



UFSM

Dissertação de Mestrado

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE LIGNINA DA MADEIRA DE
Eucalyptus globulus NA PRODUÇÃO E NA QUALIDADE DA
CELULOSE KRAFT**

Claudia Adriana Broglio da Rosa

PPGEF

Santa Maria, RS, Brasil

2003

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE LIGNINA DA MADEIRA DE
Eucalyptus globulus NA PRODUÇÃO E NA QUALIDADE DA
CELULOSE KRAFT**

por

Claudia Adriana Broglio da Rosa

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal,
Área de Concentração em Tecnologia de Produtos Florestais,
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal.

PPGEF

Santa Maria, RS, Brasil

2003

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE LIGNINA DA MADEIRA
DE *Eucalyptus globulus* NA PRODUÇÃO E NA QUALIDADE
DA CELULOSE KRAFT**

elaborada por
Claudia Adriana Broglio da Rosa

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

Celso Edmundo Bochetti Foelkel
(Presidente/Orientador)

Clóvis Roberto Hanslein

Martha Bohrer Adaime

Santa Maria, 31 de janeiro de 2003.

*À Sonia Frizzo e Celso Foelkel,
ofereço com carinho.*

À minha família, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, especialmente, aos meus maiores incentivadores Eng. Agr. Dr. Celso Foelkel e Eng. Ftal. MSc. Sonia Frizzo, os quais me ensinaram tudo que sei sobre celulose e papel e acreditaram no meu trabalho, e ao meu colega e amigo Eng. Ftal. MSc. Gabriel Valim Cardoso, pelos anos de companheirismo, estudo e trabalho, pelos momentos em que nada parecia dar certo, mas um sempre incentivava o outro, pelo carinho e confiança que sempre teve por mim.

À minha querida família, meu porto seguro nas horas difíceis.

Aos colegas e amigos do PPGEF pelos bons momentos compartilhados, em especial, Merielen Lopes, Luciana Esber, Edison Cantarelli e Rodrigo de Mattos.

Aos amigos do laboratório de química da madeira, onde tudo começou.

Aos colegas dos laboratórios industriais da Klabin Celulose Riocell, pelo apoio e incentivo nos momentos importantes.

Aos professores e as secretárias do curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Ao Eng. Ftal MSc. Teotônio F. de Assis e ao Farmacêutico MSc. Edvins Ratnieks por acreditarem na pesquisa para o desenvolvimento do setor florestal e papeleiro e confiar neste trabalho, disponibilizando material e infra-estrutura indispensáveis para sua realização.

Às bibliotecárias da Biblioteca da Klabin Celulose Riocell.

À empresa SERTEF que trabalhou na coleta do material.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela oportunidade de realizar o curso de Pós-Graduação.

À Klabin Celulose Riocell por dispor de seus laboratórios e pelo auxílio financeiro concedido que permitiu a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo auxílio financeiro a este estudo.

A todos que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para realização deste estudo.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE QUADROS.....	xv
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS OU SÍMBOLOS.....	xvi
LISTA DE APÊNDICES.....	xvii
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xx
 1 INTRODUÇÃO.....	 1
 2 REVISÃO DE LITERATURA.....	 3
2.1 Florestas de <i>Eucalyptus globulus</i>.....	3
2.2 Celulose kraft de <i>Eucalyptus globulus</i>.....	8
2.3 Propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira.....	10
2.3.1 Densidade básica.....	12
2.3.2 Lignina.....	13
2.3.3 Extrativos.....	16
2.3.4 Cinzas.....	18
2.4 Refino da polpa.....	19

	Página
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 Espécie estudada.....	23
3.2 Localização da área e época de coleta das amostras.....	23
3.3 Caracterização da área de coleta das amostras.....	24
3.4 Amostragem no campo.....	24
3.4.1 Retirada dos discos.....	25
3.4.2 Obtenção das cunhas para determinação da densidade básica.....	27
3.4.3 Obtenção da serragem para as análises químicas.....	27
3.4.4 Obtenção dos cavacos para os cozimentos.....	28
3.5 Local das análises.....	29
3.6 Determinações dendrométricas e densidade básica.....	29
3.6.1 Características dendrométricas.....	29
3.6.2 Densidade básica.....	30
3.7 Análises químicas.....	31
3.7.1 Determinação de extrativos.....	31
3.7.2 Determinação da lignina.....	32
3.7.3 Determinação da holocelulose.....	33
3.7.4 Determinação de cinzas.....	33
3.8 Cozimentos para produção de celulose.....	34
3.8.1 Cozimentos experimentais preliminares.....	35
3.8.2 Condições de controle dos cozimentos do estudo.....	35
3.8.3 Análise do licor negro residual.....	36
3.8.4 Lavagem, depuração da polpa e cálculo dos rendimentos.....	37
3.8.5 Sólidos secos dissolvidos calculados no licor negro residual.....	37
3.9 Análises realizadas nas polpas.....	38

	Página
3.9.1 Número kappa.....	38
3.9.2 Viscosidade intrínseca.....	39
3.9.3 Solubilidade em NaOH _{5%}	39
3.9.4 Alvura.....	40
3.10 Refino.....	40
3.11 Formação de folhas para ensaios físico-mecânicos.....	41
3.12 Testes físico-mecânicos.....	41
 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	 43
4.1 Resultados dendrométricos.....	44
4.2 Densidade básica.....	50
4.3 Composição química.....	55
4.3.1 Extrativos.....	55
4.3.2 Lignina.....	57
4.3.3 Holocelulose.....	59
4.3.4 Cinzas.....	60
4.4 Relação entre densidade básica e composição química da madeira.....	62
4.5 Produção de celulose Kraft.....	63
4.5.1 Rendimentos e teores de rejeitos.....	68
4.5.2 Consumo de álcali efetivo no cozimento Kraft.....	71
4.5.3 Geração de sólidos secos dissolvidos.....	73
4.5.4 Número kappa das celuloses.....	76
4.5.5 Alvura das celuloses não branqueadas.....	77
4.5.6 Viscosidade intrínseca das celuloses.....	78

	Página
4.5.7 Solubilidade em NaOH _{5%} das celuloses (S _{5%}).....	80
4.6 Refino das polpas não-branqueadas.....	81
4.6.1 Energia de refino (número de revoluções do PFI).....	82
4.6.2 Propriedades físico-mecânicas das polpas refinadas.....	84
4.6.2.1 Resistência à tração.....	85
4.6.2.2 Resistência ao estouro.....	87
4.6.2.3 Resistência ao rasgo.....	89
4.6.2.4 Volume específico aparente.....	90
4.6.2.5 Resistência ao ar Gurley.....	92
 5 CONCLUSÕES.....	 94
 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	 98
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
 APÊNDICES.....	 114

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 01 – Tendência de variação das características da madeira de <i>Eucalyptus globulus</i> da base para o topo.....	9
TABELA 02 – Resultados dendrométricos analisados para as 50 árvores estudadas.....	47
TABELA 03 – Resultados dendrométricos analisados para as seis árvores escolhidas.....	49
TABELA 04 – Densidade básica média para as 50 árvores de <i>Eucalyptus globulus</i>	50
TABELA 05 –Valores médios para densidade básica, volume de madeira e peso seco sem casca para as seis árvores.....	54
TABELA 06 – Teor médio de extrativos para as 50 árvores.....	56
TABELA 07 – Teor de lignina para as 50 árvores.....	58
TABELA 08 – Teor de holocelulose presente nas amostras.....	60
TABELA 09 – Teor médio de cinzas para as seis árvores.....	61
TABELA 10 – Resultados da deslignificação kraft das madeiras com alto teor de lignina.....	64
TABELA 11 – Resultados da deslignificação kraft das madeiras com alto teor de lignina.....	65
TABELA 12 – Resultados da deslignificação kraft das madeiras com baixo teor de lignina.....	66

	Página
TABELA 13 – Resultados da deslignificação kraft das madeiras com baixo teor de lignina.....	67
TABELA 14 – Energia necessária para refinar as polpas a 25 e 30 °SR.....	83

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 01 – Variação longitudinal da densidade básica média, por posições, das 50 árvores estudadas.....	52
FIGURA 02 – Relação entre densidade básica e lignina Klason da madeira.....	62
FIGURA 03 – Influência do teor de lignina da madeira sobre o rendimento bruto.....	69
FIGURA 04 – Influência do teor de lignina da madeira sobre o rendimento depurado.....	70
FIGURA 05 – Relação entre teor de rejeitos e teor de lignina da madeira.....	71
FIGURA 06 – Relação entre álcali efetivo consumido e teor de lignina da madeira.....	73
FIGURA 07 – Relação entre sólidos gerados e teor de lignina da madeira.....	75
FIGURA 08 – Relação entre número kappa e teor de lignina da madeira.....	76
FIGURA 09 – Relação entre alvura e teor de lignina da madeira.....	78
FIGURA 10 – Relação entre viscosidade intrínseca e teor de lignina da madeira.....	79

	Página
FIGURA 11 – Relação entre $S_{5\%}$ e teor de lignina da madeira.....	81
FIGURA 12 – Relação entre índice de tração e grau Schopper Riegler.....	86
FIGURA 13 – Relação entre resistência ao estouro e grau Schopper Riegler.....	88
FIGURA 14 – Relação entre índice de rasgo e grau Schopper Riegler.....	90
FIGURA 15 – Relação entre volume específico aparente e grau Schopper Riegler.....	92
FIGURA 16 – Relação entre resistência ao ar e grau Schopper Riegler.....	93

LISTA DE QUADROS

	Página
QUADRO 01 – Condições empregadas nos cozimentos.....	36
QUADRO 02 – Propriedades testadas nas polpas refinadas.....	42
QUADRO 03 – Análise de variância da densidade básica das 50 árvores.....	51
QUADRO 04 – Análise de variância do teor de extrativos das 50 árvores.....	56
QUADRO 05 – Análise de variância do teor de lignina Klason das 50 árvores.....	58
QUADRO 06 – Valores médios a 25 e 30°SR das propriedades físico- mecânicas das celuloses obtidas de madeiras de alto e baixo teor de lignina.....	84
QUADRO 07 – Resultados das análises da variância para propriedades físico-mecânicas das polpas.....	85

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS OU SÍMBOLOS

%	porcentagem
°C	grau Celsius
°	grau
°SR	grau Schopper-Riegler
'	minuto
Cfa	
cm	centímetro
cm ³ /g	centímetro cúbico por grama
DAP	diâmetro a altura do peito
Db	densidade básica (g/cm ³)
g/cm ³	grama por centímetro cúbico
Fc	valor de F calculado
F _{5%}	valor de F tabelado
FV	fonte de variação
g	grama
GL	grau de liberdade
g/m ²	grama por metro quadrado
ha	hectare
ISO	International Organization for Standardization
km	kilômetro
kPa.m ² /g	kilopascal metro quadrado por grama
l/kg	litro por kilograma
Labill.	Labillardière
mm	milímetro
m ³	metro cúbico
mN.m ² /g	miliNewton metro quadrado por grama
N.m/g	Newton metro por grama
PFI	
QM	quadrado médio
s/100 cm ³	segundo por cem centímetro cúbico
SQ	soma de quadrado
t	tonelada
TAPPI	Technical Association of Pulp and Paper Industry

LISTA DE APÊNDICES

	Página
APÊNDICE A – Levantamento dendrométrico para 50 árvores de <i>Eucalyptus globulus</i>	115
APÊNDICE B – Composição química da madeira das 50 árvores de <i>Eucalyptus globulus</i>	121
APÊNDICE C – Análise da variância para cozimentos das madeiras.....	123
APÊNDICE D – Resultados das propriedades físico-mecânicas das polpas provenientes das madeiras com nível alto de lignina Klason.....	126
APÊNDICE E – Resultados das propriedades físico-mecânicas das polpas provenientes das madeiras com nível baixo de lignina Klason.....	127
APÊNDICE F – Análises da variância para as propriedades físico-mecânicas.....	128

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

INFLUÊNCIA DO TEOR DE LIGNINA DA MADEIRA DE *Eucalyptus globulus* NA PRODUÇÃO E NA QUALIDADE DA CELULOSE KRAFT

Autora: Claudia Adriana Broglio da Rosa

Orientador: Celso Edmundo Bochetti Foelkel

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 31 de janeiro de 2003.

O *Eucalyptus globulus* há tempos é destaque em outros países, surgindo como importante espécie para produção de celulose e papel em Portugal, Espanha, Chile, etc. No Brasil, a sua implantação na região sul, possibilitou o surgimento de mais uma fonte de madeira com qualidade e rendimento diferenciados. Algumas propriedades da madeira do *Eucalyptus globulus* constituem-se em características de impacto sobre o custo e sobre a produtividade para a indústria de polpa kraft. Os teores de lignina e extrativos são considerados como características químicas fundamentais. A escolha da espécie *E. globulus* para este estudo foi devido a: menor teor de lignina que esta espécie apresenta em comparação às espécies tradicionalmente usadas no Brasil; boas características que apresenta o papel dela resultante; adaptação desta espécie às condições climáticas do sul do Brasil. O objetivo foi estudar a influência do teor de lignina Klason da madeira, em duas diferentes faixas de conteúdo, na produção de celulose kraft de madeiras de *E. globulus* e seus efeitos no processo de cozimento da madeira e de refino das celuloses obtidas. Nos resultados obtidos, as madeiras foram estatisticamente diferentes quanto ao teor de lignina, o que permitiu selecionar, entre as 50 árvores estudadas, as três árvores com menor teor de lignina Klason (média de 20,5 %) e as três com maior teor de lignina em suas madeiras (média de 23,0 %). A faixa de densidade básica encontrada para as seis árvores selecionadas foi restrita e estreita, com média de 0,533 g/cm³, eliminando o efeito dessa importante variável sobre a expressão e comparação dos resultados. As polpas resultantes dos

cozimentos kraft das madeiras que apresentaram baixo teor de lignina tiveram os maiores rendimentos e maiores viscosidades, os menores consumos de álcali efetivo e menores gerações de sólidos secos dissolvidos no licor negro. Nos refinis, o teor de lignina, e possivelmente a viscosidade das celuloses dos dois tipos, influenciaram significativamente no gasto de energia de refino. A energia no PFI necessária para refinar as polpas com baixo teor de lignina foi maior. Observou-se que as polpas resultantes da deslignificação kraft das madeiras com baixo teor de lignina apresentaram os melhores resultados para resistência à tração, ao estouro e ao rasgo. A resistência ao ar dessas celuloses foi também menor, indicando maior porosidade das folhas. Pequena influência foi notada para volume específico aparente. Para as resistências à tração, ao estouro e ao rasgo os diferentes teores de lignina exerceram maior influência a partir de 30°SR. As diferenças aumentaram na medida que aumentava o grau de refino. Conclusivamente, o menor teor de lignina da madeira em árvores de *E. globulus* afeta não somente a facilidade de cozimento e o rendimento de conversão da madeira à celulose, mas também as qualidades físico-mecânicas das polpas obtidas pela maior capacidade de ligação das fibras e pela maior viscosidade encontrada para mesmos números kappa.

ABSTRACT

Master's Dissertation

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

THE INFLUENCE OF *Eucalyptus globulus* WOOD LIGNIN CONTENT IN THE PRODUCTION AND IN THE QUALITY OF KRAFT PULP

(INFLUÊNCIA DO TEOR DE LIGNINA DA MADEIRA DE *Eucalyptus globulus* NA PRODUÇÃO E NA QUALIDADE DA CELULOSE KRAFT)

Author: Claudia Adriana Broglio da Rosa

Adviser: Celso Edmundo Bochetti Foelkel

Date and place of defense: Santa Maria, January 31th, 2003.

Eucalyptus globulus has been an outstanding specie in several countries, for paper and pulp manufacturing: Portugal, Spain, Chile, etc. In Brazil, its introduction in the south enabled the emergence of a source of differentiated wood. Several of the *Eucalyptus globulus* wood quality features have positive impacts on costs and productivity. Lignin and extractives are of vital importance. This study has selected *Eucalyptus globulus* as source of wood due to the lower wood lignin content that this species has in comparison to other commercial traditionally used in Brazil, and the good characteristics that its paper presents. The work had as main objective to evaluate the influence of wood Klason lignin content in the production of kraft pulps, both in the wood cooking and in the unbleached pulp refining. The achieved results showed that the woods differed statistically, which allowed the selection of 6 trees among 50 trees: three trees with low lignin content were selected (average of 20,5 %) and three trees with higher lignin contents (average of 23,0 %). The wood density of these selected trees had an average of 0,533 g/cm³. The 6 selected trees for the pulping studies had similar wood basic density to avoid the influence of this property in the results. The pulps obtained from the low lignin content wood had better incomes and viscosities, the lower consumption of effective alkali and lower generation of dry solids in the black liquor. In the refinings the original wood lignin content has influenced the pulp behavior along the refining. The unbleached pulps were tested according to standard handsheet testing procedures. The pulps obtained from low lignin wood

were proved to be superior in terms of bonding ability, what brought as consequence, better tensile, burst and tear strengths. The air resistance of these pulps was lower too, indicating a higher porosity of the sheets. It was noticed that the differences in both types of pulps was more pronounced after 30°SR. The effect on bulk wasn't so important, but porosity was better in the pulps manufactured with the low lignin content wood. As a conclusion, the decrease in the lignin content in the *Eucalyptus globulus* wood has effects not only in the kraft pulping performance, but also in the PFI mill refining and handsheet testing. Lower lignin in wood leads to better fiber bonding and higher pulp intrinsic viscosity at the same kappa number level.

1. INTRODUÇÃO

O crescente avanço global tem gerado, proporcionalmente, o aumento da competitividade e da busca constante pela perfeição no produto final: o papel ideal, com a finalidade desejada. A soma entre tecnologia moderna e matéria-prima de qualidade tem possibilitado o crescimento do mercado papelheiro. Juntamente com a expansão das indústrias, todos os nichos envolvidos também cresceram. Nunca se plantou tantas florestas que fornecessem madeira com tanta qualidade. Com a clonagem de matrizes que beiram à perfeição, devido ao cruzamento genético de indivíduos com características destacadas, é possível encontrar povoamentos perfeitamente manejados para atender às especificações de qualidade florestal e da madeira produzida.

Atualmente, não apenas o processo de obtenção da celulose é fundamental, mas também a união entre processo industrial e matéria-prima, buscando relações de qualidade entre matéria-prima fibrosa e produto final. Isso fez com que a década de 90 fosse marcada por avanços significativos na tecnologia florestal.

O estudo das propriedades e características da madeira de *Eucalyptus* tem destacado as qualidades encontradas nas espécies mais importantes do setor papelheiro. O *Eucalyptus globulus*, há tempos, é destaque em outros países como sendo a principal espécie para este fim. No Brasil, a sua implantação na região Sul possibilitou o surgimento de mais uma fonte de fibras com qualidades diferenciadas. Suas características são dadas como excelentes, e isso favorece o aperfeiçoamento dos programas de melhoramento genético do gênero *Eucalyptus*.

As propriedades da madeira, como densidade básica, lignina, celulose, hemicelulose e extrativos constituem características de relevância sobre o custo e a produtividade da indústria de polpa kraft de *Eucalyptus*. Os teores de lignina e extrativos são considerados como características químicas fundamentais, uma vez que influenciam diretamente o consumo de álcali, rendimento da deslignificação e o potencial de produção industrial (Santos, 2000).

A escolha da espécie *Eucalyptus globulus* para a realização deste estudo foi devido ao menor teor de lignina que essa espécie tem apresentado em relação àquelas tradicionalmente usadas. Também devido às boas características que o papel desta resulta e à adaptação da mesma às condições climáticas do sul do Brasil.

O presente trabalho teve por objetivo principal estudar a influência do teor de lignina Klason da madeira, em duas diferentes faixas de concentração, na produção de celulose kraft de *Eucalyptus globulus*, subespécie *globulus* Labill., e seus efeitos no processo de deslignificação da madeira e de refino das celuloses obtidas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Florestas de *Eucalyptus globulus*

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae (subfamília Leptospermoidae). Através de características fenológicas, como tipo de inflorescência, botão floral e frutos, são conhecidas mais de 650 diferentes espécies de eucaliptos.

Os eucaliptos são considerados árvores australianas. A maior parte das espécies e subespécies é endêmica do continente australiano e de ilhas adjacentes. Entretanto, algumas espécies ocorrem naturalmente em Papua Nova Guiné, ao norte da Austrália, e outras ocorrem somente na parte oeste do arquipélago da Indonésia, como Timor, Sonda Flores e Wetar, e somente uma espécie ocorre naturalmente nas Filipinas (Schumacher, 1995).

A utilização do eucalipto na produção de celulose e papel, a partir dos anos 40, transformou essa árvore em uma das principais matérias-primas das indústrias do setor, em nível mundial. O eucalipto representa 69% da área reflorestada do Brasil, cerca de três milhões de hectares. Atualmente, o Brasil situa-se entre os três maiores fornecedores mundiais de papel para impressão. É o segundo maior exportador de celulose de fibra curta e o primeiro no caso de fibras produzidas a partir do eucalipto, detendo cerca da metade das vendas deste produto (González et al., 2002).

A principal vantagem competitiva do Brasil é a sua tecnologia florestal, baseada em programas de melhoramento genético e de

multiplicação clonal do eucalipto desenvolvidos ao longo dos últimos 30 anos. Todo esse ganho de conhecimento científico e tecnológico gerou um ganho na produtividade, passando de 20 m³/ha/ano (8 árvores/m³), no início da década de 70, para 50 m³/ha/ano (3,1 árvores/m³), em 1999 (González et al., 2002).

A bibliografia revisada, no geral, é coincidente em indicar as vantagens da produção de celulose para papel de fibra curta a partir de espécies do gênero *Eucalyptus* (Cáceres, 1983). Também é notória a diferença existente entre espécies do ponto de vista da aptidão de sua madeira na produção de polpa para papel. Deve-se levar em conta que esse gênero é composto por mais de 600 espécies, que crescem nas condições mais diversas. Este fenômeno é mais importante ainda no caso do cruzamento para a obtenção de híbridos que combinam características das espécies originárias. Isto, sem dúvida, obriga à realização de estudos para encontrar materiais genéticos que maximizem as características desejadas com este fim (Gonzaga, 1983).

Com base nisso, muitos estudos têm sido desenvolvidos e demonstrado as vantagens da produção de pasta para papel com espécies de *Eucalyptus*, mesmo existindo uma grande variabilidade quanto ao comportamento das mesmas para tais usos (Foelkel et al. 1992). Entre tantas espécies avaliadas, a madeira de *Eucalyptus globulus* aparece como uma das melhores do ponto de vista do processo de obtenção de celulose (Cáceres, 1983 e Valente et al., 1992).

O *Eucalyptus globulus* foi a primeira espécie a ser introduzida na Argentina e se difundiu rapidamente na província de Buenos Aires,

especialmente no litoral atlântico, onde encontrou condições favoráveis devido a seu clima suave.

A migração para o sul do Brasil, especialmente para o Rio Grande do Sul, foi, com isso, facilitada. Os eucaliptos são essências de rápido crescimento, que variam segundo a espécie, local e cuidados oferecidos à plantação. Nas províncias de Buenos Aires e Santa Fé, são comuns crescimentos de 25-30 m³/ha/ano, com *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. viminalis*, *E. globulus*, em rotações de 10-15 anos (Repetti, 1992).

Peña & Pérez (1999) citam que o *E. globulus* pertence ao grupo “Southern Blue Gum”, assim como o *E. nitens*. Este tipo de árvore cresce bem em clima temperado frio, com precipitações de 500 a 1500 milímetros por ano, em solos de pH 5,0, aproximadamente. Uma característica própria das espécies deste grupo é o seu rápido crescimento e sua facilidade para rebrotar, o que as tornam interessantes para uma produção de madeira para celulose em rotações curtas. No Chile, o *E. globulus* é uma das espécies florestais de maior importância econômica, por seu rápido crescimento, sua adaptação a uma ampla faixa de condições climáticas e sua aptidão celulósica.

No Brasil, existem plantios comerciais de *E. globulus*, mais especificamente no Rio Grande do Sul, devido à difícil adaptabilidade dessa espécie aos climas tropicais.

Tal espécie é própria de regiões frescas, próximas à costa, podendo ser prejudicada se submetida a temperaturas muito elevadas, prefere solos arenosos, com subsolo argiloso e boa drenagem, pois não tolera umidade excessiva. É sensível a frios rigorosos, com temperaturas abaixo de -4°C. Tem grande afinidade botânica com *E. maidennii* e *E. bicostata*. Seu

crescimento é variável, de acordo com as condições de solo e clima os quais é submetida, podendo chegar a produzir 40 m³/ha/ano (Repetti, 1992).

Em virtude da sua origem biológica, a madeira apresenta uma grande variabilidade com relação às características químicas e morfológicas, o que repercute tanto na produtividade florestal, como na qualidade e produtividade da pasta para papel, sendo esta última uma das suas maiores aplicações. A madeira do *Eucalyptus globulus* segue esse comportamento, e as diferenças verificam-se tanto entre indivíduos, quanto em uma mesma árvore (radial e longitudinalmente). As causas desta variabilidade são inúmeras, destacando-se a idade, a origem genética, o modelo de crescimento da árvore, as condições ambientais e nutricionais e as práticas silviculturais (Carvalho et al., 1998).

O *Eucalyptus globulus* tem-se mostrado uma espécie de rápido crescimento, de alta produtividade e que cresce bem em variadas condições edafoclimáticas. Sua capacidade de produção elevada é o fator mais importante que levou as indústrias de celulose de diversos países a optar por essa espécie. Ela suporta três ou mais conduções de brotação e, em solos de boa fertilidade, pode atingir uma produção anual entre 30 e 40 m³ por hectare (Kardell et al. *apud* Schumacher, 1995, p.15).

No Brasil, desde as primeiras introduções de *Eucalyptus globulus* no Estado do Rio Grande do Sul, observou-se um bom crescimento, graças às condições climáticas mais favoráveis ao seu cultivo, as quais não são encontradas nas regiões de clima quente. Nesta região, vem sendo crescente o plantio dessa espécie em grande escala para fins industriais, bem como sua utilização em programas de melhoramento genético, via

hibridização com espécies mais produtivas em termos de crescimento, objetivando a incorporação de características de qualidade da matéria-prima para a celulose (Assis & Shimizu, *apud* Del Ponte et al., 2001, p.2).

Em estudo realizado por Fonseca et al. (1996), estes concluíram que a necessidade de seleção da árvore industrial é uma realidade e que o nível de competitividade de cada empresa dependerá, significativamente, dos esforços e recursos despendidos para seleção e, ou, geração de árvores cada vez melhores em termos industriais e ecológicos. O rendimento de polpação, o crescimento volumétrico e a densidade básica da madeira são as principais características para seleção da árvore industrial, quanto à capacidade e ao custo de produção da indústria.

A variabilidade no crescimento da árvore e de algumas propriedades da madeira pode ser vista no *Eucalyptus globulus*, inclusive diferenças na composição química e, principalmente, no conteúdo de celulose. Juntamente com o crescimento e com a densidade básica da madeira, os conteúdos de celulose e lignina podem ser sugeridos como um parâmetro para seleção de árvore desta espécie, desde que sua correlação com a produção de polpa e seu aumento não sejam prejudiciais às propriedades da polpa (Dillner et al. *apud* Pereira, 1988, p.83).

2.2. Celulose kraft de *Eucalyptus globulus*

Valente et al. (1992) citam que o *Eucalyptus globulus* é uma das melhores espécies para proporcionar um grande aumento da qualidade dos papéis branqueados. A deslignificação e separação das fibras, bem como o branqueamento, podem ser facilmente conseguidos, aumentando o rendimento e diminuindo o consumo de químicos. Para a produção de papel com boas qualidades óticas e adequadas propriedades estruturais e de resistência, a diminuição do consumo de energia é necessária no desenvolvimento de uma boa ligação fibra a fibra.

Cardoso et al. (2002) realizaram a otimização do cozimento kraft de madeiras de *Eucalyptus globulus*, subespécie *globulus*, aos oito anos, com dois níveis de lignina, alto (23,02%) e baixo (20,53%). Para número kappa 18, as polpas obtidas da madeira com baixo teor de lignina apresentaram rendimento depurado de 53,4% e viscosidade intrínseca de 1181 cm³/g. Já para madeiras com alto teor de lignina, a deslignificação resultou em rendimento depurado de 51,6% e viscosidade de 1131 cm³/g. As madeiras com baixo teor de lignina necessitaram menor quantidade de álcali ativo para deslignificar (17,6% como NaOH), em relação às madeiras com alto teor de lignina (19,0%), com mesmo número kappa.

O comportamento comumente do *Eucalyptus globulus* pode ser verificado na Tabela 1, que ilustra a tendência de variação das características da madeira desta espécie da base para o topo.

Tabela 1. Tendência de variação das características da madeira de *Eucalyptus globulus* da base para o topo.

Características	Da base para o topo
Densidade	Aumenta
Lignina	Diminui
Rendimento em polpa	Aumenta
Consumo de álcali	Aumenta
Espessura da parede da fibra	Aumenta
Comprimento da fibra	Diminui
Resistência física do papel	Diminui
Propriedades óticas do papel	Aumenta

Fonte: Valente et al., 1992.

Ezpeleta & Viqueira (1981), estudando 24 espécies de eucaliptos, compararam as polpas resultantes e concluíram que o *Eucalyptus globulus* manteve-se sempre em destaque quanto a rendimento, peso específico da folha, comprimento de ruptura, índice de arrebetamento e alvura. O *Eucalyptus globulus* foi a primeira espécie com tempo menor de cozimento, à temperatura máxima para um mesmo grau de deslignificação.

Barrichelo & Foelkel (1976) estudaram as características da madeira e as propriedades da celulose sulfato obtida a partir de seis espécies de eucalipto. Concluíram que, para o *Eucalyptus globulus*, os resultados encontrados, no que se refere a rendimento bruto, resistência à tração, resistência ao arrebetamento e alongação, podem ser considerados como excelentes, enquanto os de resistência ao rasgo, como razoáveis. Comparando com as celuloses de *E. saligna*, *E. grandis*, *E. decaisneana*, *E. robusta* e *E. viminalis*, a celulose de *E. globulus* mostrou superiores

resistências à tração e ao arrebentamento e maior alongação, assim como, maior volume específico aparente.

Ferreira et al. (1998), com base em seus estudos sobre o efeito das variações de cozimento kraft na refinação de pastas de *Eucalyptus globulus*, confirmam que, no caso desta espécie, as características químicas das pastas afetam decisivamente a sua capacidade de resposta à refinação. Para um mesmo nível de deslignificação, as pastas que melhor desenvolvem resistência são aquelas que exibem maior viscosidade intrínseca e/ou maior percentagem de pentosanas. Dessa maneira, pastas mais degradadas durante o cozimento necessitarão de maior energia de refinação ao atingir os níveis de resistência objetivados. Se a degradação for acentuada, não conseguirão atingir tão bons níveis nas propriedades físico-mecânicas.

2.3. Propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira

A madeira é um material heterogêneo, possuindo diferentes tipos de células, adaptadas no desempenho de funções específicas. Há grandes variações na composição química, física e na anatomia da madeira, entre espécies e também dentro da mesma espécie, as quais variam significativamente com a altura do tronco e na direção da medula até a casca. Além disso, existem diferenças entre cerne e albúrnio, madeira de início e fim de estação de crescimento e, em escala microscópica, entre

células individuais (Trugilho et al., 1996). Segundo Latorraca (2000), várias pesquisas têm procurado identificar quais os fatores que afetam as propriedades da madeira, os quais podem ser inerentes à própria madeira e também ao ambiente em que a árvore se desenvolve.

Estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de avaliar os efeitos das propriedades químicas e físicas da madeira no processo de polpação e na qualidade da polpa de eucalipto, obtida pelo processo kraft. A preocupação fundamental das relações é conseguir traduzir propriedades da polpa e/ou do papel em propriedades da madeira, com o intuito de possibilitar a seleção e o melhoramento de árvores com as características mais importantes para determinada aplicabilidade do papel. As correlações encontradas têm confirmado certas tendências e invalidado outras. Concordância tem sido observada para a importância da densidade básica da madeira como a principal característica que influencia tanto no custo da madeira produzida, quanto no rendimento do processo industrial e na qualidade de polpas e papéis (Shimoyama, 1990, Foelkel et al., 1992, Demuner et al., 1992, Wehr & Barrichelo, 1992). Sua influência no rendimento e no custo dos processos de produção de madeira e de polpa é facilmente entendida em razão do manuseio de menor volume de toras e cavacos, respectivamente, para uma mesma quantidade de massa (Shimoyama, 1990, Foelkel et al., 1992, Wehr & Barrichelo, 1992).

O conhecimento da composição química da matéria-prima destinada à produção de celulose é de grande valia, uma vez que os dados fornecerão condições para que se estabeleçam os parâmetros do processo de polpação, como o consumo de reagentes, rendimento em celulose e quantidade de sólidos gerados no licor negro (Penalber, 1983 e Wehr, 1991).

2.3.1. Densidade básica

Segundo Shimoyama (1990), vários parâmetros podem ser utilizados para determinação da qualidade da madeira visando à produção de celulose. São classificados como físicos, sendo o principal a densidade básica; químicos, os teores de holocelulose, lignina e extrativos; e anatômicos, as porcentagens e dimensões das fibras e as porcentagens de vasos e parênquimas. Dentre esses parâmetros, a densidade básica é indicada como um dos mais importantes por ser de fácil determinação e por estar diretamente relacionada às características do produto final.

A densidade da madeira influencia diretamente sobre o rendimento volumétrico (toneladas de polpa por metro cúbico de madeira roliça) e indiretamente sobre as propriedades mecânicas da fibra. Atualmente, procura-se trabalhar com uma densidade ótima da madeira para conversão à celulose, a qual se encontra entre 0,450 e 0,550 g/cm³. Madeiras acima da densidade ótima, apesar de mostrarem um baixo consumo específico por tonelada de celulose, bem como boas resistências ao rasgo, trazem problemas, tanto operacionais quanto de qualidade do produto, tais como, dificuldade de picagem das toras, geração de cavacos de maiores proporções, maior consumo de álcali, rendimento prejudicado, aumentando o teor de rejeitos devido à dificuldade de impregnação. Por outro lado, as madeiras com baixa densidade também são indesejáveis, pois mostram menores rendimentos em celulose por volume de cavacos, além de características como alto teor de vasos de dimensões demasiadas, indesejáveis para papéis de impressão, ou alto teor de parênquima, gerando

maior teor de finos (Foelkel, 1978, Souza et al., 1986, Shimoyama, 1990, Peredo, 1999).

A densidade básica da madeira é uma expressão relativa dos diferentes elementos celulares que a compõe (vasos, traqueídeos, fibras, células de parênquima) e da variação de sua parede celular, lúmen e espaços intercelulares e, em menor grau, da presença de extrativos (Foelkel, 1978, Scheneider, 1993).

2.3.2. Lignina

Ligninas são substâncias complexas, macromoléculas tridimensionais de origem fenilpropanóica, constituídas de unidades básicas de p-hidroxifenilpropano, guaiacilpropano e siringilpropano, encontradas na maioria das plantas superiores em maior concentração na lamela média do que nas subcamadas da parede secundária dos traqueídeos, vasos, fibras, etc. Enquadram-se entre as substâncias naturais mais abundantes da face da terra, ocupando cerca de 30% dos carbonos da biosfera (Fengel & Wegener, *apud* Abreu & Oertel, 1999, p.2).

Estas substâncias químicas conferem rigidez à parede da célula e, nas partes da madeira, agem como um agente permanente de ligação entre as células, gerando uma estrutura resistente ao impacto, compressão e dobra. Sua estrutura principal provém dos precursores primários, álcool trans-

coniferílico, álcool trans-sinapílico e álcool trans-para-cumário (Sacon & Weissheimer, 1996).

Atualmente, o principal uso da madeira de eucalipto no Brasil está na indústria de celulose e papel. Na fabricação do papel, o processo de polpação constitui-se em uma etapa intermediária e bastante onerosa, que visa à separação das fibras celulósicas dos demais componentes da madeira. Entre estes componentes indesejáveis encontra-se, principalmente, a lignina (D’Almeida, 1988).

Cardoso (2002) em seus estudos de otimização das condições do cozimento kraft de *Eucalyptus globulus* em função do teor de lignina da madeira, verificou que, com madeira de baixo teor de lignina e número kappa 19, consegue-se cerca de 4,2% a mais de rendimento e 2 a 2,5% a menos de carga aplicada de álcali ativo em relação à madeira de alto teor de lignina, deslignificada a número kappa 16. Portanto, pequenas reduções no teor de lignina da madeira representariam grandes economias às indústrias papeleiras, bem como, ganhos em rendimento.

Já é possível afirmar, com base em diversos estudos que estão sendo desenvolvidos nas áreas de biotecnologia (Endt et al., 2000) e de tecnologia de produtos florestais (Abreu & Oertel, 1999), que são os diferentes teores de lignina e diferentes formulações constitucionais, bem como os genes codificadores de enzimas, que promovem o grau de remoção da lignina nos processos químicos de obtenção de polpa.

Endt et al. (2000) desenvolveram um trabalho com o objetivo de isolar e caracterizar o gene codificador da enzima álcool cinamílico desidrogenase (CAD) de *Eucalyptus saligna* para gerar plantas transgênicas de *Eucalyptus* com teores de lignina reduzidos. Outros ensaios de

transformação genética vêm sendo conduzidos com espécies de *Eucalyptus* importantes na região sul do Brasil para a produção de celulose e papel. Com vistas à alteração da composição ou teores de ligninas em plantas por meio da modulação da expressão de genes biossintetizantes, estudos mais aprofundados dos mecanismos de regulação gênica devem ser e estão sendo conduzidos na área de biotecnologia e melhoramento genético.

O conhecimento dos processos de separação dos materiais lignocelulósicos é indispensável para definir as melhores condições de deslignificação. Variáveis importantes que determinam a velocidade de deslignificação e a relação licor/madeira permitem manusear diferentes matérias-primas e conseguir produtos com determinado padrão de qualidade (Sansígolo & Curvelo, 1994). Estes mesmos autores, estudando o comportamento da madeira de *Eucalyptus globulus*, quando da deslignificação em etanol-água, constataram que a composição química característica da madeira desta espécie apresenta menor teor de lignina e maior teor de holocelulose que outras espécies tradicionais de eucalipto utilizadas na produção de celulose. Pereira (1988) e Ona et al. (1995) também confirmam estas qualidades químicas do *Eucalyptus globulus*.

Segundo Perez (2002), o teor de lignina total da madeira pode ser considerado como um bom indicador do comportamento da madeira quanto ao processo de deslignificação, pois em seu estudo com exemplares de *E. globulus* procedentes de diferentes regiões da Austrália, as árvores que tiveram os maiores valores de rendimento depurado foram as que possuíam os menores teores de lignina na sua madeira.

2.3.3. Extrativos

Conceitualmente, os extrativos são os componentes estranhos da madeira não pertencentes à parede celular, de baixo e médio pesos moleculares, extraíveis em água ou solventes orgânicos neutros. Este termo, componente estranho, engloba grande gama de compostos químicos e inclui variedade de compostos individuais. Algumas exceções desse conceito são os extrativos não-solúveis em água ou solventes orgânicos neutros, como algumas frações de pectina, proteínas, amido e de certos minerais. Preferencialmente, os extrativos ocorrem em maiores teores na casca e nas raízes. Açúcares, outros constituintes solúveis da seiva, e materiais de reserva, como amido e gorduras, são encontrados em maior quantidade no alburno, enquanto materiais fenólicos são, usualmente, depositados no cerne (Hillis, 1962).

Os extrativos podem ser classificados em vários grupos, de acordo com suas características estruturais, embora ocorram sobreposições, tendo em vista a natureza polifuncional de alguns compostos (D'Almeida, 1988).

Segundo Costa et al. [199-], fisiologicamente, os extrativos de madeira podem ser classificados como materiais de reserva (ácidos graxos, açúcares, gorduras e óleos), materiais de proteção (terpenos, ácidos resinosos, fenóis e ceras) e hormônios vegetais (fitosterol e sistosterol). De acordo com vários autores, os extrativos nas madeiras de folhosas estão localizados principalmente nas células parenquimatosas, porém, ocorre alguma deposição desse material nas paredes dos vasos, principalmente em árvores mais velhas. Isso dificulta o acesso dos reagentes de cozimento aos

extrativos, já que muitas das células de parênquima não se rompem facilmente. De acordo com Otsuki et al. (1980), tais células constituem os menores elementos anatômicos da madeira. Após a individualização das fibras na polpação, essas células parenquimáticas, juntamente com vasos pequenos e pedaços de fibras, constituem a fração de finos da polpa.

O teor de extrativos pode classificar ou restringir o uso de determinada madeira destinada à produção de celulose (Otsuki et al., 1980). Os extrativos se dissolvem no licor de cozimento, influenciando diretamente sobre o consumo de reativos e sobre o rendimento em pasta. Ainda podem permanecer na polpa marrom como residual da polpação, ocasionando problemas de “pitch” na celulose e nos equipamentos, nas etapas posteriores do processo. Assim, altos teores de extrativos conduzem a mais baixos rendimentos em celulose, a maior consumo de reagentes no cozimento e no branqueamento, a problemas de incrustações na polpa e nos equipamentos. Polpas com baixo teor de extrativos causam menores problemas de “pitch” em máquinas de papel e absorção de líquidos e cargas (amido, polietileno etc.) na fabricação do papel (Ezpeleta & Viqueira, 1981, Penalber, 1983, Souza et al., 1983, Costa et al., 199-, Wehr, 1991, Costa et al., 1997).

Segundo Souza et al. (1983), muitas vezes, num mesmo tipo de madeira utilizada na fabricação de polpas, fatores como a idade, a espécie e a procedência podem determinar diferenças nos conteúdos de extrativos das árvores. Mesmo ao se comparar árvores de mesma idade, características tais como densidade básica, estrutura morfológica e conteúdo de extrativos parecem ser hereditários e determinam diferenças individuais, que constituem um importante item na seleção de árvores para o plantio de

novas florestas. Como é descrito por vários autores, um programa de melhoramento deve incluir árvores de baixo conteúdo de extrativos.

2.3.4. Cinzas

Assim como os extrativos, os inorgânicos também são considerados constituintes estranhos da parede celular das fibras e estão representados pelo teor de cinzas de cada madeira. Os inorgânicos na madeira são geralmente constituídos pelos íons cálcio, manganês, ferro, magnésio, cobre, alumínio, potássio, sódio, etc. e, normalmente, são encontrados na forma de silicatos, carbonatos, fosfatos e sulfatos (Costa et al., 1997).

Vários autores (Repetti, 1992, Sansígolo & Curvelo, 1994, Freddo, 1997, Cardoso et al., 2001) em estudos desenvolvidos com o *Eucalyptus globulus*, encontraram teores de cinzas entre 0,33% e 0,65%.

Brito & Barrichelo (1977) comparando quimicamente algumas espécies de *Eucalyptus*, encontraram os seguintes resultados para teor de cinzas na madeira: 0,2% para *E. camaldulensis*; 0,4% para *E. grandis*; 0,5% para *E. saligna*, *E. tereticornis* e *E. robusta*; 0,6% para *E. paniculata*; 0,7% para *E. urophylla*; e 1,0% para *E. citriodora*.

Assim, como os demais constituintes da madeira, o teor de cinzas pode variar com a idade da árvore, posição ao longo do fuste e fatores ambientais.

2.4. Refino da polpa

As fibras naturais não apresentam características que possibilitam, com sucesso, sua utilização na fabricação de papéis que requeiram níveis mínimos de resistência mecânica, tais como os destinados à escrita e impressão, embalagens, etc. As celuloses devem ser submetidas a um tratamento que as modifique, permitindo uma melhor ligação entre as fibras na folha de papel e conferindo a resistência mínima necessária à estrutura desse papel. Esse tratamento é o refino (Manfredi, 1998).

Determina-se o grau de refino para estabelecer comparativos entre polpas e também para padronizar uma determinada receita de fabricação de papel. Assim, pode-se fabricar papéis com características muito próximas, quando utilizado um determinado grau de moagem para uma polpa fabricada em determinado processo (Coelho & Andrioni, 199-).

Busnardo (1990) cita que refino, em sua conceituação mais ampla, é o tratamento mecânico efetuado sobre fibras em suspensão, objetivando efetuar modificações estruturais, às quais são produzidas através de impactos sobre as fibras. A etapa de refino pode ser classificada como uma das mais importantes da fabricação do papel, e é caracterizada por um elevado consumo de energia. Nesta fase, serão desenvolvidas as propriedades que irão contribuir para caracterizar a qualidade final do papel, podendo direcioná-lo para aplicações específicas.

Segundo Milanez et al. (1982), o fenômeno de maior absorção de água pela polpa refinada é mais facilmente explicado pelo fato do refino ‘abrir’ uma grande parte da estrutura interna das fibras, as quais

avidamente absorvem moléculas de água, devido à hidrofiliidade da celulose e hemicelulose. O aumento da resistência da celulose se dá, na maior parte, pelo aumento das superfícies de contato das fibras quando refinadas. As fibras se achatam, desfibrilam e se rompem, aumentando os seus pontos de contato e as áreas superficiais, o que favorece a ligação por coesão. Os efeitos das ligações entre as fibras para formação de papéis são altamente dependentes de propriedades superficiais das fibras, que, por muitas vezes, dependendo da composição dos seus constituintes, podem modificar completamente o comportamento de uma determinada polpa e direcioná-la para uma nova utilização ou aplicação. Dentre estes constituintes, destacam-se as hemiceluloses como importantes causadoras de efeitos superficiais de ligações interfibras, além de providenciarem um auxílio nos processos de inchamento das fibras e de refino da polpa.

A teoria mais aceita atualmente é a de que a resistência do papel é o resultado de ligações de pontes de hidrogênio entre as fibras. A frequência dessas ligações pode ser intensificada se for ampliada a área de contato entre as fibras, tornando-as mais flexíveis, pelo aumento da superfície da fibra, devido ao maior potencial de colapso, ou por meio de seu desfibrilamento. Quando se estuda refino, existem alguns aspectos importantes a serem considerados. A técnica de refino envolve um conjunto de variáveis que influenciam na operação, com reflexos diretos no resultado final. Variáveis como tipo de celulose, consistência, viscosidade e pH, assim como potência aplicada, área refinadora relativa aos elementos refinadores e velocidade de refinação, geralmente estão associadas à economia de energia na operação de refino, ou seja, à facilidade da ação dos elementos refinadores sobre as fibras, que, associados aos processos de

hidratação, inchamento, formação de flocos, desfibrilamento e corte das fibras, promovem o desenvolvimento de propriedades do papel (Carvalho, 1997).

Hoje é aceito que o processo de refino envolve, principalmente, o tratamento de agregados (flocos) e não de fibras isoladas como partículas independentes, pois é difícil imaginar como as fibras poderiam suportar individualmente as altas pressões existentes entre as lâminas de um refinador sem serem completamente esmagadas. Ao contrário, se o espaço estiver cheio de flocos, constituídos por muitas fibras, as tensões podem ser distribuídas, evitando o esmagamento dos agregados fibrosos, os quais controlam indiretamente a ação entre as superfícies de moagem (Carvalho, 1997).

Os diferentes processos de cozimento têm por finalidade separar as fibras mediante a eliminação da lignina e as substâncias pécicas que se encontram na lamela média. Porém, devido a sua natureza ácida ou alcalina, também exerce uma ação sobre a celulose e a hemicelulose. Os efeitos da deslignificação sobre as fibras refletem-se fortemente no refino e nas características da polpa, bem como sobre sua resistência individual ou na estrutura consolidada das fibras na folha de papel. A influência das operações de cozimento e branqueamento sobre o refino estará condicionada à extensão com que tenham sido eliminadas a lignina e as hemiceluloses, e a degradação sofrida pelos hidratos de carbono que permanecem na polpa. Em primeiro lugar, a lignina não se hidrata e, em segundo lugar, inibe a penetração de água até às zonas internas da fibra, onde se encontram os hidratos de carbono, estando unidas de alguma maneira as hemiceluloses. De um modo geral, pode-se dizer que um alto

teor de lignina, como é o caso das polpas kraft não branqueadas, faz com que as fibras sejam mais rígidas, proporcionando um refino mais difícil. Numa polpa sulfato, com conteúdo em lignina superior ao da polpa sulfito, a possibilidade de hidratação é menor e, portanto, o refino se realiza com maior dificuldade, apesar das polpas ao sulfato refinarem mais lentamente que as polpas ao sulfito, produzindo, entretanto, polpas mais resistentes (Coelho & Andrioni, 199-).

Repetti (1992) testou o desempenho de quatro espécies de *Eucalyptus* para utilização na elaboração de celuloses kraft, e o *E. globulus* mostrou ser uma excelente madeira para fabricação de celuloses kraft, pois possui baixo teor de lignina, densidade média e permite obter celuloses de boa resistência, com bons rendimentos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Espécie estudada

O material estudado constou de amostras provenientes de um povoamento gerado pelo plantio de mudas desenvolvidas em tubetes a partir de sementes, procedentes do Chile. A espécie escolhida para este estudo foi o *Eucalyptus globulus* subespécie *globulus* Labill.

3.2. Localização da área e época de coleta das amostras

As amostras foram coletadas durante o mês de agosto de 2000, do Horto Florestal Barba Negra, pertencente à Empresa Klabin Celulose Riocell, estando localizado no município de Barra do Ribeiro, RS, distante 32 km de Guaíba, onde se encontram as instalações fabris da empresa.

3.3. Caracterização da área de coleta das amostras

O Horto Florestal Barba Negra situa-se entre as coordenadas 30° 23' de latitude sul e 51° 09' a 58° 06' de longitude oeste, fazendo parte da unidade de mapeamento São Jerônimo. Seu solo caracteriza-se como tendo horizonte A moderado, textura arenosa média, relevo plano e substrato sedimentar aluvial recente (granito), segundo Lemos et al. (1973). De acordo com a classificação de Koppen, o clima é Cfa, ou seja, subtropical úmido e sem estiagem, a temperatura média anual é 20.2°C, a temperatura média do mês mais frio fica em torno de 10.7°C e a temperatura média do mês mais quente é 30.2°C. A precipitação média anual é de 1409 mm, sendo a média de dias de chuva no ano de 111, com déficit hídrico igual a zero, e a ocorrência de geadas estende-se entre os meses de abril e novembro.

3.4. Amostragem no campo

Para definir a amostragem, foi escolhido um talhão contendo aproximadamente 2.500 indivíduos da espécie *Eucalyptus globulus* subespécie *globulus* Labill., com 8 anos de idade. As dimensões do talhão perfaziam aproximadamente 1,9 hectares e o espaçamento implantado foi de 3,0 x 2,0 m. Deste talhão, foram escolhidas 50 árvores, visualmente de

qualidade superior, que não apresentassem tortuosidades, rachaduras, podridões, etc. Destas, mediu-se o diâmetro à altura do peito (DAP) com a árvore ainda em pé. O critério inicial de seleção adotado foi baseado na aparência e no desenvolvimento das árvores, considerando-se na relação aquelas com altura dominante, DAP superior, retidão do fuste, desrama natural, resistência a pragas e doenças.

3.4.1. Retirada dos discos

As matrizes selecionadas foram abatidas a 40 cm acima do nível do solo para que a madeira não sofresse influência das raízes, procedendo-se, na sequência, a medição da altura total, altura comercial e das posições nas quais os discos que representariam as amostras foram retirados. Esses discos, com aproximadamente 2,5 cm de espessura, em número de seis por altura, foram obtidos nas seguintes posições ao longo do tronco: base, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% da altura comercial, respectivamente. Foi considerado o diâmetro mínimo de 6,0 cm (com casca) como limite na última posição, que correspondeu a 100% da altura comercial.

Foi retirado, também, um disco no DAP para cada árvore abatida, a fim de dar procedimento à determinação da densidade básica e ao cálculo do volume cilíndrico das árvores.

Os seis discos retirados de cada posição das árvores tiveram o seguinte destino:

- um disco para determinação da densidade básica;
- um disco para dar procedência às análises químicas;
- três discos para serem reduzidos a cavacos e utilizados nos cozimentos; e
- um disco como reserva.

Os discos obtidos foram identificados conforme a árvore a qual representavam e a respectiva posição, ao longo do tronco da mesma. Eles foram identificados e guardados em sacos de algodão, durante o transporte e a retirada do local de coleta no talhão. Os discos que serviriam para determinação da densidade básica foram reservados em sacos plásticos, a fim de preservarem a umidade até serem descascados. Deles, foram retiradas as cunhas que iriam ficar submersas em tanques com água, imediatamente após a coleta, por tempo indefinido ou até a saturação das mesmas.

Em seguida, procederam-se as medições de cerne, alburno e casca nos discos. Após estas medições, os discos foram descascados e reservados numa sala apropriada, com a finalidade de permitir a secagem natural dos mesmos, por meio de ventilação e luz natural.

3.4.2. Obtenção das cunhas para determinação da densidade básica

Utilizando-se um disco, sem casca, de cada posição do tronco de cada árvore, incluindo o DAP, retiraram-se duas cunhas opostas por disco, que foram identificadas.

3.4.3. Obtenção da serragem para as análises químicas

No estudo em questão, a serragem necessária foi obtida proporcionalmente de cada um dos discos retirados a cada posição das 50 árvores abatidas. Foram escolhidos discos livres de nós, podridões e demais anormalidades.

Estes discos, após estarem completamente secos, foram fracionados em oito partes (cunhas) de mesmo ângulo em relação à medula, as quais foram identificadas.

O fracionamento dos discos foi feito utilizando-se um serrote manual. A serragem obtida de cada disco foi recolhida em uma bandeja plástica limpa e, posteriormente, armazenada em saco plástico identificado, que representava cada uma das posições ao longo do tronco.

A serragem foi misturada para que representasse a árvore como um todo. Foi também passada em moinho de disco tipo Wiley a fim de reduzir sua granulometria e aproximá-la da desejada.

Finalmente, a serragem foi classificada, através de peneira vibratória, em partículas com a granulometria 40 mesh (TAPPI T257 cm-85). Depois de classificada, foi acondicionada em sacos plásticos, em temperatura e umidade ambiente, por um período, até serem procedidas as determinações químicas.

3.4.4. Obtenção dos cavacos para os cozimentos

Os cavacos preparados para servirem de material nos cozimentos foram obtidos a partir de três discos retirados por posição (base, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% da altura comercial). Estes discos foram transformados, manualmente, em cavacos com dimensões e espessura dentro do recomendado, ou seja, com 2,5 centímetros de comprimento (em função do tamanho do disco) e com 3,0 milímetros de espessura. Teve-se o cuidado de evitar que nós e outras impurezas constituíssem as amostras.

Foram preparados cavacos apenas das árvores selecionadas com base no teor de lignina e na similaridade de densidade básica média a fim de serem transformados em celulose kraft para fins de avaliações comparativas.

Os cavacos foram homogeneizados de forma que o material que seria usado em cada cozimento contivesse proporcionalmente cavacos pertencentes a cada posição para que fosse representativo da árvore toda. A

seguir, foram acondicionados em sacos plásticos, constituindo o material usado nos cozimentos.

3.5. Local das análises

As análises físicas foram realizadas nas dependências do viveiro do Horto Florestal Barba Negra, e as análises químicas das madeiras, bem como a produção e avaliação das celuloses, nos laboratórios industriais do Centro Tecnológico da Klabin Celulose Riocell.

3.6. Determinações dendrométricas e densidade básica

3.6.1. Características dendrométricas

Foi utilizado o primeiro disco de cada posição e o disco do DAP para determinação dos parâmetros dendrométricos. Nestes discos, ainda úmidos, mediu-se o diâmetro com e sem casca e o diâmetro do cerne. Através destes dados, juntamente com a altura relativa entre as posições, que foi igual a 10% da altura comercial para cada árvore, calcularam-se as

características dendrométricas. Os cálculos do peso da árvore foram feitos a partir dos dados dos volumes e da densidade básica. Com os discos colhidos ao DAP, calculou-se o volume cilíndrico e o fator de forma das árvores. Em função da altura comercial das 50 árvores estar próxima aos 13 m, a amostragem representativa à posição 10% da altura comercial praticamente correspondeu à amostragem ao DAP.

3.6.2. Densidade básica

A densidade básica das madeiras foi efetuada através do método da balança hidrostática (Vital, 1984). Retiraram-se duas cunhas opostas de um disco por posição, obtendo uma média do valor encontrado para cada cunha e, assim, a densidade básica média da árvore integral, ponderada com base nos volumes intermediários entre cada posição, conforme a expressão:

$$db = \frac{[(db_{0\%} + db_{10\%})/2].v_1 + [(db_{10\%} + db_{20\%})/2].v_2 + \dots + [(db_{90\%} + db_{100\%})/2].v_{10}}{vc \ sc}$$

em que:

db = densidade básica média da madeira da árvore integral, em g/cm³;

db_(0%, 10%, ..., 100%) = densidade básica média da madeira por posição, em g/cm³;

v_(1, 2, ..., 10) = volume comercial sem casca por posição, em m³;

vc sc = volume comercial sem casca da árvore, em m³.

3.7. Análises químicas

3.7.1. Determinação de extrativos

A quantificação de extrativos em solventes orgânicos neutros possibilita ter uma estimativa do consumo de reagentes no cozimento. Além disso, os extrativos interferem em alguns ensaios de caracterização química, sendo por isso, necessária a sua remoção prévia (Carvalho, 1999).

Foi feita a quantificação destes compostos de acordo com a norma TAPPI T204 cm-97 e, em simultâneo, a preparação das amostras isentas de extrativos (segundo norma TAPPI T264 cm-97). Nas extrações, foi empregada a seguinte seqüência de solventes: i) diclorometano, para remoção das ceras, graxas e polifenóis; ii) álcool/tolueno (1+2 v/v), removendo resinas, óleos, ceras, graxas, esteróides e terpenos; iii) água quente, que solubiliza sais inorgânicos, açúcares, polissacarídeos e algumas substâncias fenólicas.

As duas primeiras extrações foram realizadas durante quatro horas, cada uma em extrator Soxhlet e a última em béquer de 400 ml contendo água quente mais a amostra, sendo que os béquers eram mantidos em banho-maria a 80 °C, durante uma hora. Após esta seqüência, a serragem isenta de extrativos foi armazenada em sala climatizada, a 20 ± 2 °C de temperatura e 50 % de umidade relativa do ar, sendo posteriormente determinada sua umidade e o teor de extrativos. Foram feitas cinco repetições para as amostras de cada árvore.

3.7.2. Determinação da lignina

Sendo a remoção da lignina o principal objetivo do processo de cozimento, a determinação do seu teor na madeira permite, de certa forma, antecipar o grau de dificuldade deste processo e, conseqüentemente, a quantidade de reagentes a ser empregada nos processos de deslignificação e branqueamento. Para esse efeito, os polissacarídeos da madeira são hidrolisados com ácido sulfúrico a 72% de concentração, a 20 °C de temperatura durante 2 horas, formando diversos oligossacarídeos, os quais são hidrolisados numa segunda etapa com o mesmo ácido diluído a 3%, a 100 °C, por 4 horas. Após esta seqüência de hidrólises, resulta um resíduo que, após lavagem com água quente, é determinado, gravimetricamente, como lignina Klason ou insolúvel em ácido (de acordo com norma TAPPI T222 om-98).

O teor de lignina encontrado nas madeiras das árvores permitiu classificar algumas das árvores em duas faixas de concentração, como a seguir:

T1 – Baixo teor de lignina: valor mínimo encontrado + 0,5 %.

T2 – Alto teor de lignina: valor máximo encontrado – 0,5 %.

Foram feitas seis repetições para determinar o conteúdo de lignina insolúvel nas madeiras de cada uma das 50 árvores amostradas. Dessas seis repetições obteve-se uma média representativa do teor de lignina presente em cada árvore amostrada. Foram selecionadas seis árvores, três de menor teor de lignina, e outras três com maior teor de lignina, as quais serviriam de material para o processo de polpação. Uma exigência metodológica

adicional na seleção dessas seis árvores era que elas apresentassem densidade básica média estatisticamente equivalente. Com isso, procurou-se evitar o efeito conhecido da densidade da madeira nos resultados de cozimento, refino e propriedades das celuloses.

As árvores selecionadas com alto teor de lignina na madeira foram as de números 9, 42 e 48. As de baixo teor eram numeradas como 26, 29 e 40.

3.7.3. Determinação da holocelulose

O teor de holocelulose foi determinado por diferença segundo expressão:

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

3.7.4. Determinação de cinzas

O teor de cinzas é dado pela massa do resíduo mineral de materiais lignocelulósicos que resulta da combustão completa da amostra. De acordo com a norma TAPPI T211 om-93, a incineração foi realizada a uma temperatura de 525 ± 25 °C, sendo o resultado expresso em percentagem da

massa de amostra seca de madeira. A quantificação do teor de cinzas foi aplicada apenas para as seis árvores escolhidas, conforme item anterior, com três repetições para cada uma.

3.8. Cozimentos para produção de celulose

Os cozimentos foram realizados em uma autoclave laboratorial rotativa, da marca Regmed, capacidade de 20 litros, aquecimento elétrico provida de manômetro, válvulas de segurança e de descarga, e dotada de quatro células de aço inox, com capacidade aproximada de 1,3 litro cada uma. O uso das células individuais possibilitou a execução simultânea do cozimento de quatro amostras de 190 gramas de cavacos absolutamente secos, uma em cada célula.

Para obtenção das polpas, foram feitos quatro cozimentos, em duplicata, para cada uma das seis árvores escolhidas, totalizando 48 cozimentos. As polpas obtidas em duplicata nos cozimentos equivalentes foram misturadas, respectivamente, como se fossem o produto de um único cozimento, executado sob as mesmas condições. Esta alternativa foi em decorrência do volume limitado de cada uma das quatro células usadas no processo. Com isso, a quantidade de polpa obtida foi adequada para os testes químicos e para o refino.

3.8.1. Cozimentos experimentais preliminares

Foram efetuados cozimentos preliminares para se definir as dosagens de álcali ativo, temperatura e tempo, ideais para atingir um mesmo grau de deslignificação (representado pelo número kappa $17,2 \pm 1,0$), para cada tipo de madeira (teores de lignina alto e baixo).

3.8.2. Condições de controle dos cozimentos do estudo

Através da otimização preliminar, foi possível obter as condições ideais para dar procedimento à polpação das amostras de cavaco das três árvores de baixo teor de lignina e das três de alto teor de lignina. As variáveis pré-estabelecidas para execução dos cozimentos são apresentadas no Quadro 1.

QUADRO 1. Condições empregadas nos cozimentos.

<i>Variáveis do processo</i>	Lignina alta	Lignina baixa
Álcali ativo, expresso como NaOH, %	19,0	18,0
Sulfidez, %	20,0	20,0
Relação licor/madeira, l/kg	4:1	4:1
Temperatura máxima, °C	168	168
Tempo de aquecimento, min.	90	90
Tempo à temperatura máxima, min.	60	60
Peso seco de cavacos, g	190	190

3.8.3. Análise do licor negro residual

Ao final dos cozimentos, as células eram abertas e o licor negro residual recolhido em um béquer para ser analisado, tomando-se o cuidado de colocar uma tela de 400 mesh sobre o béquer, para que fossem recolhidas as fibras do licor. As fibras recolhidas na tela eram transferidas para caixa de lavagem com a respectiva polpa do cozimento. Determinaram-se o pH e o teor de álcali efetivo do licor negro, conforme a metodologia TAPPI T625 om-85 modificada.

3.8.4. Lavagem, depuração da polpa e cálculo dos rendimentos

Ao final dos cozimentos, o material deslignificado era descarregado em um desfibrador laboratorial de discos abertos ao máximo. Após este procedimento, as polpas resultantes eram depositadas em caixas providas de tela de malha metálica 400 mesh e lavadas com água à temperatura ambiente em abundância. Foi determinado o rendimento total com base na consistência da polpa não depurada e no peso seco inicial de madeira. A depuração das polpas foi feita em depurador de fibras laboratorial, dotado de placa com fendas de 0,2 mm de largura.

Após lavagem e depuração, os rejeitos eram cuidadosamente secos e pesados. Conhecidos estes dados, foi possível determinar o rendimento depurado e o teor de rejeitos, ambos expressos base madeira absolutamente seca.

3.8.5. Sólidos secos dissolvidos calculados no licor negro residual

O teor de sólidos no licor negro é determinado conforme a expressão:

$$\text{Sólidos} = [(100 - \text{RB}) + \text{SM}] / \text{RB}$$

(kg ssd/kg celulose a.s.)

Sólidos = teor de sólidos, kg ssd/kg celulose a.s.;

RB = rendimento bruto, g celulose a.s.;

SM = sólidos minerais do licor de cozimento, g ssd;

ssd = sólidos secos dissolvidos no licor negro;

a.s. = absolutamente seca (até peso constante a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$).

3.9. Análises realizadas nas polpas

3.9.1. Número kappa

A determinação do número kappa fornece o desempenho e a eficácia do processo de cozimento, pois informa o teor de lignina residual na polpa (ou, o grau de deslignificação atingido), razão por que este parâmetro é amplamente usado para o controle deste processo.

Esta determinação foi de acordo com a norma TAPPI T236 om - 99.

3.9.2. Viscosidade intrínseca

A viscosidade da polpa é uma propriedade que está relacionada com o tamanho e com a configuração das moléculas. O escoamento da solução de celulose solubilizada em um solvente específico, neste caso, em cuproetilenodiamina, em capilar de um viscosímetro, comparando com o tempo de escoamento do solvente puro (TAPPI T230 om - 99) constitui-se em um bom índice para avaliar o grau de degradação química das cadeias moleculares da celulose.

3.9.3. Solubilidade em NaOH_{5%}

A finalidade deste método é determinar a solubilidade de amostras de polpa, em álcali a frio, em concentração pré-especificada de solução de hidróxido de sódio. Para determinação da solubilidade da polpa em NaOH_{5%}, utilizou-se metodologia ISO 692: 1982.

3.9.4. Alvura

O fator de reflectância difusa no azul, a 457 nm (alvura ISO), é usado para avaliar a qualidade ótica da celulose quanto à sua alvura. Os ensaios de alvura das pastas celulósicas foram realizados de acordo com a metodologia ISO 2470: 1999. Apesar de se estar trabalhando com celuloses não branqueadas, a medição da alvura pode ser um indicativo da reprecipitação de lignina ao longo do cozimento.

3.10. Refino

As polpas foram refinadas em moinho laboratorial PFI, conforme metodologia TAPPI T248 sp - 00. O número de revoluções foi variável, com a finalidade de obter dois níveis de refino expressos como graus Schopper Riegler (°SR), 25° e 30°, respectivamente, para que permitissem o desenvolvimento de curvas de refinação. Foi utilizado o equivalente a 30 gramas de polpa absolutamente seca para cada nível de refino executado. O pH das polpas foi ajustado com ácido clorídrico 0,5 N e hidróxido de sódio 1,0 N, para que ficasse entre 6,0 e 6,5 e a consistência de trabalho das polpas foi de 10 %.

Na execução dos cozimentos, foram obtidas doze polpas de madeira com baixo teor de lignina e doze polpas de madeira com alto teor de

lignina. Dessas, foram sorteadas aleatoriamente dez de cada nível de lignina para os procedimentos de refino e avaliação das propriedades físico-mecânicas.

3.11. Formação de folhas para ensaios físico-mecânicos

Formaram-se as folhas em formador específico, com aproximadamente 60 g/m^2 , de acordo com a norma TAPPI T205 sp-95, e acondicionadas em uma sala climatizada, a 20° C de temperatura e 50 % de umidade relativa do ar. Foram feitas oito folhas para cada polpa a cada nível de refino.

3.12. Testes físico-mecânicos

Para a execução dos testes físicos e mecânicos, foram escolhidas as seis melhores folhas entre oito que foram confeccionadas. As propriedades analisadas e os respectivos métodos estão descritas no Quadro 2.

QUADRO 2. Propriedades testadas nas polpas refinadas.

<i>Ensaio</i>	Norma
Índice de tração	ISO 1924-1/92
Índice de estouro	TAPPI T403 om-97
Índice de rasgo	ISO 1974:1990
Volume específico aparente	TAPPI T411 om-89 adaptada
Resistência ao ar Gurley	TAPPI T460 om-96
Gramatura	TAPPI T410 om-98
Espessura	TAPPI T411 om-97

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira a concretizar os objetivos delineados na Introdução, designadamente o estudo da influência do teor de lignina da madeira na produção de celulose kraft, procedeu-se uma extensa série de análises até chegar aos cozimentos nas condições ideais para as madeiras de *Eucalyptus globulus*.

Efetuuou-se uma caracterização exaustiva da matéria-prima, que iniciou com o estudo comparativo englobando algumas variáveis dendrométricas e a densidade básica e depois, as análises para conhecer a sua composição química, importantes para avaliar as conseqüências do cozimento (itens 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4). A caracterização das 50 árvores foi efetivada para se escolher as que iriam compor o material a sofrer o processo de deslignificação.

Depois, procedeu-se os cozimentos preliminares (indispensáveis para otimizar as condições de trabalho) e os cozimentos definitivos, sendo que, em paralelo, as pastas resultantes foram caracterizadas do ponto de vista químico, determinando-se os correspondentes número kappa, viscosidade intrínseca, solubilidade em NaOH_{5%}, rendimentos, teor de rejeitos e alvura, analisando-se para cada um deles os efeitos da variação do teor de lignina das amostras (item 4.5).

Por fim, procedeu-se o refino das polpas não branqueadas, as quais foram submetidas aos testes físico-mecânicos. Isso permitiu analisar as conseqüências do processo de refino, bem como entender os efeitos do teor de lignina da madeira original sobre as propriedades das polpas refinadas (item 4.6).

4.1. Resultados dendrométricos

A Tabela 2 mostra as médias dos resultados dendrométricos para as 50 árvores amostradas. Os resultados individuais encontram-se no Apêndice A.

As árvores estudadas apresentaram DAP médio com casca (c/c) de 21,05 cm, coeficiente de variação (CV) de 16,31% e DAP médio sem casca (s/c) de 19,36 cm, com CV de 16,97%. A altura total média da amostra coletada foi de 17,69 m, com CV de 7,67%, e a altura comercial média foi de 13,84 m, com CV de 9,53%. Pode-se notar que houve variação entre estes parâmetros observados. Os dados mostram que existe bastante variação entre as árvores, mesmo sendo estas do mesmo sítio, o que comprova os efeitos dos fatores ambientais, tais como qualidade da muda, a forma como foram plantadas, a fertilização, a competição, o ataque diferenciado de insetos, etc.

Segundo Berger (2000), a alta variabilidade em um mesmo lote de sementes pode ocasionar erros não perceptíveis, comparando-se parcelas de diferentes tratamentos. Isso indica que a real diferença entre tratamentos pode estar mascarada pela alta variabilidade entre os indivíduos de um mesmo tratamento.

Na amostra de 50 árvores coletadas no povoamento para este estudo, o fator de forma (c/c) médio encontrado foi de 0,545, variando de 0,446 a 0,630, com um CV de 8,43%. De certa maneira, a variação para fator de forma é uma indicação de que há muito espaço para se trabalhar com essa característica no que se refere à forma das árvores.

A implantação de povoamentos clonais é uma maneira de se evitar a alta variabilidade das populações florestais. Esta estratégia permite a reprodução de árvores com características genéticas idênticas ou semelhantes às da árvore matriz. Entretanto, Flores (1999) estudando a variação das características dendrométricas de quinze árvores originárias de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith, aos oito anos, encontrou uma média de fator de forma (c/c) de 0,541, com um CV de 7,14%. Isso mostra que mesmo árvores clonais apresentam uma amplitude significativa para fator de forma. Essa variabilidade foi notada pela autora acima, para a maioria das propriedades analisadas.

O resultado médio obtido para volume da árvore comercial (s/c) foi de 0,226 m³, com uma amplitude variando de 0,103 a 0,514 m³ e um CV de 36,94%; para volume comercial (c/c) foi de 0,298 m³ e um CV de 35,41%.

Os dados acima mostram uma grande variação entre as árvores para as variáveis volumes comerciais, o que é comprovado pelo coeficiente de variação. O volume varia em função das condições do ambiente observadas (clima, solo, topografia, etc.), sendo possível verificar a grande heterogeneidade em um povoamento de mudas por sementes. Em povoamentos clonais esta heterogeneidade pode ser diminuída significativamente.

O resultado médio obtido para peso seco da árvore comercial (s/c) foi de 0,119 tonelada, com CV de 34,64%. O valor médio para percentagem volumétrica (% volumétrica) de cerne base madeira foi de 43,24%, com CV de 19,70%; % volumétrica de alburno foi de 56,76%, com CV de 15,01% e % volumétrica de casca base árvore comercial foi de 16,11%, com CV de 12,37%. Observa-se que houve uma variação

significativa entre os valores das % volumétricas dos constituintes do lenho e da casca.

Estes parâmetros dendrométricos evidenciam a heterogeneidade entre as árvores estudadas. Neste sentido, os resultados confirmam a expressiva diferença existente entre as árvores matrizes. A seleção final das árvores mais adequadas para a execução dos cozimentos foi com base, principalmente, nos resultados encontrados de densidade básica e composição química da madeira. Na Tabela 3, estão os resultados dendrométricos das três árvores com alto teor de lignina e das três com baixo teor de lignina, escolhidas para sofrerem deslignificação e terem as características de suas polpas comparadas. A seleção das seis árvores para os ensaios definitivos obedeceu a pré-condição de as mesmas apresentarem densidades básicas semelhantes, evitando, com isso, a influência dessa propriedade nos resultados de cozimento e refino.

Tabela 2. Resultados dendrométricos analisados para as 50 árvores estudadas.

Parâmetros	Média	DP	CV%	Máximo	Mínimo
Altura total (m)	17,69	1,357	7,67	21,2	14,0
Altura comercial (m)	13,84	1,319	9,53	17,0	10,4
DAP c/c (cm)	21,05	3,433	16,31	31,05	15,15
DAP s/c (cm)	19,36	3,284	16,97	29,05	13,08
Volume comercial c/c (m ³)	0,298	0,095	35,41	0,589	0,124
Volume comercial s/c (m ³)	0,226	0,083	36,94	0,514	0,103
Fator de forma c/c	0,545	0,046	8,43	0,630	0,446
Fator de forma s/c	0,541	0,047	8,71	0,635	0,442
Volume de cerne (m ³)*	0,099	0,046	46,61	0,247	0,037
Volume de alburno (m ³)*	0,127	0,045	35,72	0,267	0,057
% volumétrica de cerne**	43,24	8,519	19,70	67,69	27,80
% volumétrica de alburno**	56,76	8,519	15,01	72,20	32,31
Volume de casca (m ³)	0,042	0,013	29,77	0,078	0,021
% volumétrica de casca***	14,10	1,993	12,37	20,28	12,35
Peso seco da árvore s/c (t)*	0,119	0,041	34,64	0,237	0,057

* base árvore comercial sem casca

** base madeira

*** base árvore comercial com casca

DP- desvio padrão

c/c: com casca

s/c: sem casca

Freddo (1997) fez uma avaliação comparativa entre quatro espécies de eucalipto e uma de acácia. De acordo com os resultados do autor, as espécies mostraram valores distintos para as médias de suas árvores, evidenciando uma certa heterogeneidade. Enquanto *E. grandis* (0,335 m³) e *E. saligna* (0,282 m³) apresentaram árvores volumosas, mas de madeira menos densa (0,438 e 0,453 g/cm³, respectivamente), *E. globulus* (0,12 m³), *E. dunnii* (0,258 m³) e *Acácia mearnsii* (0,165 m³) mostraram árvores menos volumosas, mas de maior densidade básica (0,511; 0,477 e 0,566 g/cm³, respectivamente). Entretanto, apesar das menores densidades básicas, as árvores médias de *E. grandis* (0,124 tonelada) e *E. saligna* (0,107 tonelada) foram também as mais pesadas.

Carvalho (1999), estudando o comportamento de dez árvores de *Eucalyptus globulus* com dez anos de idade, comparou algumas variáveis dendrométricas, a densidade básica e a composição química. Segundo resultados encontrados pela autora, apesar de os indivíduos serem geneticamente semelhantes, terem a mesma idade e, aparentemente, terem crescido sob as mesmas condições climáticas e nutricionais, verificou-se que a velocidade de crescimento variou acentuadamente entre eles, sobretudo em diâmetro. Já para a densidade básica, verificou-se que a variabilidade entre os indivíduos foi pequena. Com respeito à caracterização química da madeira, não foram observadas diferenças significativas na percentagem dos diversos parâmetros analisados, quando se compararam as árvores entre si com a amostragem de madeira ao nível do DAP.

Tabela 3. Resultados dendrométricos analisados para as seis árvores escolhidas.

Parâmetros	Árvores com baixo teor de lignina				Árvores com alto teor de lignina			
Número da árvore	26	29	40	x	09	42	48	x
Altura total (m)	19,2	18,7	16,9	18,3	15,6	17,3	16,5	16,5
Altura comercial (m)	15,3	14,7	13,15	14,4	11,9	13,6	14,0	13,2
DAP c/c (cm)	28,6	20,9	19,1	22,9	17,9	18,3	20,0	18,7
DAP s/c (cm)	26,1	19,0	17,4	20,8	16,2	16,6	18,3	17,0
Volume comercial c/c (m³)	0,463	0,283	0,226	0,324	0,189	0,204	0,262	0,218
Volume comercial s/c (m³)	0,384	0,236	0,185	0,268	0,152	0,167	0,221	0,180
Fator de forma c/c	0,469	0,562	0,599	0,543	0,630	0,570	0,595	0,598
Fator de forma s/c	0,470	0,566	0,593	0,543	0,617	0,563	0,601	0,594
Volume de cerne (m³)*	0,145	0,104	0,067	0,105	0,071	0,063	0,097	0,077
Volume de alburno (m³)*	0,239	0,132	0,118	0,163	0,081	0,104	0,124	0,103
% volumétrica de cerne**	37,6	43,94	36,09	39,21	46,55	37,74	43,69	42,66
% volumétrica de alburno**	62,40	56,06	63,91	60,80	53,45	62,26	56,31	57,34
Volume de casca (m³)	0,078	0,047	0,040	0,055	0,036	0,037	0,041	0,038
% volumétrica de casca***	16,96	16,67	17,81	17,15	19,32	18,3	15,55	17,72
Peso seco da árvore s/c (t)*	0,205	0,126	0,095	0,142	0,085	0,089	0,116	0,097

* base árvore comercial sem casca

** base madeira

*** base árvore comercial com casca

c/c: com casca

s/c: sem casca

x: média das três árvores de acordo com o teor de lignina

4.2. Densidade básica

A densidade básica é um dos parâmetros utilizados na avaliação da qualidade da madeira destinada à produção de celulose, uma vez que influencia nas propriedades físico-mecânicas, assim como no rendimento e na qualidade da celulose (Penalber, 1983).

A Tabela 4 apresenta os valores médios encontrados de densidade básica para as 50 árvores estudadas. Os resultados individuais constam no Apêndice A.

Tabela 4. Densidade básica média para as 50 árvores de *Eucalyptus globulus*.

Parâmetros	Densidade básica, g/cm ³
Valor médio	0,531
Valor mínimo	0,461
Valor máximo	0,580
Desvio Padrão	0,024
Coeficiente de Variação, %	4,51

A Tabela acima mostra que a faixa de densidade básica encontrada para as árvores selecionadas foi limitada, apresentando um coeficiente de variação baixo (4,51%). Entretanto, pelo Quadro 3 na página seguinte, o qual apresenta a análise de variância da densidade básica das 50 árvores, com duas repetições da análise por árvore, é possível observar que houveram diferenças significativas entre as árvores para essa propriedade.

Schumacher (1995), estudando árvores de diferentes espécies de *Eucalyptus*, encontrou para o *Eucalyptus globulus* ssp *globulus* Labil., aos quatro anos de idade, uma densidade básica média de $0,522 \text{ g/cm}^3$, o que está em concordância com os resultados encontrados nessa pesquisa.

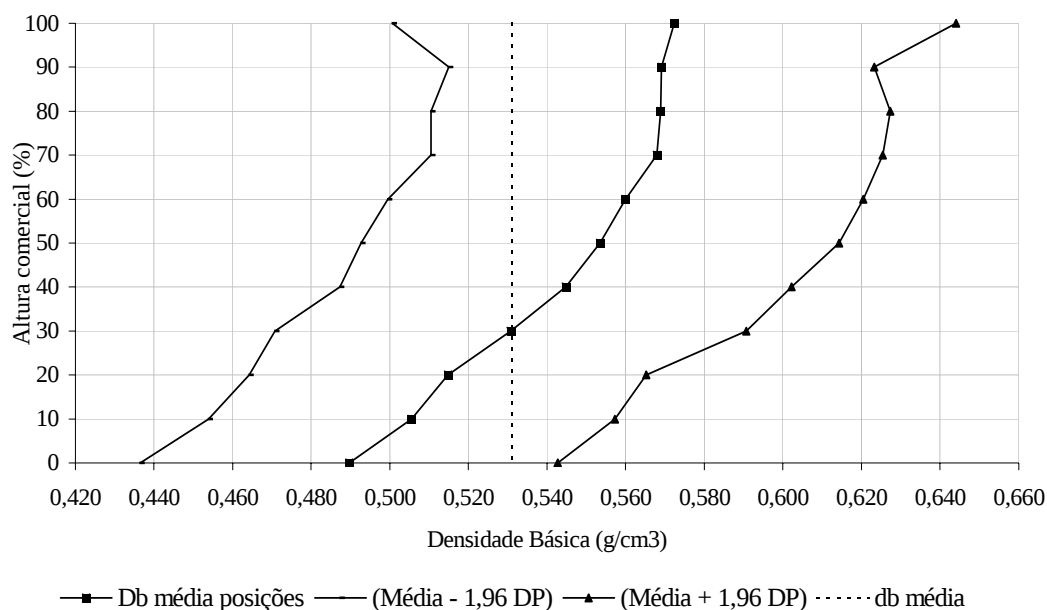
Quadro 3. Análise de variância da densidade básica das 50 árvores.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Tratamento	49	0,056513	0,0011533	82,26*	1,6
Erro	50	0,000701	1,402 E-05		
Total	99	0,057214			

* significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

A Figura 1 apresenta o gráfico com a curva média da densidade básica, correspondente à variação longitudinal, conforme a percentagem amostrada da altura comercial, obtida pela média aritmética, por posição, das densidades das 50 árvores estudadas.

De acordo com o gráfico abaixo, a densidade básica foi crescente da base para o topo. Os valores abrangidos pela amplitude de variação em posição foram bem amplos e demonstram a variação encontrada para a densidade da madeira dentro de cada posição amostrada.



Fonte: Cardoso et al. (2001).

Figura 1. Variação longitudinal da densidade básica média, por posições, das 50 árvores estudadas.

Graficamente, a posição que apresentou o mesmo valor da densidade básica média ponderada foi a posição relativa a 30 % da altura comercial das árvores.

Busnardo et. al. *apud* Busnardo et. al. (1987, p.16), estudando árvores de *Eucalyptus saligna*, com aproximadamente 10 anos de idade, concluíram que, para a particular espécie, a posição correspondente a 25 % da altura comercial da árvore foi considerada representativa para avaliação da densidade básica média da árvore. Já para *Eucalyptus grandis*, a posição correspondente a 50 % da altura comercial foi considerada como a posição representativa para avaliação da densidade básica média das árvores estudadas.

Segundo Wehr (1991), Foelkel et al. (1992) e Fonseca et al. (1996), a densidade básica para *Eucalyptus* pode variar de 0,300 a 0,800 g/cm³, porém, para a produção de celulose, recomenda-se o uso de densidade entre 0,450 e 0,550 g/cm³.

O uso de madeiras mais leves pode reduzir o rendimento do processo fabril, enquanto que o de madeiras muito densas pode dificultar a picagem das toras e a impregnação dos cavacos pelo licor branco, dificultando a deslignificação e aumentando os teores de rejeitos (Wehr, 1991).

Neste trabalho, as matrizes selecionadas apresentaram valores de densidade básica satisfatórios para produção de polpa kraft. A Tabela 5 apresenta os valores médios de densidade básica, volume de madeira e peso seco (s/c) para as seis árvores escolhidas que darão continuidade à pesquisa.

Tabela 5. Valores médios relativos à densidade básica, volume de madeira e peso seco (s/c) para as seis árvores.

Parâmetros	Densidade básica (g/cm ³)	Volume comercial s/c (m ³)	Peso seco s/c (t)
Valor médio para as seis árvores	0,533	0,224	0,119
Valor médio para as três árvores com alto teor de lignina	0,540	0,180	0,097
Valor médio para as três árvores com baixo teor de lignina	0,527	0,268	0,142
Valor mínimo entre as seis árvores	0,512	0,152	0,085
Valor máximo entre as seis árvores	0,557	0,384	0,205
Desvio Padrão entre as seis árvores	0,015	0,085	0,045
Coeficiente de Variação, %	2,75	37,7	37,6

Utilizou-se o teste “t de Student” com o objetivo de verificar a existência de homogeneidade entre as médias, para duas repetições por árvore, da densidade básica média das árvores com diferentes níveis de lignina.

Em primeiro lugar, as variâncias foram homogêneas, pelo teste F, ($F_c = 1,506 < F_{5\% (5;5)} = 5,050$), permitindo a aplicação do teste:

$$t \text{ calculado} = |-1,44|; t \text{ tabelado}_{\alpha/2} (5\%; 10) = 2,228$$

Como “t calculado” em módulo foi menor que “t tabelado”, não se rejeitou a hipótese de nulidade, ou seja, concluiu-se que não existe diferença significativa entre as duas médias de densidade básica a um nível de 5% de erro. Conseqüentemente, pode-se afirmar que as três árvores com

baixo teor de lignina não diferem estatisticamente das três árvores com alto teor de lignina, para a densidade básica da madeira, a 5% de erro.

4.3. Composição química

4.3.1. Extrativos

O resultado médio das análises de extrativos para as 50 árvores amostradas é apresentado na Tabela 6. De acordo com os dados, existe uma variabilidade significativa no teor dos extrativos encontrados para as árvores. O Quadro 4 apresenta a análise da variância, na intenção de avaliar se havia diferença entre as árvores para o teor de extrativos, o que foi comprovado a 5% de nível de significância. Os resultados individuais para teor de extrativos constam no Anexo B.

Souza et al. (1983), em seus estudos sobre o comportamento dos extrativos da madeira no processo kraft de deslignificação, evidenciaram que a utilização de árvores jovens (6-8 anos de idade), com conteúdo de extrativos relativamente baixo, é um dos fatores relevantes da matéria-prima para a obtenção de polpas com baixo conteúdo de resinas. Deve-se garantir um suficiente nível de álcali efetivo inicial na fase de cozimento e proporcionar a mais completa remoção dos extrativos nesta etapa do processo.

Tabela 6. Teor médio de extrativos para as 50 árvores.

Parâmetros	Extrativos totais, %
Valor médio para as 50 árvores	1,79
Valor médio para as três árvores com alto teor de lignina	1,93
Valor médio para as três árvores com baixo teor de lignina	1,48
Valor mínimo entre as 50 árvores	0,91
Valor máximo entre as 50 árvores	3,31
Desvio Padrão entre as 50 árvores	0,43
Coeficiente de Variação, %	24,18

Turner et al. (1983) utilizaram em seu estudo 152 árvores de *Eucalyptus globulus*, com boa forma e vigor. Os autores afirmaram a existência de alta correlação inversa entre rendimento em polpa e os teores de extrativos solúveis em água quente, assim como para carga de álcali.

Quadro 4. Análise de variância do teor de extrativos das 50 árvores.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Tratamento	49	33,72	0,69	28,93*	1,45
Erro	150	3,57	0,02		
Total	199	37,28			

* significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

4.3.2. Lignina

Os valores encontrados para teor de lignina insolúvel concordam com outros estudos (Sansígolo & Curvelo, 1994, Guarienti et al., 2000) de que o *Eucalyptus globulus*, quando comparado a outras espécies de uso comercial do gênero *Eucalyptus*, tem mostrado menor teor de lignina na madeira. Os resultados médios para lignina estão apresentados na Tabela 7. Os resultados individuais constam no Anexo B.

Para confirmar a existência de diferença estatística entre a madeira considerada com teor de lignina baixo (20,53%) e a madeira com teor de lignina alto (23,02%), compararam-se as médias, obtidas de seis repetições para cada árvore, utilizando-se o teste “t de Student”.

Uma condição para se realizar o teste é examinar a homogeneidade de variâncias, utilizando o teste de F. O resultando foi um $F_c = 1,212 < F_{5\% (17;17)} = 2,272$, o que indica que as variâncias são homogêneas, permitindo que o teste seja executado.

Confirmando-se a condição, realizou-se o teste:

$$t \text{ calculado} = |-13,78|; t \text{ tabelado}_{\alpha/2} (5\%; 34) = 2,032$$

Como “t calculado” em módulo foi maior que “t tabelado”, rejeitou-se a hipótese de nulidade, ou seja, concluiu-se que existe diferença significativa entre as duas médias de lignina a um nível de 5% de erro.

No Quadro 5, é possível observar-se que foi encontrada diferença significativa entre as árvores para o teor de lignina nas 50 árvores.

Quadro 5. Análise de variância do teor de lignina Klason das 50 árvores.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Tratamento	49	151,84	3,0987	9,03*	1,47
Erro	250	85,78	0,3431		
Total	299	237,62			

* significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

Apesar da pequena amplitude (4,45%), foi encontrada diferença significativa para o teor de lignina. As madeiras foram estatisticamente diferentes quanto ao teor de lignina, o que permitiu selecionar, entre as 50 árvores estudadas, as três árvores com menor teor de lignina e as três com maior teor de lignina, obedecida a pré-condição de similaridade da densidade básica.

Tabela 7. Teor médio de lignina para as 50 árvores.

Parâmetros	Lignina Klason, %
Valor médio para as 50 árvores	21,85
Valor médio para as três árvores com alto teor de lignina	23,02
Valor médio para as três árvores com baixo teor de lignina	20,53
Valor mínimo entre as 50 árvores	19,78
Valor máximo entre as 50 árvores	24,23
Desvio Padrão entre as 50 árvores	0,89
Coeficiente de Variação, %	4,1

4.3.3. Holocelulose

O teor de holocelulose presente nas madeiras analisadas é exposto na Tabela 8. De acordo com os valores, a amplitude de 3,82 % evidencia a diferença no teor de holocelulose entre as madeiras com diferentes teores de lignina. Os resultados individuais constam no Anexo B.

Ona et al. (1995) desenvolveram uma metodologia para determinar, em pequena escala, o conteúdo dos componentes da madeira e compararam com os métodos tradicionais. Encontraram, para *Eucalyptus globulus*, um percentual de $4,4 \pm 0,8$ de extrativos, $19,5 \pm 0,7$ de lignina e $79,6 \pm 0,4$ de holocelulose na metodologia tradicional.

Sansígolo & Curvelo (1994), estudando o comportamento da madeira de *Eucalyptus globulus* quando da deslignificação em etanol-água, constataram que a composição química característica da madeira desta espécie é apresentar menor teor de lignina (21,9%) e maior teor de holocelulose (77,8%) que outras espécies tradicionais de eucalipto para celulose, por exemplo, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*.

Tabela 8. Teor de holocelulose presente nas amostras.

Parâmetros	Holocelulose, %
Valor médio para as 50 árvores	76,36
Valor médio das três árvores com alto teor de lignina	75,10
Valor médio das três árvores com baixo teor de lignina	77,98
Valor mínimo para as 50 árvores	74,07
Valor máximo para as 50 árvores	78,49
Desvio Padrão entre as 50 árvores	0,96
Coeficiente de Variação, %	1,26

Santos (2000), estudando três métodos não-convencionais de determinação de celulose na madeira de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden, aos sete anos de idade, correlacionou, graficamente, o teor de holocelulose da madeira com extrativos totais e com lignina Klason, respectivamente. Encontrou relação negativa nos dois casos, confirmando, com isso, que, quanto menor o teor de extrativos e de lignina, maior o teor de holocelulose.

4.3.4. Cinzas

As médias obtidas para teor de cinzas são apresentadas na Tabela 9. Neste trabalho, optou-se por determinar o teor de cinzas apenas das seis

árvores escolhidas para sofrerem o processo de deslignificação, sendo que foram feitas três repetições para cada árvore.

Tabela 9. Teor médio de cinzas para as seis árvores.

Parâmetros	Cinzas, %
Valor médio para as seis árvores	0,40
Valor médio para as três árvores com alto teor de lignina	0,37
Valor médio para as três árvores com baixo teor de lignina	0,43
Valor mínimo entre as seis árvores	0,26
Valor máximo entre as seis árvores	0,50
Desvio Padrão entre as seis árvores	0,08
Coeficiente de Variação, %	19,62

O valor médio encontrado para teor de cinzas para o *Eucalyptus globulus* foi de 0,4%, concordando com Cáceres (1983). Pereira (1988) estudando árvores desta espécie entre 11 e 14 anos, de quatro locais geograficamente diferentes, encontrou o mesmo teor médio para cinzas. Sacon et al. (1995) avaliaram a performance do *Eucalyptus globulus* e encontraram teor médio de 0,47% para cinzas.

4.4. Relação entre densidade básica e composição química da madeira

A Figura 2 buscou relacionar densidade básica e lignina Klason da madeira das 50 árvores amostradas. Nota-se que o gráfico apresenta valores significativamente espalhados, indicando ausência de relação entre essas propriedades para as madeiras estudadas.

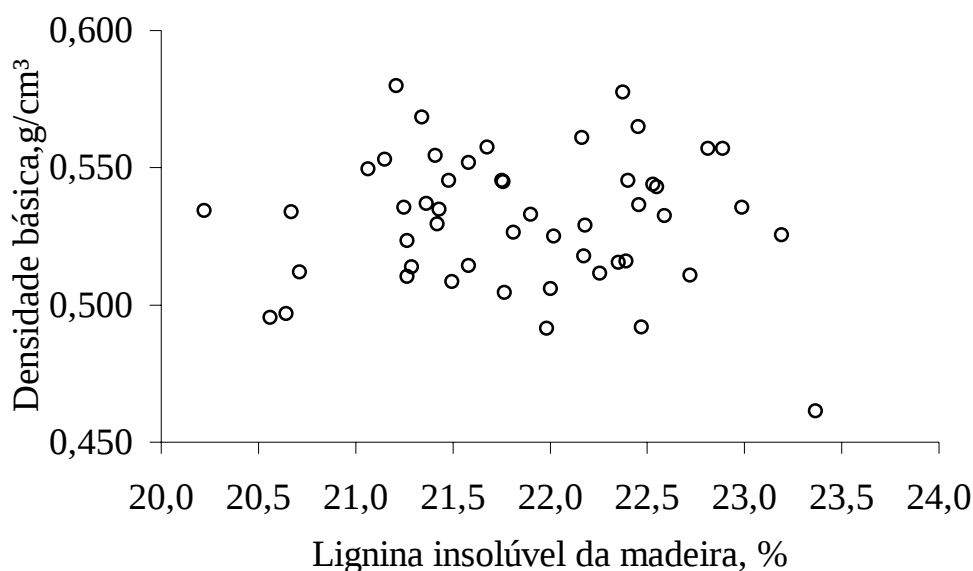


Figura 2. Relação entre densidade básica e lignina Klason da madeira.

Shimoyama (1990), em estudos realizados com árvores de *Eucalyptus*, aos sete anos, não encontrou nenhuma correlação entre o teor de lignina e o valor de densidade básica da madeira.

Estudos realizados por Vasconcelos Dias & Cláudio-da-Silva Júnior (1985), utilizando 25 árvores de *Eucalyptus grandis* de sete anos de idade e mesma procedência, apontam correlação direta entre teor de lignina e valor

de densidade básica da madeira e relação inversa entre densidade básica e hemiceluloses.

4.5. Produção de celulose kraft

Nas Tabelas 10, 11, 12 e 13, estão os dados das características das polpas resultantes da deslignificação kraft das madeiras com diferentes teores de lignina.

Nota-se que o pH dos licores residuais ficou dentro da faixa indicada para deslignificação kraft. Penalber (1983), estudando a polpação de *Eucalyptus grandis* pelo processo sulfito neutro, com e sem adição de antraquinona, evidenciou que os licores residuais devem apresentar valores de pH dentro da faixa indicada para os cozimentos kraft (pH de 11,0 a 13,0). Os altos valores de pH obtidos são desejáveis, uma vez que certa quantidade de álcali deve permanecer como resíduo para evitar a reprecipitação de lignina nas fibras, o que as tornaria mais hidrofóbicas.

Tabela 10. Resultados da designificação kraft das madeiras com alto teor de lignina.

Árvores selecionadas	Álcali efetivo consumido base madeira	Rendimento		Teor de rejeitos	pH do licor negro residual
	(%)	bruto (%)	depurado (%)	(%)	
9	16,32	50,50	50,27	0,23	12,4
9	15,91	50,30	50,10	0,20	12,64
9	15,49	50,02	49,88	0,14	12,64
9	16,13	50,48	50,31	0,17	12,50
42	15,38	51,30	51,23	0,07	12,69
42	15,37	51,04	50,94	0,10	12,46
42	15,41	51,52	51,24	0,28	12,67
42	15,38	50,57	50,51	0,06	12,68
48	15,82	51,32	51,16	0,16	12,47
48	15,75	50,21	50,07	0,14	12,59
48	14,70	49,92	49,88	0,04	12,62
48	14,60	51,10	51,01	0,09	12,72
Média	15,69	50,69	50,55	0,14	12,59
Máximo	16,32	51,52	51,24	0,28	12,72
Mínimo	15,37	49,92	49,88	0,04	12,40
Amplitude	0,95	1,60	1,36	0,24	0,32
DP	0,313	0,545	0,534	0,072	0,105
CV (%)	2,00	1,08	1,06	51,87	0,84

DP – desvio padrão

CV – coeficiente de variação

Tabela 11. Resultados da deslignificação kraft das madeiras com alto teor de lignina.

Árvores selecionadas	Número kappa	Alvura (%ISO)	Viscosidade intrínseca (cm ³ /g)	S _{5%} (%)	Sólidos no licor negro (kg ssd/kg celulose a.s.)
9	18,0	38,32	1145	14,5	1,35
9	17,7	41,12	1145	14,3	1,36
9	17,1	39,91	1150	14,1	1,38
9	17,8	40,49	1185	14,6	1,35
42	16,8	45,40	1140	14,0	1,32
42	16,8	44,74	1125	14,0	1,33
42	16,6	44,55	1160	14,3	1,31
42	16,9	45,78	1140	13,8	1,35
48	16,8	39,80	1195	13,7	1,32
48	16,8	39,93	1095	13,6	1,37
48	16,6	39,88	1065	13,5	1,38
48	16,6	39,51	1055	13,5	1,33
Média	17,0	41,62	1133	14,0	1,35
Máximo	18,0	45,78	1195	14,6	1,38
Mínimo	16,6	38,32	1055	13,5	1,31
Amplitude	1,4	7,46	140	1,1	0,07
DP	0,501	2,678	42,817	0,380	0,02
CV (%)	2,94	6,44	3,78	2,72	1,78

DP – desvio padrão

CV – coeficiente de variação

Número kappa – índice que informa o teor de lignina residual da celulose.

Tabela 12. Resultados da deslignificação kraft das madeiras com baixo teor de lignina.

Árvores selecionadas	Álcali efetivo consumido base madeira	Rendimento		Teor de rejeitos	pH do licor negro residual
	(%)	bruto (%)	depurado (%)	(%)	
26	15,80	51,52	51,38	0,14	12,20
26	15,79	51,68	51,57	0,11	12,22
26	15,29	51,34	51,25	0,09	12,54
26	15,28	51,44	51,35	0,09	12,48
29	14,92	54,14	53,98	0,16	12,46
29	15,10	54,34	54,23	0,11	12,61
29	14,89	55,12	54,96	0,16	12,70
29	14,85	55,00	54,75	0,25	12,72
40	15,15	52,85	52,74	0,11	12,39
40	15,12	52,97	52,79	0,18	12,32
40	14,90	53,26	53,15	0,11	12,56
40	14,68	52,92	52,78	0,14	12,71
Média	15,15	53,05	52,91	0,14	12,49
Máximo	15,80	55,12	54,96	0,25	12,72
Mínimo	14,68	51,34	51,25	0,09	12,20
Amplitude	1,12	3,78	3,71	0,16	0,52
DP	0,352	1,374	1,346	0,046	0,182
CV%	2,33	2,59	2,54	33,27	1,46

Tabela 13. Resultados da deslignificação kraft das madeiras com baixo teor de lignina.

Árvores selecionadas	Número kappa	Alvura (%ISO)	Viscosidade intrínseca (cm ³ /g)	S _{5%} (%)	Sólidos no licor negro (kg ssd/kg celulose a.s.)
26	18,2	39,09	1265	14,5	1,29
26	17,8	37,79	1305	14,6	1,28
26	16,4	39,48	1275	14,3	1,29
26	16,3	40,09	1210	14,5	1,29
29	16,3	41,40	1200	12,9	1,18
29	16,6	42,05	1160	13,7	1,17
29	16,6	41,88	1260	13,1	1,14
29	16,4	41,85	1245	13,4	1,14
40	17,0	43,08	1185	13,6	1,23
40	16,6	43,27	1185	13,5	1,22
40	16,6	43,86	1160	13,4	1,21
40	16,2	44,28	1135	13,5	1,23
Média	16,8	41,51	1215	13,8	1,22
Máximo	18,2	44,28	1305	14,6	1,29
Mínimo	16,2	37,79	1135	12,9	1,14
Amplitude	2,0	6,49	170	1,7	0,15
DP	0,625	2,025	53,617	0,579	0,06
CV%	3,74	4,88	4,41	4,21	4,64

DP – desvio padrão

CV – coeficiente de variação

4.5.1. Rendimentos e teores de rejeitos

O gráfico apresentado na Figura 3, assim como os demais gráficos apresentados nas figuras a seguir, mostram o desempenho da deslignificação das madeiras. Neles, o valor de cada árvore corresponde à média de quatro cozimentos, e as expressões $Média_{LA}$ e $Média_{LB}$, correspondem à média dos 12 cozimentos executados para cada nível de teor de lignina da madeira, sendo LA correspondente à madeira de lignina alta e LB da lignina baixa.

Os resultados foram comparados graficamente e através de análise de variância. As análises da variância para cada uma das propriedades são apresentadas no Apêndice C.

A Figura 3 mostra a influência do teor de lignina no rendimento bruto da deslignificação kraft. Nota-se uma diferença significativa entre as médias das árvores com diferentes teores de lignina ($F_c=31,02 > F_{5\%}=4,30$; $\Delta = 2,3$). As árvores com alto teor de lignina tiveram um rendimento de 50,33 a 50,64%. Entre árvores com baixo teor de lignina na madeira, o rendimento foi superior, variando de 51,50 a 54,65%. O valor Δ mostra a diferença entre as médias para os dois níveis de lignina das madeiras originais.

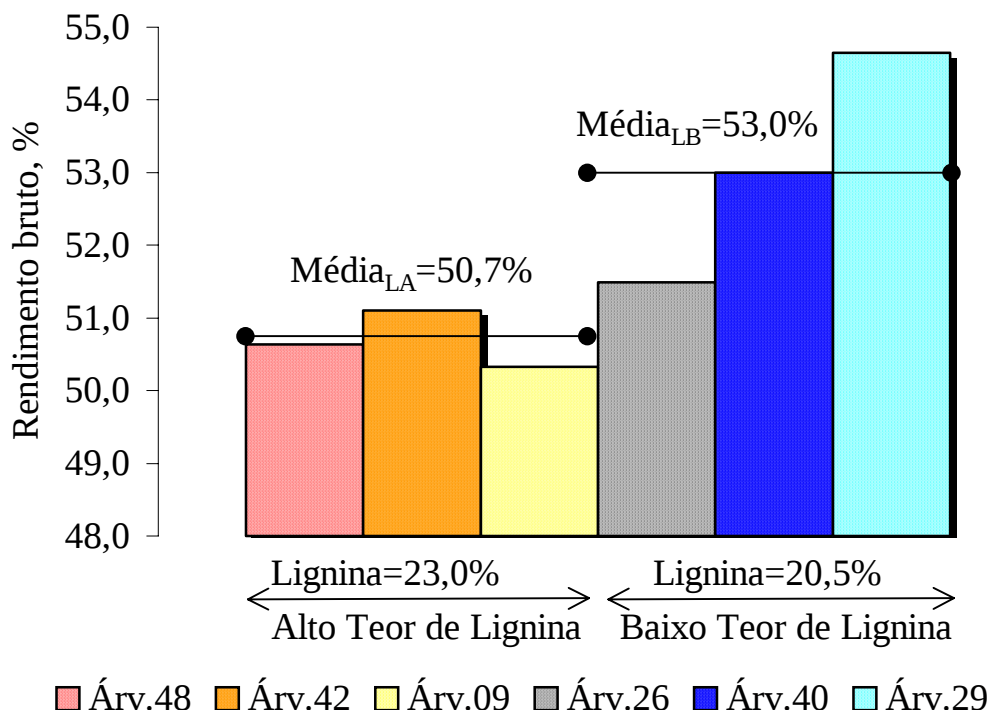


Figura 3. Influência do teor de lignina da madeira sobre o rendimento bruto.

A Figura 4 apresenta o gráfico representativo da influência do teor de lignina sobre o rendimento depurado. Do mesmo modo que o rendimento bruto, o rendimento depurado teve o mesmo comportamento, tendo sido significativa a influência dos diferentes teores de lignina das madeiras ($F_c=31,90 > F_{5\%}=4,30$; $\Delta=2,4$).

Cáceres (1983), em estudo preliminar sobre cinco espécies de *Eucalyptus* (*E. globulus*, *E. saligna*, *E. citriodora*, *E. tereticornis*, *E. grandis*), aos nove anos de idade, como possíveis fontes de polpas químicas celulósicas, observou que o *Eucalyptus globulus*, possuindo densidade básica igual a $0,570 \text{ g/cm}^3$ e o menor teor de lignina (22,9%), se for comparado às demais espécies estudadas, alcançou o melhor rendimento total, 53,0%.

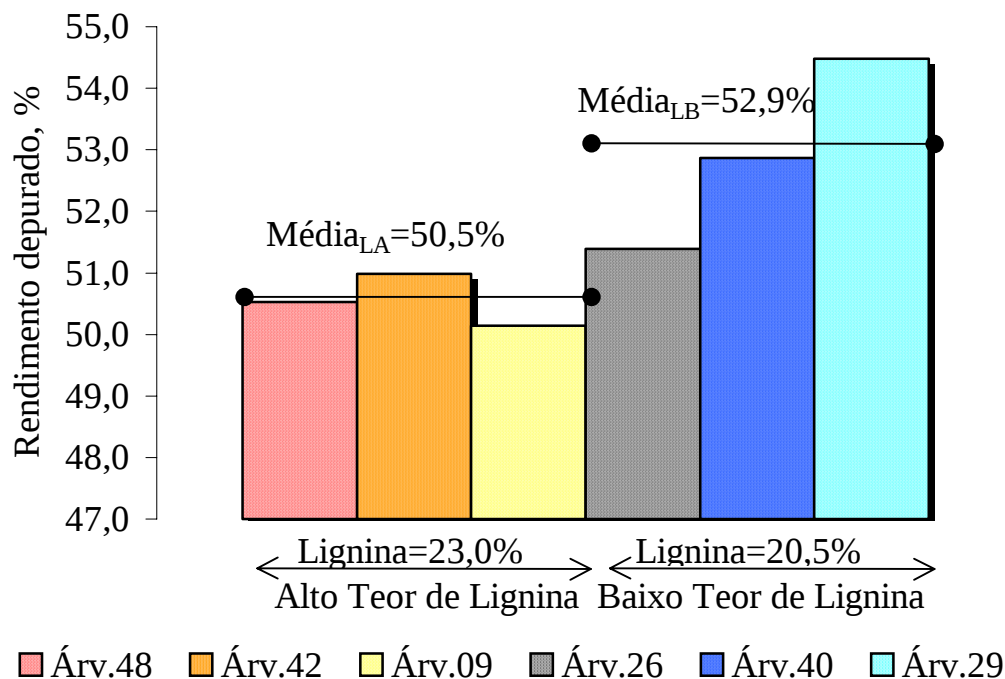


Figura 4. Influência do teor de lignina da madeira sobre o rendimento depurado.

Wehr & Barrichelo (1992) estudaram madeiras de *Eucalyptus grandis* de diferentes plantios. Concluíram que a qualidade da madeira, inicialmente definida pela densidade básica, foi acompanhada por variações na composição química. Os tipos de madeira de maior densidade apresentaram os teores de extrativos e de holocelulose mais elevados. As variações nos aspectos de qualidade da madeira conduziram a diferenças de até oito pontos percentuais no rendimento depurado em cozimentos com número kappa igual a 18.

A Figura 5 relaciona o teor de rejeitos gerado na deslignificação kraft com o teor de lignina Klason da madeira. Nota-se que a geração de rejeitos pode estar sendo influenciada pelo processo, pelas dimensões e características dos cavacos, pelas condições aplicadas, e não apenas pelo teor de lignina presente na madeira. O teor de rejeitos variou para cada

árvore, não tendo influência o teor de lignina das madeiras ($F_c=0,01 < F_{5\%}=4,30$; $\Delta=0,0$), sendo que o valor médio foi igual para as árvores com alto teor de lignina e para as árvores com baixo teor de lignina na madeira (média=0,14%).

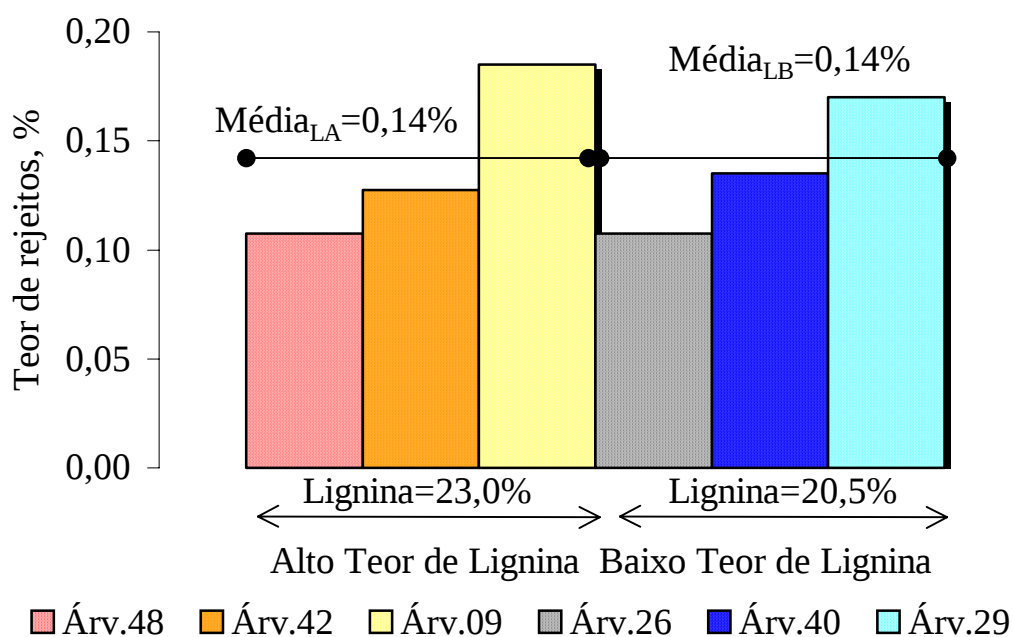


Figura 5. Relação entre teor de rejeitos e teor de lignina da madeira.

4.5.2. Consumo de álcali efetivo no cozimento kraft

A Figura 6 mostra a relação entre teor de lignina da madeira e álcali efetivo consumido no cozimento, expresso em base madeira absolutamente seca. O consumo de álcali efetivo foi significativamente diferente para as

árvores com diferentes teores de lignina ($F_c=15,78 > F_{5\%}=4,30$; $\Delta=0,6$). As madeiras das árvores com alto teor de lignina consumiram entre 15,39 e 15,96%, média de 15,70%. Para as árvores com baixo teor de lignina, o consumo variou de 14,94 a 15,54%, média de 15,15%.

As madeiras com baixo teor de lignina consumiram também menor quantidade de álcali ativo aplicado para alcançar o grau de deslignificação objetivo (número kappa médio de 16,8), acusando maiores rendimentos e menor degradação das celuloses, como mostra o comportamento para viscosidade intrínseca.

As madeiras com alto teor de lignina apresentaram um comportamento inverso, concordando com Costa et al. (1997) que, estudando o potencial de quatro madeiras de eucalipto na produção de polpa solúvel branqueada, observou que os maiores teores de lignina total, obtidos pela soma dos teores de lignina insolúvel mais lignina solúvel, requerem, normalmente, maiores dosagens de álcali para obter o mesmo número kappa no cozimento pré-hidrólise kraft.

Cáceres (1983) encontrou, para *E. globulus*, um consumo de álcali de 12,7%, rendimento de 53% a um número kappa 16; e, para *E. citriodora*, o consumo de álcali foi de 11,0%, rendimento de 47%, para número kappa igual a 14.

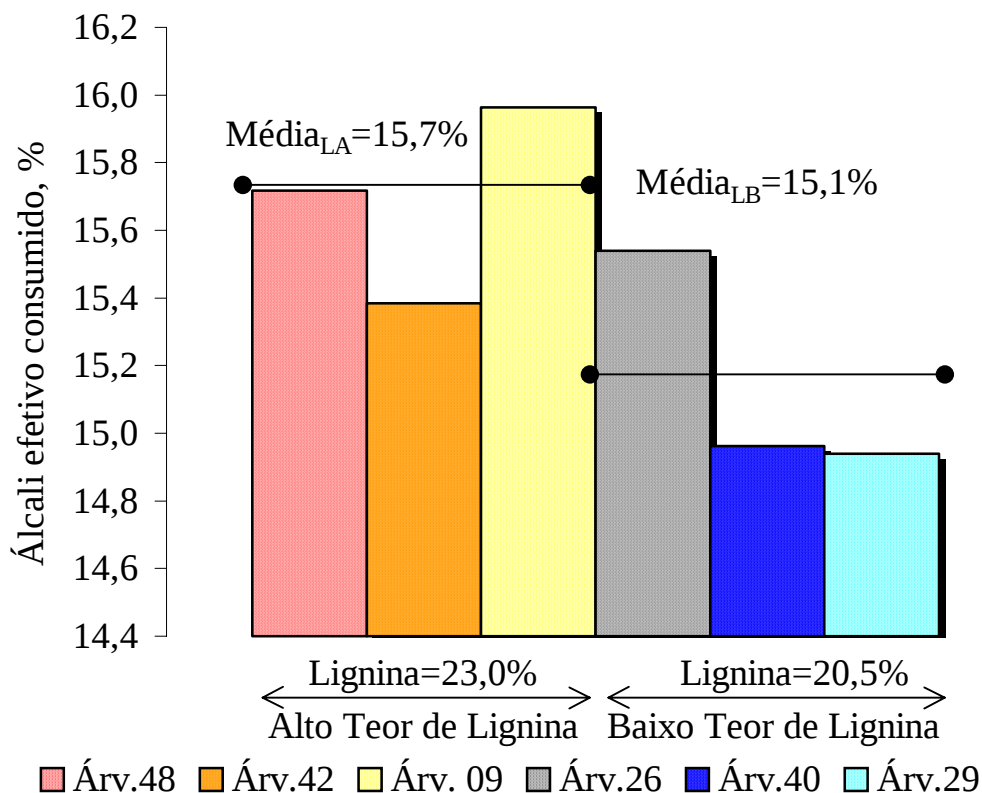


Figura 6. Relação entre álcali efetivo consumido e teor de lignina da madeira.

4.5.3. Geração de sólidos secos dissolvidos

Um importante parâmetro para a avaliação da potencialidade de diferentes tipos de madeira tem sido a quantidade de sólidos gerados no cozimento em relação à quantidade de celulose produzida. Isto porque a capacidade de queima de sólidos nas caldeiras de recuperação é que tem limitado a capacidade de produção de celulose na maioria das fábricas do processo kraft. As causas da geração de sólidos são cavacos muito finos,

juntamente com o pó, baixos rendimentos e elevado consumo de reagentes químicos para o cozimento na forma de álcali ativo (Wehr, 1991).

Para um licor negro kraft, assume-se que os sólidos contêm em torno de 40% de lignina alcalina, 30% de carboidratos e 5% de acetatos. (Busnardo, 1981).

A Figura 7 mostra a relação entre os sólidos secos gerados no licor negro e o teor de lignina insolúvel da madeira. As madeiras com baixo teor de lignina apresentaram um menor teor de sólidos minerais gerados no licor negro (média=1,22 kg ssd/kg celulose a.s.) do que as madeiras com alto teor de lignina (média=1,35 kg ssd/kg celulose a.s.). O teor de lignina afetou significativamente a geração de sólidos ($F_{calc}=48,13 > F_{5\%}=4,30$; $\Delta=0,13$). Essa é uma importante característica industrial, pois está associada a toda operação e capacidade do sistema de recuperação do licor. Menores valores de sólidos secos dissolvidos são altamente desejáveis.

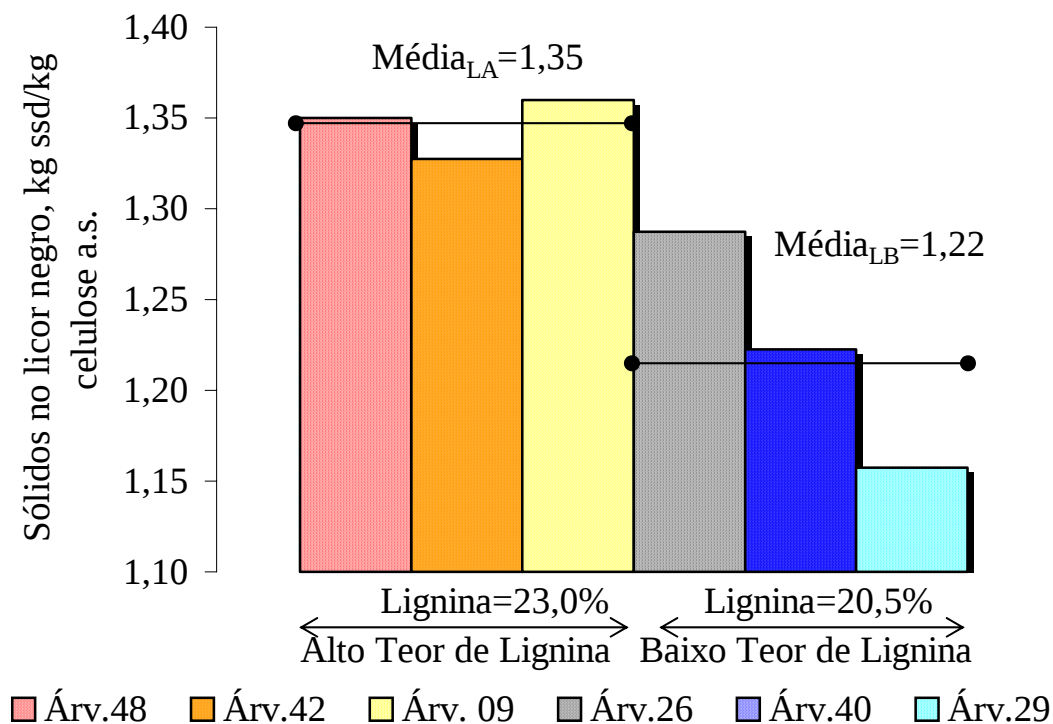


Figura 7. Relação entre sólidos gerados e teor de lignina da madeira.

Wehr (1991), estudando as variações nas características da madeira de *E. grandis* e suas influências na qualidade de cavacos em cozimentos kraft, observou que as menores quantidades de sólidos orgânicos gerados em relação à quantidade de celulose produzida em cozimentos foi para os cavacos de espessura entre 2,00 e 5,95 mm, nos quais encontrou resultados entre 0,85 e 1,13 kg sólidos/kg celulose depurada.

4.5.4. Número kappa das celulosas

De acordo com a Figura 8, o número kappa variou muito pouco entre as diferentes celulosas, sendo que o teor de lignina da madeira não afetou o número kappa ($F_c=1,59 < F_{5\%}=4,30$; $\Delta=0,2$). Isso está de acordo com o objetivo inicial que era a produção de celulosas com números kappa similares para fins de comparação das demais propriedades.

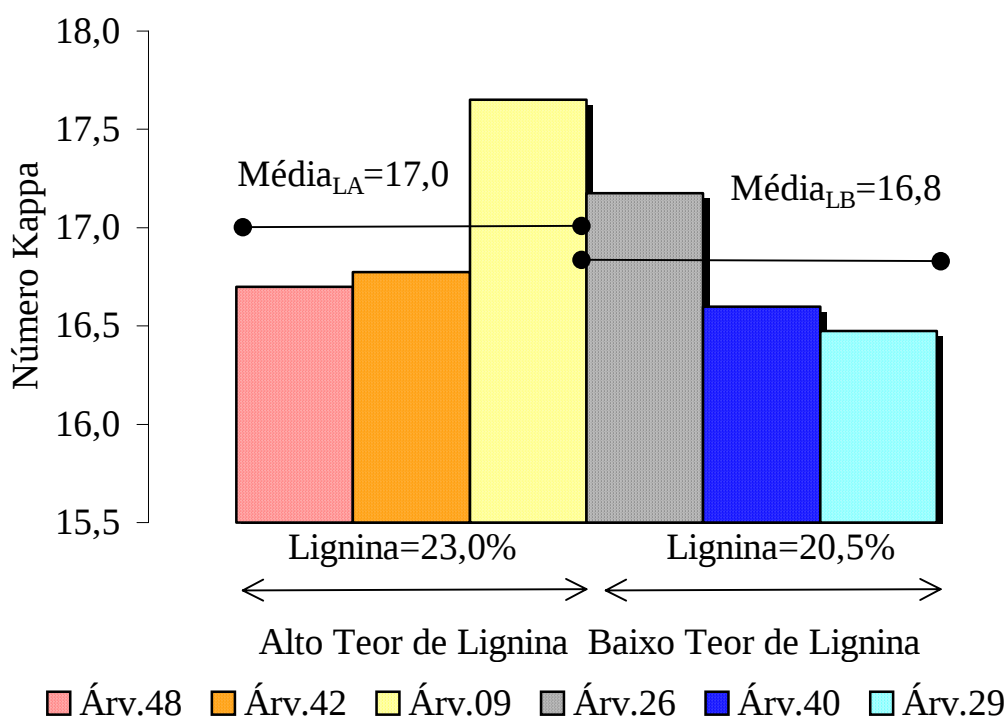


Figura 8. Relação entre número kappa e teor de lignina da madeira.

Santos (2000) cita que um menor teor de lignina na madeira, conseqüentemente, proporciona menor quantidade de lignina para ser removida no processo de deslignificação, o que pode favorecer a obtenção

de um menor número kappa. Porém, segundo Endt et al. (2000), a velocidade de deslignificação parece ser independente do teor de lignina Klason na madeira e pode estar relacionada à diferença na estrutura molecular da lignina entre os híbridos.

4.5.5. Alvura das celuloses não branqueadas

Nota-se, na Figura 9, que a alvura média das celuloses foi muito variável para as diferentes árvores, independentemente do teor de lignina ($F_c=0,04 < F_{5\%}=4,30$; $\Delta=0,2$). Para as árvores com alto teor de lignina na madeira, a alvura da celulose variou de 39,78 a 45,12 % ISO, média de 41,6 % ISO. Para as árvores com baixo teor de lignina na madeira, a alvura das celuloses ficou entre 38,86 e 41,80 % ISO, média de 41,4 % ISO. As médias gerais foram estatisticamente semelhantes a 5% de erro, mostrando que os dois tipos de madeiras resultaram em polpas de similar alvura média.

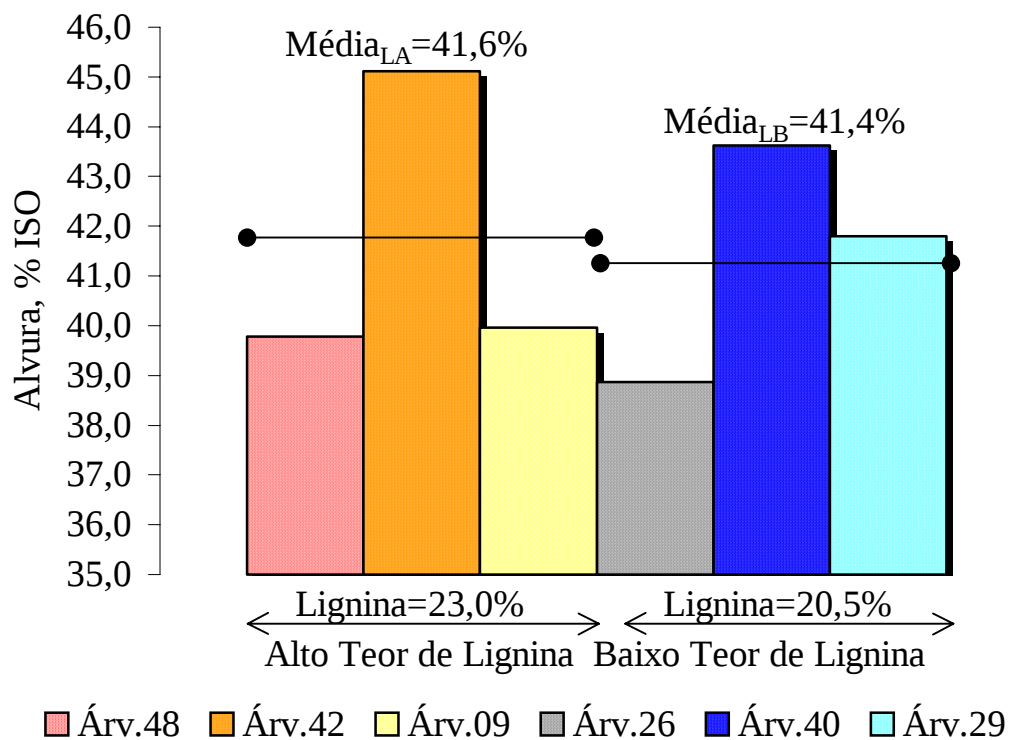


Figura 9. Relação entre alvura e teor de lignina da madeira.

Os valores médios de alvura encontrados neste estudo são semelhantes ao valor encontrado por Ezpeleta & Viqueira (1981) para *E. globulus*, que foi de 41,0 % ISO, sendo superior ao valor encontrado para *E. maidennii*, de 35 % ISO, e para *E. viminalis*, 32 % ISO.

4.5.6. Viscosidade intrínseca das celuloses

Enquanto o índice kappa fornece uma indicação do grau de deslignificação da pasta, a viscosidade traduz o grau de degradação (ou

despolimerização) da celulose. Sendo, portanto, uma característica da pasta que é imprescindível determinar.

A Figura 10 mostra a relação entre teor de lignina Klason da madeira e viscosidade intrínseca da polpa. A viscosidade foi significativamente superior para as celuloses das árvores com baixo teor de lignina na madeira, variando de 1166 a 1264 cm^3/g , média de 1215 cm^3/g . Nas árvores com alto teor de lignina na madeira, a viscosidade das celuloses variou de 1102 a 1156 cm^3/g , o que corresponde a uma média de 1133 cm^3/g . Houve influência do teor de lignina das madeiras sobre a viscosidade das polpas resultantes ($F_c=17,17 > F_{5\%}=4,30$; $\Delta=82,0$).

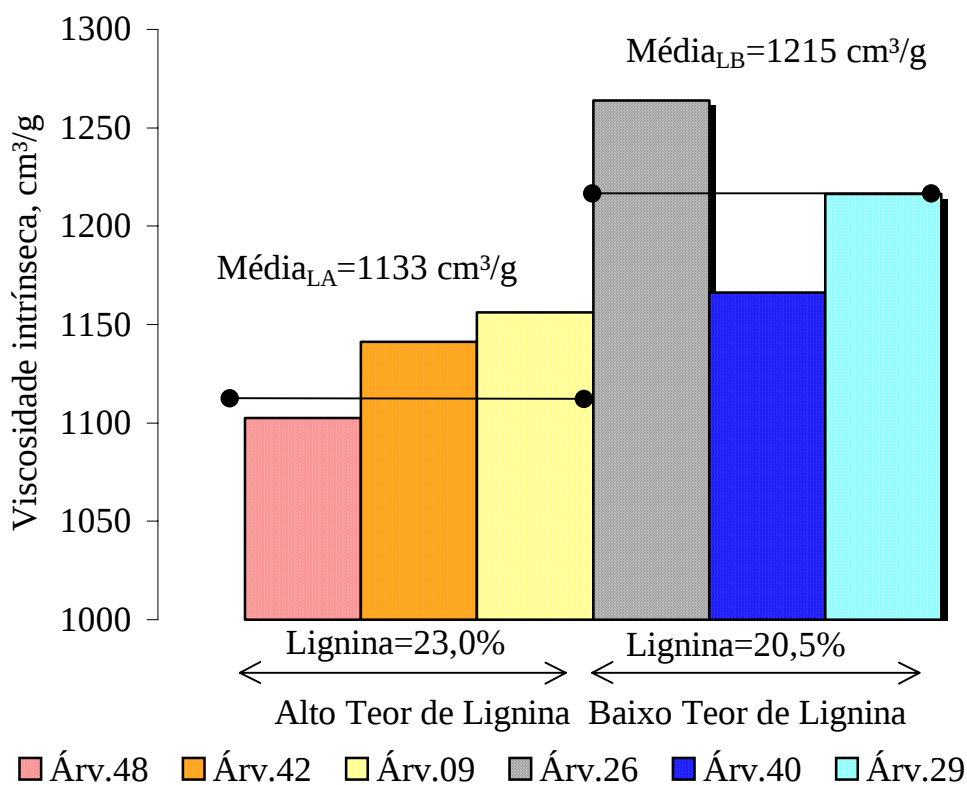


Figura 10. Relação entre viscosidade intrínseca e teor de lignina da madeira.

Carvalho et al. (1998), em estudos de variabilidade num clone de *E. globulus*, aos dez anos, encontrou uma viscosidade intrínseca igual a 1301 cm³/g para número kappa 16,7 e rendimento total de 53,2%.

Sacon et al. (1995), comparando quatro espécies de *Eucalyptus*, encontraram a maior viscosidade para o *E. globulus*, 1165 cm³/g, com teor de lignina na madeira igual a 22,0%. O *E. saligna* apresentou viscosidade de 1129 cm³/g e lignina igual a 24,4%. A viscosidade do *E. biscoata* foi de 1110 cm³/g e teor de lignina 22,5%. Para *E. maidenii*, a viscosidade foi a menor, 1041 cm³/g, e lignina igual a 23,1%.

4.5.7. Solubilidade em NaOH_{5%} das celulosas (S_{5%})

Este ensaio permite estimar de forma indireta o teor correspondente à quantidade de hemiceluloses, principalmente pentosanas.

Conforme pode ser observado na Figura 11, os diferentes teores de lignina da madeira não influenciaram a variação nos resultados para S_{5%} (Fc=1,46<F_{5%}=4,30; Δ=0,2). Entre as celulosas das árvores com alto teor de lignina, o S_{5%} variou de 13,6 a 14,4%, média de 14,0%, e entre as árvores com baixo teor de lignina, o S_{5%} das celulosas variou de 13,3 a 14,5%, média de 13,8%.

As médias encontradas para S_{5%}, relativas às celulosas das árvores com diferentes teores de lignina, mostraram valores próximos, mas bem

superiores ao encontrado por Sacon et al. (1995) para o *E. globulus*, que foi de 11,8%.

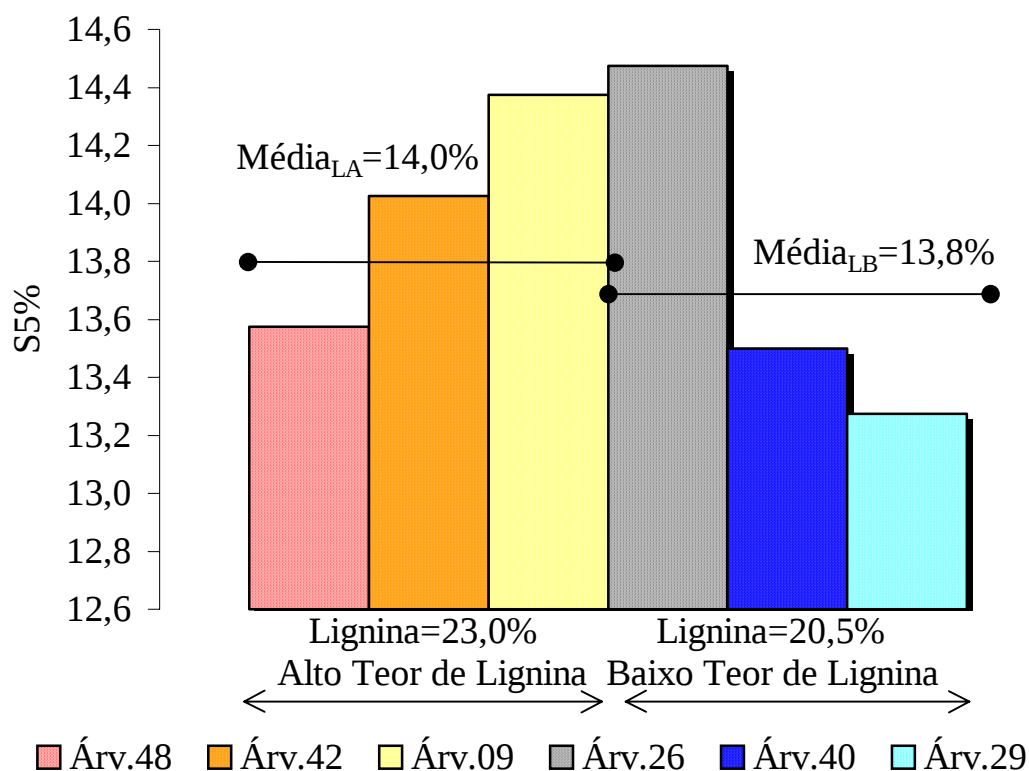


Figura 11. Relação entre $S_{5\%}$ e teor de lignina da madeira.

4.6. Refino das polpas não-branqueadas

As polpas refinadas foram ensaiadas para que se observasse a influência dos diferentes teores de lignina das madeiras sobre suas propriedades, bem como o comportamento das polpas à medida em que aumentava o grau de refino. Foram realizadas comparações a 25 e 30 graus

Schopper Riegler ($^{\circ}\text{SR}$), bem como avaliação das curvas das propriedades ao longo do refino.

Deu-se preferência para avaliar as celuloses nos níveis baixos de refino, que são os mais usuais para celuloses de eucalipto. Os resultados foram comparados graficamente e também nos níveis pré-estabelecidos de refino, 25 e 30 $^{\circ}\text{SR}$; neste último caso, através de análise de variância. As tabelas que mostram todos os resultados encontrados para os ensaios estão nos Apêndices D e E. O Quadro 7, em resumo, mostra quais as propriedades que sofreram influência significativa do teor de lignina e/ou do grau de refino. As análises da variância para cada uma das propriedades são apresentadas no Apêndice F.

4.6.1. Energia de refino (número de revoluções do PFI)

A energia de refino está intimamente ligada a teores de hemiceluloses, à anatomia, à degradação e à rigidez das fibras. Teoricamente, polpas com teores mais altos de hemicelulose refinam mais facilmente, requerendo menos energia para a refinação (Milanez, 1982).

Segundo Oliveira (2002), as variáveis como tipo de celulose, consistência, pH, entre outras, associadas a equipamentos, potência, velocidade, área de refinação e comprimento específico de corte são geralmente relacionadas à economia de energia na operação de refino. O controle dessas variáveis está associado à facilidade da ação dos elementos

refinadores sobre as fibras para promover ou manter as propriedades do papel. Estas, por sua vez, podem estar associadas aos fenômenos de umedecimento, hidratação, inchamento, formação de flocos, desfibramento e corte de fibras, merecendo, portanto, a devida atenção para o estabelecimento dos procedimentos operacionais.

Através dos resultados apresentados na Tabela 14, observa-se que a energia necessária para refinar as polpas de madeiras com baixo teor de lignina foi maior, quando comparada com as polpas obtidas das madeiras com alto teor de lignina, tanto a 25°SR como a 30°SR.

Tabela 14. Energia necessária para refinar as polpas a 25 e 30°SR.

	Energia de refino no PFI	
	N = revoluções (média das 10 repetições)	
Polpas de madeiras de alto teor de lignina	25°SR	0
	30°SR	100
Polpas de madeiras de baixo teor de lignina	25°SR	200
	30°SR	600

De acordo com observações publicadas por Jerônimo (1997), uma hipótese para explicar este fato é o comportamento da fibra durante os diferentes cozimentos. Apesar de se terem resultados similares de hemiceluloses, expressos indiretamente como solubilidade das polpas em solução de NaOH a 5%, as hemiceluloses das polpas de madeiras de alto teor de lignina possivelmente possuem menor peso molecular e são mais plásticas, devido às condições de cozimento desse tipo de madeira, que são mais severas. Outra diferença importante é quanto à viscosidade intrínseca

das celuloses. Em geral, celuloses mais degradadas, como é o caso das celuloses obtidas de madeiras de teor de lignina mais elevado, costumam refinar mais facilmente, necessitando menores energias de refino.

4.6.2. Propriedades físico-mecânicas das polpas refinadas

Para avaliar o comportamento das polpas com a evolução do grau de refino, foram confeccionados gráficos demonstrativos para cada propriedade analisada. Foram construídas curvas para as polpas produzidas a partir das madeiras com baixo teor de lignina e com alto teor de lignina, através de ajustamento de modelos matemáticos.

Quadro 6. Valores médios a 25 e 30° SR das propriedades físico-mecânicas das celuloses obtidas de madeiras de alto e baixo teor de lignina.

	Teor de lignina na madeira			
	<i>ALTO</i>		<i>BAIXO</i>	
°SR	25	30	25	30
Índice de tração, N.m/g	50,5	63,9	61,2	77,0
Índice de estouro, kPa.m ² /g	2,8	4,1	3,6	5,3
Índice de rasgo, mN.m ² /g	9,1	10,5	11,3	13,0
Volume específico, cm ³ /g	1,8	1,5	1,6	1,5
Resistência ao ar, s/100 cm ³	6,3	3,2	3,5	3,3

O Quadro 7 mostra os resultados da análise estatística aplicada nas propriedades do refino, no qual são apresentadas a influência do teor de lignina da madeira, do grau de refino e da interação entre as causas de variação.

Quadro 7. Resultados das análises da variância para propriedades físico-mecânicas das polpas.

Propriedade	Fc do teor de lignina	Fc do grau de refino	Fc da Interação
Índice de tração	53,32*	80,41*	0,49 ^{ns}
Índice de estouro	36,92*	83,36*	2,53 ^{ns}
Índice de rasgo	26,15*	11,45*	0,11 ^{ns}
Volume específico	6,02*	12,39*	3,29 ^{ns}
Resistência ao ar	4,84*	7,51*	5,59*

* Significativo ao nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

ns - não significativo ao nível de confiança estabelecido.

$$F_{5\% \text{ tabela}} = 4,13$$

Fc = F calculado pela ANOVA, teste F.

4.6.2.1. Resistência à tração

Conceitualmente, é a força de tensão direta, necessária para arrebentar uma tira do papel tracionado. Esta propriedade tende a aumentar com o refino.

A Figura 12 mostra o desempenho das polpas refinadas quanto à tração. Nela, percebe-se que, à medida que o grau de refino aumenta, aumenta também a resistência à tração. Existe uma significativa influência do refino aplicado e, também, do teor de lignina. Isso pode ser observado tanto na figura abaixo como no Quadro 7, que apresenta as análises da variância de forma simplificada.

As polpas obtidas de madeiras de baixo teor de lignina mostraram-se mais resistentes à tração, para os dois níveis de °SR estudados, uma vez que não foi observada interação entre teor de lignina e °SR. É possível associar este comportamento com a viscosidade (D’Almeida, 1986), pois as polpas de madeira com baixo teor de lignina apresentaram maiores viscosidades do que as polpas de madeira com alto teor de lignina. À medida que aumentava o refino, esta influência foi mais nítida.

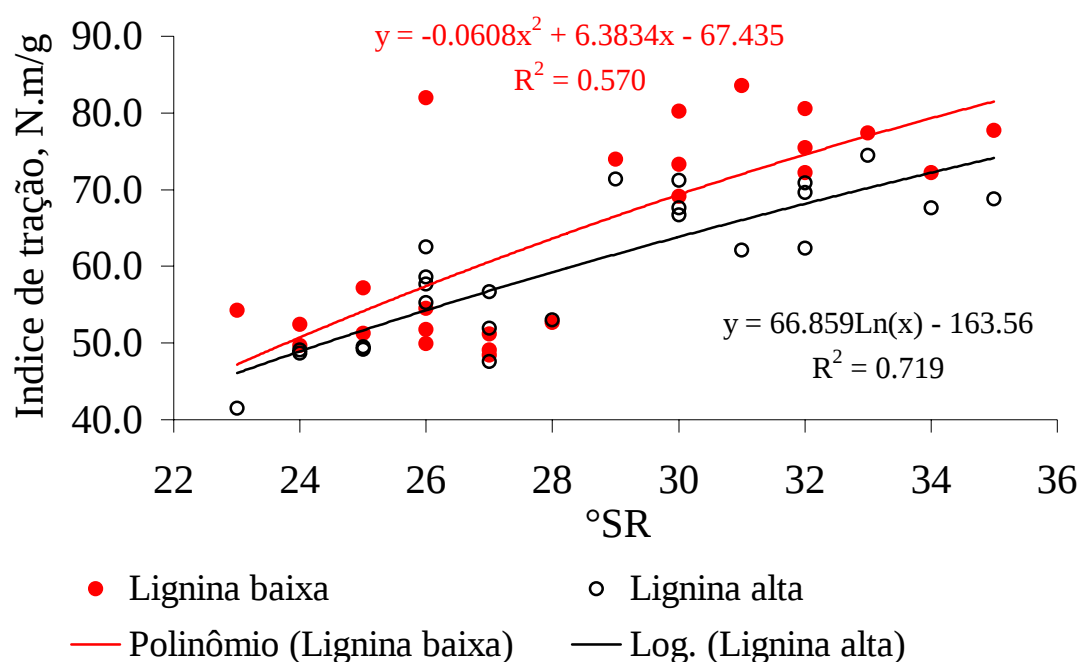


Figura 12. Relação entre índice de tração e grau Schopper Riegler.

Sansígolo et al. (1988) em seus estudos comparativos da qualidade das polpas resultantes, encontraram no que se refere a esta propriedade, para *E. globulus*, 69,5 N.m/g (25°SR) e 93,0 N.m/g (30°SR), e, para *E. saligna*, 63,5 N.m/g (25°SR) e 94,1 N.m/g (30°SR).

Perez (2002) apresentou valores semelhantes aos encontrados por Sansígolo et al. (1988) para esta propriedade, a 25°SR, em algumas árvores desta espécie avaliadas (65,1; 67,6; 73,8; e 76,4 N.m/g).

4.6.2.2. Resistência ao estouro

É a resistência que o papel apresenta ao ser submetido a uma pressão. A resistência ao estouro (ou arrebentamento) é controlada por diversos fatores, tais como: a) a resistência ao estouro aumenta com crescente refinação e decresce com o excesso. A baixa resistência ao estouro pode ser atribuída, em parte, ao corte e à destruição da estrutura das fibras; b) as variações na gramatura e na espessura causam comumente variação na resistência ao arrebentamento e; c) o uso de aditivos e colas afeta consideravelmente o comportamento do papel e o resultado do ensaio (Barrotti & Bergman, 1988).

A Figura 13 mostra o desempenho das polpas em relação ao teste de estouro. De acordo com os resultados do Quadro 7, existe uma grande influência do grau de refino e do teor de lignina das madeiras sobre esta propriedade da celulose.

O baixo teor de lignina da madeira exerceu maior influência sobre o grau de refino acima de 30°SR. Pode-se afirmar, conforme os resultados da análise da variância do Quadro 7, que as madeiras com menor teor de lignina resultaram em celuloses mais resistentes ao estouro.

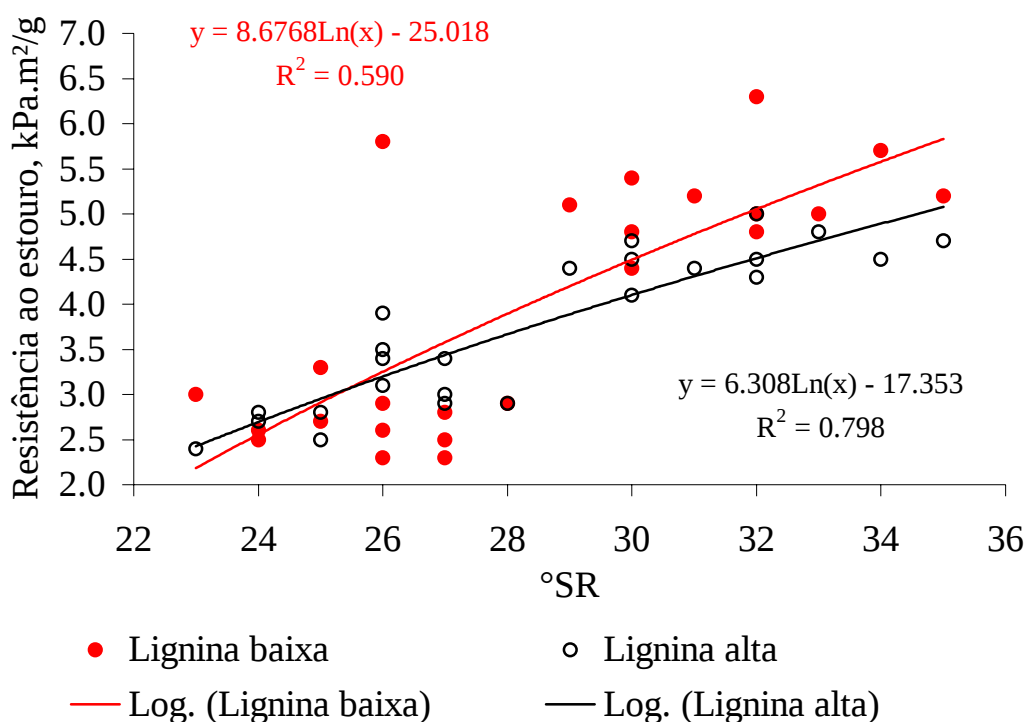


Figura 13. Relação entre resistência ao estouro e grau Schopper Riegler.

Perez (2002) encontrou valores próximos para resistência ao estouro em todas as procedências de *E. globulus* avaliadas, nas três condições de refino aplicadas (9000, 15000 e 18000 revoluções), variando de 5,1 a 6,0 kPa.m²/g.

Sansígolo et al. (1988), ao testarem esta propriedade, encontraram para esta espécie os seguintes resultados: 3,1 kPa.m²/g (25°SR) e 5,3 kPa.m²/g (30°SR). Já Valente et al. (1992) obtiveram 1,82 kPa.m²/g a 23°SR.

4.6.2.3. Resistência ao rasgo

A resistência ao rasgo mede o trabalho necessário para o rasgamento do papel, a uma distância fixada, depois do rasgo ter sido iniciado por meio de uma faca adaptada ao aparelho. Entre os fatores que podem afetar esta propriedade, têm-se o comprimento das fibras e a ligação entre elas.

A Figura 14 mostra o desempenho das polpas quanto à resistência ao rasgo. Para esta propriedade, o teor de lignina da madeira mostrou-se mais significativo do que o grau de refino aplicado.

As polpas obtidas de madeiras com menor teor de lignina atingiram os maiores índices de resistência ao rasgo. Entretanto, o grau de refino também afetou a resistência ao rasgo: com o aumento do °SR, a resistência ao rasgo também aumentou. Este comportamento está de acordo com os relatos de Coelho & Andrioni [199-], os quais afirmam que o rasgo aumenta mais ou menos proporcionalmente à viscosidade.

Para baixas viscosidades, quase não se nota o desenvolvimento do rasgo com o refino. Já para altas viscosidades, há um ponto de máximo rasgo com o refino. Neste estudo, as polpas de madeira com baixo teor de lignina apresentaram maiores viscosidades do que as polpas de madeira com alto teor de lignina.

Quanto ao índice de rasgo, Sansígolo et al. (1988) encontraram os respectivos valores para o *E. globulus*, 10,0 mN.m²/g (25°SR) e 12,2 mN.m²/g (30°SR).

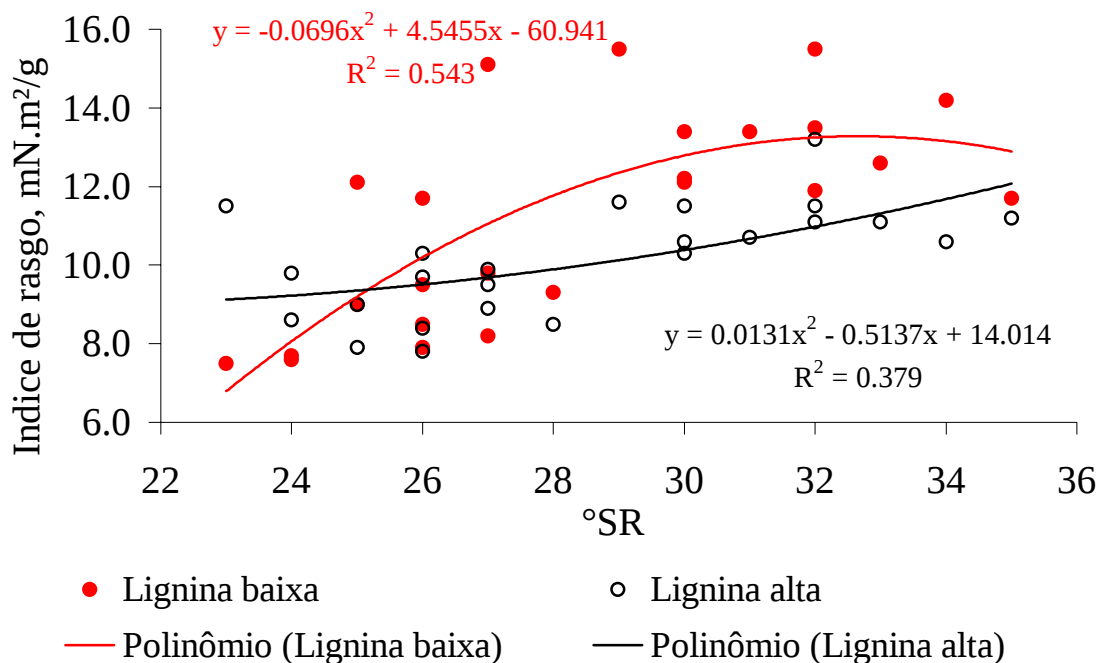


Figura 14. Relação entre índice de rasgo e grau Schopper Riegler.

Segundo D’Almeida (1986), no caso do rasgo, no qual a resistência da fibra é importante, qualquer diminuição da viscosidade influi significativamente. Portanto, para papéis nos quais esta característica é mais relevante, a faixa de variação da viscosidade deve ser pequena.

4.6.2.4. Volume específico aparente

O volume específico da folha é afetado por muitos fatores, como: grau de ligação das fibras, presença de materiais não-fibrosos que preenchem os espaços vazios e calandragem das folhas de papel.

A Figura 15 mostra o volume específico das polpas refinadas em relação ao grau de refino, o qual exerceu significativa influência, apresentando uma correlação inversa. De acordo com os resultados da análise de variância mostrados no Quadro 7, não houve interação estatisticamente comprovada entre o grau de refino e o teor de lignina das madeiras que deram origem às polpas.

Quanto ao efeito do teor de lignina, apesar da análise da variância mostrar efeito significativo, as diferenças foram industrialmente pouco importantes, com ligeira vantagem para as polpas obtidas de madeiras com menor teor de lignina a 25°SR. Entretanto, a Figura 15 mostra uma tendência para superioridade do volume específico aparente no caso das celuloses obtidas de madeira com alto teor de lignina para graus de refino acima de 30°SR.

Valente et al. (1992) encontraram para esta propriedade 1,66 cm³/g (23°SR) e 1,30 cm³/g (42,5°SR). Já os resultados obtidos para esta espécie por Sansígolo et al. (1988) foram 1,90 cm³/g (25°SR) e 1,68 cm³/g (30°SR).

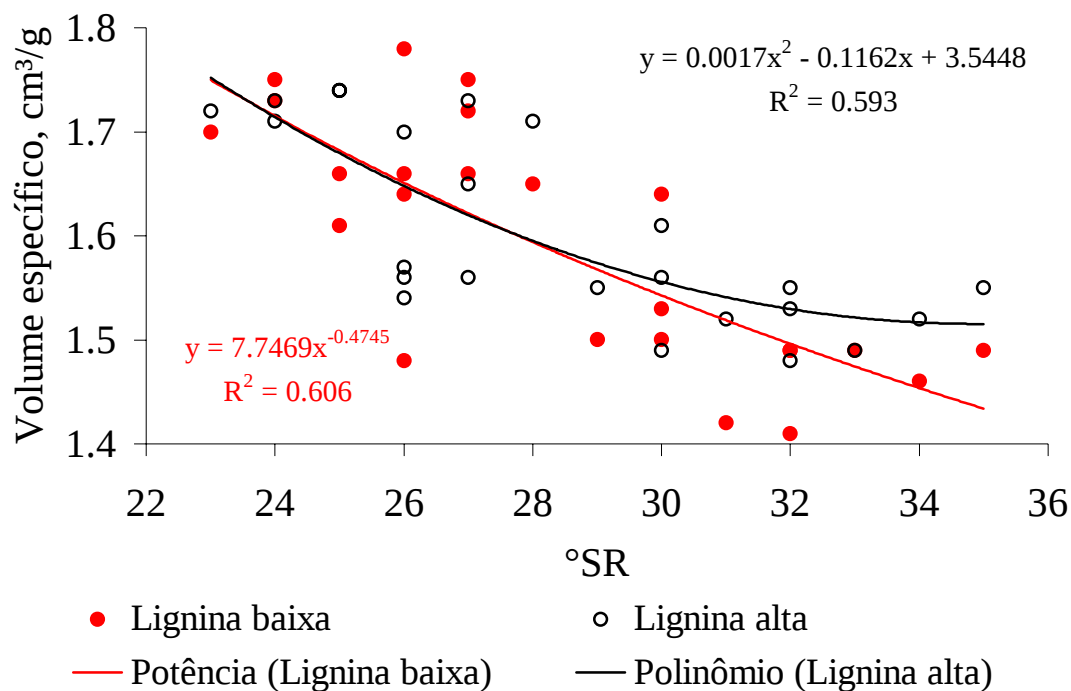


Figura 15. Relação entre volume específico aparente e grau Schopper Riegler.

4.6.2.5. Resistência ao ar Gurley

É a propriedade que mostra como uma folha de papel deixa-se atravessar por uma certa quantidade de ar, quando submetida a uma diferença de pressão conhecida. Ela se relaciona inversamente com a porosidade do papel. É uma consequência, principalmente, do grau de refino das fibras que compõem o papel. Entretanto, outros fatores também podem influenciar os seus resultados, como distribuição das fibras, densidade, teor de carga, etc.

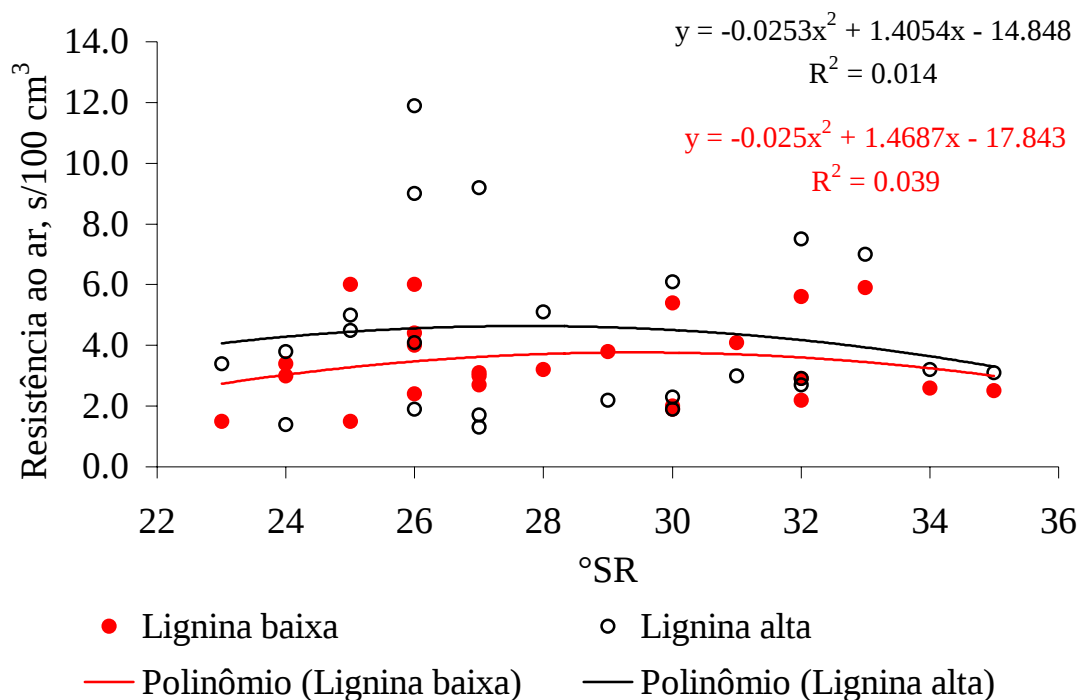


Figura 16. Relação entre resistência ao ar e grau Schopper Riegler.

De acordo com o resultado da análise de variância exposta no Quadro 7, existe uma interação pouco significativa entre °SR e teor de lignina, que influem sobre a resistência ao ar. Isto é devido à tendência dos pontos se igualarem a 30°SR. Já a 25°SR, conforme mostram o Quadro 7 e a Figura 16, a resistência ao ar é maior para a celulose obtida de madeira de lignina alta, ou seja, as folhas de ensaio produzidas com essa celulose são menos porosas.

Comparando com os resultados encontrados por Sansígolo et al. (1988), 1,3 s/100 cm³ (25°SR) e 2,7 s/100 cm³ (30°SR), o valor encontrado para esta propriedade neste estudo, a 25°SR e lignina baixa, foi superior. Valente et al. (1992) encontraram 2,2 s/100 cm³ (23°SR) e 16,0 s/100 cm³ (42,5°SR).

5. CONCLUSÕES

Considerando-se a avaliação dos resultados obtidos neste trabalho, desenvolvido com árvores de um mesmo povoamento de *Eucalyptus globulus* subespécie *globulus*, foi possível concluir que:

- há significativas variações entre árvores para as características dendrométricas e para as propriedades tecnológicas da madeira e da celulose;
- os volumes e os pesos secos das árvores, que são características importantes para a produtividade e para o melhoramento florestal, mostraram coeficientes de variação entre árvores acima de 34%, implicando em uma heterogeneidade importante entre árvores;
- as árvores com distintos teores de lignina comportaram-se de maneira diferente na sua conversão à celulose kraft. As madeiras que apresentavam baixo teor de lignina (teor médio de 20,5%) tiveram um melhor desempenho na produção de celulose kraft com números kappa entre 16,2 a 18,2, apresentando maior rendimento depurado (média de 53,0%), menor consumo de álcali efetivo base madeira (média de 15,1%) e maior viscosidade intrínseca (média de 1215 cm³/g). As polpas produzidas a partir das madeiras com alto teor de lignina (teor médio de 23,0%) para intervalo de número kappa entre 16,6 e 18,0, apresentaram menor rendimento depurado (média de 50,5%), para um consumo de álcali efetivo relativamente maior (média de 15,7%) e uma viscosidade intrínseca inferior (média de 1133 cm³/g);
- a menor demanda de álcali efetivo no cozimento das madeiras com menor teor de lignina facilitou a deslignificação no processo de polpação. Este

comportamento sugere uma redução na degradação das cadeias de celuloses e também uma melhor preservação das hemiceluloses. Já as madeiras com maior teor de lignina exigiram maior carga de álcali ativo aplicado, refletindo em maior consumo de álcali efetivo e uma maior perda de viscosidade intrínseca;

- as madeiras com baixo teor de lignina apresentaram um menor teor de sólidos minerais gerados no licor negro (media=1,22 kg ssd/kg celulose a.s.) em comparação com as de maior teor de lignina (média=1,35 kg ssd/kg celulose a.s.). Pode-se afirmar, com isto, que o uso de madeiras com baixo teor de lignina minimizaria um dos principais motivos de limitação da capacidade de produção da maioria das fábricas do processo kraft, que é a capacidade de queima de sólidos nas caldeiras de recuperação;

- a solubilidade em soda a 5%, o teor de rejeitos e a alvura das celuloses apresentaram valores médios semelhantes para as polpas de madeira com alto teor de lignina e para as com baixo teor de lignina, para números kappa na faixa entre 16,2 e 18,2. Pode-se dizer que estas características não sofreram influência da lignina da madeira;

- a energia de refino no PFI, necessária para refinar as polpas com baixo teor de lignina, foi maior: média de 200 rotações, a 25°SR, e de 600 rotações, a 30°SR. Já para refinar as polpas com alto teor de lignina, a 25°SR, praticamente não houve gasto de energia e, a 30 °SR, o valor médio foi de 100 rotações. Essas diversidades são explicadas pelas diferenças na viscosidade intrínseca das celuloses e possíveis diferenças estruturais nos carboidratos devido às drasticidades dos cozimentos, que são distintas;

- com relação aos testes físico-mecânicos aplicados nas folhas confeccionadas com as polpas não-branqueadas refinadas, as polpas

resultantes da deslignificação kraft das madeiras com baixo teor de lignina apresentaram os melhores resultados para as resistências à tração, ao estouro e ao rasgo. A resistência ao ar dessas celuloses foi também menor. Para as resistências à tração, ao estouro e ao rasgo, os distintos teores de lignina exerceram maior influência a 30°SR. As diferenças aumentaram na medida em que aumentava o grau de refino, sendo que o volume específico aparente foi superior para as celuloses obtidas de madeira com alto teor de lignina, submetidas a graus de refino acima de 30°SR.

Como conclusão geral, é possível afirmar que o menor teor de lignina da madeira em árvores selecionadas com mesma densidade básica de madeira para *Eucalyptus globulus* afeta não somente a facilidade de deslignificação e o rendimento de conversão da madeira à celulose, mas também as qualidades físico-mecânicas das polpas. Essas mostraram maior capacidade de ligação das fibras e maior viscosidade para mesmos números kappa. No caso de se comparar os resultados obtidos no processo de deslignificação kraft das madeiras com distintos teores de lignina e o comportamento das polpas resultantes quando refinadas, observa-se respostas melhores quando se trabalha com árvores constituídas de madeiras de menor teor de lignina. Isto confirma que a composição química da madeira é uma característica que exerce grande impacto sobre o custo, a produtividade e a qualidade do produto final na indústria. O teor de lignina de uma madeira deve ser considerado como um parâmetro fundamental no processo de escolha da matéria-prima em nível industrial. Ele exerce influência direta e importante sobre o consumo de álcali, o rendimento da deslignificação, o potencial de produtividade industrial no

digestor, a geração de sólidos no licor negro enviado à recuperação, e também sobre o nível de qualidade do produto final.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso da madeira de *Eucalyptus globulus* com baixo teor de lignina para produção de celulose e papel, oferece muitas vantagens para a indústria, como:

- maior rendimento na produção de celulose Kraft;
- menor demanda de álcali ativo no cozimento das madeiras;
- redução na degradação das cadeias de celulose e melhor preservação das hemiceluloses;
- menor geração de sólidos minerais no licor negro que é enviado à recuperação;
- bom desempenho no refino a baixos índices de grau Schopper-Riegler, compensando o consumo de energia gasto;
- o papel resultante apresenta boas características, como maior resistência à tração, ao rasgo e ao estouro.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, H. S.; OERTEL, A. C. Estudo químico da lignina de *Paullinia rubiginosa*. **Cerne**, v.5, n.1, p.52-60, 1999.

BARRICHELO, L. E. G.; FOELKEL, C. E. B.; Estudos para produção de celulose sulfato de seis espécies de eucalipto. **IPEF**, v.12, p.77-95, 1976.

BARROTTI, S. L. B.; BERGMAN, S. Propriedades do papel e ensaios para sua avaliação. In:____. **Celulose e Papel: tecnologia de fabricação do papel**, 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. cap.7, p.819-842.

BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**. 2000. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlação entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal. I: densidade e teor de lignina de madeira de eucalipto. **IPEF**, v.14, p.9-20, 1977.

BUSNARDO, C. A. **Estudo sobre a deslignificação da madeira de *Eucalyptus urophylla* de origem híbrida, pelo processo kraft, para produção de celulose**. 1981. 194f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, 1981.

BUSNARDO, C. A.; GONZAGA, J. V.; FOELKEL, C. E. B. *et alli*. Em busca da qualidade ideal da madeira do eucalipto para produção de celulose. IV: altura ideal de amostragem para avaliação da densidade média para árvores de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 20, 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 1987. p.17-33.

BUSNARDO, C. A. Refinação de polpa de eucalipto e suas aplicações em diferentes tipos de papéis. **Relatório Técnico**: Riocell, n.368, p.25, 1990.

CÁCERES, R. H. Producción y evaluación de pulpas celulósicas a partir de diferentes espécies de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel, 1983. p.1043-1051.

CARDOSO, G. V. **Otimização do cozimento kraft para produção de celulose a partir de madeiras de *Eucalyptus globulus* com diferentes teores de lignina**. 2002. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

CARDOSO, G. V.; FRIZZO, S. M. B.; ROSA, C. A. B.; FOELKEL, C. E. B.; ASSIS, T. F.; OLIVEIRA, P. Otimização das condições do cozimento kraft de *Eucalyptus globulus* em função do teor de lignina da madeira. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL, 35., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2002. p.20.

CARDOSO, G. V.; ROSA, C. A. B.; FRIZZO, S. M. B.; FOELKEL, C. E. B.; OLIVEIRA, P.; ASSIS, T. F. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus globulus* no sentido longitudinal da árvore. In: JORNADA DE JÓVENES INVESTIGADORES DE LA ASOCIACIÓN DE LAS UNIVERSIDADES DEL GRUPO MONTEVIDEO, 9., 2001, Rosário. **Anais...** Rosário: Universidad Nacional de Rosário, 2001.

CARDOSO, G. V.; ROSA, C. A. B.; GUARIENTI, A. F. *et. alli.* Adequação de metodologia amostral de madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus globulus* para determinação do teor de cinzas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL, 34., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2001.

CARVALHO, H. G. **Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose kraft branqueada de eucalipto.** 1997. 104f. Tese (Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

CARVALHO, M. G. V.; BASTOS, M. M. M.; SILVA, V. L. P. *et alli.* Estudos de variabilidade num clone de *Eucalyptus globulus*. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS TÉCNICOS DAS INDÚSTRIAS DE CELULOSE E PAPEL, 16., 1998, Covilhã, **Anais...** Covilhã: Tecnicelpa, 1998. p.331-338.

CARVALHO, M. G. V. S. **Efeito das variáveis de cozimento nas características químicas de pastas kraft de *Eucalyptus globulus*.** 1999.

269f. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade de Coimbra, Coimbra, 1999.

COELHO, G. A.; ANDRIONI, J. L. L. **Refinação de polpas e testes físicos na fabricação de papel**. Paraná: SENAI-CETCEP, 199-. 23p.

COSTA, M. M.; COLODETTE, J. L.; FOELKEL, C. E. B. **Aspectos básicos da produção de polpa solúvel**. I: o efeito dos extrativos da madeira - uma revisão.[S.l.:s. n.]. [199-]. paginação irregular, material impresso.

COSTA, M. M.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; FOELKEL, C. E. B. Avaliação preliminar do potencial de quatro madeiras de eucalipto na produção de polpa solúvel branqueada pela seqüência AO (ZQ)P. **Árvore**, v.21, n.3, p.385-392, 1997.

D'ALMEIDA, M. L. O. Caracterização química e físico-química de materiais lignocelulósicos. In:____. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação de pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. cap. 4, p.107-127.

____. Viscosidade de uma pasta celulósica e a resistência do papel formado. **O Papel**, p.39-42, agosto, 1986.

DEL PONTE, E. M. Multiplicação e enraizamento in vitro de *Eucalyptus globulus* subespécie *globulus* Labill. **Árvore**, v.25, n.1, p.1-8, 2001.

DEMUNER, B. J.; VIANNA DORIA, E. L.; CLAUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E.; MANFREDI, V. As propriedades do papel e as características das fibras de eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL, 25., 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 1992. p.161-177.

ENDT, D. V.; COSTA, P.; ZAGO, M. K. Genes de lignificação: em busca do eucalipto transgênico com reduzidos teores de lignina. **Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, v.3, n.15, p.151-159, julho/agosto, 2000.

EZPELETA, L. B.; VIQUEIRA, A. S. Aptitudes de diferentes especies de *Eucalyptus* como matéria-prima celulósica. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CELULOSE Y PAPEL, 2., 1981. Espanha. **Anais...** Torremolinos. 1981. p.317-332.

FERREIRA, P. J.; CARVALHO, M. G.; MARTINS, A. A.; FIGUEIREDO, M. M. Efeito das variáveis de cozimento kraft na refinação de pastas de *E globulus* nacional: avaliação das propriedades papeleiras. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA QUÍMICA, 7., Lisboa, 1998. **Anais...**Lisboa, 1998. p.353-360.

FLORES, D. M. M. **Estudo da variabilidade de um povoamento clonal entre árvores de *Eucalyptus saligna* Smith.** 1999. 88f. Dissertação (Mestrado Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

FOELKEL, C. E. B. Madeira de eucalipto: da floresta ao digestor. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA MADEIRA, 1., Piracicaba. **Boletim Informativo**, IPEF, São Paulo, v.6, n.20, p25, 1978.

FOELKEL, C. E. B.; MOURA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **O Papel**, p. 35-40, maio, 1992.

FONSECA, S. M.; OLIVEIRA, R. C.; SILVEIRA, P. N. Seleção da árvore industrial (procedimentos, riscos, custos e benefícios). **Árvore**, v.20, n.1, p.69-85, 1996.

FREDDO, A. **Elementos minerais em madeira de eucalipto e acácia negra e sua influência na indústria de celulose kraft branqueada**. 1997. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.

GONZAGA, J. V. **Qualidade da madeira e da celulose kraft de treze espécies de *Eucalyptus***. 1983. 136f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, 1983.

GONZÁLEZ, E.R. et al. Transformação genética do eucalipto. **Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, v.5, n.26, p.18-22, maio/junho, 2002.

GUARIENTI, A.; ROSA, C. A. B.; PEDRAZZI, C.; CARDOSO, G. V.; SOUZA, M. C. H.; FOELKEL, C. E. B.; FRIZZO, S. M. B. Amostragem de madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus globulus* para determinação de lignina Klason e extrativos totais. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL, 33., 2000. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2000.

HILLIS, W. E. **Wood extratives and their significance to the pulp and paper industries.** New York: Academic Press, 1962. 513p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Paper:** determination of tearing resistance. Genève, 1990. 8p. (ISO 1974: 1990).

____. **Paper and board:** determination of tensile properties. Part 1: Constant rate of loading method. Genève, 1992. 5p. (ISO 1924-1: 1992).

____. **Paper, board and pulps:** measurement of diffuse blue reflectance factor (ISO brightness). Genève, 1999. 9p. (ISO 2470: 1999).

____. **Pulps:** determination of alkali solubility. Genève, 1981. 4p. (ISO 692: 1982).

JERÔNIMO, L. H. **Adição de antraquinona na polpação alcalina e sua influência na branqueabilidade de celulose de *Eucalyptus saligna* Smith.**

1997. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.

LATORRACA, J. V. F. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v.7, n.1, p.279-291, 2000.

LEMOS, R.C., AZOLIM, M.A.D., ABRÃO, P.U. *et alli*. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife: Ministério da Agricultura/DRNR/DPP, 1973. 431p.

MANFREDI, V. O refino da celulose. In: Curso de especialização em papel. Módulo 6 – preparação da massa. ABTCP/UFV: Mucuri, 42p., 1998.

MILANEZ, A. F.; BARTH, P. P. O.; PINHO, N. C.; VESZ, J. B. V. Influência das hemiceluloses nas propriedades óticas e físico-mecânicas da polpa. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 15., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel, 1982, p.155-170.

OLIVEIRA, R. C.; SABIONI, L. Recuperação da qualidade de papéis de eucalipto no processo de reciclagem. **Árvore**, v.26, n.1, p.107-119, 2002.

ONA, T.; SONADA, T.; SHIBATA, M.; FUKAZAWA, K. Small-scale method to determine the content of wood components from multiple eucalypt samples. **Tappi Journal**, v.78, n.3, p.121-126, 1995.

OTSUKI, H.; JORDÃO, M. C. S.; ASSUMPÇÃO, R. M. V. Caracterização de alguns extrativos de eucaliptos que possam influir em processos de polpação. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 13., 1980, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1980. p.7-25.

PEÑA, J. P.; PÉREZ, L. Análisis comparativo de las propiedades microscópicas y macroscópicas de la madera de *E. nitens* y *E. globulus*. In: SILVOTECNA, 12., Concepción. **Anais...** Concepción: , 1999. p.25.

PENALBER, A. M. C. **Estudos tecnológicos da polpação de *Eucalyptus grandis*, pelo processo sulfito neutro, com e sem adição de antraquinona.** 1983. 114f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1983.

PEREDO, M. Aptitud pulpable de *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus regnans* cultivados en Chile. In: SILVOTECNA, 12., Concepción. **Anais...** Concepción: , 1999. p.20.

PEREIRA, H. Variability in the chemical composition of plantation *Eucalyptus* (*Eucalyptus globulus* Labill.). **Wood and Fiber Science**, v.20, n.1, p.82-90, 1988.

PEREZ, J. F. R. **Avaliação de procedências de *Eucalyptus globulus* segundo a qualidade de sua madeira para a produção de celulose.** 2002.

93f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

REPETTI, R. **Aptitud tecnologica de los eucaliptos *E. globulus*, *E. viminalis*, *E. saligna* y *E. grandis* para su utilizacion en la elaboraci3n de pastas kraft.** In: Palestra – Os eucaliptos na Argentina e sua potencialidade para produ33o de celulose e papel, 1992, pagina33o irregular, material impresso.

_____. **Cultivo de los eucaliptos.** In: Palestra – Os eucaliptos na Argentina e sua potencialidade para produ33o de celulose e papel, 1992. pagina33o irregular, material impresso.

SACON, V. M.; DIAS, J.; ASSIS, T. F. Avalia33o preliminar do comportamento das madeiras de *E. globulus*, *E. maidennii*, *E. bicostata* e *E. saligna*. **Nota T3cnica:** Riocell, n.1155, p.5, 1995.

SACON, V.; WEISSHEIMER, C. A. Metodologia de lignina simplificada. **Nota T3cnica:** Riocell, n.1481, p.6, 1996.

SANS3GOLO, C. A.; CURVELO, A. A. S. Deslignifica33o em etanol-3gua de *Eucalyptus globulus*: caracter3sticas da lignina e da polpa. **O Papel**, agosto, p.23-29, 1994.

SANSÍGOLO, C. A.; MARTINS, M. A. L.; BUTTURE, N. Estudo comparativo das polpas de fibra curta de mercado – 1ª parte – fabricantes da A. Latina e Europa. **Relatório Técnico**: Riocell, n.220, p.52, 1988.

_____. Estudo comparativo das polpas não branqueadas Pontevedra e Riocell. **Nota Técnica**: Riocell, n.125, p.9, 1988.

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. 117f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeira)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SCHENEIDER, P. R. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF – FATEC, 1993. 348p.

SCHUMACHER, M. V. **Ciclagem de nutrientes em diferentes povoamentos de *Eucalyptus saligna* (Smith), *Eucalyptus dunnii* (Maiden) e *Eucalyptus globulus* (Labillardière) no Rio Grande do Sul, Brasil**. 1995. 156f. Tese (Doutorado)-Universität für Badenkultur, 1995.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* spp.** 1990. 93f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

SOUZA, C.; MOREIRA, J. E.; SANTOS, G. G.; CLAUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E.; DIAS, R. L. V. Uma análise do comportamento dos extrativos de madeira no cozimento kraft. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 1983, São Paulo. **Anais...v.2.** São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel, p.347-357.

SOUZA, V. R. CARPIM, M. A.; BARRICHELO, L. E. G. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posições em árvores de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna*. **IPEF**, n.33, p.65, 1986.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. **Acid-insoluble lignin in wood and pulp.** Atlanta, 1998.2p. (T222 om-98).

____. **Air resistance of paper.** Atlanta, 1996. 3p. (T460 om-96).

____. **Analysis of soda and sulfate black liquor.** Atlanta, 1994. 4p. (T625 om-85).

____. **Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525 °C.** Atlanta, 1993. 3p. (T211 om-93).

____. **Bursting strength of paper.** Atlanta, 1997. 6p. (T403 om-97).

____. **Forming handsheets for physical tests of pulp.** Atlanta, 1995. 9p. (T205 sp-95).

____. **Grammage of paper and paperboard (weight per unit area).** Atlanta, 1998. 5p. (T410 om-98).

____. **Kappa number of pulp.** Atlanta, 1999. 4p. (T236 om-99).

____. **Laboratory beating of pulp: PFI mill method.** Atlanta, 2000. 6p. (T248 sp-00).

____. **Preparation of wood for chemical analysis.** Atlanta, 1997. 3p. (T264 cm-97).

____. **Sampling and preparing wood for analysis.** Atlanta, 1985. 5p. (T257 cm-85).

____. **Solvent extratives of wood and pulp.** Atlanta, 1997. 4p. (T 204 cm-97).

____. **Thickness (caliper) of paper, paperboard and combined board.** Atlanta, 1997, 4p. (T411 om-97).

____. **Viscosity of pulp: capillary viscometer method.** Atlanta, 1999. 9p. (T230 om-99).

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v.2, n.1, p.04-111, 1996.

TURNER, C. H.; BALODIS, V.; DEAN, G. H. Variability in pulping quality of *Eucalyptus globulus* from Tasmanian provenances. **Appita**, v.36, n.5, p.371-376, 1983.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Pró-reitoria de Pós-graduação e Pesquisa. Estrutura e apresentação de monografias, dissertações e teses.** 5. ed. Santa Maria, 2000.

VALENTE, C. A.; MENDES DE SOUZA, A. P.; FURTADO, F. P.; CARVALHO, A. P. Improvement program for *Eucalyptus globulus* at Portucel: technological component. **Appita**, v.4, n.6, p.403-407, 1992.

VASCONCELOS DIAS, R. L. & CLAUDIO-DA-SILVA JUNIOR, E. A influência da densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* em suas características químicas e propriedades de polpação e do papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 18., 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Celulose e Papel, 1985. p.31-55.

VITAL, B. R. Métodos de determinação da densidade da madeira. **Boletim Técnico**, SIF, Viçosa, n.1, p.21, 1984.

WEHR, T. R.; BARRICHELO, L. E. G. Cozimento kraft com madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes densidades básicas e dimensões de cavacos. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA

TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL, 25., 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 1992. p.161-177.

WEHR, T. R. **Variações nas características da madeira de *Eucalyptus grandis* HILL Ex Maiden e suas influências na qualidade de cavacos em cozimentos kraft.** 1991. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Levantamento dendrométrico para 50 árvores de *Eucalyptus globulus*.

Árvore	DAP c/c (cm)	DAP s/c (cm)	H tot (m)	H com (m)	V com c/c (m ³)	V com s/c (m ³)
1	17,6	16,1	18,3	13,8	0,184	0,147
2	22,5	21,1	16,7	13,4	0,309	0,262
3	22,8	20,7	16,9	13,5	0,259	0,213
4	17,3	16,1	16,5	12,8	0,174	0,147
5	16,3	15,1	17,0	13,9	0,163	0,135
6	29,4	27,6	19,2	15,9	0,495	0,430
7	19,9	18,2	18,0	14,3	0,238	0,199
8	20,7	18,9	17,2	12,4	0,238	0,198
9	17,9	16,2	15,6	11,9	0,188	0,152
10	23,6	21,9	17,3	13,8	0,311	0,262
11	18,7	16,9	17,0	13,6	0,195	0,160
12	26,7	25,5	20,0	15,7	0,426	0,374
13	17,4	15,7	17,9	13,3	0,177	0,144
14	21,9	20,5	19,5	14,5	0,291	0,253
15	19,2	18,2	16,7	12,7	0,199	0,172
16	19,6	18,6	19,2	15,1	0,242	0,210
17	19,9	18,2	17,5	13,9	0,254	0,215
18	17,3	16,0	14,0	10,4	0,144	0,118
19	21,8	20,2	19,2	15,3	0,322	0,271
20	20,9	19,0	17,8	12,9	0,219	0,189
21	19,1	17,9	17,0	13,2	0,212	0,184
22	22,4	20,5	16,7	13,6	0,240	0,199
23	23,0	21,4	17,4	13,5	0,291	0,249
24	20,3	18,4	16,3	13,2	0,248	0,208
25	21,2	19,3	17,2	14,0	0,265	0,220
26	28,6	26,1	19,2	15,3	0,463	0,384
27	16,6	15,2	17,6	13,0	0,167	0,139
28	17,4	15,8	16,8	11,8	0,162	0,133
29	20,9	19,0	18,7	14,7	0,283	0,236
30	25,8	23,9	17,9	14,0	0,360	0,308
31	21,3	19,6	17,2	13,5	0,225	0,188
32	17,0	15,4	17,8	13,6	0,195	0,161

APÊNDICE A – Levantamento dendrométrico para 50 árvores de *Eucalyptus globulus* (continuação).

Árvore	DAP c/c (cm)	DAP s/c (cm)	H tot (m)	H com (m)	V com c/c (m ³)	V com s/c (m ³)
33	18,8	17,2	17,2	12,9	0,215	0,174
34	20,1	18,6	19,0	14,9	0,245	0,207
35	15,1	13,8	16,0	11,9	0,123	0,103
36	18,9	17,0	15,9	11,8	0,199	0,159
37	20,1	18,6	18,8	15,3	0,266	0,228
38	23,9	22,1	17,1	12,7	0,321	0,273
39	24,4	22,5	20,1	16,0	0,407	0,339
40	19,1	17,4	16,9	13,1	0,226	0,185
41	19,3	17,6	16,8	13,7	0,225	0,183
42	18,3	16,6	17,3	13,6	0,204	0,167
43	21,5	19,2	17,7	13,6	0,285	0,233
44	21,7	19,2	19,6	15,9	0,350	0,294
45	22,7	21,1	21,2	16,9	0,355	0,311
46	31,0	29,0	20,5	17,0	0,588	0,514
47	24,4	22,6	17,5	14,2	0,327	0,277
48	20,0	18,3	16,5	14,0	0,262	0,221
49	26,3	24,1	18,0	14,3	0,429	0,360
50	20,75	19,0	17,2	13,3	0,236	0,198
Média	21,0	19,4	17,7	13,8	0,268	0,226
Máximo	31,0	29,0	21,2	17,0	0,588	0,514
Mínimo	15,1	13,8	14,0	10,4	0,123	0,103
DP	3,4	3,3	1,36	1,32	0,095	0,083
CV%	16,31	16,97	7,67	9,53	35,41	36,94

DAP c/c – diâmetro a altura do peito com casca

DAP s/c – diâmetro a altura do peito sem casca

H tot – altura total

H com – altura comercial

V com c/c – volume comercial com casca

V com s/c – volume comercial sem casca

DP – desvio padrão

CV – coeficiente variação

APÊNDICE A – Levantamento dendrométrico para 50 árvores de *Eucalyptus globulus* (continuação).

Árvore	Fforma c/c	Fforma s/c	V cerne (m ³)	V alburno (m ³)
1	0,546	0,523	0,057	0,089
2	0,584	0,560	0,108	0,154
3	0,470	0,470	0,088	0,125
4	0,579	0,561	0,066	0,081
5	0,558	0,545	0,067	0,068
6	0,459	0,452	0,239	0,191
7	0,532	0,533	0,076	0,123
8	0,569	0,571	0,083	0,116
9	0,630	0,617	0,071	0,081
10	0,513	0,505	0,097	0,165
11	0,523	0,521	0,066	0,093
12	0,485	0,466	0,191	0,183
13	0,560	0,555	0,069	0,075
14	0,533	0,530	0,171	0,082
15	0,544	0,525	0,087	0,085
16	0,530	0,511	0,111	0,099
17	0,584	0,594	0,125	0,090
18	0,586	0,567	0,061	0,057
19	0,563	0,554	0,118	0,153
20	0,495	0,516	0,120	0,069
21	0,562	0,556	0,091	0,093
22	0,446	0,442	0,100	0,099
23	0,515	0,510	0,094	0,155
24	0,581	0,594	0,091	0,117
25	0,533	0,534	0,070	0,150
26	0,469	0,470	0,144	0,239
27	0,588	0,589	0,049	0,090
28	0,578	0,574	0,046	0,087
29	0,562	0,566	0,103	0,132
30	0,490	0,490	0,151	0,157
31	0,465	0,465	0,069	0,119
32	0,629	0,631	0,058	0,103

APÊNDICE A – Levantamento dendrométrico para 50 árvores de *Eucalyptus globulus* (continuação).

Árvore	Fforma c/c	Fforma s/c	V cerne (m ³)	V alburno (m ³)
33	0,601	0,582	0,049	0,125
34	0,518	0,515	0,057	0,149
35	0,574	0,576	0,036	0,066
36	0,601	0,596	0,049	0,110
37	0,549	0,551	0,116	0,111
38	0,564	0,557	0,144	0,129
39	0,542	0,534	0,156	0,183
40	0,599	0,593	0,067	0,118
41	0,561	0,546	0,073	0,109
42	0,570	0,563	0,063	0,104
43	0,575	0,588	0,080	0,153
44	0,596	0,635	0,119	0,174
45	0,520	0,524	0,144	0,166
46	0,457	0,456	0,246	0,267
47	0,491	0,487	0,100	0,177
48	0,595	0,601	0,096	0,124
49	0,551	0,548	0,149	0,211
50	0,526	0,523	0,069	0,129
Média	0,545	0,541	0,099	0,126
Máximo	0,630	0,635	0,246	0,267
Mínimo	0,446	0,442	0,036	0,057
DP	0,046	0,047	0,046	0,045
CV%	8,43	8,71	46,61	35,72

F forma c/c – fator de forma com casca

F forma s/c – fator de forma sem casca

V cerne – volume de cerne

V alburno – volume de alburno

APÊNDICE A – Levantamento dendrométrico para 50 árvores de *Eucalyptus globulus* (continuação).

Árvore	V cerne %	V alburno %	V casca (m ³)	V casca %	Db média (g/cm ³)	Ps s/c ton
1	38,77	61,23	0,037	20,28	0,510	0,075
2	41,06	58,94	0,048	15,39	0,543	0,142
3	41,09	58,91	0,046	17,87	0,511	0,109
4	45,12	54,88	0,027	15,52	0,529	0,078
5	49,70	50,30	0,027	16,77	0,537	0,073
6	55,64	44,36	0,065	13,12	0,492	0,211
7	38,34	61,66	0,038	16,17	0,535	0,107
8	41,66	58,34	0,040	16,81	0,565	0,112
9	46,55	53,45	0,036	19,32	0,557	0,085
10	36,93	63,07	0,048	15,58	0,536	0,141
11	41,56	58,44	0,035	18,14	0,549	0,088
12	51,06	48,94	0,052	12,35	0,527	0,197
13	47,83	52,17	0,033	18,85	0,568	0,082
14	67,69	32,31	0,037	12,91	0,506	0,128
15	50,67	49,33	0,027	13,70	0,514	0,089
16	53,05	46,95	0,032	13,17	0,516	0,109
17	58,11	41,89	0,039	15,33	0,512	0,110
18	51,90	48,10	0,025	17,78	0,509	0,060
19	43,58	56,42	0,050	15,56	0,529	0,144
20	63,55	36,45	0,029	13,44	0,557	0,106
21	49,30	50,70	0,028	13,11	0,535	0,099
22	50,24	49,76	0,041	17,02	0,525	0,105
23	37,84	62,16	0,041	14,11	0,555	0,139
24	43,90	56,10	0,039	16,01	0,561	0,117
25	31,90	68,10	0,045	16,94	0,523	0,115
26	37,60	62,40	0,078	16,96	0,534	0,205
27	35,00	65,00	0,028	16,57	0,505	0,070
28	34,55	65,45	0,029	17,73	0,580	0,077
29	43,94	56,06	0,047	16,67	0,534	0,126
30	48,96	51,04	0,052	14,49	0,545	0,168
31	36,76	63,24	0,036	16,15	0,492	0,093
32	36,16	63,84	0,033	17,17	0,546	0,088

APÊNDICE A – Levantamento dendrométrico para 50 árvores de *Eucalyptus globulus* (continuação).

Árvore	V cerne %	V alburno %	V casca (m ³)	V casca %	Db média (g/cm ³)	Ps s/c ton
33	28,27	71,73	0,041	18,94	0,515	0,090
34	27,80	72,20	0,038	15,39	0,497	0,103
35	35,62	64,38	0,020	16,72	0,557	0,057
36	30,85	69,15	0,039	19,84	0,552	0,088
37	51,15	48,85	0,039	14,56	0,577	0,131
38	52,70	47,30	0,048	15,05	0,518	0,141
39	46,00	54,00	0,067	16,54	0,533	0,181
40	36,09	63,91	0,040	17,81	0,512	0,095
41	40,22	59,78	0,042	18,64	0,553	0,101
42	37,74	62,26	0,037	18,30	0,536	0,089
43	34,54	65,46	0,051	18,07	0,516	0,121
44	40,64	59,36	0,056	16,13	0,496	0,146
45	46,45	53,55	0,045	12,59	0,544	0,169
46	48,02	51,98	0,075	12,72	0,461	0,237
47	36,14	63,86	0,050	15,30	0,546	0,151
48	43,69	56,31	0,040	15,55	0,525	0,116
49	41,34	58,66	0,069	16,13	0,545	0,196
50	34,95	65,05	0,038	16,29	0,533	0,106
Média	43,24	56,76	0,042	16,11	0,531	0,119
Máximo	67,69	72,20	0,078	20,28	0,580	0,237
Mínimo	27,80	32,31	0,020	12,35	0,461	0,057
DP	8,52	8,52	0,012	1,99	0,024	0,041
CV%	19,70	15,01	29,77	12,37	4,51	34,64

V casca – volume de casca

Db média – densidade básica média

Ps s/c – Peso seco da árvore sem casca

APÊNDICE B – Composição química da madeira de 50 árvores de *Eucalyptus globulus*.

Árvore	Holocelulose, %	Lignina, %	Extrativos totais, %
1	77,90	21,26	1,65
2	75,21	22,55	2,24
3	75,37	22,72	1,91
4	76,44	21,42	2,14
5	76,52	21,36	2,12
6	75,83	21,98	2,19
7	77,37	21,25	1,38
8	76,04	22,45	1,51
9	74,91	22,89	2,20
10	76,21	22,46	1,33
11	77,20	21,06	1,74
12	76,87	21,81	1,32
13	76,34	21,34	2,32
14	75,22	22,00	2,78
15	76,75	21,29	1,96
16	75,23	22,35	2,42
17	75,78	22,26	1,96
18	76,58	21,49	1,93
19	75,69	22,18	2,13
20	74,07	22,81	3,12
21	76,91	21,43	1,66
22	75,99	22,02	1,99
23	76,47	21,41	2,12
24	76,26	22,16	1,58
25	77,51	21,27	1,22
26	77,59	20,67	1,74
27	77,01	21,76	1,23
28	76,92	21,21	1,87
29	78,49	20,22	1,29
30	76,55	21,76	1,69
31	75,88	22,47	1,65
32	76,66	21,75	1,59
33	77,18	21,58	1,24
34	78,20	20,64	1,16

APÊNDICE B – Composição química da madeira de 50 árvores de *Eucalyptus globulus* (continuação).

Árvore	Holocelulose, %	Lignina, %	Extrativos totais, %
35	76,84	21,68	1,48
36	76,91	21,58	1,51
37	75,20	22,38	2,42
38	75,81	22,17	2,02
39	75,42	22,59	1,99
40	77,87	20,71	1,42
41	77,43	21,15	1,42
42	75,52	22,99	1,49
43	75,78	22,39	1,83
44	77,90	20,56	1,54
45	75,81	22,53	1,66
46	74,81	23,37	1,82
47	77,12	21,48	1,40
48	74,20	23,19	2,11
49	76,08	22,40	1,57
50	76,48	21,90	1,62
Média	76,36	21,85	1,79
Mínimo	74,07	20,22	1,16
Máximo	78,49	23,37	3,12
DP	0,96	0,72	0,41
CV, %	1,26	3,29	23,10

APÊNDICE C – Análises da variância para cozimentos das madeiras.

1. Sólidos secos dissolvidos calculados no licor negro residual.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	0,09	0,09	48,13*	4,30
Resíduo	22	0,04	0,00		
<i>Total</i>	<i>23</i>	<i>0,13</i>			

*significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

2. Álcali efetivo consumido.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	1,76	1,76	15,78*	4,30
Resíduo	22	2,45	0,11		
<i>Total</i>	<i>23</i>	<i>4,20</i>			

*significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

3. Rendimento bruto.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	34,58	34,58	31,02*	4,30
Resíduo	22	24,53	1,12		
<i>Total</i>	<i>23</i>	<i>59,11</i>			

*significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

APÊNDICE C – Análises da variância para cozimentos das madeiras
(continuação).

4. Rendimento depurado.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	33,44	33,44	31,90*	4,30
Resíduo	22	23,06	1,05		
<i>Total</i>	23	56,50			

*significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

5. Teor de rejeitos.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	0,00	0,00	0,01 ^{ns}	4,30
Resíduo	22	0,08	0,00		
<i>Total</i>	23	0,08			

ns - não significativo ao nível de confiança estabelecido.

6. Alvura.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	0,22	0,22	0,04 ^{ns}	4,30
Resíduo	22	129,81	5,90		
<i>Total</i>	23	130,03			

ns - não significativo ao nível de confiança estabelecido.

APÊNDICE C – Análises da variância para cozimentos das madeiras
(continuação).

7. Número kappa.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	0,51	0,51	1,59 ^{ns}	4,30
Resíduo	22	7,08	0,32		
<i>Total</i>	23	7,59			

ns - não significativo ao nível de confiança estabelecido.

8. Viscosidade intrínseca.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	40426,04	40426,04	17,17*	4,30
Resíduo	22	51789,58	2354,07		
<i>Total</i>	23	92215,63			

*significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

9. Solubilidade em NaOH_{5%}.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	0,35	0,35	1,46 ^{ns}	4,30
Resíduo	22	5,28	0,24		
<i>Total</i>	23	5,63			

ns - não significativo ao nível de confiança estabelecido.

APÊNDICE D – Resultados das propriedades físico-mecânicas das polpas
provenientes das madeiras com nível alto de lignina Klason.

	Tratamentos – 25 °SR										
Repetição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Índice de tração, N.m/g	56,6	47,2	47,4	51,6	50,8	52,4	40,4	49,2	59,8	49,6	50,5
Índice de estouro, kPa.m ² /g	3,3	2,5	2,5	2,6	3,3	3,0	2,5	2,8	3,4	2,5	2,8
Índice de rasgo, mN.m ² /g	7,8	8,5	8,8	9,8	9,6	9,2	9,7	9,0	10,5	7,9	9,1
Volume específico, cm ³ /g	1,6	2,4	2,1	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,5	1,7	1,8
Resistência ao ar, s/100 cm ³	10,0	9,3	7,1	3,6	10,8	3,1	7,1	4,5	2,2	5,0	6,3

	Tratamentos – 30 °SR										
Repetição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Índice de tração, N.m/g	66,6	56,8	56,8	64,6	73,4	70,6	66,6	58,4	68,6	56,6	63,9
Índice de estouro, kPa.m ² /g	4,4	3,2	3,3	3,6	4,7	4,5	4,0	4,0	5,3	3,5	4,1
Índice de rasgo, mN.m ² /g	10,6	8,7	9,2	10,4	12,2	10,2	10,6	10,2	13,0	9,8	10,5
Volume específico, cm ³ /g	1,5	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5	1,6	1,4	1,5	1,4	1,5

Resistência ao ar, s/100 cm ³	7,2	3,3	3,3	2,2	2,2	2,3	2,0	2,8	3,0	3,2	3,2
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

APÊNDICE E – Resultados das propriedades físico-mecânicas das polpas provenientes das madeiras com nível baixo de lignina Klason.

	Tratamentos – 25 °SR										
Repetição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Índice de tração, N.m/g	65,4	61,0	56,4	58,2	67,0	61,0	64,0	63,8	58,0	57,2	61,2
Índice de estouro, kPa.m ² /g	3,6	4,1	3,3	3,1	4,1	3,6	3,9	3,4	3,2	3,3	3,6
Índice de rasgo, mN.m ² /g	11,6	12,3	9,4	11,0	11,3	13,1	13,2	11,0	7,9	12,1	11,3
<i>Volume específico</i> cm ³ /g	1,5	1,5	1,6	1,6	1,5	1,6	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6
Resistência ao ar, s/100 cm ³	2,6	2,5	2,0	2,2	5,8	3,3	2,0	4,1	4,3	6,0	3,5

	Tratamentos – 30 °SR										
Repetição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Índice de tração, N.m/g	79,8	75,1	74,0	70,0	80,2	76,8	83,8	83,6	76,2	70,2	77,0
Índice de estouro, kPa.m ² /g	5,5	6,1	4,9	4,6	5,7	5,1	6,1	5,2	4,8	4,8	5,3
Índice de rasgo, mN.m ² /g	14,2	14,2	11,3	15,1	15,4	13,9	10,3	13,4	10,6	11,7	13,0

Volume específico, cm ³ /g	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5
Resistência ao ar, s/100 cm ³	2,4	2,9	2,1	2,5	4,0	2,4	2,7	4,2	4,0	5,3	3,3

APÊNDICE F – Análises da variância para as propriedades físico-mecânicas.

1. Índice de tração.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	1401,86	1401,86	53,32*	4,13
Grau SR	1	2114,12	2114,12	80,41*	
Interação	1	13,00	13,00	0,49 ^{ns}	
Resíduo	36	946,56	26,29		
<i>Total</i>	39	4475,52			

*significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.
ns - não significativo ao nível de confiança estabelecido.

2. Índice de estouro.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	9,51	9,51	36,92*	4,13
Grau SR	1	21,46	21,46	83,36*	
Interação	1	0,65	0,65	2,53 ^{ns}	
Resíduo	36	9,27	0,26		
<i>Total</i>	39	40,89			

*significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.
ns - não significativo ao nível de confiança estabelecido.

3. Índice de rasgo.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	55,93	55,93	26,15*	4,13

Grau SR	1	24,49	24,49	11,45*	
Interação	1	0,24	0,24	0,11 ^{ns}	
Resíduo	36	77,00	2,14		
<i>Total</i>	39	157,67			

*significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

ns - não significativo ao nível de confiança estabelecido.

APÊNDICE F – Análises da variância para as propriedades físico-mecânicas (continuação).

4. Volume específico aparente.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	0,13	0,13	6,02*	4,13
Grau SR	1	0,27	0,27	12,39*	
Interação	1	0,07	0,07	3,29 ^{ns}	
Resíduo	36	0,79	0,02		
<i>Total</i>	39	1,27			

*significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.

ns - não significativo ao nível de confiança estabelecido.

5. Resistência ao ar Gurley.

FV	GL	SQ	QM	Fc	F _{5%}
Lignina	1	18,09	18,09	4,84*	4,13
Grau SR	1	28,06	28,06	7,51*	
Interação	1	20,88	20,88	5,59*	
Resíduo	36	134,49	3,74		
<i>Total</i>	39	201,51			

*significativo a um nível $\alpha=5\%$ de probabilidade de erro.