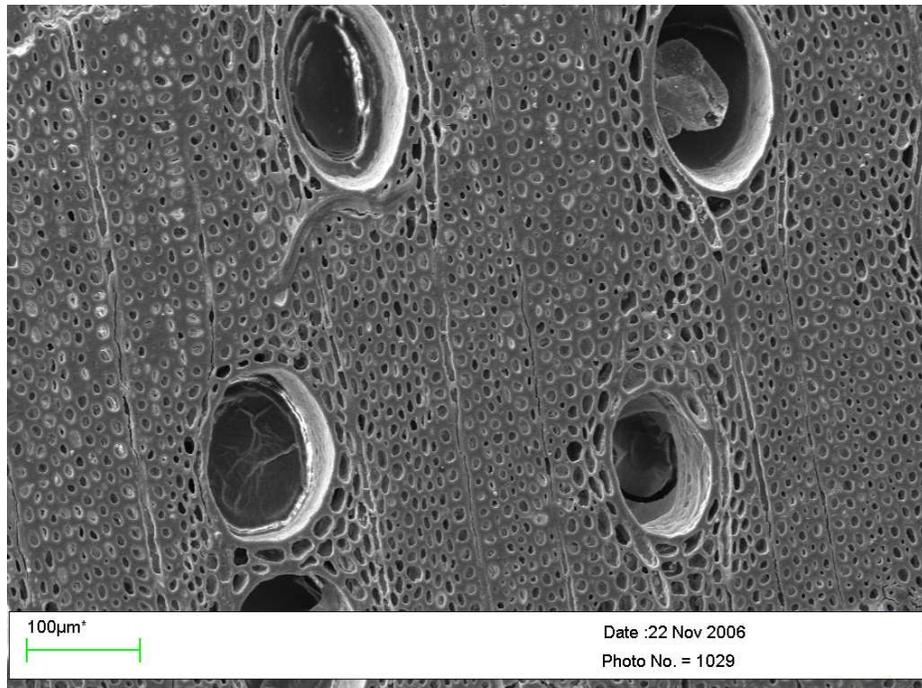


Figura 31 - *Eucalyptus globulus* - Corte transversal (aumento - 400x)

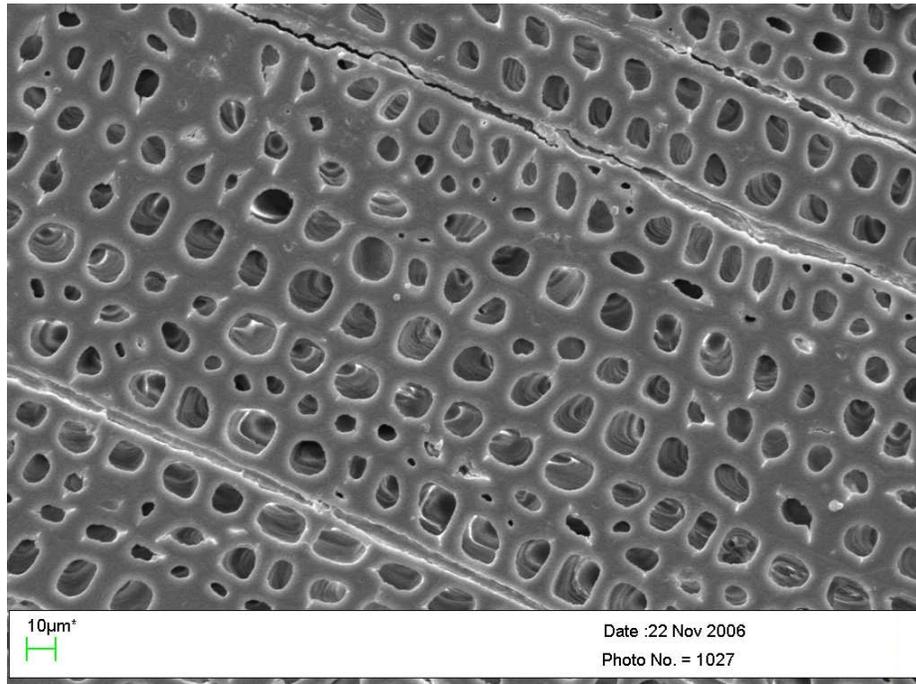


Figura 32 - *Eucalyptus globulus* - Corte transversal (aumento 1000x)

Apresentou-se nas figuras 30, 31 e 32 as fotomicrografias do plano transversal para as espécies de *E. globulus* de Portugal.

Pode ser observado que a espécie apresenta vasos com distribuição difusa, predominando os vasos solitários; com variação de tamanho de médio a grande.

As análises avaliando as características, físicas, químicas e anatômicas das madeiras estudadas neste trabalho, destacaram que as matérias-primas em estudos são bastante distintas o que deverá ter impacto sobre a eficiência do processo de polpação e características da polpa celulósica obtida.

2.3.5 Polpação

O processo kraft de polpação envolve fenômenos físicos e químicos que tem por objetivo básico a dissolução da lamela média e a conseqüente individualização das fibras.

Neste contexto, o processo de polpação apresenta algumas variáveis, sendo elas, relação licor madeira, tempo, temperatura, carga de álcali ativo e sulfidez. A carga alcalina, a temperatura e o tempo são as variáveis mais importantes na polpação, determinando o

conteúdo final de lignina na polpa. Essas variáveis são aplicadas tanto nos processos convencionais como nos modificados. Em ambos os casos, existem uma melhor combinação para a obtenção de polpa celulósica com ótimas qualidades para um dado produto final (SILVA JÚNIOR, 2006).

Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho os cozimentos foram conduzidos visando à obtenção de polpas celulósica com número kappa ($17,0\pm 0,5$); para atingir este grau de deslignificação variou-se a carga alcalina, os demais parâmetros de cozimento seguiram base literatura e foram mantidos constantes. Apresenta-se na figura 33 os resultados de carga alcalina aplicada para cada matéria-prima considerada neste trabalho.

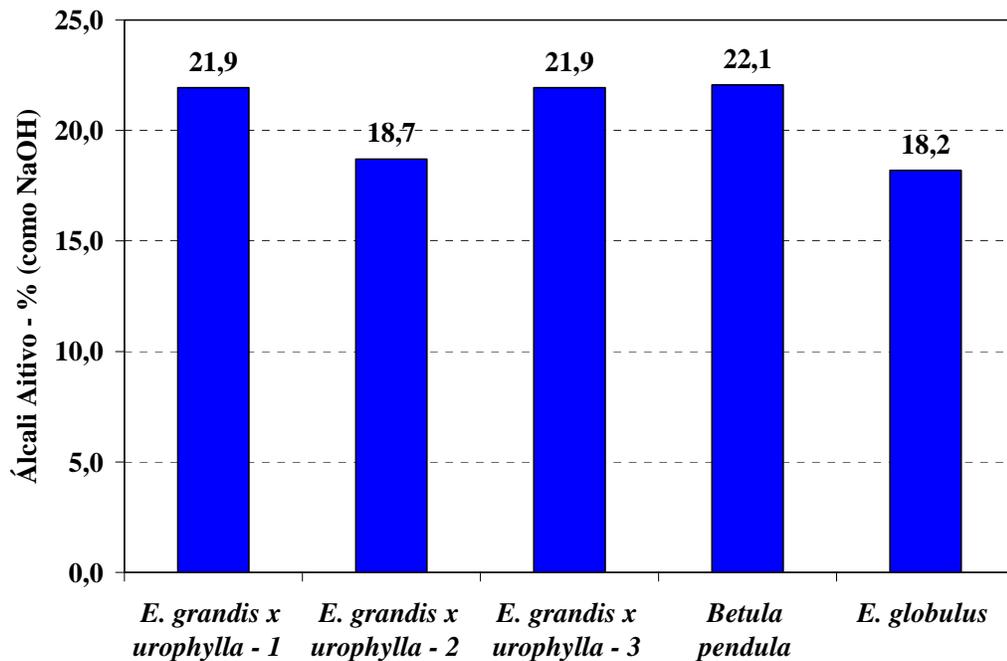


Figura 33 - Álcali-ativo aplicado - base NaOH

No desenvolvimento desse trabalho, a carga de álcali ativo foi o parâmetro utilizado para obtenção de polpa celulósica com número kappa ($17,0\pm 0,5$). Sabe-se que a carga de álcali ativo apresenta efeito direto sobre a intensidade das reações de deslignificação; nos resultados apresentados pode ser observado que as matérias-primas *E. grandis x E. urophylla 2* e o *E. globulus* exigiram um menor teor de álcali ativo para o mesmo nível de deslignificação.

A carga alcalina aplicada e o fator H são os principais parâmetros do processo de polpação kraft utilizados para controle das oscilações devido à matéria-prima, visando manter

relativamente constante o nível de deslignificação da polpa. Almeida (2003) afirmou que ao estudar diferentes níveis de álcali ativo em híbridos de *E. grandis x E. urophylla*, encontrou resultados que indicam que os níveis de álcali ativo apresentam efeito significativo sobre o número kappa; tal fato também foi observado para esse trabalho em questão.

Apresenta-se na figura 34 a variação do rendimento depurado e do rendimento bruto para as diferentes matérias-primas.

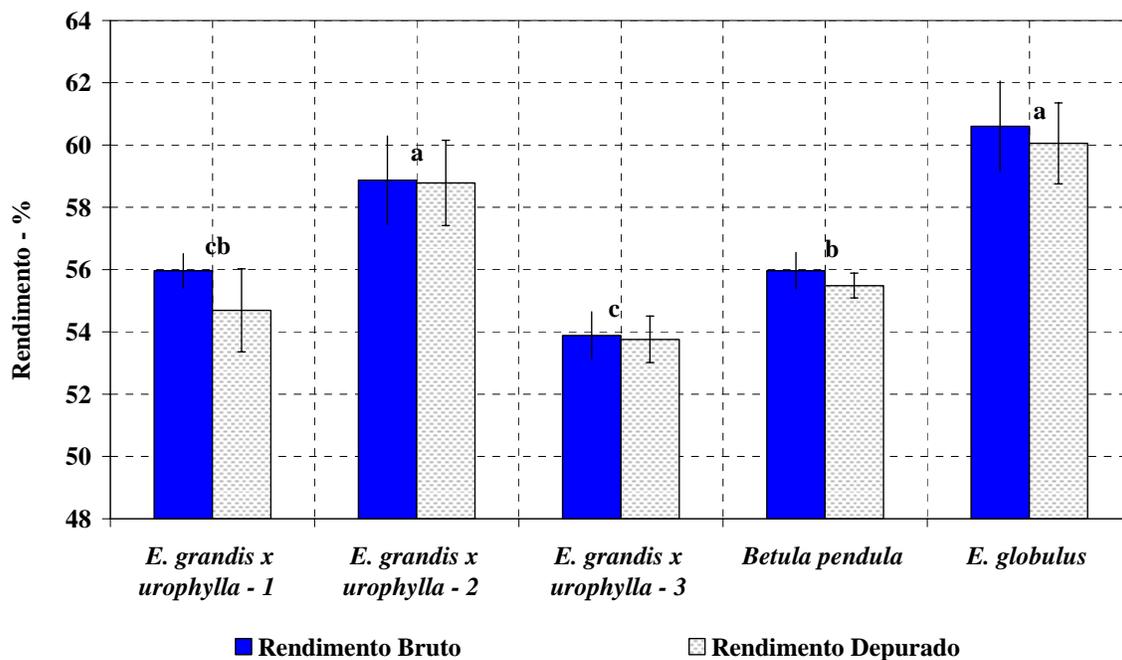


Figura 34 - Rendimento bruto e depurado

Conforme salientado anteriormente as espécies de *E. grandis x E. urophylla 2* e o *E. globulus* exigiram um menor teor de álcali ativo para o mesmo nível de deslignificação, fator esse que influenciou no rendimento de polpa celulósica, uma vez que a deslignificação para essas matérias-primas foi mais branda e resultou em menor degradação dos carboidratos. Tal fato poderá influenciar de forma positiva nos resultados de viscosidade.

A matéria-prima que apresentou menor rendimento foi o *E. grandis x E. urophylla 3* com 53,8% para rendimento bruto e 53,7% de rendimento depurado, tal fato se justifica pelo alto teor de extrativos e lignina presente na madeira, o que ocasionou maior adição de álcali ativo e consequentemente maior degradação dos carboidratos, o que poderá interferir de forma negativa nos níveis de viscosidade.

Silva Júnior (2006) destacou que o aumento a carga alcalina do cozimento proporciona redução significativa do rendimento total do processo de polpação. Segundo o autor a queda no rendimento acontece no caso de madeira de folhosas, devido á degradação das xilanas, as quais são sensíveis ao aumento da carga alcalina causando impactos negativos na seletividade do cozimento, a qual pode ser expressa pela relação viscosidade/número kappa ou rendimento/número kappa.

O processo de polpação de madeira de folhosas deve ser conduzido visando atingir o nível de deslignificação estabelecido mantendo o rendimento o mais alto possível uma vez que esse parâmetro está relacionado ao consumo de madeira e conseqüentemente ao custo da polpa celulósica, pois a madeira é o seu principal item de custo (SILVA JUNIOR 2005).

As análises estatísticas para rendimento bruto, depurado e teor de rejeito estão apresentados nos apêndices e pode ser observado que houve diferenças estatísticas para teor de rejeitos e rendimentos.

Apresenta-se na figura 35 o teor de rejeito para as diferentes matérias-primas estudadas. Pode-se observar que a polpa de *E. globulus* e a espécie de *B. pendula*, apresentaram os maiores teores de rejeitos, tal fato pode estar relacionado com a maior densidade básica.

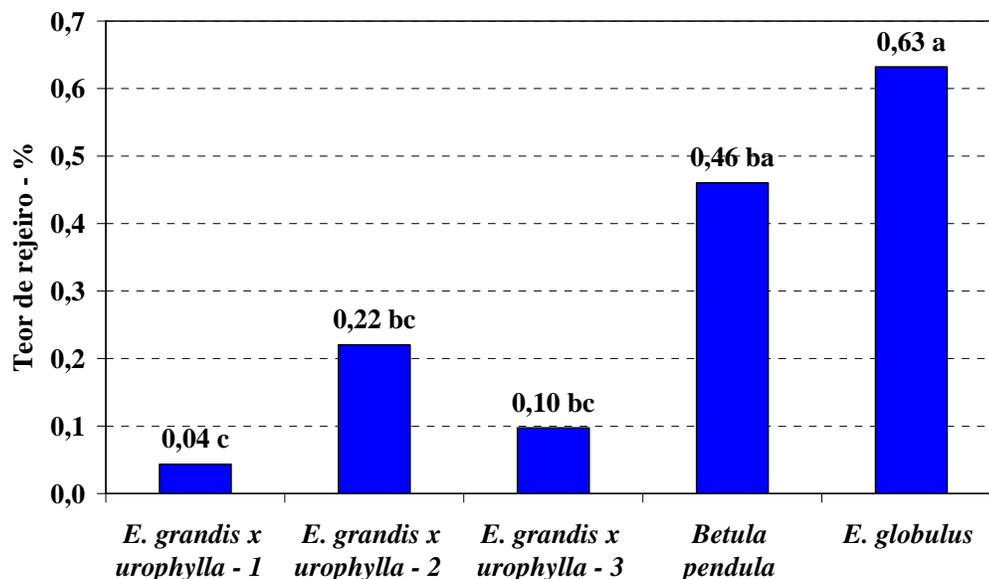


Figura 35 - Teor de rejeito

Processos de polpação que utilizam matérias-primas destinadas à produção de polpa celulósica que apresentam tendência a geração de elevados teores de rejeitos devem ser criteriosamente analisados e dimensionados; neste caso a etapa de impregnação deve ser privilegiada visando permitir uma melhor impregnação dos cavacos e conseqüentemente a redução do teor de rejeitos.

No processo de polpação é de grande importância avaliar as características da polpa celulósica obtida, diante disso, apresenta-se na tabela 9 os resultados das análises realizadas. As análises estatísticas da polpa celulósica estão apresentadas no apêndice.

Tabela 9 - Análises química da polpa

Espécies	AA	Ácidos Hexenurônicos	Viscosidade
	%	µmol/g	cP
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 1	21,9	69,38 a	37,95 a
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 2	18,7	60,22 a	59,89 b
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 3	21,9	61,37 a	34,93 a
<i>Betula pendula</i>	22,1	61,91 a	55,86 b
<i>E. globulus</i>	18,1	48,98 b	64,58 b

Costa, Mounteer e Colodette (2001), citam que os ácidos hexenurônicos são formados durante a polpação alcalina; as condições da polpação que mais influenciam o conteúdo de ácidos hexenurônicos na polpa celulósica são: álcali ativo, sulfidez e temperatura. As ligações duplas conjugadas na estrutura dos ácidos hexenurônicos influenciam no processo de branqueamento da polpa, formando ligações com a lignina e consumindo reagentes químicos do branqueamento como (cloro, dióxido de cloro, ozônio e peróxidos), além de causar reversão de alvura.

Apresenta-se na tabela 9 os valores de ácidos hexenurônicos para as diferentes matérias-primas, pode ser observado que a espécie que apresentou maior teor de ácidos hexenurônicos foi o híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* 1 com 69,38 µmol/g, sendo que a espécie de *E. globulus* apresentou aproximadamente 30% a menos quando compararam as polpa de *E. grandis* x *E. urophylla* e *Betula*.

Almeida (2003) encontrou teores de ácidos hexenurônicos de 49,17 e 50,43 µmol/g em polpas celulósicas produzidas com híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* com número kappa de 17,07

e 17,98. Com base na citação os resultados obtidos para ácidos hexenurônicos no presente neste trabalho estão superiores comparados aos resultados apresentados pelo autor.

Para facilitar a observação dos resultados de ácidos hexenurônicos, os valores foram plotados em gráfico figura 36.

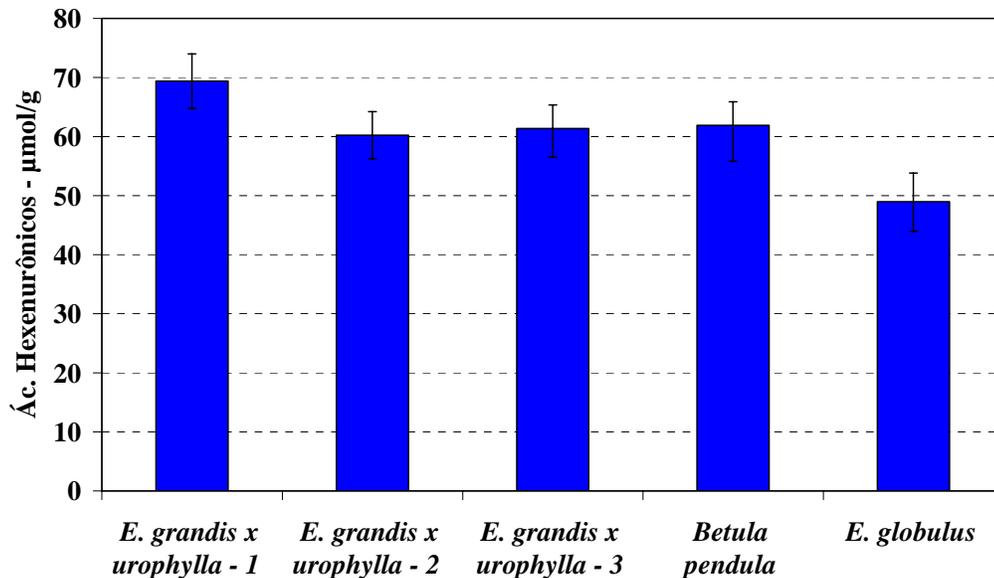


Figura 36 - Ácidos hexenurônicos

Conforme salientado anteriormente os ácidos hexenurônicos interferem negativamente no branqueamento da polpa celulósica. Entretanto Eiras et.al. 2002 destacaram que o mesmo pode ser eliminado em grande extensão com simples tratamento de hidrólise ácida na polpa, assim como, a diminuição do pH nos estágios de branqueamento D_{Hot} , diante disso, cabe salientar que as polpas celulósicas das espécies de *E. grandis x E. urophylla* 1,2 e 3 e *Betula pendula* que apresentaram alto teor de ácidos hexenurônicos, no processo de branqueamento deverá passar por um estágio ácido ou ter um estágio D_{Hot} para que não haja um consumo excessivo de reagente químicos, assim como interferência na reversão de alvura.

Costa et al. (2001) verificou que o número kappa é influenciado pelo teor de ácidos hexenurônicos da polpa, sendo que o mesmo contribui para um incremento no valor do número kappa. Estudos conduzidos sugeriram alguns fatores de conversão para o cálculo do

número kappa corrigido, sendo comum utilizar o fator proposto por Li et al. (1997), no qual uma unidade de número kappa corresponde a $11,9 \mu\text{mol}$ de HexA's/Kg de polpa.

Apresenta-se na figura 37 o número kappa corrigido e pode ser observado que o incremento no valor foi de aproximadamente 6 unidades para cada matéria-prima, com exceção do *E. globulus* que apresentou diferença de aproximadamente 4 unidades, sendo justificado pelo menor teor de ácidos hexenurônicos encontrado na polpa dessa espécie.

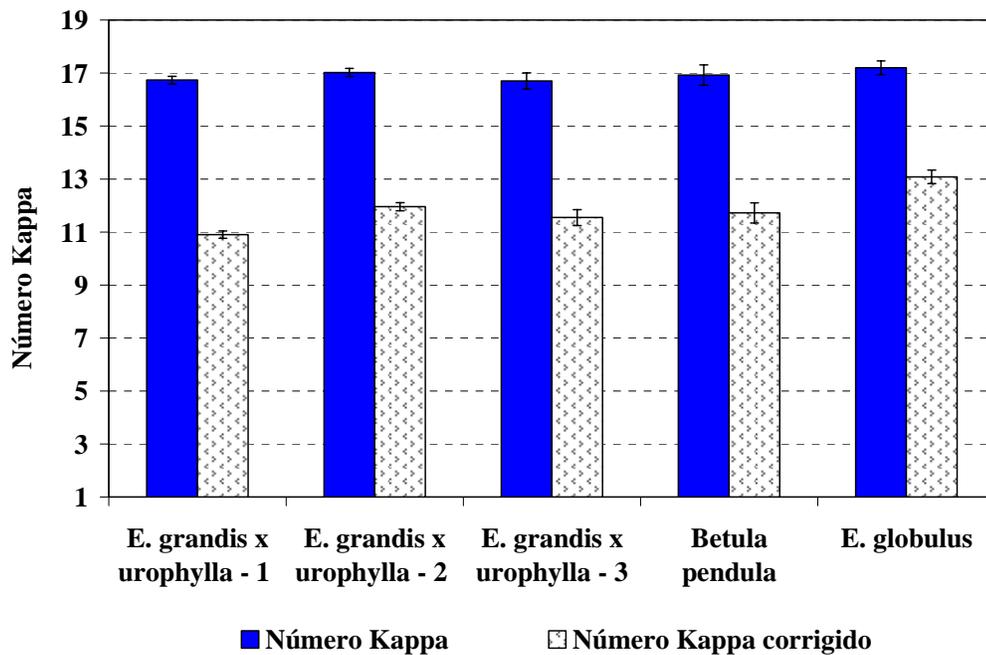


Figura 37 - Número kappa e número kappa corrigido

Uma forma de caracterizar a qualidade da polpa celulósica é a avaliação da viscosidade, que está associada ao grau médio de polimerização da celulose, sendo essa medida utilizada para estimar indiretamente, o nível de degradação dos carboidratos durante as fases do processo de obtenção da polpa celulósica. Sendo assim, de maneira geral, maior valor de viscosidade indica maior preservação dos carboidratos e, conseqüentemente, melhores propriedades de resistência físicas, principalmente aquelas que dependem da ligação entre fibras. Tal parâmetro também está associado diretamente com o rendimento da polpa celulósica.

Apresenta-se plotados em gráficos na figura 38 os resultados de viscosidade para as diferentes matérias-primas.

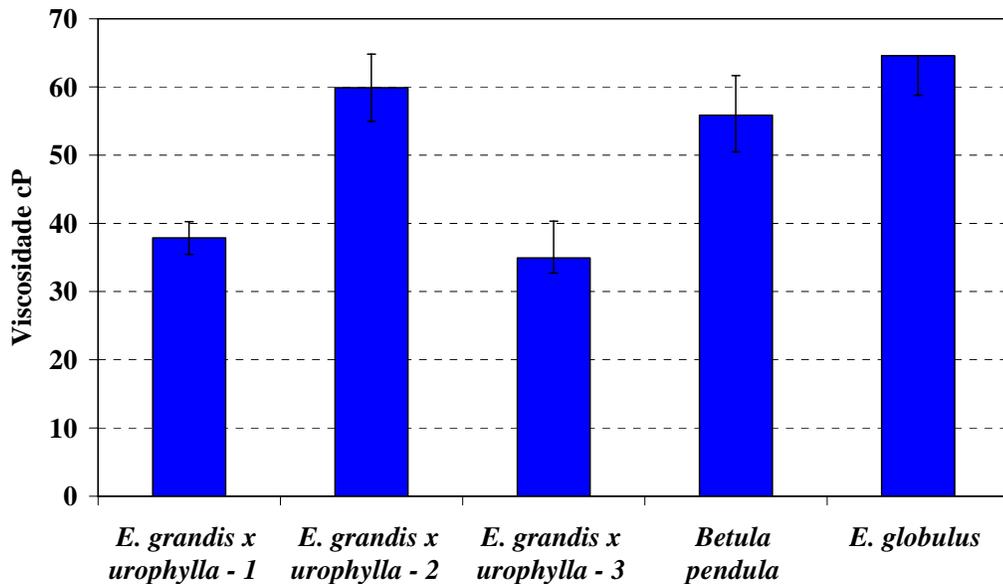


Figura 38 - Viscosidade

Diante dos resultados apresentados acima, é possível salientar que as matérias-primas que apresentaram um melhor desempenho no processo de polpação no que diz respeito à viscosidade, foram *Eucalyptus globulus* de Portugal com 64,6 cP, *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla 2* do Brasil 59,9 cP. Os resultados das análises estatísticas mostram que as espécies anteriormente mencionadas apresentam polpas com viscosidade significativamente superiores às das espécies de híbridos *E. grandis x E. urophylla 1* e *3*, fator esse que indica que as espécies *E. globulus*, o híbrido *Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla 2* podem dar origem a polpas branqueadas com boas propriedades físico-mecânicas.

Conforme discutido anteriormente, o aumento da carga de álcali tem como consequência a diminuição da seletividade do processo o que afeta negativamente o rendimento e a viscosidade. Segue na figura 39 a apresentação da seletividade para as diferentes matérias-primas.

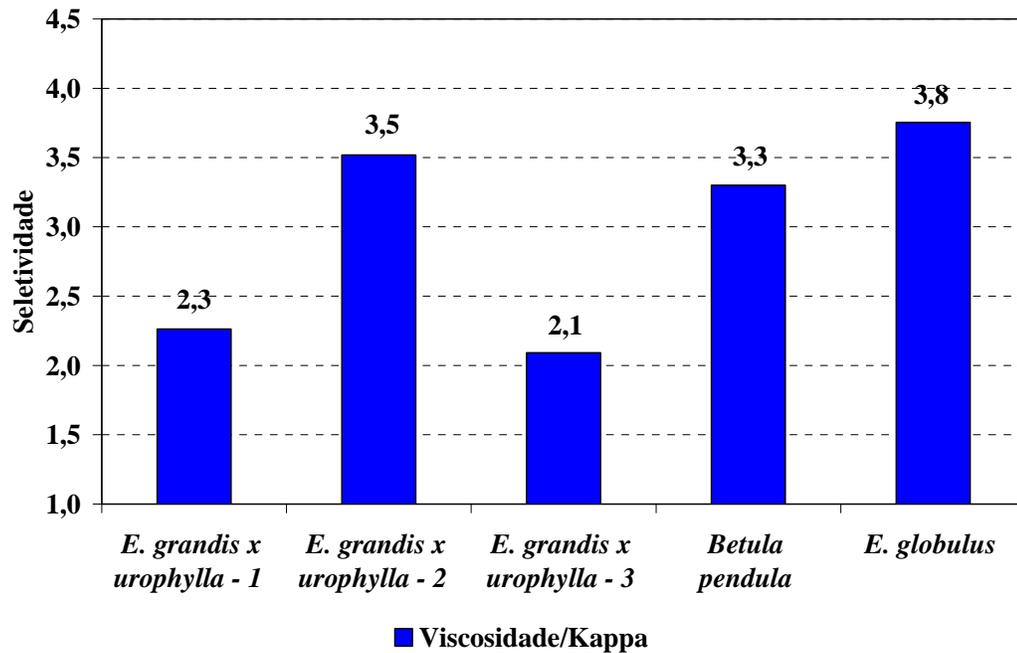


Figura 39 - Seletividade

Considerando-se seletividade como a relação entre viscosidade é número kappa, pode ser observado na figura 39 que a matéria-prima que mais se destacou foi à espécie de *Eucalyptus globulus*, que por sua vez requereu menor carga alcalina para obtenção de polpa com o número kappa estabelecido e apresentou o maior rendimento e viscosidade.

Além de avaliar as polpas celulósicas é de grande importância considerar as características do licor negro obtido após o processo de polpação, sendo que o mesmo pode fornecer informações importantes que colaboram na melhor compreensão do processo de polpação. Diante disso, apresenta-se na tabela 10 o desempenho do licor negro para as diferentes matérias-primas.

As análises rotineiras dos licores empregados no processo kraft de deslignificação de polpa celulósica são simples e baseiam-se, normalmente, nas determinações das concentrações de NaOH e Na₂S e do pH.

Tabela 10 - Análise do licor residual

Espécies	Sólidos totais %	pH	AA (como NaOH) g/L	AE (como NaOH) g/L
<i>E. grandis</i> x <i>E.urophylla</i> – 1	14,22 a	13,43 a b	18,51 a	15,50 a
<i>E. grandis</i> x <i>E.urophylla</i> – 2	13,05 a	13,36 a b	14,04 b	10,38 b
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 3	13,54 a	13,52 a b	19,38 a	15,53 a
<i>Betula pendula</i>	13,88 a	13,74 a	11,89 b	8,04 b
<i>E. globulus</i>	11,86 b	13,10 b	12,71 b	9,57 b

Em processos destinados a produção de polpa celulósica branqueável é recomendada que o pH final do licor de cozimento seja superior a 12,5 evitando desta forma a reprecipitação de lignina dissolvida no licor sobre a superfície da fibra que por sua vez pode resultar em problemas na etapa subsequente de branqueamento; observa-se na tabela 10 que os pHs para dos licores negros oriundos dos processos de polpação das matérias-primas utilizadas neste trabalho apresentaram valores superiores a 12,5.

Os resultados de álcali ativo e efetivo residual apresentam valores estatisticamente diferentes para alguns materiais; estas diferenças são conseqüências da carga alcalina inicialmente aplicada e da intensidade de reações de polpação (tanto deslignificação como degradação dos carboidratos). O menor nível de álcali ativo residual para as espécies de *E. globulus* e *E. grandis* x *E. urophylla* 2 são devidos, justamente à menor aplicação de carga alcalina no início do processo de polpação, quando comparada às outras matérias-primas estudadas. Entretanto para a espécie de *Betula pendula* utilizou-se no início do processo o maior nível de carga alcalina e pode ser justificado o baixo teor de álcali ativo residual pelo alto teor de extrativos totais apresentado na madeira, consumindo mais álcali ativo durante o processo de polpação.

A associação entre os dados de rendimento do processo de polpação e a carga alcalina aplicada permite estimar a massa de sólidos gerados na produção de polpação celulósica. Na figura 40 os resultados de tss/odt.

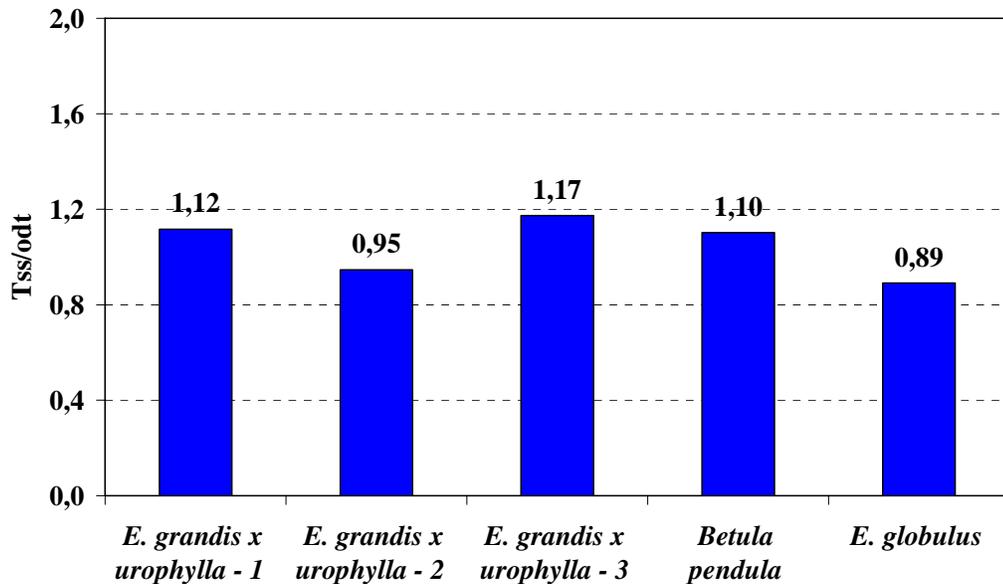


Figura 40 - Teor de sólidos gerados por tonelada de polpa produzida

A carga alcalina é a principal fonte de componentes inorgânicos no licor negro e apresenta efeito direto sobre a quantidade de sólidos gerados para produção de polpa celulósica. Os componentes da madeira dissolvidos durante o processo de polpação, por sua vez, representam a principal fonte de componentes orgânicos do licor negro.

O teor de sólidos secos gerados durante o processo de polpação está diretamente relacionado com a capacidade de produção de celulose de uma unidade industrial; isto se deve ao fato de que para viabilizar o processo kraft de polpação torna-se necessário a recuperação dos produtos químicos para a utilização em novo ciclo de cozimento. Essa recuperação química, na maioria das vezes é limitada pela capacidade de queima de licor negro da caldeira de recuperação.

Conforme salientado por Bassa (2002), o aumento do teor de sólidos em uma planta produtora de polpa celulósica esta diretamente relacionada à redução da capacidade de produção de polpa celulósica, em função da capacidade da queima da caldeira de recuperação.

O mercado mundial de celulose de forma simplista classifica as polpas em polpas de fibras curtas e polpas de fibras longas; no entanto, variedade de matérias-primas utilizadas para a produção destes tipos de polpa é ampla.

No presente trabalho considerou-se algumas das principais matérias-primas comerciais destinadas à produção de polpa de fibra curta; os resultados apresentados mostram a diversidade de características da madeira e desempenho frente ao processo de polpação; esses dados são indicadores que comparações ou mesmo desenvolvimento de processos e produtos devem ser criteriosamente avaliados considerando-se as particularidades da matéria-prima.

3 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram concluir que existem diferenças químicas, físicas e anatômicas entre as madeiras de *E. grandis* x *E. urophylla* -1, *E. grandis* x *E. urophylla* -2, *E. grandis* x *E. urophylla* -3, *Betula pendula* e *Eucalyptus globulus*, que levam as diferenças significativas na eficiência do processo kraft de polpação destas matérias primas.

Entre as matérias-primas consideradas neste trabalho, o *E. globulus* de Portugal e *E. grandis* x *E. urophylla*- 2 do Brasil apresentam os melhores desempenhos frente ao processo kraft de polpação.

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que as espécies avaliadas são diferentes em termos de qualidade da madeira e desempenho frente ao processo kraft de polpação com diferenças expressivas entre os principais parâmetros:

- a madeira de *Eucalyptus globulus* oriundo de Portugal apresentou a densidade básica mais elevada ($0,590\text{g/cm}^3$) e a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* - 3 apresentou a menor densidade ($0,442\text{g/cm}^3$);
- a madeira de *B. pendula* (Finlândia) apresentou o menor teor de lignina (18,61%) e a espécie de *E. grandis* x *E. urophylla* -3 apresentou maior teor de lignina (30,06%);
- a madeira *B. pendula* apresentou maior teor de extrativos totais (6,97%) e a espécie *E. grandis* x *E. urophylla* -2 apresentou menor teor de extrativos totais (2,30%);
- o maior teor de holocelulose foi apresentado pela madeira de *E. globulus* com 74,56% e a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* -3 o menor valor - 65,96%;
- a madeira de *B. pendula* se destacou das demais por apresentar fibras com comprimento médio significativamente maior que as demais madeiras consideradas neste trabalho;
- a madeira de *Betula pendula* exigiu a maior carga alcalina para atingir o número kappa estipulado sendo que o menor nível de carga alcalina exigido para a madeira de *E. globulus*;
- como consequência de suas características químicas, a madeira de *E. globulus* apresentou o melhor rendimento frente ao processo kraft de polpação (considerando-se o nível de

deslignificação especificado), polpa com a mais elevada viscosidade e a menor geração de massa de sólidos secos por massa de polpa celulósica produzida;

Os resultados mostraram que as matérias-primas utilizadas industrialmente para produção de polpa celulósica de fibra curta no Brasil, na Finlândia e em Portugal têm características e desempenhos distintos frente ao processo kraft de produção de polpa celulósica branqueável de fibra curta podendo levar a produtos finais com propriedades diferenciadas.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, G.S.B. **Estudo da qualidade da madeira para produção de polpa celulósica relacionada à precocidade na seleção de um Híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. 2002. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ALMEIDA, F.S. **Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-solids® para madeiras de eucaliptos**. 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

ALMEIDA, J.M.; SILVA, D.J. Efeito da qualidade de extrativos e da acessibilidade do licor na polpação Kraft de clones de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO ANUAL ABTCP, 34, 2001 São Paulo. **Anais...** São Paulo, ABTCP, 2001. p 1-14.

ARANGO, A.S.B. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004, 133 p. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ARROJA, L.; LOURO, M.; CAPELLA, I. Gestão integrada de resíduos em fábricas de pasta para papel em Portugal. **O Papel/Aveiro**, São Paulo, n 1, p. 48-55, Abr. 2005.

AMIDON, T.E. Effect of wood properties od hardwood on kraft paper properties. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 64, n. 3, p. 123-126, Mar.1981.

ASSIS, T.F. Melhoramento genético do eucalipto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 8, n. 185, p. 40-51, 1996.

BARRICHELO, L.G. A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel. **Série Divulgação PRODEPEF**, Brasília, n.13, p. 1-145, 1976.

BARRICHELO, L.G.; BRITO, J. O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para indústria de celulose e papel. **Serie Divulgação PRODEPEF**, Brasília, n.45, p.1-145, 1976.

BARRICHELO, L.G.; BRITO, J.O. A utilização da madeira na produção de celulose. **Circular técnica IPEF**, Piracicaba, n. 68, Piracicaba, p. 1-16, set. 1979.

BARRICHELO, L. G.; BRITO, J. O.; COUTO, H. T. Z. Densidade básica, teor de holocelulose e rendimento de celulose de *Eucalyptus grandis*. **Silvicultura**, São Paulo, v.8, n.32, p.802-808, 1983.

BARRICHELO, L.G.; BRITO, J.O.; MIGLIORINI, A. Estudo longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus spp.* **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 726-730, 1982.

BASSA, A. **Processo de polpação Kraft convencional e modificado com madeiras de *E. grandis* e Híbrido (*E. grandis* x *E. urophylla*)**. 2002. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BASSA, A.G.M.C. **Misturas de madeiras de *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft através do Processo Lo-Solids®**. 2006. 168 p. Dissertação (Mestrado Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2002.

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

BERTOLUCCI, F.; PENCHEL, R. Clonagem de eucalipto: Efeito sobre a produtividade da qualidade da madeira. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 91, p. 16-21. Jun. 1993. Suplemento.

BOUCAHRDET, J.A. **Crescimento físico e anatômico da madeira juvenil de dois clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em resposta á aplicação de boro**. 2002, 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo,. Piracicaba, 2002.

BUSNARDO, C.A.; FOELKEL, C.E.B. Estudos comparativos da qualidade da madeira de algumas espécies de eucaliptos tropicais. CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 11. 1978, São Paulo. **Trabalhos técnicos**. São Paulo: ABCP, p. 221-232, 1978.

BHAT, K.M.; KÄRKKÄINEN M. Wood anatomy and physical properties of wood and bark in *Betula totuosa* LEDEB. **Silva Fennica**, Helsinki, v.15, n.2, p.148-155, 1981.

BRASIL, M.A.M. **Densidade básica e características das fibras de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex maiden aos 3 anos de idade**. 1976. 126 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1976.

BRASIL, M.A.M. **Variação da densidade básica da madeira entre e dentro de procedências de *Eucalyptus urophylla* ST BLAKE**. 1983. 89 p. Tese (Livre docência) Faculdade de Ciências Agrônômicas de Campus de Botucatu, Universidade Estadual São Paulo, Botucatu, 1983.

BRASILEIRO, L.B.; COLODETTE J.L. A utilização de peróxidos na deslignificação e no branqueamento de polpa celulósica. **Química Nova**, Viçosa, v. 24, n. 6, p. 819-829, 2001.

CARVALHO, M.G.V.S. **Efeito das variáveis de cozimento nas características químicas de pastas kraft de *Eucalyptus globulus***. 1999. 269 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 1999.

CINQUE, U.C. Os benefícios gerados ao país pela floresta plantada. *Opiniões*, Ribeirão Preto, v. 9-10, p. 14, 2006.

CLITES, S.M. It begins with trees. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 77, n. 2, p. 17-21 . 1994.

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

COSTA, M.M.; MOUNTEER, A.H.; COLODETTE, J.L. Ácidos Hexenurônicos Parte II: Remoção e impacto na branqueabilidade e qualidade de polpa no processo de branqueamento. **O Papel** v. 62, n. 6 p, 77-84. 2001b.

DECOUX, V.; VARCIN, E.; LEBAN, J.M. Relations between the intra-ring wood density assessed by x-ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell apparent density determination. **Annals Forestry Science**, United States v.61, p.251-262, 2004.

DETERMINAÇÃO da percentagem de casca e variação dentro da árvore. **Informações SQCE**, Piracicaba, v. 5, p. 1-7, dez.1983.

ECHOLS, R.M. Uniformity of wood density assessed from x-ray of increment cores. **Wood Science and Technology**, New York, v.7, n.1, p.34-44, 1973.

EIRAS, K.M.M.; COLODETTE, J.L.; et al. Influencia das condições de operação no estágio Dht na branqueabilidade e nas características físico-química da polpa e do filtrado. . In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 2002. São Paulo, **Anais**. São Paulo ABCP, 2002. p.1-19.

FAO. **El eucalipto en la repoblación forestal** Roma, 1981. 747 p.

FANTUZZI NETO, H. **Dissolução de constituintes químicos da madeira de *Eucalyptus grandis* durante a polpação Kraft convencional e modificada**. 1997. 83p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

FREDDO, A.; FOELKEL, C.E.B.; FRIZZO, S.M.B.; SILVA, M.C.M. Elementos minerais em madeiras de eucaliptos e acácia negra e sua influência na indústria de celulose e papel. **Ciências Florestais**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 193-209, 1999.

FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO L.G. Madeiras de coníferas e folhosas na fabricação de celulose KRAFT no Brasil e nos Estados Unidos da América, um estudo comparativo. CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 8, 1975 São Paulo, 1975a. **Trabalhos técnicos...** São Paulo: ABCP, p. 15-20.

FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELO, L.E.G. **Tecnologia de celulose e papel**. Piracicaba: CALQ, 1975b. 207p.

FOELKEL, C.E.B. **Estrutura da Madeira**. Belo Oriente: Cenibra. 1977. 84p.

FOELKEL, C.E.B.; ZVINAKEVICIUS, C. Potencialidade de Algumas Espécies Nativas como Fornecedoras de Madeira para Produção de Celulose. **Cenibra Pesquisa**, Belo Oriente, n. 72, p. 1-12, set.1978.

FOELKEL, C.E.B.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: Sua verdadeira utilizada como índice de qualidade da madeira de eucalipto para a produção d celulose. **O papel**, São Paulo, v.53, n.5, p.35-40, Mai.1992.

FLORESTA - Parte 2. Pavilhão do Conhecimento - **Ciência Viva**. Disponível em: <<http://www.pavconhecimento.mct.pt>>. Acesso em: 18 de out. 2005.

GOES, E. **Os Eucalyptus**: Identificação e Monografia de 121 Espécies Existentes em Portugal. Lisboa: Portucel Ed. 1985. 300p.

GOMIDE, J.L. Reação dos carboidratos e dissolução dos constituintes da amadeira, durante polpação alcalina. **O papel**, São Paulo, v.40, n.11, p.119-28, 1979.

GOMIDE, J.L. Antraquinona – Um eficiente aditivo para polpação alcalina de madeiras. **Boletim Técnico SIF**, Viçosa, n. 6, p. 1-27, 1980.

GOMIDE, J.L.; VIVONE, R.R.; MARQUES, A.R. Utilização do processo soda/antraquinona para produção de celulose branqueável de *Eucalyptus* sp. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 1987. São Paulo. 1987, **Anais...** São Paulo ABCP, p. 35-42 1987.

GONÇALVES, C. Fibras de Eucalipto para papel Tisú. **El Papel**, n. 94, p. 42-47, nov. 2001.

JANKOSWSKY, I. P. **Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira.** 1997. 94p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

HERNÁN, C.R. Produccion y evaluación de pulpas celulósicas a partir de diferentes especies de eucalyptus. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3, São Paulo, 1983. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1983. p. 1043-1051.

HISTÓRIA da Finlândia. Disponível em: <<http://www.penedo.com/finlandia.htm>>. Acesso em: 01 de nov. 2005.

IGARTÚA, D.; MONTEOLIVA, S.; NUÑEZ, C. Densidad básica, longitud de fibras y composición química de la madera de *Eucalyptus globulus* en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EN CELULOSA E PAPEL, 3, Cordoba, 2004. **Anais...** Madrid: INIA, 2005. p. 69-74.

KIMO, J.W. **Aspectos químicos da madeira de *Eucalyptus grandis*, W. Hill ex-Maiden, visando a produção de polpa celulósica.** 1986. 45 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1986.

KLARIN A. Corrosividade de licores em digestores contínuos. 2004. **Papel/Tappi Journal**, Atlanta, v. 12, n. 2, p. 12-21, 2004.

KRAMARSKI, S. **Complexação de quelantes para metais de transição em branqueamento de celulose com Peróxido de hidrogênio.** 2004 76p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004.

LANG, G.E.; REINERS, W.A.; SHELITO. G.A. Tissue chemistry of abies balsamea and *Betula papyrifera* var. cordifolia from subalpine forests of northeastern United States. **Canadian Journal of forest Research**. Ottawa, v. 12, p. 310-318, 1982.

LI, J.; GELLERSTEDT, G. On the structural significance of Kappa number measurement. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM WOOD PULPING CHEMICAL, 9; Montreal, 1997. **Proceedings...** Montreal: TAPPI, 1997. p. 56-71.

LOPES, G.A. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith de Itatinga associado aos padrões de casca apresentado pela população.** 2000. 74 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

MARTINS, M.A.L. **Estudo tecnológico da polpação Kraft de *Acacia mearnsii* De Wild.** 1983. 72p. Dissertação (Mestrado Recursos Florestais) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1983.

MANCILLA, H., GARCIA, R. Chemical characterization of Chilean Hardwoods. **Wood Science and Technology**, New York, v. 25, p. 145-149, 1991.

MESSIER C.; PUTTONEN P. Growth, allocation, and morphological responses of *Betula pubescens* and *Betula pendula* to shade in developing scotspine stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 25, n. 4, p. 629-637, 1995.

MILANEZ, A.; BARBOSA, L.C.A. Estocagem da madeira e suas relações com extrativos e pitch. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 38, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2005. p. 20-24.

MIRANDA, M.G.; SILVA, M.L. MACHADO, C.C. LEITE, H.G. Contribuição da casca na composição do custo do transporte da madeira de eucalipto. **Revista árvore**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 145-148. 2002.

MONTALVÃO, FILHO A. **Variabilidade química e das características dimensionais das fibras e polpação kraft, com pré-extração aquosa do *Bambusa vulgaris* SCHRAD EX WENDL VAR. *vulgaris*.** 1983, 57 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa – Viçosa, 1983.

MONTEIRO, L.V. **Anatomia, identificação e usos de trinta e uma espécies de madeiras comercializadas no Estado do Maranhão.** 1996. 200 p. Dissertação (Mestrado Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1996.

MOYA R.R.A. **Variação da anatomia e da densidade básica da madeira de *Gmelina arborea* (Roxb.), em diferentes condições de clima e de manejo na Costa Rica.** 2005. 181 p. Dissertação (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MULLINS, E.J.; McKNIGHT, T.S. **Canadian Woods: their properties and uses.** 3rd ed., Ottawa: Forestry Branch, 1981. 407p.

NETO C.P.; EVTUGUIM, D.V. Componentes macromoleculares das madeiras de *Eucalyptus* e de outras folhosas: estrutura e influência na aptidão ao cozimento e branqueamento. **O papel / Aveiro**. São Paulo, n. 1. p. 17-27, abr. 2005.

NUNES, J.R.S. **Análise do volume e da percentagem de casca em povoamento de eucaliptos de origem híbrida, segundo a idade, local, espécie e método de regeneração.** 1981, 120 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1981.

OLIVEIRA, R.C. **Produção de celulose Kraft a partir de misturas de madeiras de *Pinus strobus charpensis* e *Eucalyptus urophylla* de origem híbrida.** 1979. 177p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1979.

OLIVEIRA, J.T.S. O potencial do eucalipto para a produção de madeira sólida. **Revista da Madeira.** Caxias do Sul, n. 75, p. 1-8. ago, 2003.

PÁSZTOR, Y. P. C. Teste internacional de procedências de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista do Instituto Florestal,** São Paulo, v. 2, n. 2, p. 207-214, dez.1990.

PAULO NETO, F.; NUNES, J.R.S.; CAMPOS, J.C.C. Variação de percentagem da casca ao longo do tronco e entre a árvore de eucalipto. **Revista árvore.** Viçosa, v. 16, n. 3, p. 309-318. 1992.

QUEIROZ, S.C.S.; GOMIDE J.L. Efeito das características anatômicas e químicas na densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **O Papel,** São Paulo, v. 64, n. 5, p. 79-84. jun. 2003.

RESENDE, A.; MAEQUES, A.A.; ARENA, D.B. Fundamentos de branqueamento com pseudo-quelantes, desenvolvimento e aplicação. In: CURSO DE BRANQUEAMENTO DA PASTA CELULÓSICA PAPEL. São Paulo: ABTCP, 1999, p. 70-93.

RESQUIN, F. **Avaliação de procedências de *Eucalyptus globulus* segundo a qualidade de sua madeira para a produção de celulose.** 2002. 93p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

René C.C.; Silva G.M.R. Caracterización de madeira pilpablede *Eucalyptus globulus* Labill. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EM CELULOSA Y PAPEL, 3, Córdoba. **Anais...** Madrid: INIA, 2004 p. 65-68..

ROCHA, M.P. ***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria prima para serrarias.** 2000. 183 p. Dissertação (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.

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

SANTOS, C.R. **Métodos não-convencionais para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa Kraft-AQ.** 2000. 117 p. Dissertação (Mestrado Ciências Florestais). Universidade Superior de Agricultura “Luiz de Queiros”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SANTOS, S.R. **Influência da qualidade da madeira de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do processo Kraft de polpação na qualidade da polpa branqueada.** **Dissertação (Mestrado Ciências Florestais).** 2005. 160 p. Universidade Superior de Agricultura “Luiz de Queiros”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SILVA, D.J. **Impacto na qualidade da madeira na deslignificação do branqueamento e nas propriedades físico-mecânica da polpa de eucalipto.** 1996. 115 p. Tese (Mestrado em Recursos Florestais) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1996.

SILVA JÚNIOR F.G.; MUNER, J.C.G.; VALLE, C.F. Programa de qualidade da madeira da Votorantim Celulose e Papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 28, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1995. p. 515-529.

SILVA JÚNIOR F.G. **Efeito do ritmo de produção sobre a eficiência de processos modificados de polpação para *Eucalyptus grandis* e *Populus tremuloides*.** 2005. 144 p. Tese (Livre Docência). Departamento de Ciências Florestais Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SILVA JÚNIOR F. G. Qualidade da matéria prima – Um tema atual. Coluna/Artigo. **Celulose Online**, 2002/2003. Disponível em:
<<http://www.celuloseonline.com.br/colunista/colunista.asp?IDAssuntoMateria=2&iditem=96>>.
Acesso em: 02 de fev. de 2005.

SILVESTRE, A.J.D.; NETO, C.P.; FREIRE, C.S.R. Componentes lipofílicos da madeira de *Eucalyptus globulus*: composição e comportamento durante a produção de pasta de papel. **O papel/Aveiro**, São Paulo, n. 1, p. 5-16, abr.2005.

SOUZA. V.R.; BARRICHELO L.E.G. Densidade básica da madeira de Eucalipto no sentido longitudinal (Base e Topo). **Informações SQCE**, Piracicaba, v. 17, p. 1-4, 1985.

SOUZA. V.R.; CARPIM, M. A.; BARRICHELO L.E.G. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetros e posição em árvores de *Eucalyptus grande* e *E. salignina*. **IPEF**, Piracicaba, n. 33, p. 65-72, Ago. 1986.

SMOOK, G.A. **Handbook for pulp & paper technologists.** Vancouver: Angus Wide Publications, 1994, 419 p.

SHIMOYAMA, V.R.S. **Variação da Densidade Básica e Características Anatômicas e Químicas da Madeira em *Eucalyptus* spp.** 1990. 93p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

TEIXERA, M. L.; MENDES, L.M. Correlação entre densidade básica e componente químicos da madeira de *Pinus oocarpa*. **O papel**, São Paulo, v. 56, n. 11, 3 p. 1995.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *E. saligna* e *E. grandis*. IPEF, Piracicaba, n. 29, p. 37-45, 1985.

TOMAZELLO FILHO, M. **Variação radial dos constituintes Anatômicos e da Densidade básica da madeira de oito espécies de Eucalipto.** Piracicaba: ESALQ/LCF, 1983. 102 p.

TOMAZELLO FILHO, M. variação da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus globulus*, *E. pelita* e *E. acmenioides*. IPEF, Piracicaba, n. 36, p. 35-42, 1987.

TRUGILHO, F.P.; LIMA, J.T.; et al. Influencia da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

WHER, T. R. **Variação nas características da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden e suas influências na qualidade de cavacos em cozimentos Kraft.** 1991. 84p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

APÊNDICES

Apêndice A - Método utilizado para determinar Extrativos totais, lignina e holocelulose.

- 1- Pesar equivalente a 2 g absolutamente seco de serragem e transferir para saquinho de papel filtro.
- 2- Colocar a amostra no corpo do extrator.
- 3- Fazer a extração com álcool-tolueno (1:2) e álcool 96 GL, durante 8 horas em cada solvente, deixando secar ao ar após cada extração.
- 4- Ligar o banho-maria e mantê-lo em ebulição.
- 5- Transferir toda serragem do saquinho para elermneyer de 250 ml.
- 6- Adicionar 100 ml de água destilada e colocar o elernmeyer em banho-maria (que já deverá estar em ebulição).
- 7- Agitar a cada 15 minutos.
- 8- Após 3 horas filtrar através de cadinho de vidro sinterizado tarado, transferindo toda serragem do elernmyer para o cadinho.
- 9- Lavar de forma descontínua o cadinho com 250 ml de água quente.
- 10- Mantê-lo na estufa até peso constante.
- 11- Retirar o cadinho da estufa, esperar esfriar em dessecador e pesar.
- 12- Calcular a porcentagem do “Extrato Total” através da expressão:

$$ET (\%) = (2 \times \text{peso seco serragem}) \times 100$$
- 13- Utilizando a mesma serragem do cadinho transferi-la para um elermnyer de 125 ml.
- 14- Resfriar o H₂SO₄ 72% a 10-25°C.
- 15- Adicionar 3 ml de H₂SO₄ 72% para o elermneyer e mantê-lo no banho-maria a 30°C, por um período de 1 hora homogeneizando a cada 15 minutos. Após esse período adicionou-se 84 ml de água.
- 16- Colocar as amostras em autoclave a 118°C (27PSI), por o período de 1 hora. Após esse período as amostras foram filtradas em cadinhos de vidro sinterizados.
- 17- Lavar a o extrato do cadinho com 700 ml de água quente. Colocar o cadinho em estufa até peso constante.
- 18- Retirar o cadinho da estufa esperar esfriar em dessecador e pesar.
- 19- Calcular a porcentagem de lignina solúvel através da expressão:

$$\text{Lignina solúvel (\%)} = \left[\frac{4.53 \times (L.215 - \text{branco}) - (L.280 - \text{branco})}{(300 \times PS) \times 100} \right]$$

21- Calcular a porcentagem de lignina insolúvel através da expressão:

$$\text{Lignina insolúvel (\%)} = \left[\frac{(P_{\text{seco}} - \text{lignina.})}{(PS)} \right] \times 100$$

20- Calcular a porcentagem de holocelulose através da expressão:

$$H (\%) = 100 - (\text{teor de lignina} + \text{teor de extrativos totais})$$

Apêndice B - Tabela com a representação dos diâmetros dos discos de madeiras das espécies de *E. grandis* x *E. urophylla* 1, 2 e 3, *Betula pendula* e *E. globulus*

Matéria-prima	Altura	Diâmetro com casca	Diâmetro sem casca
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 1	Base	23,74	16,30
	25%	18,38	15,02
	50%	14,82	11,56
	75%	13,19	8,88
	100%	9,98	4,92
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 2	Base	22,28	12,34
	25%	17,10	9,44
	50%	12,67	9,37
	75%	12,85	7,72
	100%	10,30	6,44
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> 3	Base	26,86	15,14
	25%	20,97	12,70
	50%	16,26	11,83
	75%	14,14	8,38
	100%	10,66	6,32
<i>Betula pendula</i>	Base	22,99	21,71
	25%	17,72	17,08
	50%	15,71	15,12
	75%	11,78	11,32
	100%	7,17	6,68
<i>E. globulus</i>	Base	19,21	17,12
	25%	14,82	13,83
	50%	12,26	11,89
	75%	9,35	8,84
	100%	6,12	5,66

Apêndice C - Análise da variância e teste F para resultados de densidade básica das espécies de *E. grandis* x *E. urophylla* 1, 2 e 3, *Betula pendula* e *E. globulus*

GL = grau de liberdade SQ = soma dos quadrados QM = quadrado médio P= probabilidade

Análise de variância para densidade básica total.

Parâmetros	GL – DB_{total}	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	0.07967584	0.01991896	67,16*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para densidade básica da madeira.

Parâmetros	GL – DB_{madeira}	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	0.10264136	0.02566034	75,18*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para densidade básica da casca.

Parâmetros	GL – DB_{casca}	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	0.14362736	0.03590684	169.26*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para casca em peso.

Parâmetros	GL – Casca em peso	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	104.5642640	26.1410660	27.23*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para casca em volume.

Parâmetros	GL – Casca em volume	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	60.19565600	15.04891400	25.59*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para índice de heterogeneidade.

Parâmetros	GL – índice heterogeneidade	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	0,2167189	0,05417974	1,89	0,1515
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Apêndice D - Análise da variância e teste F para resultados de características químicas das espécies de *E. grandis* x *E. urophylla* 1, 2 e 3, *Betula pendula* e *E. globulus*

GL = grau de liberdade **SQ = soma dos quadrados** **QM = quadrado médio** **P= probabilidade**

Análise de variância para extrativos totais.

Parâmetros	GL – extrativos totais	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	67.84725600	16.96181400	184.32*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para lignina solúvel.

Parâmetros	GL – lignina solúvel	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	16.26480000	4.06620000	13.94*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para lignina insolúvel.

Parâmetros	GL – lignina insolúvel	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	431.2137040	107.8034260	70.91*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para lignina total.

Parâmetros	GL – lignina total	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	370.0283760	92.5070940	50.08*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para holocelulose.

Parâmetros	GL – holocelulose	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	250.3114160	62.5778540	63.75*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Apêndice E - Análise da variância e teste F para resultados de compostos inorgânicos das espécies de *E. grandis* x *E. urophylla* 1, 2 e 3, *Betula pendula* e *E. globulus*.

GL = grau de liberdade **SQ = soma dos quadrados** **QM = quadrado médio** **P= probabilidade**

Análise de variância para Cálcio.

Parâmetros	GL – Ca	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	0.33924304	0.08481076	11.50	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para Magnésio.

Parâmetros	GL – Mg	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	0.03428320	0.00857080	25.63	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para Cobre.

Parâmetros	GL – Cu	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	23.10000000	5.77500000	8.02	0.0005
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para Ferro.

Parâmetros	GL – Fe	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	26495.90000	6623.97500	1.96	0.1398
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para Manganês.

Parâmetros	GL – Mn	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	41424.40000	10356.10000	108.04	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Apêndice F - Análise da variância e teste F para resultados de diâmetro de fibras das espécies de *E. grandis* x *E. urophylla* 1, 2 e 3, *Betula pendula* e *E. globulus*.

GL = grau de liberdade **SQ = soma dos quadrados** **QM = quadrado médio** **P= probabilidade**

Análise de variância para Comprimento da fibra.

Parâmetros	GL – Mn	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	0.20458400	0.05114600	20.52*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para diâmetro do lume.

Parâmetros	GL – Mn	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	93.36160000	23.34040000	29.28*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para espessura da parede.

Parâmetros	GL – Mn	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	8.53177600	2.13294400	14.57*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para fração parede.

Parâmetros	GL – Mn	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	554.5365440	138.6341360	21.06*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para coeficiente de flexibilidade.

Parâmetros	GL – Mn	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	541.9245760	135.4811440	21.32*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análise de variância para índice de Runkel.

Parâmetros	GL – Mn	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	0.63064856	0.63064856	17.51*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Apêndice G - Análise da variância e teste F para resultados de polpação das espécies de *E. grandis* x *E. urophylla* 1, 2 e 3, *Betula pendula* e *E. globulus*.

GL = grau de liberdade SQ = soma dos quadrados QM = quadrado médio P= probabilidade

Apresentação do número kappa obtido.

Espécies	AA %	Kappa
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 1	21,9	16,73 a
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 2	18,7	17,02 a
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> – 3	21,9	16,70 a
<i>Betula pendula</i>	22,1	16,92 a
<i>E. globulus</i>	18,1	17,20 a

Análises estatísticas de rendimento bruto.

Parâmetros	GL	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	145.9253840	36.4813460	34.87*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análises estatísticas de rendimento depurado.

Parâmetros	GL	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	145,9253840	36,4813460	34,87*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análises estatísticas de teor de rejeito.

Parâmetros	GL	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	1.26070400	0.31517600	7.40	0.0008
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análises estatísticas do número kappa.

Parâmetros	GL	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	0.74105600	0.18526400	2.53	0.0730
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análises estatísticas dos ácidos hexenurônicos.

Parâmetros	GL	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	1047.356360	261.839090	15.17	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análises estatísticas de viscosidade.

Parâmetros	GL	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	6360801.69	1590200.42	1.01	0.4241
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análises estatísticas de pH do licor residual.

Parâmetros	GL	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	1.18898400	0.29724600	2.86	0.0502
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análises estatísticas de teor de sólidos do licor residual.

Parâmetros	GL	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	16.34830400	4.08707600	7.99	0.0005
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análises estatísticas de álcali ativo do licor residual.

Parâmetros	GL	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	217.7923600	54.4480900	15.81*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade

Análises estatísticas de álcali efetivo do licor residual.

Parâmetros	GL	SQ	QM	F	Pr
Matéria-prima	4				
Resíduo	20	242.8328000	60.7082000	25.71*	<.0001
Total	24				

*significativo ao nível de 5% de probabilidade