

YARA MOSCA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MADEIRA DE TRÊS  
CLONES DE *EUCALYPTUS*, AOS CINCO ANOS DE  
IDADE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2010

YARA MOSCA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MADEIRA DE TRÊS  
CLONES DE *EUCALYPTUS*, AOS CINCO ANOS DE  
IDADE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada: 09 de julho de 2010

---

Prof. Jorge Luiz Colodette  
(Co-Orientador)

---

Prof. Acelino Couto Alfenas

---

Prof. José Lívio Gomide  
(Orientador)

À minha avó, Aparecida, por todo amor.

Aos meus pais, Aurélio e Laudelina, por todo amor, dedicação e apoio.

À minha irmã, Tainá, pelo amor e pela amizade.

## AGRADECIMENTOS

À minha avó Aparecida, meus pais Aurélio e Laudelina e minha irmã Tainá por todo amor e incentivo.

Ao Prof. José Lívio Gomide pela orientação, paciência e amizade no desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos dos laboratórios da Universidade Federal de Viçosa que realizaram as análises de qualidade da madeira dos clones de *Eucalyptus*.

Ao Prof. Francides Gomes da Silva Júnior pelo apoio incondicional para o término deste trabalho e pela amizade.

Ao Leandro de Jesus Moreira por tirar minhas dúvidas, me “socorrer” e por toda amizade.

Aos meus amigos pelo apoio para a realização desta dissertação.

Muito Obrigada!

## **BIOGRAFIA**

Yara Mosca, filha de Aurélio Mosca e Laudelina Maria Carneiro, nasceu em 21 de fevereiro de 1973, no município de São Paulo.

Em 1991, concluiu o 2º grau no colégio Objetivo, em São Paulo.

Em 1992, iniciou o curso de Engenharia Florestal, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo.

Em 2006, ingressou no programa de Especialização em Tecnologia de Celulose e Papel da Universidade Federal de Viçosa.

Em agosto de 2008, ingressou no programa de Mestrado Profissionalizante em Tecnologia de Celulose e Papel da Universidade Federal de Viçosa.

## SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS .....	vi
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Gênero <i>Eucalyptus</i> .....	2
2.1.1 <i>Eucalyptus grandis</i> .....	2
2.1.2 <i>Eucalyptus urophylla</i> .....	3
2.1.3 <i>Eucalyptus grandis xEucalyptus urophylla</i> .....	3
2.2. Características da madeira para a indústria de celulose.....	4
2.2.1 Densidade básica da madeira.....	6
2.2.2 Constituição química da madeira.....	7
2.2.3 Estrutura anatômica da madeira.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1 Material.....	11
3.2 Método.....	11
3.2.1 Amostragem.....	11
3.2.2 Classificação dos cavacos.....	11
3.2.3 Saturação dos cavacos e pré-vaporização.....	12
3.2.4 Características do licor de cozimento.....	12
3.2.5 Simulação dos cozimentos Lo-Solids.....	13
3.2.5.1 Transferência do licor.....	13
3.2.5.2 Condições de cozimento.....	13
3.2.6 Lavagem e depuração.....	14
3.2.7 Determinação do número Kappa, rendimento e teor de rejeitos.....	14
3.2.8 Análise dos licores residuais.....	14
3.2.9 Análise de viscosidade.....	14
3.2.10 Ácidos hexenurônicos.....	14
3.2.11 Alvura.....	15
3.2.12 Análise do material fibroso.....	15
3.2.13 Consumo específico de madeira.....	15
3.2.14 Geração de sólidos totais.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4.1 Densidade básica e constituição química.....	17
4.2 Constituição química dos carboidratos.....	19
4.3 Cozimento Lo-Solids.....	20
4.4 Características das fibras.....	22
4.5 Imacel.....	23
4.6 Consumo específico de madeira.....	23
4.7 Geração de sólidos totais.....	24
5. CONCLUSÕES.....	27
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

## LISTA DE QUADROS

1 Valores de incremento médio anual dos clones de <i>Eucalyptus spp</i> .....	11
2 Condições operacionais para as simulação dos cozimentos.....	13
3 Densidade e constituição química dos clones de <i>Eucalyptus spp</i> aos 5 anos de idade.....	18
4 Teores de celulose e hemicelulose dos clones de <i>Eucalyptus spp</i> .....	24
5 Resultados dos cozimentos Lo-Solids® dos clones de <i>Eucalyptus spp</i> .	22
6 Características das fibras dos clones de <i>Eucalyptus spp</i> .....	23
7 Imacel.....	23
8 Consumo específico de madeira dos clones de <i>Eucalyptus spp</i> .....	24
9 Teor de sólidos/odt gerados na polpação dos clones de <i>Eucalyptus spp</i> .....	25

## RESUMO

MOSCA, Yara, M. Sc.; Universidade Federal de Viçosa, julho de 2010. **Avaliação da qualidade da madeira de três clones de *Eucalyptus*, aos cinco anos de idade.** Orientador: José Lívio Gomide. Co-orientadores: Jorge Luiz Colodette e Rubens Chaves de Oliveira.

A crescente demanda do mercado de celulose vem estimulando pesquisas na busca de matérias-primas mais apropriadas e diversificadas à sua fabricação. Busca-se não só florestas altamente produtivas, mas também materiais geneticamente superiores em rendimento e em qualidade de celulose. A melhoria da qualidade da madeira afeta a quantidade do produto comercial a ser obtido por unidade de área e, também, permite a diferenciação de produtos, de forma a melhorar a competitividade das empresas no mercado mundial. Os novos materiais genéticos de espécies e híbridos, multiplicados pelo processo de clonagem, existentes em plantios experimentais e em plantações comerciais necessitam, no desenvolvimento das etapas das pesquisas, serem analisados com relação aos parâmetros de qualidade da madeira. Para polpa celulósica os estudos de caracterização de qualidade da madeira devem envolver a constituição química da madeira, suas características estruturais anatômicas e as características tecnológicas da transformação da madeira em polpa. O presente trabalho teve como objetivo caracterizar a madeira de árvores de um clone de *Eucalyptus grandis* e dois clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos cinco anos de idade. Foram realizadas análises das características das fibras, densidade, constituição química da madeira, análise dos carboidratos e realização de cozimentos kraft. De maneira geral, a madeira de densidade mais baixa mostrou-se mais favorável à produção de celulose, uma vez que necessitou de menor carga de álcali para o cozimento, apresentou maior rendimento, polpa com maior viscosidade. Entretanto teve várias desvantagens como maior consumo específico de madeira e menor peso de madeira no digestor, afetando desfavoravelmente o custo e a produtividade industrial.

## ABSTRACT

MOSCA, Yara, M. Sc.; Universidade Federal de Viçosa, July, 2010. **Evaluation of wood quality of three clones of Eucalyptus at five years old.** Adviser: José Lívio Gomide. Co-advisers: Jorge Luiz Colodette and Rubens Chaves de Oliveira.

The increasing demand of the pulp market has stimulated research to find materials that are appropriate and diversified to manufacture. The aim is not only highly productive forests, but also genetically superior materials in yield and quality of pulp. Improving the quality of the wood affects the amount of commercial product to be obtained per unit area and also allows product differentiation in order to improve competitiveness in the global market. The new genetic material of species and hybrids, multiplied by the cloning process, existing in experimental plantings and commercial plantations should be analyzed with respect to parameters of wood quality in the development stages of research. Pulp for the characterization studies of wood quality must involve the chemical composition of wood, the anatomical structural characteristics and the industrial processing of wood pulp. This study aimed to characterize the wood of trees of a clone of *Eucalyptus grandis* and two hybrid clones of *Eucalyptus grandis x urophylla* to five years old. We analyzed the characteristics of the fibers, density, chemical composition of wood, carbohydrate analysis and kraft cooks. In general, wood of lower density was more favorable to the production of cellulose, since it required less alkali charge for cooking and had a higher yield pulp with higher viscosity. However he had several disadvantages such as higher specific wood consumption and lower weight of wood in the digester, adversely affecting the cost and industrial productivity.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda do mercado de celulose vem estimulando pesquisas na busca de matérias-primas mais apropriadas e diversificadas à sua fabricação. Busca-se não só florestas altamente produtivas, mas materiais geneticamente superiores também superiores em rendimento e em qualidade de produção de celulose.

A melhoria da qualidade da madeira afeta a quantidade do produto comercial a ser obtido por unidade de área e, também, permite a diferenciação de produtos, de forma a melhorar a competitividade das empresas no mercado mundial.

Um fator importante na competitividade da indústria de celulose é a seleção de árvores para formação de florestas homogêneas que possibilitem a produção de polpa celulósica com alto rendimento industrial, baixo custo de produção e elevada qualidade tecnológica. Esse fato fez com que as empresas florestais, nos últimos anos, vislumbassem a necessidade de conduzir programas de melhoramento genético, visando à melhoria não só do volume de madeira, como também da qualidade.

Os novos materiais genéticos de espécies e híbridos, multiplicados por estaquia, existentes em plantios experimentais e em plantações comerciais necessitam do desenvolvimento de pesquisas, e análises com relação à qualidade da madeira.

A qualidade da celulose depende das características químicas, anatômicas e físicas da matéria-prima. Além da densidade básica, que é uma das principais características de avaliação por sua facilidade de amostragem e mensuração, outras variáveis devem ser avaliadas como as características das fibras, dos parênquimas e vasos, bem como os teores de celulose, lignina, pentosanas e extrativos.

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar a madeira de árvores de um clone de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e de dois clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos cinco anos de idade, realizando-se análises das características das fibras, densidade básica, constituição química da madeira, análise dos carboidratos e do resultado do cozimento.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Gênero *Eucalyptus*

Ocorre espontaneamente na Austrália e ilhas vizinhas e possui cerca de 600 espécies adaptadas a diversas condições de clima e solo. Dessa grande diversidade de espécies, só duas não são originárias da Austrália: o *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e o *Eucalyptus deglupta* Blume.

A maioria das espécies conhecidas é de árvores típicas de florestas altas, com 30 a 50 metros de altura e de florestas abertas, com árvores de 10 a 25 metros de altura. Aproximadamente 30 a 40 espécies são arbustivas (MORA & GARCIA, 2000). Segundo estes autores, na Austrália, desde 1788 já foram derrubados 38% das florestas nativas. Estima-se assim que, atualmente, existem 43,2 milhões de ha de florestas, sendo 25,6 milhões (60%) de eucaliptos.

As espécies de *Eucalyptus* mais utilizadas no mundo são o *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *Eucalyptus camaldulensis* Dehn, *Eucalyptus tereticornis* Smith, *Eucalyptus globulus* Labill, *E. urophylla*, *Eucalyptus viminalis* Labill, *Eucalyptus saligna* Smith e *Corymbia citriodora*.

Dentre as espécies de eucalipto em uso no Brasil, as mais utilizadas na indústria de celulose são *E. grandis* e *E. urophylla*, assim como de híbridos entre elas (BERTOLUCCI et al., 1995).

#### 2.1.1 *Eucalyptus grandis*

*Eucalyptus grandis* apresenta distribuição natural entre 16° e 33° de latitude Sul, sendo a maior ocorrência entre 26° e 33° Sul. A maioria das florestas naturais desta espécie ocorre no sul de Queensland e norte de New South Wales, em terras baixas na região costeira e em colinas com uma altitude em torno de 600 m, não se estendendo mais que 100 km do mar (ELDRIDGE et al., 1993). É encontrada em vários tipos de solos, mas geralmente em solos profundos e bem drenados, com moderada fertilidade, não tolerando ambientes alagados. Nessas regiões, as precipitações variam de 1.000 a 1.800 mm anuais.

Esta espécie possui crescimento exuberante e é amplamente plantada em regiões subtropicais. Ela não é resistente à seca, mas uma precipitação média anual de 900 mm é geralmente adequada, desde que bem distribuída. Geadas fortes limitam a plantação em áreas com altas altitudes (TURNBULL & PRYOR, 1984).

No Brasil, esta espécie destacou-se pelo seu rápido crescimento e grande adaptação. Suas árvores são retas e fornecem excelente madeira para serraria, escoras e para a produção de celulose, sendo, por isso, uma espécie bastante utilizada nas áreas reflorestadas (ASSIS, 1996).

Esta espécie supera qualquer outra em incremento volumétrico em condições ambientais adequadas, sendo a mais plantada no Brasil, pela sua plasticidade genética, e é muito utilizada na obtenção de híbridos e para clonagem de árvores selecionadas (MORA & GARCIA, 2000).

### **2.1.2 *Eucalyptus urophylla***

*Eucalyptus urophylla* não é encontrado naturalmente na Austrália. Ocorre nas ilhas de Timor, Flores, Wittar e outras da Indonésia, em latitudes que variam de 7° a 10° Sul, em altitudes de 300 a 3.000 m, com precipitações anuais de 1.000 a 2.000 mm. Apresenta crescimento muito bom em baixas altitudes e resistência ao cancro, causado pelo fungo *Chrysosporthe cubensis* (= *Cryphonectria cubensis*) (Gryzenhout *et al.*, 2004). (TURNBULL & PRYOR, 1984).

Esta é uma espécie de grande potencialidade para regiões de clima quente e de elevado déficit hídrico, devido ao seu bom desenvolvimento nestas condições, a boa qualidade da madeira para carvão, celulose, serraria e, principalmente, pela sua resistência ao cancro. Suas árvores são de grande porte, retas, com forte dominância apical e casca rugosa (RUY, 1998).

### **2.1.3 *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***

O híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* tem sido a base da silvicultura clonal brasileira (Ruy, 1998). As indústrias de celulose têm trabalhado com populações de *E. grandis* e *E. urophylla* para a produção de híbridos, devido à associação das características de rápido crescimento e formato do tronco de *E. grandis*, capacidade alta de rebrota, resistência ao cancro, resistência à seca e maior densidade da madeira de *E. urophylla*. Tais fatores contribuem para uma boa capacidade de combinação entre estas duas espécies (ASSIS, 1996).

Segundo Busnardo (1981) o *E. urophylla* e seus híbridos (como o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) constituem uma das principais fontes de matéria-prima para a indústria brasileira de celulose. Estes híbridos apresentam excelente desenvolvimento em altura e em diâmetro e densidade básica da madeira intermediária

entre as de média densidade ( $0,460 \text{ g/cm}^3$  do *E. grandis* e *E. saligna*) e as de alta densidade (acima de  $0,570 \text{ g/cm}^3$  do *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus Paniculata* Smith).

## **2.2 Características da madeira para a indústria de celulose**

O formato do tronco, volume de madeira e taxa de crescimento, devem ser levadas em consideração no melhoramento de eucalipto, independentemente da finalidade do programa.

A seleção de árvores retas permite a obtenção de melhores postes e escoras, melhor madeira para a serraria e é uma vantagem no empilhamento e manuseio das toras para lenha ou celulose. A maior taxa de crescimento permite que as árvores possuam maior volume de madeira no momento do corte. O aumento do volume leva a um incremento na quantidade de madeira seca por unidade de área, o que é interessante para a indústria de carvão e celulose (ELDRIDGE et al., 1993).

A multiplicação clonal de *Eucalyptus* sp. permite o estabelecimento de florestas com a qualidade requerida pelas empresas requerem análises e testes de milhares de clones potenciais. A seleção de clones inicia-se com os aspectos silviculturais, abrangendo características de enraizamento, resistência a doenças, adaptação aos fatores edafoclimáticos, forma do fuste e crescimento e, conseqüentemente, a produtividade de madeira. Depois de uma seleção preliminar, pelas características silviculturais, é indispensável a realização de análises tecnológicas que possibilitem a determinação de critérios de qualidade da madeira. Apenas depois desses estudos silviculturais e tecnológicos é que são selecionados os clones para multiplicação e formação de florestas homogêneas que irão apresentar, após um período de rotação de cinco a sete anos, alta produtividade florestal e, também, alta qualidade tecnológica para produção de polpa celulósica.

Os estudos de caracterização de qualidade da madeira para produção de polpa celulósica envolvem a constituição química da madeira, suas características estruturais anatômicas e também, de grande importância, as características tecnológicas da transformação da madeira em polpa celulósica (GOMIDE et al., 2004).

### 2.2.1 Densidade básica da madeira

Entre as propriedades físicas da madeira a densidade básica é a mais utilizada como parâmetro de seleção, sendo influenciada pela base genética, pelo ambiente, e pela interação desses dois fatores (RUY, 1998).

A densidade básica da madeira varia em função da idade e a taxa de crescimento das árvores, o clima, os tratamentos silviculturais, o sítio, o local de amostragem no tronco, entre outros. A densidade básica da madeira varia entre e dentro de árvores de uma mesma espécie (SHIMOYAMA, 1990; ARANGO & HOYOS, 1999; LATORRACA & ALBUQUERQUE, 2000).

Arbuthnot (1991), em estudo realizado com várias espécies de eucaliptos, verificou que a densidade básica da madeira está altamente correlacionada com algumas propriedades da polpa de celulose e do papel. De igual forma, Ferreira (1972) relacionou-a com a espessura da parede das fibras, seu valor alto indicando fibras de parede espessa, presentes em muitas espécies do gênero.

A densidade está diretamente relacionada com a espessura da parede celular e com o diâmetro das fibras. O incremento na densidade básica da madeira promove um ganho adicional na quantidade de celulose contida em um metro cúbico de madeira, o que proporciona economia em todas as operações de manuseio da madeira (ASSIS, 1996).

Vasconcelos Dias & Cláudio-da-Silva Jr. (1985) verificaram que, quimicamente, árvores com madeiras mais densas apresentaram uma elevação no teor de lignina e uma diminuição no teor de hemiceluloses, em relação a madeiras de menores densidades, para eucalipto de mesma espécie. O aumento da espessura da parede celular e o decréscimo do diâmetro da fibra demonstraram acompanhar o aumento da densidade básica da madeira. Por outro lado, o comprimento médio de fibras e o teor de extrativos na madeira não se mostraram correlacionados com a densidade básica. Concluíram que o rendimento da polpação aumenta quando a densidade básica varia de 418 a aproximadamente 470 kg/m<sup>3</sup>, mas decresce continuamente deste ponto até densidades de 666 kg/m<sup>3</sup>, acompanhado de um constante aumento no teor de rejeitos. Apesar disto, projeções obtidas para o rendimento do digestor demonstraram um crescente aumento da capacidade de produção com o uso de madeiras mais densas. A viscosidade e o teor de sólidos no licor residual apresentaram valores significativamente mais altos quando obtidos a partir da polpação de madeiras mais densas, com conseqüentes sobrecargas no sistema de recuperação, o que poderia limitar a capacidade de produção de polpa.

### 2.2.2 Constituição química da madeira

Segundo Colodette (2006),  $\frac{3}{4}$  da substância madeira são carboidratos, representados principalmente pelos polissacarídeos. Eles incluem celulose, os polissacarídeos não-celulósicos e “insolúveis” em água comumente designados como hemiceluloses, o amido, as substâncias pécnicas, e os polissacarídeos solúveis em água tais como arabinogalactanas. A celulose é o maior constituinte da madeira, correspondendo a 50% do seu peso. Açúcares ocorrem na seiva e em tecidos em desenvolvimento, mas são componentes de pouca importância na madeira madura.

Segundo Santos (2000), a composição química assume grande importância no rendimento em polpa kraft. A lignina e os extrativos, por exemplo, influenciam diretamente o consumo de álcali, rendimento da deslignificação e o potencial de produção industrial.

A lignina é uma substância química que confere rigidez à parede das células e também funciona como um agente de ligação entre elas, tornando a madeira mais resistente. A redução no teor de lignina na indústria de celulose trará benefícios para o processo de polpação e branqueamento. Quanto mais alto for o seu teor, maior quantidade de produtos químicos será gasto e mais celulose será destruída devido a um ataque químico mais forte, reduzindo assim o rendimento em celulose. Na fase de branqueamento, sua presença em teores elevados dificulta e reduz a branqueabilidade (ASSIS, 1996).

Segundo Foelkel (1978), o teor de lignina, bem como o teor de extrativos da madeira tendem a aumentar em madeira mais velha (acima de 15 anos).

Almeida (2001) considera o teor de extrativos um parâmetro importante na seleção de madeira para produção de polpa. Algumas empresas têm considerado o teor de extrativos solúveis em diclorometano como um indicador de qualidade da madeira, embora sua herdabilidade ainda esteja sendo estudada.

Wehr (1991) encontrou em um estudo com 4 lotes de tipos diferentes de *E. grandis* alta correlação entre hemiceluloses e rendimento, verificando que madeiras com baixo teor de extrativos e lignina conduzem a um aumento no rendimento.

### 2.2.3 Estrutura anatômica da madeira

Os elementos de vaso, fibras, parênquima radial e longitudinal compõem a estrutura anatômica da madeira dos eucaliptos, com variações dentro e entre diferentes grupos de espécies (DADSWELL, 1972).

Desta forma, o estudo das características anatômicas dos eucaliptos pode ser realizado para a identificação da espécie e para prever suas propriedades tecnológicas (OLIVEIRA, 1997).

Alfonso (1987) caracterizou o lenho das principais espécies de *Eucalyptus* utilizadas no Brasil, observando que as madeiras possuem estrutura anatômica homogênea, com pouca variação entre amostras de uma mesma espécie. Afirmou também que as condições climáticas podem alterar a estrutura anatômica da madeira, influenciando nos resultados das análises.

As características anatômicas constituem-se em um índice de qualidade, além da composição química e as características físicas da madeira, compondo os fatores que estão relacionados e que afetam as propriedades da madeira (HAYGREEN & BOWYER, 1982).

Os parâmetros anatômicos, como porcentagem e dimensão de fibras, vasos e parênquima, além de número de fibras por grama e “coarseness”, são os mais utilizados na avaliação da qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose e papel e estão relacionados com a qualidade da polpa. Estes parâmetros estão associados às propriedades físico-mecânicas e características superficiais e ópticas do papel produzido (CARVALHO et al. 1998).

Segundo Oliveira (1997), a relação entre o volume ocupado pelos vasos, fibras (espessura da parede) e parênquima são fatores importantes nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de diferentes espécies de eucaliptos, além da sua permeabilidade a líquidos e gases.

A espessura da parede das fibras está relacionada aos fatores genéticos, ambientais e à idade da árvore, sendo importante no controle das propriedades do papel, principalmente a sua resistência ao rasgo (SHIMOYAMA, 1990).

Com respeito ao comprimento das fibras, Hillis & Brown (1978) afirmaram que as diferenças entre a madeira formada ao longo da idade em uma árvore são maiores que as existentes entre as árvores de uma mesma espécie. Verificaram que, para espécies de eucaliptos, o comprimento, diâmetro e a espessura da parede das fibras aumentam com a idade, com valores máximos nas idades de 10 a 30 anos.

O comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume das fibras da madeira dos eucaliptos representam diferentes estágios de seu desenvolvimento e são controlados por processos fisiológicos distintos (SHIMOYAMA, 1990). O comprimento das fibras é diretamente influenciado pelas divisões periclinais das células cambiais controladas pela taxa de hormônios ligados a sazonalidade, condições ambientais e fatores genéticos.

O diâmetro dos vasos e a sua porcentagem em volume variam inversamente com a espessura dos anéis de crescimento, relação comumente encontrada no lenho formado nos períodos mais secos e quentes do ano. Igualmente, as porcentagens de fibras, vasos e parênquima variam consideravelmente no lenho próximo à medula e a casca e entre espécies, com os vasos usualmente menores e mais numerosos perto da medula (HILLIS & BROWN, 1978).

Segundo Oliveira (1997), os tecidos fibrosos ocupam de 30 a 70 % do volume, sendo mais abundantes nas madeiras de alta massa específica. Desta forma, o estudo do lenho em microscópico deve considerar características como o comprimento, o diâmetro e a espessura das paredes celulares.

Rocha et al. (2002), estudando a variação da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus grandis* com sete anos de idade, concluíram que a árvore dominante apresentou fibras mais longas, paredes celulares mais espessas, diâmetro dos vasos mais largos e raios mais altos no sentido radial. Verificaram, ainda, aumento das dimensões das fibras, do comprimento e diâmetro tangencial dos vasos, redução da frequência dos vasos, das dimensões dos raios e de sua frequência.

Carvalho (2000) relatou valores médios de 1,07 mm de comprimento, 17,48 µm de largura, 8,49 µm de diâmetro do lume e 4,49 µm de espessura de parede das fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com sete anos de idade.

Davidson (1972), Barrichelo & Brito (1976), Barrichelo & Brito (1977), Barrichelo (1979), Vasconcellos Dias & Claudio da Silva Jr. (1985), Shimoyama (1990) e Vital et al. (1994) afirmaram existir uma relação positiva entre a densidade e as dimensões dos componentes anatômicos da madeira das espécies de eucaliptos. Panshin & De Zeeuw (1980) afirmaram que as variações da densidade são resultado das dimensões das fibras e da interação com a quantidade de componentes passíveis de extração por unidade de volume das madeiras.

A largura e espessura da parede das fibras mostram uma clara relação com a densidade básica da madeira, sendo que as fibras de maiores diâmetros e paredes

espessas apresentam correlação estatística positiva e as largas e de paredes finas, correlação negativa (SHIMOYAMA, 1990). Para a madeira de *E. grandis*, quanto maior a largura das fibras, menor é o valor da densidade básica da madeira, conforme Vasconcellos Dias & Claudio da Silva Jr. (1985). Madeiras com altas porcentagens de elementos de vaso tendem a apresentar baixa densidade (FOELKEL, 1978).

Ruy (1998) afirmou que certas características anatômicas como comprimento, espessura da parede e diâmetro do lume das fibras, porcentagens de vasos e de parênquima, possuem relação com a densidade básica da madeira e influenciam as propriedades e usos finais da madeira.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material

Para este experimento foram selecionados três clones comerciais de uma indústria de celulose, localizada em Lençóis Paulista – SP, aos cinco anos de idade, sendo um de *E. grandis* e dois de *E. grandis* x *E. urophylla*. Na Tabela 1 são apresentados os valores do incremento médio anual (IMA) dos clones analisados. Estes dados foram obtidos com base no histórico de inventário da empresa.

Tabela 1 - Valores de incremento médio anual dos clones de *Eucalyptus spp.*

Clones	Espécies	IMA m <sup>3</sup> /ha/ano
A	<i>Eucalyptus grandis</i>	51,26a
B	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	47,24a
C	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus urophylla</i>	50,21a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 3.2 Métodos

##### 3.2.1 Amostragem

Foram coletadas três árvores de cada clone, amostradas ao acaso, que apresentavam dimensões médias de DAP e de altura do plantio de talhões comerciais. As árvores abatidas foram seccionadas em toretes de 50 cm de comprimento, obtidos na base da árvore e nas alturas correspondentes a 25, 50, 75 e 100% da altura comercial.

##### 3.2.2 Classificação dos cavacos

Todas as toras de 50 cm de comprimento de cada clone foram transformadas em cavacos que foram classificados em peneiras vibratórias de acordo com a norma SCAN-CM 40:95. A fração dos cavacos que ficou retida na peneira de barras de 8 mm foi considerada como cavacos “oversize”. As frações que passaram pela peneira de 8 mm e ficam retidas nas peneiras com aberturas de 7 mm e de 3 mm foram considerados como aceitos. As frações de cavacos “overs” e aceitos foram misturadas e a mistura global de cavacos foi novamente classificada para retirar os cavacos exageradamente grandes, nós e cunhas que poderiam provocar heterogeneidade nos resultados do estudo. As

classificações e misturas foram realizadas para tentar simular ao máximo as condições industriais dos cavacos da empresa, sem prejudicar a precisão deste estudo.

Em seguida os cavacos foram secos ao ar para obter uniformidade em seu teor de umidade e, a seguir, foram armazenados em sacos de polietileno para manter estas condições.

### **3.2.3 Saturação dos cavacos e pré- vaporização**

Amostras de cavacos (500 g.a.s.) foram saturadas com água, utilizando-se uma autoclave acoplada a uma bomba de vácuo e aplicando-se vácuo por 14 h. Esta operação de saturação com água resultou em teor de umidade dos cavacos em torno de 50%, valor normalmente encontrado nas condições industriais. Após a saturação, os cavacos foram transferidos para o digestor. O sistema de cozimento utilizado constituiu de um digestor MK, modelo 1/K409, com capacidade de 7 l., aquecido eletricamente por controles eletrônicos ligado a computador, com manômetro, trocador de calor e bomba de circulação. Com auxílio de autoclave, foi gerado vapor que foi conectado, por meio de tubulação flexível, ao registro na tampa do digestor MK. Com isso foi possível simular uma pré-vaporização dos cavacos, injetando-se vapor, à pressão de 1.5 atm e temperatura de 105-110°C, por 10 min. O registro inferior do digestor foi mantido aberto para permitir o escoamento tanto do excesso de vapor quanto do condensado. Após este tempo, o registro inferior foi fechado, prosseguido a operação de vaporização por mais 10 minutos. Após a vaporização, uma amostra de cavaco foi retirada do digestor para estabelecimento do teor de umidade dos cavacos, que foi utilizado para todos os outros cozimentos no cálculo da relação licor/madeira.

### **3.2.4 Características do licor de cozimento**

O licor branco utilizado nos cozimentos foi produzido em laboratório. O licor branco foi titulado conforme norma SCAN N-2:88 e apresentou uma concentração alcalina de 114,8 g/l de AE, como NaOH, e sulfidez de 27,6%. No lugar do licor negro, foi utilizada água para completar a relação licor/madeira.

### **3.2.5 Simulação dos cozimentos Lo-Solids**

#### ***3.2.5.1 Transferência do licor***

O licor de cozimento foi, primeiramente, aquecido em uma autoclave, a 195°C e pressão de 12 Kg/cm<sup>2</sup>. Terminada a vaporização dos cavacos, o licor de cozimento já

aquecido foi rapidamente transferido, por meio de tubulação flexível, para o digestor contendo os cavacos pré-vaporizados. A temperatura do licor de cozimento logo após a transferência foi de cerca de 130°C.

### **3.2.5.2 Condições de cozimento**

Para as simulações dos cozimentos foram seguidos os princípios operacionais descritos na Tabela 2, baseado nos parâmetros do digestor da indústria. Os cozimentos foram realizados em duplicatas, após o estabelecimento do número kappa objetivo ( $18.0 \pm 0.5$ ). Para que o número kappa objetivado pudesse ser atingido, variou-se a carga de álcali, mantendo constantes as outras condições de cozimento.

No total foram realizados 15 cozimentos, monitorados por computador interligado ao controlador do digestor. Dados de temperatura foram monitorados a cada 1 minuto, gerando com estes dados, ao final do cozimento, um gráfico demonstrando o perfil de temperatura e o fator H do cozimento. Com estas informações foi possível garantir uma boa repetibilidade dos cozimentos.

Tabela 2 - Condições operacionais para as simulações dos cozimentos.

Parâmetros de polpação	Impregnação	Cozimento superior	Cozimento inferior
Tempo até temperatura (minutos)	10	10	4
Tempo à temperatura (minutos)	35	40	26
Temperatura (°C)	146,0	157,0	159,0
Divisão alcalina (% AE total)	58	38	4,0
Sulfidez %	27,6	27,6	27,6
Relação licor/madeira	4/1	4/1	4/1

Após o término do cozimento o licor negro de cozimento foi descarregado do digestor, coletando-se uma amostra para análise posterior. A remoção dos cavacos deslignificados ao final do cozimento foi realizada por sucção a vácuo.

### **3.2.6 Lavagem e depuração**

Após o descarregamento do digestor, os cavacos deslignificados foram lavados exaustivamente com água à temperatura ambiente, utilizando caixa com fundo de tela de aço inox de 150 mesh para completa remoção do licor residual. A individualização das fibras foi realizada em “hidrapulper” laboratorial de 25 litros de capacidade, em

consistência de 1%. Para a remoção dos rejeitos, foi utilizado um depurador laboratorial Voith, dotado de placa com fendas de 0,2 mm.

A polpa marrom, após lavagem, desfibramento e depuração, foi desaguada em centrífuga a uma consistência de 30-35% e armazenada em saco de polietileno, para análises posteriores.

### **3.2.7 Determinação de número kappa, rendimento e teor de rejeitos**

Para cada cozimento, foram determinados o rendimento depurado e o teor de rejeitos, por análise gravimétrica, e o número kappa foi determinado conforme a norma TAPPI T236 cm-85.

### **3.2.8 Análise dos licores residuais**

Foram retiradas amostras de licores ao final dos cozimentos, determinando-se o álcali efetivo residual segundo norma SCAN N 2:88.

### **3.2.9 Análise de viscosidade**

Para análise de viscosidade foi utilizada a norma TAPPI T230 om-94. A amostra para análise de viscosidade foi obtida pela mistura das polpas geradas pelas repetições, para cada clone estudado.

### **3.2.10 Ácidos hexenurônico**

A determinação do teor de ácidos hexenurônico foi realizada seguindo a metodologia citada por Jiang et al., 1999. A amostra para análise de ácidos hexenurônico foi obtida pela mistura das polpas geradas pelas repetições, para cada clone em estudo.

### **3.2.11 Alvura**

Na determinação da alvura foi seguida a norma TAPPI T525 om-86. Da mesma forma, a amostra para análise de alvura foi obtida pela mistura das polpas geradas pelas repetições, para cada clone estudado.

### 3.2.12 Análise do material fibroso

Para análise do material fibroso foram realizadas: determinação do comprimento e diâmetro médio do material fibroso (polpa), número de material fibroso/grama, “coarseness” e teor de finos.

Para realização da análise foi preparada uma suspensão do material fibroso, em água na consistência de 0,001%, para realização das análises. A preparação das suspensões foi feita utilizando balão volumétrico, água destilada e dispersante (2,0 % base polpa). Após a hidratação do material fibroso, por no mínimo 4 horas, as análises de comprimento médio, do número de fibras por grama, coarseness e teor de finos das polpas foram determinados em equipamento Galai CIS-100, injetando-se no Galai 700ml da suspensão de fibra. O sistema computadorizado do equipamento permite a sua circulação através de uma cubeta de quartzo numa velocidade constante. A incidência de um feixe de laser gerador das imagens foram coletas por uma vídeo câmara, armazenadas e analisadas com ajuda de um software-*Wshape*, apropriado para análises de material fibroso. Os resultados das análises fornecidos pelo próprio software (*Wshape*) que acompanha o aparelho foram transferidos para o programa *Excel* utilizado para tabulação dos dados e confecção gráfica.

### 3.2.13 Consumo específico de madeira

O consumo específico de madeira foi obtido pela seguinte expressão:

$$Cem = 1/(Rb.Db)$$

Onde:

Cem = Consumo específico de madeira (m<sup>3</sup> madeira/t polpa seca)

Rb = Rendimento bruto (%);

Db = Densidade básica (g/cm<sup>3</sup>).

### 3.2.14 Geração de sólidos totais

O teor de sólidos secos gerados por tonelada de polpa produzida foi estimada pela seguinte expressão:

$$tss/odt = ((100 - Rb) + AA)/Rd.$$

Onde:

Tss = Teor de sólidos secos gerados por uma tonelada de celulose (tss/odt);  
Rb = Rendimento bruto (%);  
AA = Álcali ativo aplicado (como Na<sub>2</sub>O) (%);  
Rd = Rendimento depurado (%).

Esta equação não considera a perda alcalina.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Densidade básica e constituição química

Como pode ser observado na Tabela 3, o clone A apresentou uma menor densidade básica 446 Kg/m<sup>3</sup>. O valor determinado está condizente com os valores encontrados em literatura para as espécies estudadas.

O clone A apresentou menor teor de extrativos, madeiras com baixos teores de lignina e de extrativos propiciam melhor desempenho de polpação em termos de rendimento e consumo de álcali.

O clone A também apresentou uma maior relação siringil/guaiacil, 3.1. Nos três clones analisados a relação siringil/guaiacil é de duas a três estruturas de siringil para uma estrutura de guaiacil. Valores similares foram encontrados por Gomide et al 2005, quando analisaram madeiras de 10 clones diferentes.

A densidade básica não é só uma variável de mais fácil avaliação, mas também se constitui numa das informações de qualidade da madeira mais relevantes na indústria de celulose, por apresentar relação direta com a produção de polpa no digestor.

Morais (2008), verificou que tomando como base densidades entre 460 e 480 Kg/m<sup>3</sup> como sendo adequadas para fabricação de celulose, e considerando os resultados encontrados frente à polpação e ao branqueamento, verificou-se que clones com 5 e 6 anos já poderiam ser colhidos para uso no processo.

Em estudo conduzido por Wehr (1991), os limites de densidade básica da madeira de eucalipto, para produção de celulose, deveriam estar entre 450 e 550 Kg/m<sup>3</sup>. O autor ressalta que madeiras leves levam à redução do rendimento em celulose (base volume), enquanto madeiras pesadas apresentam dificuldades na picagem e impregnação, consomem quantidades elevadas de reagentes e resultam em baixos rendimentos (base peso) e em elevados teores de rejeitos.

Segundo Lanna et al(2001) citado por Gomide et al (2005), estudos realizados com madeiras de clones de *Eucalyptus* têm demonstrado vantagens na utilização de madeiras com densidades básicas mais baixas. Essas vantagens corresponderiam à necessidade de utilização de menores cargas alcalinas, com reflexos favoráveis no rendimento e viscosidade da polpa celulósica e, também, na carga mais baixa de sólidos para o setor de recuperação. Considerando que na produção industrial procuram-se manter os parâmetros de tempo e temperatura com pequena variabilidade, o uso de densidades mais altas requer cargas de álcali mais elevadas para possibilitar maior

eficiência de difusão dos íons e obtenção do kappa objetivo. A utilização de madeiras de baixa densidade, entretanto, irá resultar em consumo específico de madeira mais elevado, o que constitui significativa desvantagem, principalmente quando a empresa possui alguma limitação no fornecimento de matéria-prima.

O teor de lignina da madeira desempenha um papel econômico no processo de produção de polpa. Madeiras com maiores teores de lignina podem exigir um maior consumo de álcali durante a polpação, gerando, conseqüentemente, maiores teores de sólidos para queima na caldeira (SANTOS, 2000).

Os extrativos presentes na madeira são normalmente removidos durante o processo químico. As quantidades de extrativos que permanecem nas polpas são muito pequenas, mas podem ter efeitos significativos nas suas propriedades de absorção. Certos extrativos causam a redução da alvura de polpas branqueadas, bem como formam agregados depositando-se nas fibras, como pitch.

De acordo com Gomide et al (2005), os clones com maiores teores de extrativos apresentam menor rendimento de polpação, devido exclusivamente a remoção dos extrativos. Apesar de as empresas nacionais estarem investindo fortemente em estudos de caracterização desses extrativos hidrofóbicos, as medidas práticas para minimizar a ação dos depósitos de “pitch” têm sido a adoção de medidas paliativas que consistem na utilização de aditivos, como talco, para combater seus efeitos maléficos.

Estruturalmente as ligninas são classificadas nos tipos guaiacil e guaiacil-siringil, sendo a primeira mais facilmente removida durante a polpação. O conhecimento da relação siringil/guaiacil (S/G) na estrutura da lignina tem implicações diretas para a indústria sobre o processo de polpação e branqueamento.

Segundo Pereira (1994), em estudos realizados com *Eucalyptus grandis*, quanto maior a relação siringila/guaiacila presente na lignina, menor será o consumo de álcali na polpação. As estruturas de lignina siringila são mais fáceis de ser degradadas pelos reagentes de cozimento, necessitando de menor álcali para se alcançar um mesmo número kappa final, resultando em menor perda de rendimento no processo.

Tabela 3 - Densidade e constituição química dos clones de *Eucalyptus* spp. aos 5 anos de idade.

Clones	Densidade Básica Kg/m <sup>3</sup>	Extrativos DCM %	Extrativos Acetona %	Lignina Klason %			Relação Siringil/Guaiacil
				Insolúvel	Solúvel	Total	
A	446b	0,17b	1,60c	24,5a	3,2a	27,7a	3,1a
B	485a	0,34a	1,94a	25,0a	3,0a	28,0a	2,6b
C	491a	0,39a	1,74b	25,0a	2,8a	27,8a	2,4b

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4.2 Constituição química dos carboidratos

De acordo com os resultados das análises dos clones pode-se observar na Tabela 4, que as glicanas representam em média 47,9% do peso das madeiras. Das hemiceluloses observa-se que as xilanas representam em média 12,3%. Demonstrando que as xilanas são as principais hemiceluloses dos eucaliptos.

Os ácidos urônicos representam em média 4,57% do peso da madeira e o grupo acetil 3,7%. Tanto os ácidos urônicos quanto o grupo acetil estão relacionados com o consumo de álcali durante a polpação.

Como pode ser observado na Tabela 4, o clone A apresentou maior teor de celulose com 47,7% e o menor teor de hemicelulose com 23,4%.

Polpas com maiores teores de celulose e baixos teores de hemiceluloses desenvolvem menores resistências quando são refinadas.

O maior teor de hemicelulose foi encontrado nos clones B e C com 23,8 e 23,9% respectivamente, isso indica que estes clones são mais indicados para a fabricação de tissue, pois, para menores valores de hemiceluloses as fibras perdem capacidade de ligações, oferecendo ao papel maior volume específico e capilaridade. Desta forma, estes papéis ficam mais absorventes e macios, sendo mais apreciados à maior parte do segmento tissue.

Segundo Gomide et al (2005), a importância das xilanas está relacionada com o consumo de álcali durante a polpação, com conseqüente hidrólise e dissolução, e com a transformação em ácidos hexenurônicos, indesejáveis nas operações de branqueamento.

Segundo Duarte 2007, os ácidos hexenurônicos influenciam o processo de branqueamento da polpa, formando ligações com a lignina e consumindo reagentes químicos do branqueamento (cloro, dióxido de cloro, ozônio, peróxido), além de causar reversão de alvura.

As glicanas são o único açúcar componente da celulose. Quanto maior a idade da árvore maior será a porcentagem de glicanas e conseqüentemente maior será o teor de celulose.

Tabela 4 - Teores de celulose e hemicelulose dos clones de *Eucalyptus spp.*

Clones	Glicanas %	Xilanas %	Ácidos Urônicos %	Acetil %	Hemicelulose %	Celulose %	Holocelulose %
A	48,48	12,23	4,52	3,68	23,4b	47,7a	71,1a
B	47,6	12,53	4,31	3,74	23,8a	46,8c	70,6b
C	47,75	12,2	4,89	3,69	23,9a	47,1b	71,0a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

### 4.3 Cozimentos Lo-Solids®

Segundo Morais (2008), idealmente o desempenho da polpação Kraft deve ser aferido em um valor fixo de número kappa. Para madeiras de eucalipto, um valor de número kappa da ordem de  $17,0 \pm 0,5$  tem sido considerado adequado.

Como pode ser observado na Tabela 5, o destaque entre os três clones avaliados ficou com o clone A, mostrando um melhor desempenho durante a etapa de cozimento. Para o cozimento do clone A foi necessário a aplicação de uma menor carga de álcali, para alcançar o kappa objetivo. O rendimento depurado para o clone em destaque também foi maior, quando comparado com os outros clones, da mesma forma que a viscosidade da polpa e a alvura.

Devido à menor carga de álcali aplicada e, portanto, um cozimento mais suave, o teor de ácidos hexenurônicos, para o clone A, foi maior quando comparado com os dois outros clones, que exigiram uma carga de álcali maior para alcançar o número kappa objetivo. No entanto, os valores de ácidos hexenurônicos para os três clones avaliados estão muito próximos, podendo-se dizer que não diferem entre si.

Para o clone de maior densidade foi necessário utilizar carga de álcali de 28%, substancialmente mais elevada que para o clone de menor densidade, que foi de 24,5%. Esta diferença, 3,5%, em carga de álcali, para obter o mesmo número kappa, pode ser explicada pela dificuldade de impregnação do licor de cozimento nos cavacos da madeira de mais alta densidade.

Segundo Bassa et al (2007), o rendimento em polpa é uma característica de extrema importância em uma unidade industrial, pois tem efeito sobre a geração de

sólidos, sobre o consumo específico de madeira e, conseqüentemente, sobre os custos de produção.

Alencar (2002), verificou que à medida que aumenta o nível de álcali tem-se uma redução no rendimento depurado.

A viscosidade da polpa do clone mais denso foi 4,7% menor do que a da polpa do clone de baixa densidade, isso pode ser explicado pela concentração alcalina mais elevada utilizada para promover a deslignificação da madeira de mais alta densidade.

Duarte 2007, cita que maiores valores de viscosidade indicam maior preservação dos carboidratos e, conseqüentemente, melhores propriedades físicas das fibras.

Em termos de alvura, comparando os clones B e C, observa-se um resultado ligeiramente maior para o clone C.

Deve-se destacar que a carga alcalina foi ajustada visando à obtenção de polpa celulósica com número kappa determinado.

Tabela 5 - Resultados dos cozimentos Lo-Solids® dos clones de *Eucalyptus spp.*

Clones	AE %	Número Kappa	Rendimento Depurado %	Viscosidade cP	Ac. Hex. mmol/Kg	Alvura % ISO
A	18.4c	17.5	50.9a	58.4a	56.9a	38.4a
B	18.8b	18.0	49.3b	51.8c	55.4c	37.7b
C	19.8a	17.7	49.4b	53.7b	56.0b	37.3c

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4.4 Características das fibras

A Tabela 6 mostra os resultados das análises das polpas utilizando o equipamento Galai Cis-100.

Os três clones analisados apresentaram comprimento médio de fibras de 0,78 mm. De acordo com dados da literatura o comprimento médio das fibras de eucalipto variam de 0,76 a 1,00 mm.

O clone B foi o que apresentou maior número de fibras por grama 23,64 milhões.

O clone A foi o que apresentou maior coarseness 6,2 mg/100m. Embora os valores encontrados para os três clones possam ser considerados baixos apresentam um produto final com propriedades favoráveis para papéis de imprimir e escrever, pois, terá

melhor formação e resistência das folhas, andamento das máquinas, opacidade e coeficiente de distribuição de luz.

Segundo Bassa et al (2007), o coarseness da fibra é definido como a massa por uma unidade de comprimento, é uma propriedade fundamental que afeta as propriedades estruturais do papel (densidade, lisura, porosidade), resistências e propriedades ópticas. A flexibilidade da fibra e a capacidade de formação de ligações interfibras diminuem quando o coarseness aumenta. Este é influenciado pela espessura da parede da fibra e aumenta à medida que o comprimento da fibra aumenta.

Segundo Mokfienski (2004), diferentemente da análise microscópica, o Galai CIS 100 mensura todo o material fibroso, incluindo fibras inteiras e quebradas, resultando em comprimento médio das fibras mais baixos.

Segundo Gomide et al (2005), as fibras mais curtas contribuem para uma boa formação da folha.

Tabela 6 - Características das fibras dos clones de *Eucalyptus spp.*

Clones	Comprimento mm	Largura µm	Nº fibras/grama (milhões)	Coarseness (mg/100m)	Teor de finos %
A	0.77a	31.84b	21.21c	6.2a	6,2b
B	0.78a	31.88a	23.64a	5.4c	7,0a
C	0.79a	31.06c	21.98b	5.8b	6,8a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4.5 Imacel

Com base nos dados da densidade e do rendimento de cada clone foi possível calcular a produção de celulose (tsa) por hectare por ano.

Os resultados podem ser vistos na Tabela 7. Como se pode observar o clone mais produtivo é o clone C com 12,17 ton cel/ha/ano, apesar de que estatisticamente as produtividades dos clones não diferem entre si.

Alencar 2002, realizou um estudo de densidade básica com madeiras de eucalipto com idades de 1 a 7 anos, mostrando que a densidade básica se estabiliza aos 5 anos, esta informação justifica o estudo ter sido realizado com madeiras desta idade. Associado a este fato, os avanços silviculturais indicam a possibilidade de redução da idade de corte.

Tabela 7 – Imacel.

Clones	Idade anos	IMA m <sup>3</sup> /ha/ano	Densidade Básica Kg/m <sup>3</sup>	Rendimento Depurado %	Imacel ton cel/ha/ano
A	5	51,26 a	446 b	50.9 a	11,63 b
B	5	47,24 a	485 a	49.3 b	11,29 c
C	5	50,21 a	491 a	49.4 b	12,17 a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4.6 Consumo específico de madeira

Na Tabela 8 pode-se observar o consumo específico de madeira, expresso em metro cúbico sólido de madeira por tonelada de celulose seca, calculado pela densidade básica e pelo rendimento de polpação.

Observa-se que o menor consumo específico foi obtido com madeira de maior densidade básica, com o clone C.

Os resultados obtidos evidenciam a influência da densidade básica da madeira sobre o consumo de madeira no processo de polpação. Assim, confirma-se a importância do emprego de madeiras mais densas na fabricação de polpa celulósica, uma vez que a quantidade de madeira (em m<sup>3</sup>) necessária para produzir uma tonelada de polpa é menor e conseqüentemente a área de floresta necessária para abastecimento de uma unidade industrial também será menor, supondo uma produção de polpa celulósica fixa.

Segundo Mokfienski (2004), normalmente a madeira da fábrica de celulose é comprada e transportada em volume. Assim, quanto maior for a densidade básica, maior será o peso seco de madeira por carga e menor será o custo variável da produção de celulose. Além de a madeira representar o item de maior custo na fabricação de celulose.

No entanto segundo Wehr et al (1994), madeiras de menor densidade proporcionam maiores rendimentos.

Tabela 8 – Consumo específico de madeira dos clones de *Eucalyptus spp.*

Clones	Densidade Básica g/m <sup>3</sup>	Rendimento Depurado %	Consumo Específico (m <sup>3</sup> /odt)
A	0,446 b	50.9 a	4,40a
B	0,485 a	49.3 b	4,18b
C	0,491 a	49.4 b	4,12c

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4.7 Geração de sólidos totais

Na Tabela 9 é mostrada, com base nas densidades básicas das madeiras, nos rendimentos depurados e nas cargas de álcali aplicadas, a geração específica de sólidos totais na polpação, expressa pela relação entre o peso de sólidos secos totais no licor preto e o peso de polpa seca (tst/odt).

Como pode ser observado com o aumento da densidade básica houve um aumento no teor de sólidos, os clones mais densos foram o que apresentaram maiores teores de sólidos secos.

Segundo Mokfienski (2004), madeiras mais densas têm potencial de aumento marginal na produção de polpa sem sobrecarga do ciclo de recuperação química da fábrica.

Tabela 9 – Teor de sólidos/odt gerados na polpação dos clones de *Eucalyptus spp.*

Clones	Densidade Básica g/m <sup>3</sup>	Rendimento Depurado %	AE %	Teor de Sólidos tss/odt
A	0,446 b	50.9 a	18.4c	1,318c
B	0,485 a	49.3 b	18.8b	1,412b
C	0,491 a	49.4 b	19.8a	1,417a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Segundo Duarte 2007, o teor de sólidos secos gerados durante o processo de polpação está diretamente relacionado com a capacidade de produção de celulose de uma unidade industrial, isto se deve ao fato de que para viabilizar o processo Kraft de polpação torna-se necessário a recuperação dos produtos químicos para utilização em um novo ciclo de cozimento. Essa recuperação química, na maioria das vezes é limitada pela capacidade de queima de licor negro da caldeira de recuperação.

A caldeira de recuperação é um componente do processo industrial de polpação que apresenta capacidade de queima de sólidos determinada e, esta capacidade normalmente determina a capacidade de produção de polpa celulósica de uma unidade industrial, desde que não haja restrição na alimentação de cavacos ao digestor, nem na disponibilidade de vapor (BASSA, 2006).

Quanto maior for o teor de sólidos gerados em uma planta produtora de polpa celulósica menor será sua capacidade de produção, em função da capacidade de queima da caldeira de recuperação.

Para os materiais avaliados, no cálculo do tss/odt foram considerado apenas as perdas de sólidos que ocorrem no digestor durante o processo de polpação. Para essas condições, ao considerar uma unidade produtora de polpa celulósica com uma caldeira de recuperação com capacidade de queima de 950 toneladas de sólidos por dia, pode-se verificar que a capacidade de produção de polpa celulósica dos materiais avaliados seria de 720, 673 e 670 toneladas de celulose/dia, respectivamente para o clone A, clone B e clone C.

Com base nesses dados verifica-se que quanto maior a densidade, maior a quantidade de álcali utilizada na polpação para atingir o número kappa objetivo, maior a degradação das fibras, diminuindo o rendimento e, portanto maior o teor de sólidos.

## 5. CONCLUSÕES

Pelas análises efetuadas pode-se concluir que:

- A madeira de baixa densidade apresentou menor requerimento de álcali para produção de polpa, maior rendimento depurado e viscosidade da polpa mais elevada.
  - As características de polpação, carga de álcali ativo, rendimento e consumo específico de madeira são fortemente influenciados pela densidade básica da madeira.
  - O clone que apresentou a maior quantidade de extrativos, necessitou de uma maior carga de álcali ativo no cozimento.
  - A densidade básica da madeira foi o que mais influenciou o consumo de madeira no processo de polpação.
  - Quanto maior for o teor de sólidos gerados menor será a capacidade de produção de uma planta produtora de celulose, em função da capacidade de queima da caldeira de recuperação.
- De maneira geral, a madeira de densidade mais baixa mostrou-se mais favorável à produção de celulose, uma vez que necessitou de menor carga de álcali para o cozimento, apresentou maior rendimento, polpa com maior viscosidade. Entretanto teve várias desvantagens como maior consumo específico de madeira e menor peso de madeira no digestor, afetando desfavoravelmente o custo e a produtividade industrial.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF, Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Anuário Estatístico da ABRAF 2010, ano base 2009. Brasília, 2010. 140p.

ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E. A. V.; MAFIA, R. G.; ASSIS, T. F. **Clonagem e doenças do eucalipto**. Viçosa: UFV, 2009. 500p.

ALMEIDA, J.M.; SILVA, D.J. Efeito da quantidade de extrativos e da acessibilidade do licor na polpação kraft de clones de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO NACIONAL ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 34, São Paulo, 2001. **Anais**. São Paulo: ABTCP, 2001. p.1-14.

ARBUTHNOT, A.L. The influence of basic wood density of *Eucalyptus* on pulp and paper properties. In: IUFRO SIMPOSIUM THE ROLE OF *EUCALYPTS*, 2, Durban, 1991. South Africa: IUFRO, 1991. p. 966-975.

ASSIS, T. F. de. Melhoramento genético do eucalipto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 18, n. 185, p. 32-51, 1996.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. **A madeira das espécies de eucalipto como matéria – prima para a indústria de celulose e papel**. PRODEPEF, 1976. 45p. (Série de Divulgação, 13).

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. Variações das características da madeira de *Eucalyptus grandis* e suas correlações com a produção de celulose. In: CONGRESSO NACIONAL ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 10, São Paulo, 1977. **Anais**. São Paulo: ABTCP, 1977. p.41-46.

BASSA, A. G. M. C.; SILVA Jr, F. G.; SACON, V. M. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft através do Processo Lo-Solids®. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 75, p. 19-29, set. 2007.

BERTOLUCCI, F. de L. G.; REZENDE, G. D. S. P.; PANCHEL, R.; Produção e utilização de híbridos de eucalipto. **Silvicultura**, São Paulo, v. 26, n. 51, p. 12- 16, 1995.

CAMPINHOS Jr.; CLAUDIO-DA-SILVA Jr.E. Desenvolvimento do *Eucalyptus* do futuro. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 6, São Paulo, 1990. **Trabalho convidado**, SBS/SBEF, 1990. p.55-72.

CARVALHO, H. G.; OLIVEIRA, R.C.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose Kraft branqueada de eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 31º, São Paulo, 1998. **Anais** São Paulo: ABTCP, 1998. p. 367-381.

COLODETTE, J.L., Estrutura anatômica e química da Madeira. Curso de pós-graduação lato sensu em Tecnologia de Celulose e Papel, Lwarcel, 2006.

DADSWELL, H.E. **The anatomy of eucalypt woods**. Melbourne: CSIRO: Forest Products Laboratory, Division of Applied Chemistry Technological, 1972. 35p.

DAVIDSON, J. **Variations, association and inheritance of morphological and wood characters in improvement program for *E. deglupta* Blume**. Camberra, 1972. 280p. Thesis (Ph. D.) – Australian National University.

ELDRIDGE, K.; DAVIDSON, I.; HARWOOD, C.; VAN WYK, G. **Eucalypt domestication and breeding**. New York: Oxford University Press, 1993. 288 p.

FERREIRA, M. Melhoramento e Silvicultura intensiva clonal. **IPEF**, n.45, p.22-30,

FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P.Y. Melhoramento genético da densidade da madeira de eucalipto. **Silvicultura**, v.2, n.14, p.148-152, 1978.

FOELKEL, C.E.B. Madeira de eucalipto: da floresta ao digestor. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 11, São Paulo, 1978. **Boletim Informativo do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, v. 6, n. 20, p. E1-E25, 1978.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R. C. de et al. **Technological characterization of the new generation of Eucalyptus clones in Brazil for kraft pulp production.** Rev. Árvore. 2005, vol. 29, no. 1, p. 129-137.

GOMIDE, J.L.; NETO, H.F.; LEITE, H.G. Estratégia de análise da qualidade de madeira de *Eucalyptus* sp. para produção de celulose. **Revista Árvore**, v.28, n.3, p. 443-450, 2004.

HAYGREEN, J.G.; BOWYER, J.L. **Forest products and wood science introduction.** Ames: Iowa State University, 1982. 549p.

HILLIS, W.E.; BROWN, A.G. **Eucalyptus for wood production.** Melbourne: CSIRO, 1978. 434p.

JORDÃO, M. C. S.; MANGOLINI, N. J. Avaliação de pastas ligno-celulósicas para fins absorventes com ênfase em pasta fofa (fluff pulp). In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 21., São Paulo, 1988. **Anais** São Paulo: ABTCP, 1988. p. 295-309.

LATORRACA, J.V.; ALBUQUERQUE, C.E. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v.7, n. 1, p.279-291, jan/dez. 2000.

MORA, A.L.; GARCIA, C.H. **A cultura do eucalipto no Brasil.** São Paulo: SBS, 2000. 112p.

PANSHIN, A.J; De ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 404p.

PEREIRA, D. E. D.; DEMUNER, B. J.; BERTOLUCCI, F. L. G.; PASQUALI, S. M. A relação guaiacila/siringila como critério de seleção de árvores e sua importância no processo de deslignificação. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE DESLIGNIFICAÇÃO. **Anais.** Vitória: ABTCP, p. 21-31, 1994.

PIRES, I. E.; PAULA, R.C. de. Estado da arte de melhoramento genético florestal para qualidade da madeira. In: CRC FOR TEMPERATE HARDWOOD FORESTRY – IUFRO, Salvador, 1997. **Anais**. Salvador: CRCTHF; IUFRO, 1997.

ROCHA, F.T.; FLORSHEIM, S.M.B.; COUTO, H.T.Z.; SPEGIORIN, L.; Variação da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus grandis* aos sete anos. In: ENCONTRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURA DE MADEIRA, 7, Uberlândia, 2002. 10p.

SILVA, D. J.; OLIVEIRA, R. C.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L. Impacto da qualidade da madeira na deslignificação, no branqueamento, e na qualidade da polpa Kraft de clones de eucalipto. **O Papel**, vol. 58, n. 2, p. 33-43, 1997.

SILVA, J.C.; ASSIS, T.F.; OLIVEIRA, J.T. Melhoramento genético para a qualidade da madeira. **Revista da Madeira**, n.75, 10 p, 2003.

TURNBULL, J. W.; PRYOR, L. D. Choice of species and seed sources. In: HILLS, W. E.; BROW, A. G. (Ed.). **Eucalyptus for wood production**. Sydney: CSIRO/Academic Press, 1984. p. 6-65.

VASCONCELLOS DIAS, R.L.; CLAUDIO-DA-SILVA JR., E. A influência da densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* em suas características químicas e propriedades de polpações e do papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, **Anais** São Paulo: ABTCP, 1985. p.31-55.

VENCOVSKY, R.; RAMALHO, M. A. P. Contribuições do melhoramento genético de plantas no Brasil. In: PATERNIANI, E. (Ed.). **Agricultura brasileira e pesquisa agropecuária**. Brasília: EMBRAPA Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2000. p. 57-89.

VITAL, B.R.; ALMEIDA, J.; VALENTE, O.F.; PIRES, I.E. Características de crescimento das árvores e de qualidade da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* para a produção de carvão. **IPEF**, n.47, p.22-28, 1994.

WEHR, T.R. **Variações nas características da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex- Maiden e suas influências na qualidade de cavacos em cozimentos kraft.**

Piracicaba, 1991. 84p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo.