

# CELULOSE KRAFT PRODUZIDA A PARTIR DAS MADEIRAS DE BRACATINGA (*Mimosa scabrella*) E EUCALIPTO (*Eucalyptus saligna*) MISTURADAS EM DIFERENTES PROPORÇÕES

## KRAFT PULPING OF BRACATINGA (*Mimosa scabrella*) AND EUCALYPTUS (*Eucalyptus saligna*) WOOD CHIP BLENDS

Rafael Hardt Araujo<sup>1</sup> Celso E. B. Foelkel<sup>2</sup> Patrícia de Oliveira<sup>3</sup>

### RESUMO

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar o uso da madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth), pura e misturada em diferentes proporções com madeira de eucalipto (*Eucalyptus saligna* Smith), para a obtenção de celulose para papel. Tem como objetivos secundários, avaliar as características dendrométricas das árvores, qualificar e quantificar os principais elementos químicos da madeira (extrativos em diclorometano, extrativos em álcool tolueno, lignina e cinzas) e análise anatômicas das fibras e dos vasos. Foram realizados 20 cozimentos kraft, sendo cinco tratamentos, envolvendo misturas em peso seco de cavacos de madeira entre bracatinga e eucalipto (100% bracatinga, 5% bracatinga, 10% bracatinga, 20% bracatinga e 100% eucalipto) com quatro repetições cada. As condições de cozimento foram iguais para os diversos tratamentos, alterando-se somente o álcali ativo da amostra de bracatinga pura, visando manter o número kappa de  $16 \pm 1$ . A alteração foi de 23% de álcali ativo na bracatinga e 20% nos demais tratamentos (álcali ativo expresso como NaOH). A sulfidez manteve-se constante em 20%. A forma de cozimento foi a seguinte: (relação licor/madeira=4:1; temperatura máxima=170 °C; tempo até a temperatura máxima=90 min.; tempo a temperatura máxima=60 min.). A polpa marrom passou pelas seguintes análises: rendimento bruto, número kappa, S<sub>5</sub>, viscosidade intrínseca e alvura. Após os cozimentos, as polpas passaram por uma deslignificação com O<sub>2</sub> e posteriormente um branqueamento ECF, com uma seqüência D<sub>1</sub> E<sub>0</sub> D<sub>2</sub> SO<sub>2</sub>, para conseguir máxima alvura das polpas com menor ataque às fibras. As celulosas branqueadas foram refinadas em moinho PFI com o objetivo de atingir níveis de 30° SR, e concomitantemente com as amostras sem refinar foram feitos os testes físicos-mecânicos e óticos. O teor de lignina e extrativos foram semelhantes nas duas madeiras, enquanto o eucalipto apresentou maior teor de cinzas e menor densidade básica. Anatomicamente, as fibras das duas espécies mostraram pouca diferença no comprimento, porém a bracatinga possuía fibras mais largas com maiores diâmetros de lúmen e paredes mais espessas. A bracatinga apresentou maior rendimento em celulose nos cozimentos. A deslignificação com oxigênio apresentou bons resultados na alvura e no número kappa, com pouca agressão às fibras. No branqueamento, a alvura foi influenciada a partir do acréscimo de 20% de bracatinga. Igual comportamento ocorreu na reversão da alvura. Com relação ao desempenho das celulosas nos testes físico-mecânicos e óticos, o acréscimo da proporção de bracatinga tende a promover uma perda da resistência à tração, ao rasgo, ao estouro, à alongação e piora a opacidade. Com esses resultados, pode-se concluir que a celulose de bracatinga é mais compatível com a fabricação de polpas para papéis sanitários e higiênicos, e menos recomendada para papéis de impressão e escrita, frente às suas características anatômicas e de desempenho nos testes de refinação. Entretanto, o seu uso em misturas até 10% com madeira de eucalipto, não afeta significativamente a qualidade da celulose resultante.

**Palavras-chave:** celulose kraft, bracatinga, eucalipto, deslignificação, branqueamento, refino, propriedade físicas, mecânicas e óticas.

1. Engenheiro Florestal, MSc Empresa Nobrecel S.A. Celulose e Papel SP. E mail: [fomento@nobrecel.com.br](mailto:fomento@nobrecel.com.br)
2. Engenheiro agrônomo, MSc, Grau Celsius Ltda. , URL: [www.celso-foelkel.com.br](http://www.celso-foelkel.com.br) ; E-mail: [foelkel@via-rs.net](mailto:foelkel@via-rs.net)
3. Cargo: Técnica de Laboratório da Aracruz Celulose - Unidade Guaíba Formação: Graduação: Química - Licenciatura Plena Mestrado: Engenharia. Área de Concentração: Ambiente. e-mail: [poliveira@aracruz.com.br](mailto:poliveira@aracruz.com.br)

## ABSTRACT

This study had as main objective to evaluate the use of bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth) wood as fibrous source for papermaking. Kraft pulping of bracatinga and eucalyptus (*Eucalyptus saligna* Smith) wood chip blends were analyzed. Other objectives were: to evaluate characteristics of the trees; wood chemical composition (dichlormethane extractives, alcohol toluene extractives, lignin content and ash content) and anatomical dimensions and population of fibers and vessel elements in the pulps. Twenty kraft cooking were performed, comprising the comparison of 5 treatments with 4 replication for treatment (different wood chip blends based on oven dried wood weight: 100% bracatinga, 5% bracatinga, 10% bracatinga, 20% bracatinga and 100% eucalyptus). Kraft cooking conditions were similar to all treatments, except for 100% bracatinga wood chips, which required 23% active alkali instead of 20% corresponding to the other treatments (active alkali expressed as NaOH). Sulfidity was kept constant as 20%. Other kraft pulping conditions: liquor to wood ratio = 4/1; maximum temperature = 170°C; time to 170°C = 90 minutes; time at 170°C = 60 minutes. Unbleached pulps were analyzed for pulp yield, kappa number, 5% caustic soda solubility, intrinsic viscosity and brightness. Target kappa number was  $16 \pm 1$ . After cooking, the unbleached pulps were delignified by oxygen in alkaline condition followed by an ECF bleaching sequence ( $D_1 E_0 D_2 SO_2$ ). Bleached pulps were beaten in a PFI mill and the strength and optical properties compared at unbeaten and 30° SR drainability levels. Lignin content and extractives were similar in both woods (eucalyptus and bracatinga). However, eucalyptus wood had higher ash content and lower wood basic density. Bracatinga and eucalyptus fibers were similar in term of fiber length, but bracatinga fibers were wider and thicker-walled. Bracatinga wood chips led to better pulp yields. Oxygen delignification provided good results in all treatments. Pulp bleaching started to show losses in brightness when bracatinga wood content in the blend was 20% and over. The same trend for reverted brightness. Higher the bracatinga wood content over 10%, worse the strength properties (tensile, tear, burst and stretch) and pulp opacity. However, the use of bracatinga wood up to 10% based on dry weight did not harm the pulp quality. High bracatinga fiber content in pulp gives pulps more suitable to tissue papers manufacturing and less recommended to printing and writing papers.

**Key words:** kraft pulp, bracatinga, eucalyptus, delignification, bleaching, refining, pulp properties

## INTRODUÇÃO

A espécie nativa a ser avaliada como fonte de matéria-prima fibrosa para a produção de polpa celulósica pelo processo kraft é a bracatinga (*Mimosa scabrella* var. *scabrella*), que tem sua área de ocorrência natural na vegetação secundária da floresta dos pinhais (floresta ombrófila mista), que está compreendida na região sul do Brasil. Também ocorre em menor frequência principalmente nas regiões serranas do leste do estado de São Paulo, sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro (Carvalho, 1994). Já a espécie referência usada é o *Eucalyptus saligna* Smith, o qual representa uma grande parcela no fornecimento de matéria-prima para a produção de celulose no Brasil. Essa espécie, apesar de ser originária da Austrália, encontrou ambiente favorável para crescimento no Brasil e sua utilização industrial tem favorecido o desenvolvimento socioeconômico, principalmente no sul e sudeste do país. A escolha da bracatinga se deve a suas características ecológicas, tecnológicas e seu potencial para uso em plantações e em sistemas agro-florestais em pequenas e médias propriedades rurais. Além disso, é uma espécie pioneira e tem rápido crescimento em relação às espécies de florestas nativas do sul do país.

A análise do potencial tecnológico da bracatinga representa um grande passo para o uso múltiplo das espécies nativas. Descobrir as suas diferentes potencialidades, estar-se-á contribuindo,

de certa forma, para a preservação da espécie florestal e o plantio em novas áreas para a recuperação de áreas deterioradas, o que no momento se faz muito necessário.

O presente estudo teve por objetivo principal avaliar o potencial de produção e a qualidade da polpa celulósica de bracatinga (*Mimosa scabrella* var *scabrella*) em diferentes proporções de mistura com a madeira de eucalipto (*Eucalyptus saligna*). Espera-se assim contribuir com novas alternativas de matéria-prima, bem como avaliar o potencial de implantação de novos reflorestamentos para produção dessa madeira. O objetivo não é o de substituir as espécies tradicionalmente usadas para a produção de celulose. Pelo contrário, quer-se oferecer uma alternativa para a integração maior da indústria de produção de celulose de eucalipto com a comunidade rural, disponibilizando outra madeira de fibra curta como fonte complementar de fibras nos cozimentos industriais com eucalipto.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Amostragem**

As amostras de bracatinga foram coletadas no mês de fevereiro de 2.000 numa pequena propriedade localizada no município de Agronômica, planalto médio de Santa Catarina. A floresta tinha 84 meses de idade e apresentava uma densidade populacional em torno de 2.400 árvores por hectare com espaçamento aproximado de 2 metros por 2 metros. Foi um plantio de primeiro corte, sendo plantado a partir de mudas.

As amostras de eucalipto foram retiradas em novembro de 1.999 no município de Barra do Ribeira, às margens da lagoa dos Patos no estado do Rio Grande do Sul. Era uma floresta clonal, tinha 120 meses de idade e apresentava um espaçamento 3 metros por 2 metros, somando aproximadamente 1.600 árvores por hectare no plantio, sendo também a primeira colheita. Consistia em um material em avançado nível de melhoramento genético para desenvolvimento volumétrico e característica dendrométricas das árvores.

### **Preparo das amostras**

Um total de 26 árvores foram escolhidas aleatoriamente, das quais 15 de eucalipto e 11 bracatinga. Os indivíduos foram cubados e seccionados na base, DAP e a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, que representa um diâmetro mínimo de 6 cm com casca. Foram retirados 3 discos por altura, um para análises químicas e cozimentos, outro para a determinação da densidade básica, e o terceiro para reserva de material. Os discos seguiram um padrão médio com aproximadamente 3 cm de espessura. Para as análises químicas e cozimentos, os discos foram divididos em duas partes, de cada metade separou-se 15° a partir da linha da divisão. Essa amostra foi picada em palitos e depois moída em moinho tipo Wiley. O restante foi transformado manualmente em cavacos para cozimento, nas dimensões aproximadas de 2 a 3 mm de espessura, 2 a 3 cm de largura. O comprimento dos cavacos era função da espessura de 3 cm dos discos.

As amostras para as análises químicas foram moídas até serem transformadas em um serragem fina. Posteriormente peneirou-se a serragem numa peneira de 40 mesh, separou-se todo material que passou pela peneira, as maiores partículas que ficaram retidas foram novamente moídas em um gral e peneirados novamente. Repetiu-se esse procedimento até passar todo o material pela peneira. Depois a serragem foi homogeneizada e medida a sua consistência.

## Determinações dendrométricas

Determinou-se o volume comercial através do método adaptado conforme Smalian descrito por Finger, (1992). O volume de cada seção é calculado em função do comprimento e das áreas basais obtidas nas extremidades das seções. Mediu-se a espessura da casca em todas as alturas, assim obteve-se o volume comercial com e sem casca e pela diferença resultou o volume de casca.

## Densidade básica

Foi retirada uma parte representativa de um disco de cada altura, essa amostra foi mergulhada em água por aproximadamente 30 dias até a saturação total da madeira.

Na determinação do volume úmido usou-se o método de deslocamento ou empuxo. Depois de medido o volume das peças por imersão, foram levadas à estufa com  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  até manterem o peso constante.

Assim temos:

$$D_b = P_{\text{seco}} / V_{\text{sat.}}$$

Onde:

$D_b$  = Densidade básica;  $P_{\text{seco}}$  = Peso da amostra absolutamente seca;  $V_{\text{sat.}}$  = Volume da amostra saturada, com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras.

## Peso seco da madeira comercial da árvore

A determinação do peso seco da madeira comercial da árvore fez-se pela multiplicação do volume parcial de cada segmento na altura por sua respectiva densidade básica média e somando os resultados para totalizar o peso da madeira da árvore. O peso da madeira da árvore foi expresso em toneladas absolutamente secas, os volumes em metros cúbicos e as densidades em  $\text{g/cm}^3$  ou  $\text{t/m}^3$ .

## Análises químicas das madeiras

Foram efetuados quatro tipos de determinações químicas das madeiras, com três repetições cada seguindo as metodologias descritas abaixo:

Teor de lignina TAPPI 222 om-88 e ISO 624: 1974; teor de cinzas TAPPI 211 om-93; teor de extrativos em diclorometano ISO 624: 1974; teor de extrativos em álcool tolueno TAPPI T204 cm-97.

## Cozimentos kraft

Os cozimentos kraft foram feitos em uma autoclave (Regmed-modelo-AU/e-20) contendo 4 células. Cada célula do digestor era carregada com 150 g de cavacos absolutamente secos, totalizando 600g por cozimento nas 4 células. Cada unidade amostral foi sorteada aleatoriamente e representada em 2 células por cozimento, colocadas em sentidos opostos no digestor. Após a polpação, foram unidas novamente na lavagem da celulose, com isso totalizando 300 g de cavacos secos transformadas em polpa marrom, sendo assim 2 células opostas do digestor para uma amostra e conseqüentemente 2 unidades amostrais por cozimento. Efetuaram-se cozimentos prévios para ajustar o álcali ativo e a sulfidez para se ter uma polpa de número kappa  $16 \pm 1$ . Desprezando os cozimentos para ajustes, foram realizadas 10 operações de cozimento no digestor para obtenção de todas as amostras (5 tratamentos por 4 repetições = 20 unidades amostrais, duas por cada operação de cozimento).

Os tratamentos utilizados na obtenção da polpa foram:

- 100% de madeira de eucalipto
- 5% de madeira de bracinga e 95% de madeira de eucalipto, base peso absolutamente seco
- 10% de madeira de bracinga e 90% de eucalipto
- 20% de madeira de bracinga e 80% de eucalipto
- 100% de madeira de bracinga

Esses 5 tratamentos com 4 repetições cada foram definidos com o objetivo de avaliar a qualidade da celulose kraft da bracinga e sua influência em misturas com eucalipto.

### Condições dos cozimentos

As condições da polpação kraft foram praticamente as mesmas para todos os tratamentos, variando somente a carga de álcali ativo das amostras de bracinga pura, quando se aplicou 23% base NaOH, em relação aos 20% aplicados nos cozimentos de eucalipto puro e misturas de eucalipto e bracinga.

TABELA 1 - Condições de cozimento.

	100% eucalipto	5% bracinga	10% bracinga	20% bracinga	100% bracinga
Relação licor / madeira	4:1	4:1	4:1	4:1	4:1
Sulfidez (%)	20	20	20	20	20
Álcali ativo (%)	20	20	20	20	23
Álcali efetivo (%)	18,0	18,0	18,0	18,0	20,7
Temperatura máxima (°C)	170	170	170	170	170
Tempo até temperatura máxima (min).	90	90	90	90	90
Tempo à temperatura máxima (min).	60	60	60	60	60

Após os cozimentos foi recolhido o licor residual e determinado o álcali efetivo residual, álcali efetivo consumido, seguindo a metodologia TAPPI 625 om-85.

Na determinação do rendimento bruto, calculou-se a relação percentual entre o peso absolutamente seco da celulose não depurada com o peso absolutamente seco da madeira empregada no cozimento.

Na separação dos rejeitos da polpa foi usado no depurador peneiras com fendas de 0,2 mm. O material retido era seco em estufa a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  pesado e o teor de rejeitos era expresso com base também no peso absolutamente seco da madeira. O rendimento depurado foi calculado pela diferença entre rendimento bruto e o teor de rejeitos.

### Análises efetuadas na polpa após o cozimento

Após o cozimento, depuração e lavagem da polpa foram determinados número kappa, alvura, solubilidade em NaOH ( $S_5$ ) e viscosidade intrínseca. A determinação desta do número kappa foi realizada segundo a norma da International Organization for Standardization (ISO 302: 1981). O ensaio de alvura foi realizado segundo a metodologia ISO 2470: 1977. A solubilidade da polpa em soda cáustica a frio na concentração de 5% foi feita através da metodologia ISO 692: 1982. A determinação da viscosidade intrínseca foi segundo a metodologia ISO 5351-1:1981.

## Deslignificação alcalina com oxigênio molecular

Essa técnica simula as condições de descompressão em uma torre pressurizada de fluxo ascendente. As taxas de descompressão estão descritas abaixo. Para isso usou-se um digestor elétrico com capacidade de 20 litros, cabendo 2 amostras em 4 provetas de vidro por vez. As amostras eram colocadas em 2 provetas em lados opostos, fechadas com algodão e submersas em água quente (banho-maria), tomando-se o cuidado de não entrar água nas provetas. A deslignificação foi feita conforme a metodologia encontrada nos Documentos Técnicos da Klabin Riocell S.A. (DT – 3013 – 062 – 07 – 3).

Foram usadas as seguintes condições na deslignificação:

Pressão inicial do oxigênio: 7 kgf/cm<sup>2</sup>

Pressão do oxigênio após 10 minutos: 6 kgf/cm<sup>2</sup>

Pressão do oxigênio após 20 minutos: 5 kgf/cm<sup>2</sup>

Pressão do oxigênio após 30 minutos: 4 kgf/cm<sup>2</sup>

Pressão do oxigênio até 40 minutos: 3 kgf/cm<sup>2</sup>

Tempo total: 40 minutos

Temperatura: 95°C

Consistência de trabalho: 12%

Carga de NaOH aplicada: 1,667% base celulose absolutamente seca

Após essa deslignificação as polpas passaram pelos testes de alvura, número kappa, S<sub>5</sub> e viscosidade intrínseca.

## Branqueamento

As cargas de reagentes aplicadas foram sempre calculadas com base no peso absolutamente seco da celulose deslignificada com oxigênio que ingressava para o branqueamento. Para o cloro ativo aplicado no estágio D<sub>0</sub>, variava-se a carga conforme o número kappa inicial da celulose. Posteriormente, todas as adições de reagentes eram constantes para todas as celuloses.

TABELA 2. - Condições de branqueamento.

	Estágios			
	D <sub>1</sub>	E <sub>0</sub>	D <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Carga de cloro ativo (%)	Nº kappa x 0,2	-	2,5	-
Carga de NaOH (%)	-	1,7	-	-
Carga de SO <sub>2</sub> (%)	-	-	-	0,25
Consistência de trabalho (%)	10	12	10	5
Tempo de reação (min.)	30	60	120	10
Temperatura de reação (°C)	75	90	75	Ambiente

O estágio D<sub>1</sub> de branqueamento foi realizado de acordo com as condições citadas no quadro anterior. A adição do dióxido de cloro foi aplicada na polpa dentro de um saco plástico e para atingir e se manter a temperatura a 75°C, foi usado um banho-maria, aquecido eletricamente e controlado por um termostato. A carga de cloro ativo aplicado foi calculada a partir da relação: 0,2 x nº kappa, expressa como percentagem base polpa absolutamente seca.

Na extração alcalina E<sub>0</sub>, utilizou-se o mesmo digestor usado na deslignificação alcalina com oxigênio, variando a carga de soda, pressão, temperatura de reação e a taxa de descompressão.

Neste ensaio as amostras foram submetidas às seguintes condições de pressão:

Pressão inicial do oxigênio: 6 kgf/cm<sup>2</sup>

Pressão do oxigênio após 20 minutos: 5 kgf/cm<sup>2</sup>

Pressão do oxigênio após 40 minutos: 4 kgf/cm<sup>2</sup>

Pressão do oxigênio até 60 minutos: 3 kgf/cm<sup>2</sup>

Na fase D<sub>2</sub> do branqueamento foram usados procedimentos similares aos do estágio D<sub>1</sub>, diferenciando somente o tempo de reação e a carga de cloro ativo, tendo submetido a polpa nesta fase a condições mais prolongadas de tempo de reação.

O estágio SO<sub>2</sub> se caracteriza por ser uma lavagem ácida redutora da polpa com o objetivo de minimizar a reversão da alvura, além da destruição do residual de dióxido de cloro ainda presente nas fibras. Foi o último procedimento na fase de branqueamento.

Nas polpas branqueadas foram determinadas: alvura, S<sub>5</sub> e viscosidade intrínseca. Para avaliar a eficiência do branqueamento foram medidos: cloro ativo aplicado, cloro ativo consumido e cloro residual.

## **Refino e ensaios físico-mecânicos da celulose branqueada**

No processo de refino das polpas branqueadas foi usado um refinador PFI, segundo a metodologia ISO 5264-2: 1979. Foram avaliadas as propriedades das celuloses a dois graus de refino, 0 revoluções do PFI (sem refino) e 30°SR (graus Schopper Riegler). Para atingir os 30°SR, as polpas foram submetidas a diferentes níveis de revoluções do refinador e os valores para os ensaios interpolados por regressão. Ajustou-se uma equação para cada teste para determinar os valores interpolados a 30°SR de refino

O grau Schopper Riegler que mede a drenabilidade da celulose foi medido conforme a metodologia ISO 5267-1: 1979.

As condições adotadas para refino foram segundo a metodologia ISO 5264-2: 1979.

As folhas para os testes possuíam gramatura de  $60 \pm 1$  g/m<sup>2</sup> e a metodologia usada foi segundo a norma TAPPI 205 om-88. Depois de formadas, as folhas foram acondicionadas em sala climatizada até atingirem equilíbrio a  $50 \pm 2$  % de umidade relativa e temperatura de  $23 \pm 2$ °C. Nesta mesma sala foram realizados todos os testes físico-mecânicos e óticos.

As seguintes propriedades foram medidas, conforme as respectivas normas de ensaio:

Número de revoluções do PFI para atingir 30°SR, gramatura (ISO 536: 1995), resistência ao ar Gurley (TAPPI 460 om-88), espessura (TAPPI 411 om-89), alvura (ISO 2470: 1977), opacidade (ISO 2471: 1971), resistência à tração (ISO 1924-1: 1992), alongação (ISO 1924-2: 1994), resistência ao rasgo (ISO 1974: 1990), resistência ao estouro (TAPPI 403 om-91), volume específico aparente (TAPPI 411 om-89), ascensão capilar Klemm (metodologia Klabin Riocell – DT 80220-07-172-3).

## **Dimensões das fibras e vasos na celulose branqueada**

As polpas foram avaliadas quanto ao número de fibras por grama de celulose absolutamente seca, “*coarseness*”, comprimento e diâmetro da fibra, espessura da parede celular, diâmetro do lúmen e teor de finos. Os elementos de vaso foram medidos quanto ao comprimento e diâmetro por microscopia ótica. Sua frequência na polpa foi medida por contagem em lâmina com suspensão diluída de polpa, e expressos em números de elementos de vasos / grama absolutamente seca de celulose.

Para fazer essas mensurações foram usadas as seguintes técnicas:

- microscopia ótica com projeção e uso de ocular micrométrica reticulada (metodologia Klabin Riocell DT – 8040 – 016 – 07 – 1)
- avaliação de fibras pelo analisador de fibras Kajaani F 100 (metodologia Klabin Riocell DT – 3013 – 167 – 07 – 3)

## Valor de retenção de água (*Water retention value* - WRV)

Essa técnica consiste em determinar a capacidade percentual base seu peso seco de retenção de água pela polpa depois de passar por uma centrífuga a 3600 rpm por 30 minutos. Essa análise segue a metodologia Klabin Riocell DT – 8040 – 019 – 07 – 3.

## Análises estatísticas dos resultados

Nas análises das diferentes misturas foi usado o delineamento experimental inteiramente casualizado, utilizando análises da variância (Anova) testando-se as diferenças estatísticas, pelo teste de significância F com 5% de nível de significância. Nas demais análises calcularam-se as médias (**X**) e os desvios padrão (DP). Para os dados dendrométricos, determinou-se também o coeficiente de variação (CV).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Análises dendrométricas

Os resultados das análises dendrométricas estão representados nas Tabelas 1 e 2. A Tabela 1 mostra os valores individuais do volume comercial sem casca, densidade básica média e peso absolutamente seco da madeira comercial de cada árvore. Como se pode verificar nesse quadro, tem-se uma média para volume comercial sem casca de 0,403 m<sup>3</sup> no eucalipto e 0,110 m<sup>3</sup> para bracatinga, mostrando a grande diferença de crescimento entre as espécies, apesar da idade diferente entre os povoamentos amostrados e de este material ser um clone geneticamente melhorado de *Eucalyptus saligna*. As médias das densidades básicas das duas espécies foram de 0,43 g/cm<sup>3</sup> para o eucalipto e 0,57 g/cm<sup>3</sup> na bracatinga. Valor semelhante na densidade básica da bracatinga foi encontrado por Barrichelo & Brito (1982), 0,58 g/cm<sup>3</sup>. O peso médio de madeira absolutamente seca por árvore foi de 0,192 toneladas para eucalipto e 0,063 toneladas para bracatinga.

TABELA 3 - Valores dendrométricos de volume, densidade e peso.

Árvore	Volume comercial sem casca (m <sup>3</sup> )		Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )		Peso médio da árvore (toneladas de madeira a.s.)	
	eucalipto	bracatinga	eucalipto	bracatinga	eucalipto	bracatinga
1	0,415	0,155	0,44	0,58	0,200	0,090
2	0,392	0,089	0,41	0,57	0,178	0,051
3	0,381	0,118	0,41	0,55	0,177	0,065
4	0,401	0,086	0,42	0,56	0,188	0,048
5	0,410	0,059	0,42	0,56	0,192	0,034
6	0,408	0,136	0,43	0,53	0,193	0,073
7	0,398	0,088	0,41	0,57	0,181	0,050
8	0,390	0,124	0,42	0,59	0,184	0,074
9	0,411	0,131	0,42	0,59	0,190	0,078
10	0,389	0,083	0,42	0,59	0,187	0,048
11	0,432	0,138	0,46	0,56	0,220	0,080
12	0,421		0,44		0,203	
13	0,418		0,44		0,204	
14	0,401		0,43		0,192	
15	0,382		0,43		0,187	
Média geral	<b>0,403</b>	<b>0,110</b>	<b>0,43</b>	<b>0,57</b>	<b>0,192</b>	<b>0,062</b>
CV (%)	3,70	27,20	2,86	3,32	5,86	27,76

TABELA 4 - Dados de volume comercial com e sem casca, volume e percentual de casca.

Árvore	Volume comercial com casca (m <sup>3</sup> )		Volume comercial sem casca (m <sup>3</sup> )		Volume de casca (m <sup>3</sup> )		% de casca base volume	
	eucalipto	bracatinga	eucalipto	bracatinga	eucalipto	bracatinga	eucalipto	bracatinga
	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média
1	0,461	0,181	0,415	0,155	0,046	0,026	9,90	14,36
2	0,433	0,099	0,392	0,089	0,041	0,010	9,45	10,12
3	0,430	0,139	0,381	0,118	0,049	0,021	11,35	14,90
4	0,449	0,097	0,401	0,086	0,047	0,011	10,63	11,68
5	0,455	0,067	0,410	0,059	0,045	0,007	9,97	10,89
6	0,451	0,157	0,408	0,136	0,043	0,020	9,61	12,88
7	0,439	0,100	0,398	0,088	0,041	0,011	9,34	11,50
8	0,439	0,141	0,390	0,124	0,049	0,017	11,22	12,03
9	0,455	0,153	0,411	0,131	0,043	0,021	9,59	14,04
10	0,447	0,098	0,389	0,083	0,058	0,015	12,99	15,12
11	0,483	0,153	0,432	0,138	0,051	0,015	10,63	9,72
12	0,464		0,421		0,043		9,21	
13	0,463		0,418		0,045		9,72	
14	0,446		0,401		0,045		10,15	
15	0,439		0,382		0,057		13,04	
Média total	<b>0,450</b>	<b>0,126</b>	<b>0,403</b>	<b>0,110</b>	<b>0,047</b>	<b>0,016</b>	<b>10,46</b>	<b>12,48</b>
CV (%)	3,10	27,81	3,70	27,20	11,16	35,88	11,73	13,31

Os dados apresentados na Tabela 4 mostram uma média de 0,450 m<sup>3</sup> para o volume comercial com casca para o eucalipto e para a bracatinga 0,126 m<sup>3</sup>, demonstrando menor produtividade florestal para essa última espécie. O volume médio de casca para eucalipto e bracatinga foi de 0,0470 m<sup>3</sup> e 0,0159 m<sup>3</sup> respectivamente. A avaliação do percentual médio para a quantidade volumétrica de casca mostrou 10,46% para eucalipto e 12,48% para a bracatinga.

### Analises químicas da madeira

Os teores médios de lignina insolúvel em ácido, cinzas, extrativos em diclorometano e álcool tolueno encontrados nas duas amostras são mostrados na Tabela 5. As médias de extrativos em diclorometano encontradas nas duas espécies diferenciaram muito pouco entre si, sendo 0,21% em eucalipto e 0,20% na madeira de bracatinga. O mesmo aconteceu para os valores de extrativos solúveis em álcool tolueno, encontrando-se 1,45 % para eucalipto e 1,44% para a bracatinga.

TABELA 5 - Teores de lignina, cinzas, extrativos solúveis em diclorometano e em álcool tolueno nas madeiras.

Eucalipto	Lignina(%)	Cinzas(%)	DCM(%)	Alcool tolueno(%)
1 <sup>a</sup> repetição	23,4	0,85	0,18	1,51
2 <sup>a</sup> repetição	23,5	0,84	0,23	1,42
3 <sup>a</sup> repetição	23,2	0,83	0,22	1,41
<b>Média</b>	<b>23,4</b>	<b>0,84</b>	<b>0,21</b>	<b>1,45</b>
D.P.	0,152	0,010	0,026	0,055
Bracatinga	Lignina(%)	Cinzas(%)	DCM(%)	Alcool tolueno(%)
1 <sup>a</sup> repetição	23,4	0,38	0,2	1,48
2 <sup>a</sup> repetição	23,2	0,35	0,16	1,45
3 <sup>a</sup> repetição	22,9	0,35	0,25	1,4
<b>Média</b>	<b>23,2</b>	<b>0,36</b>	<b>0,20</b>	<b>1,44</b>
DP	0,252	0,017	0,045	0,040

DCM = Extrativos em diclorometano; DP = desvio padrão

Os percentuais médios de lignina não tiveram grande diferença entre as duas espécies avaliadas, apenas 0,2% a mais base madeira absolutamente seca para o eucalipto. Os valores médios de lignina encontrados na madeira de *Eucalyptus saligna* foram superiores aos 20,47% medidos por Flores (1999). Já a média encontrada na *Mimosa scabrella* foi inferior ao teor médio de lignina de 25,8% determinado por Sturion & Silva (1989).

Como se demonstrou na Tabela 5, os valores médios de cinzas no eucalipto e na bracatinga foram de 0,84% e 0,36% respectivamente. Em *Eucalyptus saligna*, Flores (1999), Foelkel & Sani (1977) e Lima *et al.*(1993) encontraram valores muito próximos a 0,30% de cinzas na madeira. Vital *et al.*(1994) encontrou valores mais elevados nessa mesma espécie, em torno de 0,77%, dando indicações de que existe uma certa variação para essa propriedade, provavelmente em função de características genéticas e de riqueza de solo.

### Características das fibras e vasos da celulose branqueada

Foram mensuradas na celulose branqueada o número de vasos por grama de celulose absolutamente seca, o comprimento médio das fibras maiores que 0,25 mm, o “*coarseness*”, o número de fibras maiores que 0,25 mm/grama de celulose absolutamente seca, o teor de finos, o valor de retenção de água (WRV) e as medições óticas de fibras inteiras e vasos inteiros (comprimento e largura dos vasos, comprimento das fibras, largura das fibras, espessura da parede e diâmetro do lúmen).

Encontrou-se maior número de vasos na celulose de bracatinga, 83.333 unidades, e em menor quantidade na polpa de eucalipto, 51.150 elementos de vaso por grama de polpa absolutamente seca. Esse aspecto demonstra a melhor qualidade da polpa branqueada de eucalipto com menor número de vasos, principalmente na utilização para papéis de impressão, onde os vasos costumam trazer problemas na mesma.

Os resultados das análises feitas com o aparelho Kajaani estão representados na Tabela 6. Nas mensurações feitas por esse analisador de fibras, nota-se que as fibras da bracatinga têm comprimento ligeiramente maior que o eucalipto.

Pelo fato da madeira da bracatinga possuir maior densidade, observa-se que o peso de 100 metros de fibras hipoteticamente postas enfileiradas pelas extremidades (“*coarseness*”) é maior, com 10,78 mg contra 8,35 mg no eucalipto. Pela maior densidade da madeira da espécie, o que pode representar fibras mais pesadas, o número de fibras por grama de celulose na bracatinga é menor,  $15,8 \times 10^6$  contra  $21,45 \times 10^6$  para o eucalipto. O teor de finos medidos pelo Kajaani é maior no eucalipto, 4,43% de finos e 3,85% na bracatinga. Em função desses resultados, é de esperar comportamento distinto entre as espécies nas propriedades físico-mecânicas e óticas, ficando o eucalipto com melhores resultados potenciais para opacidade e a bracatinga para volume específico aparente e ascensão capilar de água.

TABELA 6 - Resultados do analisador de fibras Kajaani F 100.

	Eucalipto	Bracatinga
Comprimento médio das fibras com mais que 0,25 mm	0,67 mm	0,71 mm
“ <i>Coarseness</i> ” (mg/100m)	8,35	10,78
Nº de fibras com mais de 0,25 mm / grama absolutamente seca	$21,45 \times 10^6$	$15,8 \times 10^6$
Teor de finos (%)	4,43	3,85

No ensaio valor de retenção de água (*Water retention value* - WRV), as fibras de eucalipto tiveram maior retenção de água, 178,45%, contra 145,6% para a bracatinga, sendo mais indicadas para papéis que demandam absorção e retenção de água. Como as fibras de eucalipto são mais numerosas,

devem possuir mais espaço para reter a água nos lúmens, na porosidade da parede celular e entre fibras. O menor WRV favorece a drenagem na parte úmida na máquina de papel, vantagem para as polpas de bracinga.

As determinações anatômicas com microscopia ótica demonstraram maiores comprimentos das fibras que os obtidos nas mensurações feitas pelo analisador Kajaani, uma vez que só são mensuradas fibras inteiras. Na medição do comprimento da fibra com microscopia ótica há a seleção somente de fibras inteiras, enquanto no analisador Kajaani tira-se a média das fibras quebradas ou não, com comprimento acima de 0,25 mm. O valor acima de 0,25 mm é arbitrariamente escolhido, pois elementos anatômicos menores que 0,25 mm ou não são fibras, ou são apenas fragmentos de fibras.

Nessa análise, as fibras da bracinga diferenciaram-se por serem mais largas, 25,20 µm, contra 21,40 µm de largura no eucalipto. Notou-se pequena diferença no comprimento, 1,076 mm para eucalipto e 1,042 mm para a bracinga. As maiores diferenças ocorreram com a espessura da parede celular, 6,39 µm na bracinga e 4,72 µm para o eucalipto. A bracinga também apresentava o diâmetro do lúmen ligeiramente maior, 12,38 µm, e 11,94 µm para o eucalipto. Os valores encontrados por Barrichelo & Brito (1982) nas fibras de bracinga foram de 0,97 mm de comprimento, 23,5 µm de largura, 11,0 µm de diâmetro do lúmen e 6,2 µm na espessura da parede. Em outro estudo feito por Barrichelo (1968), encontraram-se valores um pouco maiores nas dimensões anatômicas das fibras da bracinga: foi de 1,17 mm o comprimento, 25,8 µm a largura, 14,3 µm o diâmetro do lúmen e a espessura da parede apresentou um valor inferior, 5,7 µm. Conclusivamente, pode-se dizer que as fibras da bracinga são ligeiramente mais largas, têm mesmo comprimento, mas têm maior espessura de parede que as fibras do *E. saligna*, para essas faixas encontradas de densidade básica da madeira.

Os elementos de vasos do eucalipto possuem maiores dimensões, mas são em menor número. As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados obtidos através das mensurações com microscopia ótica das fibras e dos vasos.

TABELA 7 - Dimensões anatômicas das fibras na celulose branqueada.

		Comprimento das fibras	Largura das fibras	Espessura da parede celular	Diâmetro do lúmen
Eucalipto	<b>Média</b>	<b>1,076 mm</b>	<b>21,40 µm</b>	<b>4,72 µm</b>	<b>11,94 µm</b>
	D. P	0,1778	4,2798	1,2902	4,2798
Bracinga	<b>Média</b>	<b>1,042 mm</b>	<b>25,17 µm</b>	<b>6,39 µm</b>	<b>12,38 µm</b>
	D. P	0,1609	5,4402	1,9257	5,4270

TABELA 8 – Comprimento e largura dos vasos na celulose branqueada.

		Comprimento dos vasos	Largura dos vasos
Eucalipto	<b>Média</b>	<b>0,513 mm</b>	<b>0,335 mm</b>
	D. P	0,0922	0,0622
Bracinga	<b>Média</b>	<b>0,411 mm</b>	<b>0,300mm</b>
	D. P	0,0533	0,0467

## Cozimento

A avaliação dos resultados dos cozimentos permitiu detectar a influência dos tratamentos no que diz respeito à adição da bracinga no comportamento da polpa não branqueada. Frente às diferenças nas qualidades tecnológicas das madeiras das duas espécies, todos os parâmetros analisados apresentaram resultados significativos, o que demonstra que havia a influência do teor de bracinga

nos resultados em análise, principalmente no que se diz respeito ao tratamento constituído apenas de madeira de bracinga.

Na Tabela 9 estão representados os valores médios do rendimento bruto, número kappa ( $n^\circ$  kappa), viscosidade intrínseca, solubilidade em solução de NaOH a 5% ( $S_5$ ) e alvura da polpa não branqueada após os cozimentos e lavagem da mesma.

TABELA 9 – Determinações do rendimento bruto, número kappa, viscosidade intrínseca,  $S_5$  e alvura das celuloses não branqueadas.

TRATAMENTOS	Rendimento bruto (%)	Número kappa	Viscosidad e intrínseca ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	$S_5$ (%)	Alvura (% ISO)	
100% eucalipto	<b>50,5</b>	<b>16,0</b>	<b>1062</b>	<b>10,2</b>	<b>40,3</b>	
5% bracinga	<b>50,1</b>	<b>15,6</b>	<b>1040</b>	<b>10,2</b>	<b>39,7</b>	
10 % bracinga	<b>50,1</b>	<b>16,2</b>	<b>1075</b>	<b>10,7</b>	<b>39,5</b>	
20% bracinga	<b>51,3</b>	<b>16,4</b>	<b>1072</b>	<b>11,0</b>	<b>37,9</b>	
100% bracinga	<b>51,3</b>	<b>16,2</b>	<b>955</b>	<b>11,4</b>	<b>34,2</b>	
ANOVA	F	4,507	5,761	18,253	9,573	42,053
	Sig	S	S	S	S	S

Sig: Nível de significância igual a 5%

S: Significativo

As quantidades de rejeitos retidas no depurador apresentaram valores inferiores a 0,01 % em todas as situações, desprezando-as assim e também o cálculo e análise dos rendimentos depurados. Pelo valor de F, a alvura foi a propriedade que sofreu maior influência na polpa marrom com a adição de bracinga, sendo o F calculado igual a 42,053. Seguiram-se a viscosidade intrínseca com um F de 18,253 e o  $S_5$  com 9,573. A madeira de bracinga mostra-se bastante interessante por conduzir a maiores rendimentos em celulose em relação ao eucalipto (51,3% versus 50,5%). Associando-se essa propriedade à sua maior densidade básica (0,57  $\text{g}/\text{cm}^3$  para bracinga e 0,43  $\text{g}/\text{cm}^3$  para o eucalipto), o resultado é menor consumo específico de madeira por tonelada de celulose produzida a partir da bracinga. Teoricamente, sem considerar perdas de madeira no processamento industrial, os consumos específicos calculados para bracinga e eucalipto são respectivamente 3,42 e 4,60 metros cúbicos de madeira por tonelada absolutamente seca de celulose não branqueada.

Após o cozimento, o licor negro residual foi avaliado para determinar o álcali efetivo residual. Através dessa determinação e dos álcalis ativo e efetivo originalmente aplicados, calculou-se o álcali efetivo consumido base madeira absolutamente seca. Os resultados médios dessas análises estão demonstrados na Tabela 10.

TABELA 10 - Álcali ativo aplicado, álcali efetivo aplicado, álcali efetivo residual e álcali efetivo consumido ( resultados base madeira absolutamente seca).

	100% eucalipto	5% bracinga	10% bracinga	20% bracinga	100% bracinga
Álcali ativo aplicado (%)	20	20	20	20	23
Álcali efetivo aplicado (%)	18,0	18,0	18,0	18,0	20,7
Álcali efetivo residual (%)	2,46	2,62	2,31	2,07	4,18
Álcali efetivo consumido (%)	15,54	15,38	15,69	15,93	16,52

Pela condição mais severa dos álcalis ativo e efetivo aplicados no cozimento com 100% de bracinga, acabou-se encontrando um maior valor médio de álcali efetivo residual para esse tratamento. Ficou em torno de 2,4% nos licores das misturas e do eucalipto e 4,2% de álcali efetivo residual nos cozimentos de bracinga pura. Os valores de álcali efetivo consumidos pelos cozimentos de bracinga pura foram cerca de 1% superiores base madeira absolutamente seca. Caso não se

aumentasse o álcali para o cozimento da bracatinga pura, não se conseguiriam os valores objetivados de número kappa. Em parte, a maior dificuldade de cozimento da madeira de bracatinga pode estar associado a sua maior densidade básica, o que dificulta a penetração do licor e a conseqüente polpação.

### Deslignificação alcalina com oxigênio

Na oxidação da lignina com oxigênio, os tratamentos apresentaram comportamentos distintos nas diferentes análises efetuadas para sua avaliação. Entretanto, a bracatinga pura seguiu suas tendências de piores alvuras e melhores resultados para solubilidade em soda a 5%. Os resultados médios de número kappa,  $S_5$ %, viscosidade intrínseca e alvura após a deslignificação com oxigênio estão na Tabela 11.

TABELA 11 - Resultados da deslignificação com oxigênio: número kappa,  $S_5$ , viscosidade intrínseca e alvura.

	Número kappa	$S_5$ (%)	Viscosidade intrínseca ( $cm^2/g$ )	Alvura (%ISO)	
100% eucalipto	10,6	9,4	940	55,7	
5% bracatinga	10,4	9,4	930	54,5	
10 % bracatinga	11,0	9,9	980	52,8	
20% bracatinga	11,0	10,3	960	52,4	
100% bracatinga	9,7	11,2	890	45,5	
ANOVA	F	19,409	32,538	9,844	119,618
	Sig	S	S	S	S

Sig: Nível de significância igual a 5%

S: Significativo

Apesar do número kappa ter significância estatística após a aplicação de oxigênio na polpa marrom, manteve-se dentro dos limites especificados ( $10 \pm 1$ ), para essa análise no branqueamento.

A preservação de hemiceluloses na polpa medidas pelo  $S_5$ , indicou aumento a partir de 20 % de bracatinga, o que é um fator positivo para essa mistura. A viscosidade intrínseca alterou-se expressivamente apenas na bracatinga pura. A alvura decaiu a partir do acréscimo de 10% de bracatinga na polpa e ficou mais baixa ainda na polpa de bracatinga pura.

### Branqueamento

A Tabela 12 mostra que não se conseguiu atingir alvuras superiores a 90° ISO para a polpa de bracatinga. Apesar disso a polpa de bracatinga branqueou bem, pois partiu de alvuras iniciais menores. Um branqueamento mais otimizado para a polpa de 100% de bracatinga com certeza possibilitaria alvuras melhores. Notou-se que com 20% de mistura dessa espécie decaiu significativamente a alvura, sendo a propriedade mais afetada com o acréscimo de bracatinga ( $F = 33,3$ ). A viscosidade intrínseca teve a menor influência dos tratamentos ( $F = 8,3$ ), não sendo essas diferenças encontradas tecnologicamente importantes.

A solubilidade em soluções de soda a 5% da polpa após o branqueamento comportou-se como é demonstrado na Tabela 12. Nota-se a tendência da madeira de bracatinga colaborar para aumento dessa propriedade.

TABELA 12 - S<sub>5</sub>, viscosidade intrínseca e alvura das celuloses branqueadas.

	S <sub>5</sub> (%)	Viscosidade intrínseca (cm <sup>2</sup> /g)	Alvura (%ISO)
100% eucalipto	8,4	810	90,4
5% bracinga	8,2	790	90,3
10 % bracinga	8,9	820	90,2
20% bracinga	9,1	820	89,8
100% bracinga	10,6	770	88,5
ANOVA	F	8,311	33,345
	Sig	S	S

Sig: Nível de significância igual a 5%

S: Significativo

Nas Tabelas 13 e 14 estão apresentados os valores de cloro ativo aplicado, cloro ativo consumido e o residual de cloro após o branqueamento. Percebe-se que o residual de cloro em D<sub>1</sub> é baixo, sendo nulo em polpa com 100% de bracinga. Esse baixo residual de cloro ativo deve-se ao fato das polpas mostrarem alta reatividade pelo dióxido de cloro, consumindo-o quase totalmente, o que é desejável nesse estágio. Entretanto faltou cloro ativo para a celulose com 100% de bracinga nesse estágio, indicando que esse estágio mereceria maiores otimizações.

TABELA 13 - Cloro ativo aplicado, cloro ativo consumido e residual de cloro no estágio D<sub>1</sub>.

ESTÁGIO D <sub>1</sub>	Repetição	Cloro ativo aplicado (%)	Cloro ativo consumido (%)	Residual de cloro (%)	Média do residual de cloro (%)
100% eucalipto	1	2,17	2,170	0,000	0,014
	2	2,10	2,100	0,000	
	3	2,07	2,063	0,007	
	4	2,08	2,030	0,050	
5% bracinga	1	2,12	2,109	0,011	0,003
	2	2,10	2,100	0,000	
	3	2,10	2,100	0,000	
	4	1,96	1,960	0,000	
10% bracinga	1	2,26	2,242	0,018	0,036
	2	2,18	2,171	0,009	
	3	2,16	2,152	0,008	
	4	2,20	2,092	0,108	
20% bracinga	1	2,16	2,124	0,036	0,023
	2	2,20	2,200	0,000	
	3	2,26	2,205	0,055	
	4	2,14	2,140	0,000	
100% bracinga	1	1,92	1,920	0,000	0,000
	2	1,90	1,900	0,000	
	3	2,00	2,000	0,000	
	4	1,94	1,940	0,000	

TABELA 14 - Cloro ativo aplicado, cloro ativo consumido e residual de cloro no estágio D<sub>2</sub>.

ESTÁGIO D <sub>2</sub>	Repetição	Cloro ativo aplicado (%)	Cloro ativo consumido (%)	Residual de cloro (%)	Média do residual de cloro (%)
100% eucalipto	1	2,50	2,433	0,067	0,059
	2	2,50	2,463	0,037	
	3	2,50	2,396	0,104	
	4	2,50	2,470	0,030	
5% bracatinga	1	2,50	2,380	0,120	0,073
	2	2,50	2,486	0,014	
	3	2,50	2,419	0,081	
	4	2,50	2,423	0,077	
10% bracatinga	1	2,50	2,424	0,076	0,052
	2	2,50	2,500	0,000	
	3	2,50	2,469	0,031	
	4	2,50	2,400	0,100	
20% bracatinga	1	2,50	2,430	0,070	0,123
	2	2,50	2,426	0,074	
	3	2,50	2,340	0,160	
	4	2,50	2,310	0,190	
100% bracatinga	1	2,50	2,310	0,190	0,148
	2	2,50	2,378	0,122	
	3	2,50	2,367	0,133	
	4	2,50	2,354	0,146	

O residual de cloro em D<sub>2</sub> é mais elevado que em D<sub>1</sub>. A maior média nesse estágio é do tratamento com 100% de bracatinga apresentando 0,147% de cloro residual, comportamento contrário ao estágio anterior, onde foi nulo. Como no estágio D<sub>1</sub> faltou cloro para a polpa de bracatinga e no estágio D<sub>2</sub> essa celulose não consumiu todo o dióxido de cloro aplicado, acredita-se que adequando-se as condições de branqueamento seria possível atingir valores mais elevados de alvura. Os resultados indicam uma menor velocidade no consumo de dióxido de cloro para as polpas contendo quantidades maiores de bracatinga. É possível então que a alvura da celulose de bracatinga pudesse ser melhorada caso o tempo e/ou a temperatura do estágio D<sub>2</sub> fossem aumentados.

Os graus de drenabilidade Schopper Riegler (°SR) conjuntamente com a energia de refino em número de revoluções no refinador PFI para atingir 30°SR estão na Tabela 15.

TABELA 15 - Graus de drenabilidade Schopper Riegler (°SR) e energia de refino em número de revoluções do refinador PFI.

	°SR das polpas sem refinar	Revoluções para atingir 30°SR (X10 <sup>3</sup> )
100% eucalipto	15	2,7
5% bracatinga	15	2,7
10% bracatinga	14	2,7
20% bracatinga	14	2,7
100% bracatinga	12	2,8
ANOVA	F	3,592
	Sig	NS

Como pode ser observado, o grau de drenabilidade Schopper Riegler para polpa sem refino difere estatisticamente somente na celulose pura de bracatinga, sendo excepcionalmente mais baixos.

Explica-se isso pela menor população fibrosa da celulose de bracinga e seu menor valor de retenção de água, o que favorece a drenagem da água através da estrutura da manta de fibras formada no teste. As quantidades de revoluções do refinador PFI para se atingir 30°SR em todas as polpas não diferiram entre si, mostrando que todas as polpas são igualmente refinadas para esse nível de drenabilidade.

### Testes físico-mecânicos das polpas branqueadas

O índice de tração, a alongação, o índice de estouro e o índice de rasgo são representados em seus valores médios na tabela 16, para polpas sem refino e refinadas a 30°SR. Em condições semelhantes de cozimento com polpas de *Eucalyptus saligna* com e sem refino, os testes de resistência desse estudo mostraram valores ligeiramente superiores aos encontrados por Jerônimo, 1997.

A adição crescente de bracinga na mistura tende a ir gradualmente reduzindo a resistência à tração, sendo que a polpa de 100% de bracinga é significativamente mais fraca para essa propriedade nos dois níveis de refino. O teste de alongação nas polpas branqueadas sem refino tiveram a mesma média em todos os tratamentos (2,1%). Nas polpas refinadas, a alongação das polpas refinadas em celulose de eucalipto puro teve valor pouco superior às misturas, mas diferenciou-se estatisticamente a polpa de bracinga que foi o pior tratamento. A resistência ao estouro das polpas refinadas a 30°SR começaram a cair significativamente com o acréscimo de 10 % de bracinga e a polpa de bracinga pura apresentou qualidade inferior às demais. As polpas sem refino sofreram menor influência dos tratamentos no teste de resistência ao estouro, mas seguiram as mesmas tendências das pastas refinadas.

TABELA 16 – Índice de tração, alongação, índice de estouro e índice de rasgo.

	Índice de tração (N.m/g)		Alongação (%)		Índice de estouro (kPa.m <sup>2</sup> /g)		Índice de rasgo (mN.m <sup>2</sup> /g)		
	Sem refino	Refino 30°SR	Sem refino	Refino 30°SR	Sem refino	Refino 30°SR	Sem refino	Refino 30°SR	
100% eucalipto	26,9	86,3	2,1	4,9	1,15	8,40	5,95	13,33	
5% bracinga	25,2	85,2	2,1	4,3	1,00	8,13	5,85	13,1	
10% bracinga	25,9	85,2	2,1	4,5	1,13	7,83	5,43	12,58	
20% bracinga	25,5	83,5	2,1	4,6	1,03	7,93	5,53	12,75	
100% bracinga	14,2	61,6	2,1	3,5	0,3	4,8	2,2	9,15	
ANOVA	F	39,50	68,21	0	21,21	29,89	131,9	44,69	46,83
	Sig	S	S	NS	S	S	S	S	S

Na tabela 17 estão representados os valores médios do volume específico aparente, resistência ao ar e ascensão capilar Klemm das folhas de celulose branqueadas.

Somente as polpas de bracinga pura, com e sem refino tiveram valores significativos quanto a médias diferentes para o volume específico aparente, mas nota-se um sensível aumento dessa propriedade com a adição de bracinga.

Na resistência ao ar Gurley, os resultados das pastas refinadas a 30°SR tiveram decréscimo de valor com as misturas. Nessa situação, a resistência à passagem de ar foi menor, ou seja as folhas de polpa de bracinga foram mais porosas, o que é uma vantagem para papeis sanitários e papeis filtro.

Na ascensão capilar Klemm, verifica-se pouca influência dos tratamentos iniciais de misturas, diferenciando a partir do acréscimo de 20% de bracinga. As polpas sem refino foram mais afetadas pelos tratamentos, apresentando valor de F superior, mas também teve o mesmo comportamento que as polpas refinadas. Seguindo a tendência demonstrada de produzir polpas volumosas e porosas, o teste

de ascensão capilar Klemm para a polpa de 100% bracatinga mostrou o que se esperaria de tal celulose, ou seja, uma maior ascensão de água pela rede porosa da folha.

TABELA 17 – Análises do volume específico aparente, resistência ao ar e ascensão capilar Klemm.

	Volume específico (cm <sup>3</sup> /g)		Resistência ao ar (seg/100 cm <sup>3</sup> )		Ascensão capilar (mm/10 min)		
	Sem refino	Refino 30°SR	Sem refino	Refino 30°SR	Sem refino	Refino 30°SR	
100% eucalipto	2,07	1,48	0,95	15,60	100,6	42,25	
5% bracatinga	2,17	1,52	0,73	10,71	111,6	46,75	
10% bracatinga	2,14	1,51	0,83	11,18	106,0	44,12	
20% bracatinga	2,14	1,52	0,78	12,15	106,5	46,98	
100% bracatinga	2,46	1,64	0,26	3,16	133,6	60,25	
ANOVA	F	24,24	16,59	28,03	15,48	17,50	7,35
	Sig	S	S	S	S	S	S

A análise de variância dos testes óticos apresentada na Tabela 18 mostrou que a opacidade sofreu maior influência que a alvura por ação dos tratamentos. Entretanto, pelas médias da alvura tem-se uma visão do prejuízo que causa o acréscimo de bracatinga na qualidade da polpa para essa propriedade. É certo que essa qualidade inferior da alvura na celulose de bracatinga poderia ser contornada por otimização das condições no branqueamento. Por outro lado, uma elevação de alvura poderia eventualmente conduzir a maior degradação das moléculas de celulose e a resultados ainda inferiores de propriedades de resistência.

Quanto a opacidade, a menor população fibrosa da bracatinga acaba por prejudicar essa importante propriedade para papéis de impressão e escrita. Entretanto, essa perda de opacidade não é significativa até a mistura de 20% de bracatinga.

TABELA 18 – Opacidade e alvura das polpas com e sem refino.

	Opacidade (%)		Alvura (% ISO)
	Sem refino	Refino 30°SR	Refino 30°SR
100% eucalipto	80,0	73,9	88,1
5% bracatinga	80,2	73,9	87,7
10% bracatinga	79,8	73,2	87,3
20% bracatinga	80,1	73,6	87,2
100% bracatinga	77,5	70,8	85,8
ANOVA	F	43,196	29,173
	Sig	S	S

## CONCLUSÕES

Como conclusão geral do trabalho, pode-se afirmar que a madeira de bracatinga tem condições de ser utilizada como fonte de madeira em misturas com eucalipto na fabricação de celulose, contribuindo com sua maior densidade básica e fibras de paredes mais espessas a agregar um diferencial na qualidade nas polpas produzidas, dependendo da proporção que vier a ser utilizada na mistura. Para pequenas adições de madeira de bracatinga, até 10% do peso dos cavacos, não se notam diferenças significativas na polpação e na qualidade da polpa da mistura em relação à polpa de eucalipto puro. Quando se aumentar a proporção de madeira de bracatinga, pode-se esperar alguns prejuízos nas resistências físico-mecânicas e na alvura e opacidade, mas ganha-se em porosidade,

absorção de água Klemm e volume específico aparente. Por essa razão, as fibras de bracinga parecem ser mais compatíveis com a fabricação de polpas para papéis sanitários e higiênicos, e menos recomendadas para papéis de impressão e escrita, frente às suas características anatômicas e de desempenho nos testes de refinação.

As análises dendrométricas demonstraram que as árvores de espécies de bracinga (*Mimosa scabrella* var. *scabrella*) tiveram incremento volumétrico inferior, porém apresentaram madeiras mais densas em comparação ao eucalipto (*Eucalyptus saligna*) de povoamentos de maior idade.

Existe hoje pouca chance da bracinga competir em termos de produtividade florestal com o eucalipto. Entretanto, ela pode ser uma interessante fonte de fibras complementar, principalmente de origem de pequenas e médias propriedades rurais, e assim, ajudar a diversificar e aproveitar outras fontes de matéria-prima viáveis na produção de celulose e papel. Há ainda oportunidades para ganhar em produtividade florestal através de melhoramento genético da espécie.

Em termos de composição química da madeira, o teor de lignina e extrativos foram semelhantes nas duas madeiras, enquanto o eucalipto apresentou maior teor de cinzas.

Anatomicamente, as fibras das duas espécies mostraram pouca diferença no comprimento, porém a bracinga possuía fibras mais largas, com maiores diâmetros de lúmen e paredes mais espessas. As suas fibras foram mais pesadas, possuindo menor população fibrosa por grama seca de polpa e maior “coarseness”. Foi encontrado menor número de vasos na polpa de eucalipto, porém esses vasos apresentaram maiores dimensões.

As fibras da polpa de bracinga mostraram também menor valor de retenção de água do que as de eucalipto, o que favorece a drenagem na formação do papel.

A madeira de bracinga exigiu condições mais severas de cozimento, aumentando-se o álcali ativo para ter-se um grau de deslignificação semelhante aos demais tratamentos após o cozimento. Com essa drástica requerida no cozimento, degradaram-se mais as fibras da polpa de bracinga, contribuindo em parte para o decréscimo de qualidade e resistência da polpa de bracinga pura. Pela maior densidade básica e rendimento maior na conversão a celulose, oferece a vantagem de menor consumo de volume de madeira por tonelada de celulose, o que pode ser útil em fábricas que estejam com gargalos de produção devido a alimentação de madeira.

No branqueamento, a alvura foi influenciada a partir da mistura de 20% de bracinga e decaindo substancialmente na polpa pura de bracinga. Igual comportamento ocorreu na reversão da alvura. O teor de hemiceluloses medido pelo  $S_5$  foi mais acentuado na polpa de 100% bracinga.

Todas as polpas branqueadas gastaram a mesma energia para serem refinadas. O grau de drenabilidade expresso pelo grau Schopper Riegler das polpas sem refino diferenciou-se apenas na celulose de bracinga pura, que mostrou-se mais baixo em função da menor população fibrosa e mais fácil drenagem.

Com relação ao desempenho das celulose nos testes físico-mecânicos, o acréscimo da proporção de bracinga pode promover uma perda da resistência à tração, ao rasgo, ao estouro e à alongação. Entretanto, até 10% de mistura, não se notaram diferenças estatísticas importantes.

Nas propriedades óticas, o maior uso de bracinga prejudicava a opacidade e a alvura da folha, mas também não se notaram prejuízos pelo uso de até 10% de madeira de bracinga na mistura de cavacos.

A grande vantagem da bracinga fez-se notar nos ensaios de volume específico aparente, porosidade e ascensão capilar. Apesar da adição de baixas quantidades de bracinga não representarem ganhos apreciáveis nessas propriedades, as polpas 100% de bracinga eram muito superiores.

Inquestionavelmente, caso se procedam otimizações nas condições de cozimento e branqueamento, as qualidades das polpas de bracinga poderão ser melhoradas.

## AGRDECIMENTOS

- ⇒ UFSM - Universidade Federal de Santa Maria, ao corpo docente e por disponibilizar as instalações
- ⇒ Klabin Riocell S.A. pela amostras das madeiras de eucalipto, suporte técnico e uso de suas instalações laboratoriais
- ⇒ AFUBRA, pela oportunidade de obtenção das madeiras de bracatinga

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRICHELO, L.E.G. Celulose sulfato de bracatinga. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 1., 1968, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FIEP, 1968. p. 43-46.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. Celulose sulfato branqueada de bracatinga. **Brasil Florestal**, v.12, n.49, p.45-50, 1982.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira.** Colombo: EMBRAPA-CNPQ; Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. p.337-343.

FLORES, D.M.M. **Variação das características dendrométricas, da qualidade da madeira e da celulose entre árvores de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith.** 1999. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

FINGER, C.A.G. **Fundamentos de biometria florestal.** Santa Maria : UFSM/CEPEF- FATEC, 1992. 269 p.

FOELKEL, C.E.B., SANI, A. **Presente, passado e perspectivas futuras na utilização do eucalipto pela indústria de celulose no Brasil.** Belo Oriente: Celulose Nipo-Brasileira, 1977. 55 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Cellulose in dilute solutions: determination of limiting viscosity number. Part 1: method in cupriethylene-diamine (CED) solution.** Genève, 1981. 11 p. (ISO 5351-1: 1981)

\_\_\_\_\_. **Paper:** determination of tearing resistance. Genève, 1990. 8p. (ISO 1974:1990)

\_\_\_\_\_. **Paper and board:** measurement of diffuse blue reflectance factor (ISO brightness). Genève, 1977. 4 p. (ISO 2470:1977).

\_\_\_\_\_. **Paper and board:** determination of grammage. Genève, 1995. 4 p. (ISO 536:1995).

\_\_\_\_\_. **Paper and board:** determination of opacity (paper backing): diffuse reflectance method. Genève, 1998. 7 p. (ISO 2471:1998).

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

\_\_\_\_\_. **Paper and board:** determination of tensile properties. Part 2: constant rate of loading method. Genève, 1994. 8p. (ISO 1924-2 :1994).

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

- \_\_\_\_\_. **Pulps:** determination of dichlormethane soluble matter. Genève, 1974. 2 p. (ISO 624:1974).
- \_\_\_\_\_. **Pulps:** determination of drainability. Part 1 Schopper-Riegler method. Genève, 1999. 7 p. (ISO 5267-1:1999).
- \_\_\_\_\_. **Pulps:** determination of kappa number. Genève, 1981. 4 p. (ISO 302:1982).
- \_\_\_\_\_. **Pulps:** laboratory beating. Part 2: PFI mill method. Genève, 1979. 10 p. (ISO 5264-2:1979).
- JERÔNIMO, L.H. **Adição de antraquinona na polpação alcalina e sua influência na branqueabilidade de celulose de *Eucalyptus saligna* Smith.** 1997. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.
- KLABIN RIOCELL. **Ascensão capilar Klemm.** Guaíba, 1997. 9p. (DT 80220-07-172-3).
- \_\_\_\_\_. **Avaliação de fibras com Kajaani F 100.** Guaíba, 1998. 8p. (DT-3013-167-07-3).
- \_\_\_\_\_. **Deslignificação de polpa marrom com oxigênio.** Guaíba, 1998. 15p. (DT-3013-062-07-3).
- \_\_\_\_\_. **Microscopia ótica com projeção e uso de ocular micrométrica reticulada.** Guaíba, 1997. 12p. (DT-8040-016-07-1).
- \_\_\_\_\_. **Water retention value.** Guaíba, 1997. 6p. (DT-8040-019-07-3).
- KUAN, G.S.S., BENAZZI, R.C.; BERGMAN, S. Matérias-primas. In: D'ALMEIDA, M.L.O. (Coord.), **Celulose e papel: tecnologia de fabricação do papel.** São Paulo : Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo , 1982 , p. 1-22. v.2
- LIMA, A.F.; OLIVEIRA, G.; FRANCO, L.C. *et al.* **Avaliação do *Eucalyptus dunnii* como matéria-prima alternativa para a RIOCELL.** Guaíba : RIOCELL, 1993. 13p. (Relatório Técnico, 596).
- 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, 1994. 3 p. (T 460 om-88).
- \_\_\_\_\_. **Analysis of soda and sulfate black liquor.** Atlanta, 1994. 4 p. (T 625 om-85).
- \_\_\_\_\_. **Ash in wood, pulp, paper and paperboard:** combustion at 525 °C. Atlanta, 1993. 3p. (T211 om-93)
- \_\_\_\_\_. **Bursting strength of paper.** Atlanta, 1994. 4 p. (T 403 om-91).
- \_\_\_\_\_. **Forming handsheet for physical tests of pulp.** Atlanta, 1994. 3 p. (T 205 om-88).
- \_\_\_\_\_. **Solvent extractives of wood and pulp.** Atlanta, 1997. 4 p. (T 204 cm-97).
- \_\_\_\_\_. **Thickness (caliper) of paper, paperboard and combined board.** Atlanta, 1994. 3 p. (T 411 om-89).