

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**QUALIDADE DA MADEIRA E DA CELULOSE DE CLONES DE**  
*Eucalyptus* spp. **DE DIFERENTES DENSIDADES**

**FERNANDA ASTI DIOGO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Ciência Florestal.

BOTUCATU-SP  
Agosto - 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**QUALIDADE DA MADEIRA E DA CELULOSE DE CLONES DE**  
*Eucalyptus* spp. **DE DIFERENTES DENSIDADES**

**FERNANDA ASTI DIOGO**

Orientador: Cláudio Angeli Sansígolo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu,  
para obtenção do título de Mestre em Ciência  
Florestal.

BOTUCATU-SP  
Agosto – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA  
INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA -  
LAGEADO - BOTUCATU (SP)

D591q Diogo, Fernanda Asti, 1986  
Qualidade da madeira e da celulose de clones de *Eucalyptus*  
spp. de diferentes densidades / Fernanda Asti Diogo. - Botucatu :  
[s.n.], 2014  
vi, 39 f. : grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2014  
Orientador: Cláudio Angeli Sansígolo  
Inclui bibliografia

1. Eucalipto. 2. Madeira - Densidade. 3. Madeira - Qua-  
lidade. 4. Polpa de madeira. I. Sansígolo, Cláudio Angeli. II.  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Fi- lho"  
(Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômi- cas. III.  
Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU  
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "QUALIDADE DA MADEIRA E DA CELULOSE DE CLONES DE  
*Eucalyptus spp.* DE DIFERENTES DENSIDADES"

ALUNA: FERNANDA ASTI DIOGO

ORIENTADOR: PROF. DR. CLAUDIO ANGELI SANSIGOLO

Aprovado pela Comissão Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. CLAUDIO ANGELI SANSIGOLO

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. PAULO TORRES FENNER

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. GUSTAVO VENTORIM

Data da Realização: 20 de agosto de 2014.

**AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais por acreditarem em mim e estarem sempre ao meu lado.

Ao meu namorado pelo companheirismo e apoio durante o curso.

Ao Prof. Dr. Cláudio Angeli Sansígolo pela orientação e paciência.

Ao curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal da UNESP.

Aos funcionários do Departamento de Ciência Florestal, e a técnica de laboratório Liliane pela amizade e ajuda na realização do trabalho.

A empresa Lwarcel pelo material fornecido.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Meus sinceros agradecimentos!

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE FIGURAS .....	V
LISTA DE TABELAS .....	VI
RESUMO .....	1
SUMMARY .....	2
1 INTRODUÇÃO .....	3
2 OBJETIVOS .....	5
3 REVISÃO DE LITERATURA .....	6
3.1 Gênero <i>Eucalyptus</i> spp.....	6
3.2 Qualidade da madeira .....	7
3.2.1 Propriedades físicas.....	7
3.2.2 Propriedades químicas .....	9
3.2.3 Propriedades anatômicas.....	11
3.3 Processo de polpação Kraft.....	12
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	14
4.1 Material .....	14
4.2 Métodos .....	14
4.2.1 Amostragem das árvores .....	14
4.2.2 Determinação dos parâmetros dendrométricos.....	15
4.2.3 Densidade básica da madeira e densidade aparente dos cavacos .....	16
4.2.4 Composição química da madeira .....	17
4.2.5 Deslignificação Kraft da madeira e análises na polpa .....	17
4.2.6 Classificação das fibras da celulose .....	18
4.2.7 Análise estatística.....	19
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20
5.1 Parâmetros dendrométricos .....	20
5.2 Densidade básica da madeira e densidade aparente dos cavacos .....	23
5.3 Composição química .....	24
5.4 Polpação Kraft das madeiras.....	26
6 CONCLUSÕES .....	34
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35

**LISTA DE FIGURAS**

	<b>Página</b>
Figura 1. Resultados dendrométricos para árvores individuais.....	22
Figura 2. Resultados individuais das árvores para densidade básica média da árvore e densidade aparente dos cavacos .....	24
Figura 3. Resultados individuais das árvores para composição química .....	26
Figura 4. Resultados individuais das árvores na polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 14%.....	28
Figura 5. Resultados individuais das árvores na polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 16%.....	31

**LISTA DE TABELAS**

	<b>Página</b>
Tabela 1. Resultados médios dos parâmetros dendrométricos dos materiais genéticos estudados. ....	21
Tabela 2. Resultados médios da densidade básica média da árvore e densidade aparente dos cavacos.....	23
Tabela 3. Resultados médios da composição química dos materiais genéticos estudados. ....	25
Tabela 4. Resultados médios da polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 14%. ....	27
Tabela 5. Comprimento das fibras na celulose (%) do cozimento com carga de álcali ativo 14%.....	29
Tabela 6. Resultados médios na polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 16%. ....	30
Tabela 7. Comprimento das fibras na celulose (%) do cozimento com carga de álcali ativo 16%.....	32

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade da madeira e da celulose Kraft não branqueada de *Eucalyptus* spp. de diferentes densidades. Os materiais utilizados foram 10 árvores do clone de *E. grandis* de baixa densidade (0,456 g/cm<sup>3</sup>) e 10 árvores do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* de alta densidade (0,510 g/cm<sup>3</sup>) com 6 anos de idade. Foram analisados os parâmetros dendrométricos (DAP, altura total, altura comercial, volume com casca, volume sem casca, percentagem de casca e volume comercial sem casca), propriedades físicas (densidade básica da madeira e densidade aparente dos cavacos), composição química da madeira (solubilidade em NaOH1%, extrativos totais, lignina e holocelulose), a celulose Kraft utilizando álcali ativo de 14 e 16% (número kappa, rendimentos bruto e depurado, rejeitos base madeira e celulose e consumo específico da madeira) e a classificação das fibras. Quimicamente, os materiais não se diferenciaram entre si. O cozimento com álcali ativo 14% resultou em um número kappa alto para os dois materiais. Todos os resultados deste cozimento apresentaram uma diferença significativa entre os materiais, sendo que o material de alta densidade se caracterizou por apresentar um maior rendimento bruto (57,05%) e depurado (52,52%). No cozimento com álcali ativo 16%, o número kappa apresentou um resultado esperado e os rendimentos não apresentaram uma diferença estatística entre os materiais.

**Palavras-chave:** densidade básica, *Eucalyptus*, polpação Kraft

WOOD AND PULP QUALITY OF *Eucalyptus* spp. CLONES WITH DIFFERENTS SPECIFIC GRAVITIES. Botucatu, 2014. 39p

Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: FERNANDA ASTI DIOGO

Adviser: CLÁUDIO ANGELI SANSÍGOLO

## SUMMARY

The objective of this study was to evaluate the wood and pulp quality of *Eucalyptus* spp. with differents specific gravities. The materials used were 10 trees of low specific gravity *E. grandis* clone (0.456 g/cm<sup>3</sup>) and 10 trees of high specific gravity *E. grandis* x *E. urophylla* hybrid (0.510 g/cm<sup>3</sup>) at 6 years of age. Dendrometric parameters (DBH, total height, commercial height, volume with bark, volume without bark, percentage of bark and commercial volume without bark), physical properties (wood basic density and apparent density of the chip), chemical composition (solubility in NaOH1%, total extractives, lignin and holocellulose), kraft pulp using active alkali 14 and 16% (kappa number, gross income and debugged income, rejects and specific consumption of wood) and the classification of fibers wood were analyzed. Chemically, the materials do not differ from each other. The baking with active alkali 14% resulted in a high kappa number for the two materials. All this cooking results showed a significant difference between the materials, and the high density material was characterized by a higher gross income (57.05%) and debugged (52.52%). In cooking with active alkali 16%, kappa number showed an expected result and the yields did not show a statistical difference between the materials.

**Keywords:** *Eucalyptus*, Kraft pulping, specific gravity.

## 1 INTRODUÇÃO

O setor industrial brasileiro de celulose e papel produziu 14 milhões de toneladas de celulose no ano de 2011, fazendo com que o país permanecesse no posto de quarto maior produtor mundial de celulose (BRACELPA, 2012).

A área plantada no Brasil é de 6,66 milhões de hectares. Os *Eucalyptus* sp. representam 76,6% da área plantada (ABRAF, 2013). O Brasil é o maior produtor mundial de celulose Kraft branqueada provenientes de espécies de eucalipto, produzindo cerca de 82% da produção de celulose nacional. A madeira de eucalipto é a mais utilizada para a produção de polpa celulósica devido seu rápido desenvolvimento e sua grande adaptabilidade as condições edafoclimáticas locais. Dentre as espécies mais utilizadas se destacam o *Eucalyptus saligna*, *E. grandis*, *E. urophylla* e seus híbridos.

Para atender este mercado é necessário que a madeira tenha uma alta qualidade, um bom rendimento e um baixo custo para a produção da celulose. Portanto, o estudo de propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira são muito importantes para determinar a qualidade da madeira. A densidade da madeira é a propriedade física mais importante a ser avaliada.

O processo Kraft é o mais utilizado para produção de celulose no mundo. O cozimento é realizado em um digestor com determinada pressão e temperatura, com solução de hidróxido de sódio e sulfeto de sódio como reagentes químicos, com o objetivo de remover a lignina e liberar a porção fibrosa da madeira. Para a produção de

celulose Kraft a densidade é muito importante, pois esta influencia na impregnação do licor nos cavacos, rendimento do processo, e também nas propriedades do papel.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar a qualidade da madeira e da celulose, em laboratório, de um clone de *Eucalyptus grandis* de menor densidade e de um clone do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de maior densidade.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar as principais diferenças na qualidade da madeira devidas as propriedades físicas e químicas da madeira.
- Analisar os reflexos da qualidade da madeira nos dois clones nos rendimentos da polpação e qualidade da celulose produzida.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Gênero *Eucalyptus* spp.

Os *Eucalyptus* spp. cobrem a maior área dos reflorestamentos no mundo. O grande número de espécies deste gênero, a grande plasticidade ecológica e a sua excelente produção tornaram-no matéria prima de inúmeras indústrias florestais, o que permitiu um rápido avanço no conhecimento silvicultural e tecnológico de muitas espécies (FINGER et al., 1993).

Dentre as espécies plantadas no país, o *Eucalyptus grandis*, o *Eucalyptus saligna*, o *Eucalyptus urophylla* e seus híbridos tornaram-se a base da cultura florestal de fibra curta na indústria de celulose (CARVALHO; NAHUZ, 2004).

O *Eucalyptus grandis* constitui uma das principais fontes de matéria prima para indústria brasileira de celulose (BUSNARDO et al., 1978), conseqüentemente é a espécie mais plantada no Brasil pela sua plasticidade genética e muito utilizada na obtenção de híbridos e para clonagem de árvores selecionadas. O *E. grandis* supera qualquer outra em incremento volumétrico em condições ambientais adequadas (MORA; GARCIA, 2000).

O *Eucalyptus urophylla* é uma espécie de grande porte e que apresenta resistência ao cancro do eucalipto (BARROSO, 1999), ao contrário do *Eucalyptus grandis*, que é uma espécie sensível. Esta espécie é cultivada com a finalidade de produção de lenha, carvão, serraria e para produção de celulose (GOLFARI et al., 1978).

Os híbridos são cruzamentos que combinam características de diferentes espécies originárias e tem grande relevância nas indústrias de celulose e papel

além de algumas espécies do gênero *Eucalyptus*. Portanto, vem adquirindo importância no Brasil para facilitar a obtenção de um meio mais rápido de promover o melhoramento de características florestais desejáveis. O eucalipto urograndis é um híbrido originado do cruzamento entre *E. grandis* e *E urophylla*, bastante utilizado por indústrias de celulose e papel, pois se mostrou altamente adaptado no que diz respeito à densidade básica, química da madeira e processamento da madeira em polpa, apresentando alto rendimento e qualidade de polpa produzida (MILAGRES, 2009).

O objetivo do cruzamento entre *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* é obter plantas com um bom crescimento, características do *E. grandis* e um leve aumento na densidade da madeira e melhorias no rendimento e propriedades físicas da celulose, características do *E. urophylla* (CARVALHO; NAHUZ, 2004).

### **3.2 Qualidade da madeira**

A qualidade da madeira dificilmente será definida por uma única propriedade. Para os estudos de caracterização da qualidade da madeira, visando à produção de celulose, vários parâmetros podem ser utilizados. Também não existe uma única qualidade de madeira que otimize toda a operação da fábrica e a qualidade do produto. Os parâmetros analisados são classificados como físicos, sendo o principal a densidade básica por ser de fácil determinação e por estar diretamente relacionada às características do produto final; os químicos, que determinam os teores de holocelulose, lignina e extrativos; e anatômicos, que estuda as porcentagens e dimensões das fibras e as porcentagens de vasos e parênquimas. Apesar da densidade básica da madeira ser uma das propriedades mais versáteis e utilizadas, existem muitas limitações para se tê-la como uma indicação universal de qualidade da madeira dos eucaliptos (FOELKEL, 2009b; SHIMOYAMA, 1990).

#### **3.2.1 Propriedades físicas**

O parâmetro físico mais utilizado na determinação da qualidade da madeira é a densidade básica, que é a relação entre o peso absolutamente seco da madeira, em gramas ou toneladas, e seu volume, respectivamente em centímetros cúbicos ou metros cúbicos, quando em estado de completa saturação de água (FOELKEL et al, 1971). De acordo com Foelkel et al. (1990) é um índice importante para avaliar a qualidade da

madeira de eucalipto, pois com sua variação muitas das propriedades da madeira e da celulose também variam.

A variação da densidade básica ocorre entre espécies e também dentro da própria árvore. Estas variações dependem das mudanças na proporção dos vasos e das espessuras das paredes celulares das fibras. O aumento da espessura da parede celular das fibras ou o aumento na proporção das fibras em relação à proporção dos vasos acarreta a um crescimento na densidade. Assim como ocorre inversamente com o aumento na proporção de vasos e diminuição na espessura da parede celular, há uma redução na densidade (OLIVEIRA e SILVA, 2003).

Algumas alterações no processo de polpação podem ocorrer devido a variação da densidade básica da madeira, como a impregnação pelo licor do cozimento e no processo de transformação da madeira em cavacos, sendo recomendável um planejamento adequado do abastecimento da matéria prima adequada na fábrica (SILVA, 2011).

As madeiras com densidade baixa levam a redução do rendimento volumétrico em celulose, enquanto as madeiras de densidade alta consomem mais reagentes e levam a baixos rendimentos gravimétricos e teores mais elevados de materiais rejeitados. Madeiras de densidade alta devem ter menores dimensões de cavacos para facilitar o processo de impregnação, porém requer maior demanda energética no processo de picagem e tende a produzir cavacos pouco uniformes (MILAGRES, 2009; CARDOSO, 2006 apud SILVA, 2011).

Para a indústria de celulose e papel, uma avaliação adequada da densidade básica fornece indicações bastante precisas acerca da impregnação dos cavacos e rendimento do processo e geralmente está associada às características de qualidade e de resistências físico-mecânicas da polpa (QUEIROZ et al., 2004). A densidade básica tem alta correlação com o rendimento na produção de celulose (CARVALHO e NAHUZ, 2004).

Queiroz et al. (2004) concluíram que a madeira do clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* de densidade mais baixa (0,447 g/cm<sup>3</sup>) mostrou-se mais favorável à produção de celulose, uma vez que a necessidade de álcali para o cozimento foi menor, apresentou maior rendimento depurado, proporcionou polpa com maior viscosidade, resultou em licor residual com menor teor de sólidos e apresentou

melhor branqueabilidade da polpa, requerendo menos reagentes químicos para branqueamento.

Santos e Sansígolo (2007) analisaram a influência da densidade básica de dois clones do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* ( $440 \text{ kg/m}^3$  e  $508 \text{ kg/m}^3$ ) na qualidade da polpa branqueada e concluíram que madeiras de densidade básica inferior apresentaram menor viscosidade da celulose e rejeitos após polpação, maior consumo específico de madeira e álcali ativo consumido bases madeira e produto químico e menor viscosidade intrínseca da celulose branqueada.

Fantuzzi Neto (2012) estudou a qualidade da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose e concluiu que madeiras de alta densidade podem resultar em rendimentos semelhantes ao da madeira de baixa densidade se submetidas a uma temperatura mais baixa e um tempo de cozimento mais longo. O mesmo autor também concluiu que para abastecer uma fábrica com madeiras de alta densidade será necessária uma área plantada bem inferior comparada a plantios com clones de baixa densidade.

### 3.2.2 Propriedades químicas

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

A madeira é um material orgânico e os seus constituintes químicos (celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos) estão diretamente relacionados com as suas propriedades. O conhecimento da natureza química da madeira é essencial para que se possa determinar a matéria prima ao seu uso final através do seu comportamento (OLIVEIRA, 1997; SILVA, 2002). De acordo com Hillis e Brown (1978), diversas espécies de eucalipto apresentam 40 - 62% de celulose, 12 - 22% de hemiceluloses e 15 - 25% de lignina.

A holocelulose é a combinação de polímeros de celulose e hemiceluloses, sendo a celulose o principal componente da parede celular dos vegetais e o mais abundante composto orgânico da natureza, se apresenta sob a forma de fibras juntamente com outros componentes em vegetais superiores (TRUGILHO et al., 1996).

Trata-se de um polímero regular e uniforme de um único monômero (anidro glucose). Esses monômeros se unem por ligações de altíssima resistência ( $\beta$  1-4), sendo, portanto, um polímero difícil de ser clivado e fracionado (FOELKEL, 2013).

As hemiceluloses são constituintes desejáveis na polpação, pois contribuem para o rendimento e apresentam efeitos benéficos na ligação interfibras e na resistência de polpa celulósica. Em virtude de suas qualidades desejáveis, a maior parte dos processos de obtenção de polpa celulósica procura remover o mínimo possível de hemiceluloses (GOMES, 2007). Possuem cadeias que podem ser ramificadas com espinha central constituída de monômeros de açúcares simples com diferentes constituições. A xilose é o principal monômero das hemiceluloses do eucalipto (denominadas de xilanas) e o terceiro mais abundante composto orgânico presente nas plantas superiores (FOELKEL, 2013).

A lignina é um constituinte considerado indesejável para a produção de celuloses químicas. As operações de cozimento e branqueamento visam remover a maior parte possível, sem causar dano apreciável às fibras (GONZAGA, 1983). É o segundo composto orgânico mais abundante na biomassa vegetal. É uma substância complexa composta por macromoléculas tridimensionais de origem fenilpropano de difícil fracionamento, por isso a necessidade de condições drásticas nos processos de polpação química como o kraft (FOELKEL, 2013).

Os teores de lignina e extrativos são considerados como características químicas fundamentais, uma vez que influenciam diretamente o consumo de álcali, rendimento da deslignificação e o potencial de produção industrial (SANTOS, 2000).

Os extrativos são importantes no estudo da madeira para a produção de celulose e papel, embora se apresentem em quantidades pequenas podem exercer influência negativa durante o processo. Por este motivo, quanto maior a remoção desses constituintes da madeira na etapa de polpação é possível minimizar problemas processuais como incrustações resinosas do tipo “pitch” (ALMEIDA; SILVA, 2001). São compostos químicos que consistem principalmente de ácidos graxos, álcoois, fenóis, terpenos, esteróides, resinas, ceras, e outros compostos orgânicos. Estes compostos existem na forma de monômeros, dímeros e polímeros (ROWELL et al., 2005).

### 3.2.3 Propriedades anatômicas

Para a produção de celulose e papel os parâmetros anatômicos são considerados importantes na avaliação da qualidade da madeira de eucalipto, pois estão relacionados com a qualidade da polpa e associados às propriedades físico-mecânicas e características superficiais e ópticas do papel produzido (CARVALHO et al., 1998).

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

A espessura da parede das fibras está intimamente relacionada com a densidade da madeira, e as variações na espessura da parede entre e dentro das árvores são similares ao padrão de variação da densidade (MALAN, 1995).

Tomazello Filho (1985) observou que em árvores de uma mesma espécie de *Eucalyptus*, há ocorrência de significativas variações no comprimento das fibras, no diâmetro de lume, na espessura da parede das fibras e no diâmetro tangencial dos vasos, tendendo a aumentarem no sentido radial, e uma diminuição nas frequências de vasos foi observada no mesmo sentido.

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

Os vasos são muito importantes tanto para a fisiologia e crescimento das árvores, como para os processos de conversão da madeira em celulose. Sua presença nas madeiras de folhosas favorece o processo de impregnação dos cavacos pelo licor de cozimento. Como são elementos grandes e ocos em sua maioria, eles facilitam a passagem do licor para o interior dos cavacos. Além disso, a comunicação dos vasos com as células adjacentes, através de pontoações, permite que o licor de cozimento migre para o interior dos cavacos (FOELKEL, 2007).

### 3.3 Processo de polpação Kraft

O processo Kraft é o meio dominante de produção de celulose química. Desde sua descoberta acidental em 1879, e posterior patente de Carl Dahl em 1884, esse processo tem sido imbatível em termos de promover a separação das fibras de inúmeras matérias primas para a fabricação de polpas celulósicas orientadas à manufatura de variados tipos de papéis, derivados de celulose, etc. (FOELKEL, 2009). Este processo envolve o cozimento de cavacos de madeira em um vaso de pressão, o digestor, com solução de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na<sub>2</sub>S) como reagentes químicos deslignificantes. O sulfeto de sódio proporciona aumento da velocidade de reação e de qualidade da polpa, mas tem a desvantagem de formar mercaptanas e H<sub>2</sub>S responsáveis pelo odor característico deste processo (SAMISTRARO, 2008).

Tendo-se em vista que o objetivo da polpação é a remoção seletiva da lignina e liberação da porção fibrosa da madeira, as madeiras com baixos teores de lignina e de extrativos propiciam melhor desempenho da polpação em termos de rendimento (GOUVEA et al., 2009).

Os eucaliptos, nas idades em que são consumidos para fabricação de celulose Kraft, possuem madeiras bastante porosas. Isso porque são madeiras com relativamente baixos teores de extrativos e medianas densidades básicas. Densidades básicas elevadas reduzem a porosidade da madeira e dificultam a entrada e a quantidade de licor nos cavacos. Quando se cozinham madeiras muito densas (maior que 0,700 g/cm<sup>3</sup> de densidade básica), há que produzir cavacos de pequenas dimensões, especialmente na espessura (2 a 4 mm) e no comprimento (1,5 a 2 cm) (FOELKEL, 2013).

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

As reações que ocorrem no processo Kraft de polpação são complexas e a deslignificação ocorre em três fases distintas: a primeira fase é caracterizada como um processo de extração, onde ocorre a remoção inicial muito rápida de lignina. Na segunda fase há uma seletiva e eficiente remoção da maior parte da lignina, cerca de 60 a 65%. Na terceira fase, ocorre a remoção da lignina residual. As hemiceluloses e parte da

celulose também são atacadas a partir da fase inicial e totalizando uma perda de 10 a 14% do peso da madeira (FOELKEL, 2009a; SMOOK, 1990).

A qualidade da celulose é definida por um grupo de atributos que pode variar de acordo com a qualidade da madeira, com o processo de deslignificação e produção de celulose e com as operações particulares do processo de produção de papel (FOELKEL, 2007).

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Material**

O material consistiu de árvores de um clone de menor densidade básica de *Eucalyptus grandis* (G21) e árvores de um clone do híbrido de maior densidade básica de *E. grandis* x *E. urophylla*, (P4295), ambos com 6 anos. Estas árvores são provenientes da Empresa Lwarcel Celulose e Papel de Lençóis Paulista-SP e foram retiradas na Fazenda Nova América dos talhões 001.2 e 006.2, respectivamente.

### **4.2 Métodos**

#### **4.2.1 Amostragem das árvores**

A amostragem consistiu em 10 árvores representativas do DAP médio do talhão para cada material genético. As árvores foram marcadas e abatidas com motosserra. Em cada árvore abatida houve a medição da altura total e comercial e DAP. Em seguida foram retirados discos com 3 cm de espessura na base (0%), a 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (5 discos por árvore), considerando o diâmetro mínimo de 8 cm com casca, para a determinação da densidade básica da madeira. No laboratório da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) da UNESP foram mensurados seus diâmetros com casca e sem casca para a obtenção de dados dendrométricos.

Os toretes da madeira entre os discos foram descascados e picados para a realização do cozimento kraft. A picagem dos toretes foi realizada em picador e classificados, para obtenção da amostra de cavacos. O picador utilizado foi o modelo PPK220/500 da marca Planalto, série 0457/02, com potência de 60 a 175 cv e capacidade

de 34mst/h. Os cavacos foram acondicionados em sacos plásticos para transporte e armazenados no galpão de secagem de madeira da FCA-UNESP.

#### 4.2.2 Determinação dos parâmetros dendrométricos

Nos discos coletados de cada árvore foram efetuadas as medições dos diâmetros com casca e sem casca. As cascas de cada árvore depois de retiradas foram separadas para avaliação da densidade básica. O volume comercial de cada árvore, com e sem casca foi calculado através da fórmula de Smalian (1937) observado na Equação 1.

$$Vc = \frac{\pi}{8} L \left[ D^2_B + D^2_{100} + 2(D^2_{25} + \dots + D^2_{75}) \right] \quad (1)$$

Sendo:

Vc = volume comercial da árvore com casca ou sem casca, m<sup>3</sup>;

L = comprimento de cada seguimento da árvore, m;

D = diâmetro dos discos com casca ou sem casca a diferentes alturas da árvore, m.

A massa comercial da árvore foi determinada através da Equação 2.

$$Mc = da \times V_{s/c} \quad (2)$$

Sendo:

Mc = massa comercial da árvore, kg;

da = densidade básica média da árvore, kg/m<sup>3</sup>;

Vs/c = volume comercial da árvore sem casca, m<sup>3</sup>

A percentagem de casca em volume foi determinada através da Equação 3.

$$\% Cv = \left( \frac{V_{c/c} - V_{s/c}}{V_{c/c}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

% Cv = percentagem de casca em volume, %;

Vc/c = volume da árvore com casca, m<sup>3</sup>;

Vs/c = volume da árvore sem casca, m<sup>3</sup>.

### 4.2.3 Densidade básica da madeira e densidade aparente dos cavacos

Os discos de madeira foram cortados em quatro cunhas com ângulo de 90°. Foram utilizadas duas cunhas, uma para a determinação da densidade básica e a outra para a avaliação da composição química da madeira. A determinação da densidade básica da cunha de madeira e da casca foi efetuada através do método da balança hidrostática (Foelkel et al., 1971) (Equação 4).

$$db = \frac{PS}{PU - PI} \quad (4)$$

Sendo:

db = densidade básica da amostra de madeira, g/cm<sup>3</sup>;

PS = peso seco da amostra de madeira, g;

PU = peso úmido da amostra de madeira, g;

PI = peso imerso da amostra de madeira, g.

A densidade básica média de cada árvore foi determinada através da densidade básica de cada cunha de madeira e respectivo diâmetro sem casca através da Equação 5.

$$da = \frac{1}{2} \frac{(D_B^2 + D_{25}^2)(d_B + d_{25}) + \dots + (D_{75}^2 + D_{100}^2)(d_{75} + d_{100})}{D_B^2 + D_{100}^2 + 2(D_{25}^2 + \dots + D_{75}^2)} \quad (5)$$

Sendo:

da = densidade básica média da árvore, g/cm<sup>3</sup>;

D = diâmetro dos discos sem casca a diferentes alturas da árvore, cm;

d = densidade básica das cunhas nas diferentes alturas da árvore, g/cm<sup>3</sup>.

A densidade básica aparente dos cavacos foi efetuada usando um recipiente cilíndrico de capacidade 10 litros. As determinações foram efetuadas em triplicata e determinada através da equação 6.

$$dcav = \frac{PS}{VA} \quad (6)$$

Sendo:

dcav = densidade aparente dos cavacos de madeira, g/cm<sup>3</sup>;

PS = peso seco dos cavacos de madeira, g;

VA = volume aparente dos cavacos de madeira, cm<sup>3</sup>.

#### 4.2.4 Composição química da madeira

A amostra composta de madeira de cada árvore foi realizada através do agrupamento de palitos obtidos manualmente de cunhas retiradas dos discos amostrados nas diferentes alturas. Estes palitos foram reduzidos à serragem em moinho Wiley. Posteriormente, a serragem obtida foi classificada para obtenção da fração 40/60 mesh. Foram efetuadas as seguintes análises em cada árvore: solubilidade em NaOH 1% (TAPPI T 4 wd-75), teor de extrativos totais (TAPPI T 12 wd-82), de lignina Klason insolúvel em ácido sulfúrico (TAPPI T 249 cm-85) e de holocelulose (deslignificação com clorito de sódio).

#### 4.2.5 Deslignificação Kraft da madeira e análises na polpa

As deslignificações Kraft foram realizadas em digestor rotativo marca Regmed, com 20 litros de capacidade. Para a polpação foram utilizadas cápsulas com capacidade para 50 g de madeira seca. Foram realizadas duas deslignificações Kraft com diferentes teores de álcali ativo. As condições da deslignificação Kraft foram às seguintes: álcali ativo base madeira seca como Na<sub>2</sub>O = 14% e 16%, sulfidez do licor = 25%, temperatura máxima = 170 °C, tempo até temperatura máxima = 90 min e tempo na temperatura máxima = 30 min. Após a deslignificação Kraft e lavagem da polpa foram determinados o rendimento bruto (Equação 7), teor de rejeitos base celulose (Equação 8), teor de rejeitos base madeira (Equação 9), rendimento depurado (Equação 10) e consumo específico de madeira (Equação 11). A depuração da celulose para a determinação dos rejeitos foi efetuada em depurador Brecht Roll utilizando peneira com fendas de 0,2 mm. O número Kappa foi efetuado em amostras de polpas depuradas conforme norma TAPPI T 236 om-85.

$$Rb = \frac{\text{m.s.c.}}{\text{m.s.m.}} \times 100 \quad (7)$$

Sendo:

Rb = rendimento bruto, %;

m.s.c. = massa seca de celulose, g;

m.s.m. = massa seca de madeira, g.

$$\%Rej_{bc} = \frac{m.s.r.}{m.s.c.} \times 100 \quad (8)$$

Sendo:

$\%Rej_{bc}$  = percentagem de rejeitos base celulose, %;

m.s.r. = massa seca de rejeitos, g;

m.s.c.= massa seca de celulose, g.

$$\% Re j_{bm} = \frac{m.s.r.}{m.s.c.} \times Rb \quad (9)$$

Sendo:

$\%Rej_{bm}$  = percentagem de rejeitos base madeira, %;

m.s.r. = massa seca de rejeitos, g;

m.s.c.= massa seca de celulose, g; Rb = rendimento bruto, %.

$$Rd = Rb - \% Re j_{bm} \quad (10)$$

Sendo:

Rd = rendimento depurado, %;

Rb = rendimento bruto, %;

$\%Rej_{bm}$  = percentagem de rejeitos base madeira.

$$CEM = \frac{1}{Rb \times db} \quad (11)$$

Onde:

CEM = consumo específico de madeira, m<sup>3</sup> de madeira/t de celulose seca;

Rb = rendimento bruto;

db = densidade básica, m<sup>3</sup> mad/ ton cel.

#### 4.2.6 Classificação das fibras da celulose

A classificação por comprimento das fibras na celulose foi efetuada equipamento Bauer McNett (TAPPI T233 cm-95). Esse classificador possui cinco tanques posicionados em cascata, cada um equipado com uma peneira, as malhas das peneiras diminuem do primeiro para o quinto tanque, essa disposição permite a retenção das fibras com o mesmo intervalo de comprimento em cada tanque. As malhas das 5 peneiras foram: 16 mesh, 16 - 30 mesh, 30 - 50 mesh, 50 - 100 mesh, 100 - 200 mesh, correspondendo às

aberturas de 1,190, 0,595, 0,297, 0,149 e 0,074 mm. Os finos que passaram para última peneira foram considerados como < 200 mesh (< 0,074mm).

Para a classificação foi utilizado o equivalente a 10 gramas de celulose depurada seca. A celulose foi colocada no primeiro tanque e classificada durante 10 minutos, ao final da classificação de cada tratamento os tanques foram esgotados, lavados e as fibras retidas nos papéis filtro instalados nas saídas de cada tanque. Em seguida, a celulose coletada em cada tanque foi seca em estufa  $103 \pm 2^\circ \text{C}$ , pesada em balança com precisão de 0,01 g, e calculado o percentual de fibras retidas em cada peneira e a percentagem de finos que passaram pela última peneira. Foram efetuadas duas repetições para cada amostra.

#### **4.2.7 Análise estatística**

Os resultados obtidos neste estudo foram analisados utilizando o programa Statistic 7 e realizada a análise de variância e o teste de comparação de médias Tukey no nível de 5% de significância.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Parâmetros dendrométricos

Dentre os parâmetros dendrométricos analisados, como mostra na Tabela 1, o DAP, a altura comercial, os volumes com casca e sem casca, a porcentagem de casca e a massa seca da árvore sem casca não apresentaram diferença significativa entre os materiais estudados. Apenas a altura total apresentou uma diferença estatística significativa entre os materiais onde o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* apresentou uma média de altura total maior (27,95 m) que o clone *E. grandis* (26,36 m).

A quantidade de casca presente na madeira é normalmente expressa como porcentagem em volume ou em peso e varia entre 10 a 20% para a grande maioria das espécies florestais, de acordo com Busnardo et al (1983). Apesar de não ter ocorrido uma diferença significativa entre os materiais, o *E. grandis* x *E. urophylla* demonstrou uma tendência de maior porcentagem de casca. O uso da madeira com casca aumenta o consumo de reagentes e produz um licor negro mais rico em substâncias orgânicas que podem sobrecarregar o equipamento de recuperação (BARRICHELO e BRITO, 1979).

Tabela 1. Resultados médios dos parâmetros dendrométricos dos materiais genéticos estudados.

Madeiras	<i>E. grandis</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
DAP, cm	17,75 a	17,43 a
Altura total, m	26,36 b	27,95 a
Altura comercial, m	20,60 a	21,43 a
Volume com casca, m <sup>3</sup>	0,317 a	0,327 a
Volume sem casca, m <sup>3</sup>	0,279 a	0,287 a
% de casca em volume, %	11,86 a	12,01 a
Massa seca da árvore sem casca, kg	128,0 a	141,2 a

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey no nível de 5%.

A Figura 1 mostra os resultados dendrométricos para árvores individuais. O resultado do volume médio comercial sem casca (s/c) e o coeficiente de variação (CV) foi de 0,279 cm<sup>3</sup> e 21,8% para o *E. grandis* e 0,287 cm<sup>3</sup> e 25,8% para o *E. grandis* x *E. urophylla*.

Busnardo et al (1983) afirmaram que a massa seca da árvore é um parâmetro muito importante para a classificação de árvores e quantificação da produção de matéria seca de um povoamento destinado à produção de celulose, pois o mesmo se resulta da multiplicação entre a densidade básica e o volume da madeira sem casca. Observa-se que o resultado da massa seca da árvore (Figura 1) obteve uma grande variação tanto para *E. grandis* (CV=25,9%) quanto para *E. grandis* x *E. urophylla* (CV=31,6%), podendo explicar a diferença entre as médias dos materiais estudados de 13,2 kg (Tabela 1) não ter sido significativo.

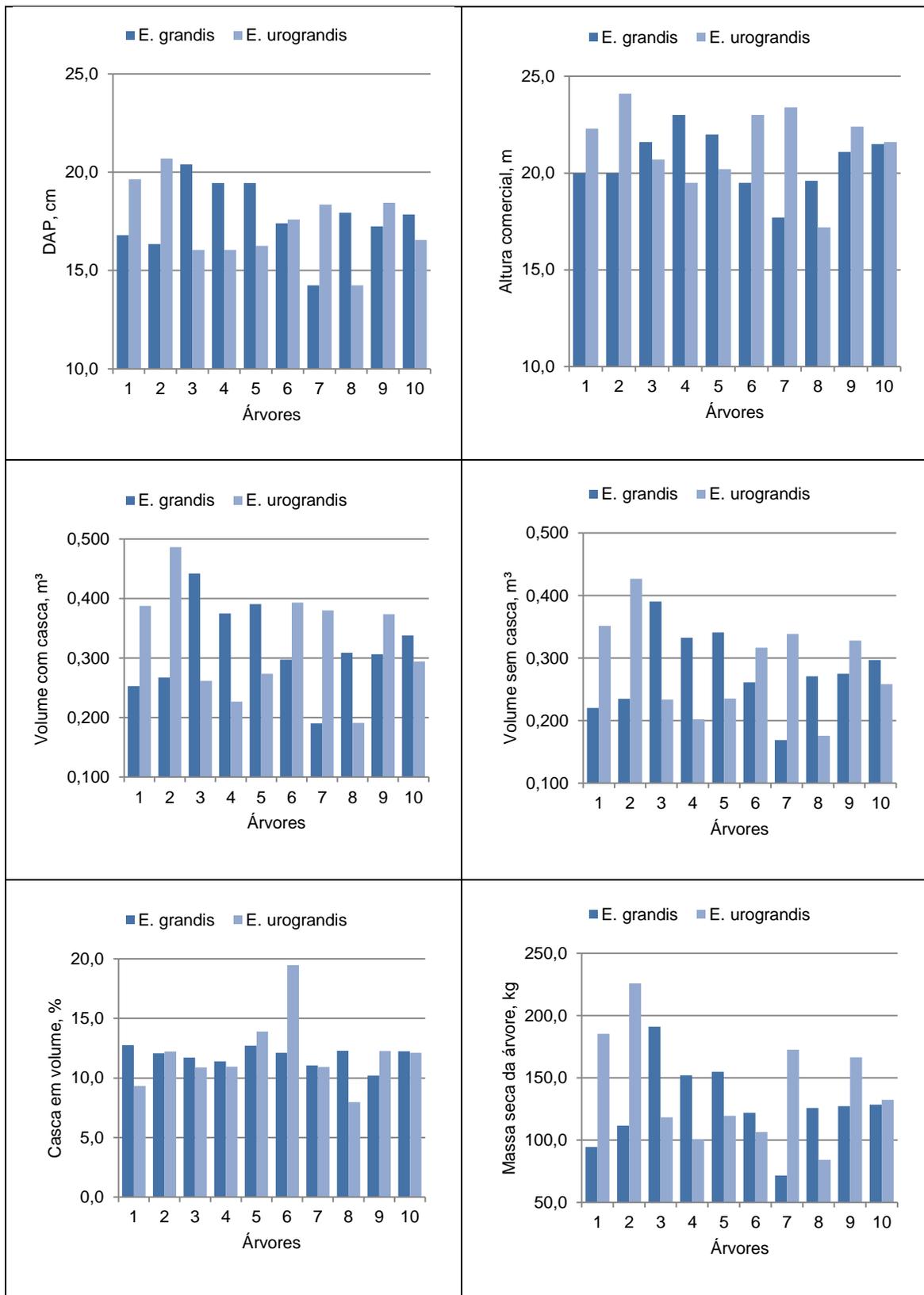


Figura 1. Resultados dendrométricos para árvores individuais

## 5.2 Densidade básica da madeira e densidade aparente dos cavacos

Os valores da densidade básica média da árvore e densidade aparente dos cavacos dos materiais *E. grandis* e *E. grandis* x *E. urophylla* constam na Tabela 2. Através do teste de Tukey pode-se observar que houve diferença significativa no nível de 5% em ambas as densidades, sendo que o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* foi o que apresentou maior densidade básica média da árvore (0,510 g/cm<sup>3</sup>) e densidade aparente dos cavacos (0,184 g/cm<sup>3</sup>) g/cm<sup>3</sup> em relação ao clone *E. grandis*.

A densidade básica da madeira pode variar consideravelmente entre espécies de 0,300 a 0,600 t/m<sup>3</sup> (GULLICHSEN E FOGELHOLM, 1999). As densidades básicas mais elevadas tem a vantagem de proporcionarem maior rendimento volumétrico do digestor, menor consumo específico de madeira para produção de uma tonelada de celulose e menor área florestal para uma tonelada de celulose. Como desvantagens podem ser citadas maior dificuldade de picagem e impregnação dos cavacos pelo licor de cozimento.

Santos e Sansígolo (2007) estudaram madeiras do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* de alta e baixa densidade e encontraram resultado da densidade básica da madeira mais elevada no valor de 0,508 g/cm<sup>3</sup> semelhante a encontrada neste trabalho (0,510 g/cm<sup>3</sup>).

A densidade aparente dos cavacos é outro parâmetro muito utilizado na indústria de polpação Kraft. A densidade aparente pode variar de 0,120 a 0,200 t/m<sup>3</sup> e depende de espécies, tamanho dos cavacos e distribuição do tamanho dos cavacos (GULLICHSEN E FOGELHOLM, 1999). A densidade aparente dos cavacos é muito utilizada na indústria para converter volume de cavacos alimentado ao digestor em massa para os cálculos da carga alcalina a ser utilizada nos cozimentos da madeira.

Tabela 2. Resultados médios da densidade básica média da árvore e densidade aparente dos cavacos.

Madeiras	<i>E. grandis</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Densidade básica média da árvore, g/cm <sup>3</sup>	0,456 b	0,510 a
Densidade aparente dos cavacos, g/cm <sup>3</sup>	0,174 b	0,184 a

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey no nível de 5%.

A Figura 2 mostra os resultados individuais das árvores para densidade básica média da árvore (dba) e densidade aparente dos cavacos (dcav). Pode ser

observado que as árvores do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* caracterizaram por apresentar valores mais elevados para estas duas formas de determinação da densidade da madeira. A variação entre árvore foi analisada através do coeficiente de variação (CV). Para o híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, a dba foi  $0,510 \text{ g/cm}^3$  (CV = 2,9%) e dcav foi  $0,184 \text{ g/cm}^3$  (CV = 2,6%) e os correspondentes valores para *E. grandis* foram dba =  $0,456 \text{ g/cm}^3$  (CV = 4,6%) e dcav =  $0,174 \text{ g/cm}^3$  (CV = 3,8%). Este resultado mostra maior variação nas árvores de *E. grandis* para estas duas densidades.

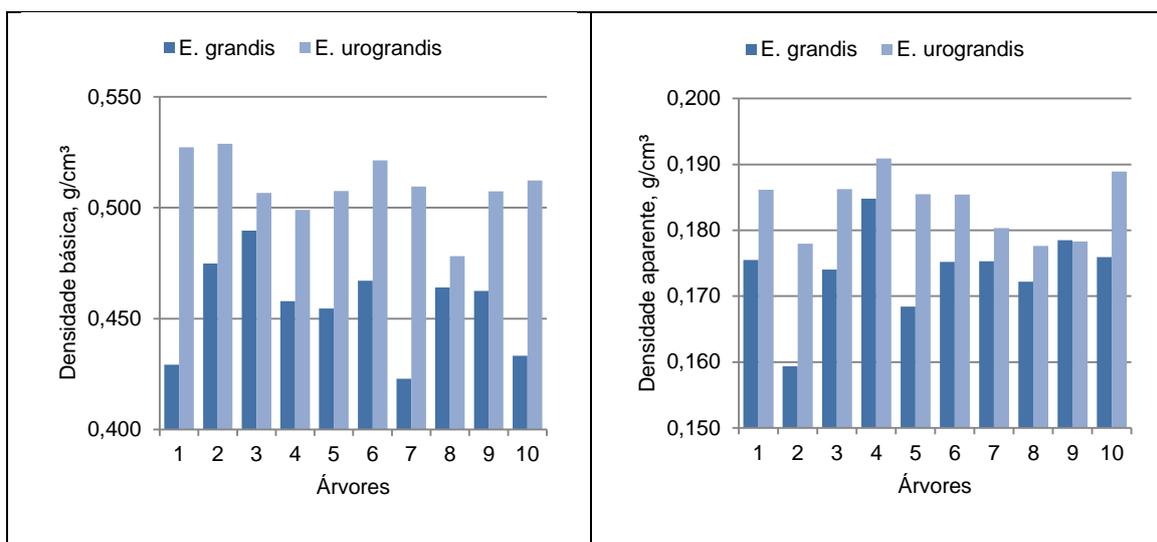


Figura 2. Resultados individuais das árvores para densidade básica média da árvore e densidade aparente dos cavacos

### 5.3 Composição química

Com relação a composição química foram analisados a solubilidade em NaOH 1%, os extrativos totais, o teor de lignina insolúvel e o teor de holocelulose dos materiais estudados conforme mostrado na Tabela 3. Observa-se que todos os resultados da composição química não apresentaram uma diferença significativa entre os materiais. Portanto, a densidade básica da madeira de *E. grandis* ( $0,456 \text{ g/cm}^3$ ) e *E. grandis* x *E. urophylla* ( $0,510 \text{ g/cm}^3$ ) não influenciou estatisticamente nos resultados da composição química.

Valores maiores de solubilidade em NaOH% indicam uma maior facilidade para a remoção das hemiceluloses em soluções alcalinas. Na polpação Kraft as hemiceluloses contribuem para o rendimento do processo e na resistência da polpa celulósica (GOMES, 2007).

Almeida e Silva (2001) estudaram dois clones de *Eucalyptus* híbridos (*urograndis*) de densidades 0,513 e 0,482 g/cm<sup>3</sup> que resultaram em teores de extrativos totais de 1,05 e 2,98%. Neste trabalho foram encontrados valores de 1,64 e 1,61% correspondentes a madeiras de baixa e alta densidade.

Vasconcelos Dias e Cláudio-da-Silva Junior (1985) concluíram que as 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. Shimoyama (1990), em estudos realizados com árvores de *Eucalyptus*, aos sete anos, não encontrou nenhuma correlação entre o teor de lignina e o valor de densidade básica da madeira.

Holocelulose é a combinação de celulose e hemiceluloses. No presente estudo, o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* resultou em um valor 77,01% de holocelulose. A madeira de baixa densidade apresentou uma leve tendência a apresentar um teor mais elevado (77,06%).

Tabela 3. Resultados médios da composição química dos materiais genéticos estudados.

Madeiras	<i>E. grandis</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Solubilidade em NaOH 1%, %	10,60 a	11,07 a
Extrativos totais, %	1,64 a	1,61 a
Lignina insolúvel,%	23,73 a	23,82 a
Holocelulose, %	77,06 a	77,01 a

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey no nível de 5%.

A Figura 3 mostra os resultados individuais das árvores para composição química. A solubilidade em NaOH1% e os teores de lignina, extrativos e holocelulose dos materiais se caracterizaram por apresentar um baixo coeficiente de variação entre as árvores. Os teores de extrativos apresentaram uma alta variação tanto para o *E. grandis* (CV=29,3%) como para o *E. grandis* e *E. urophylla* (CV=39,8%).

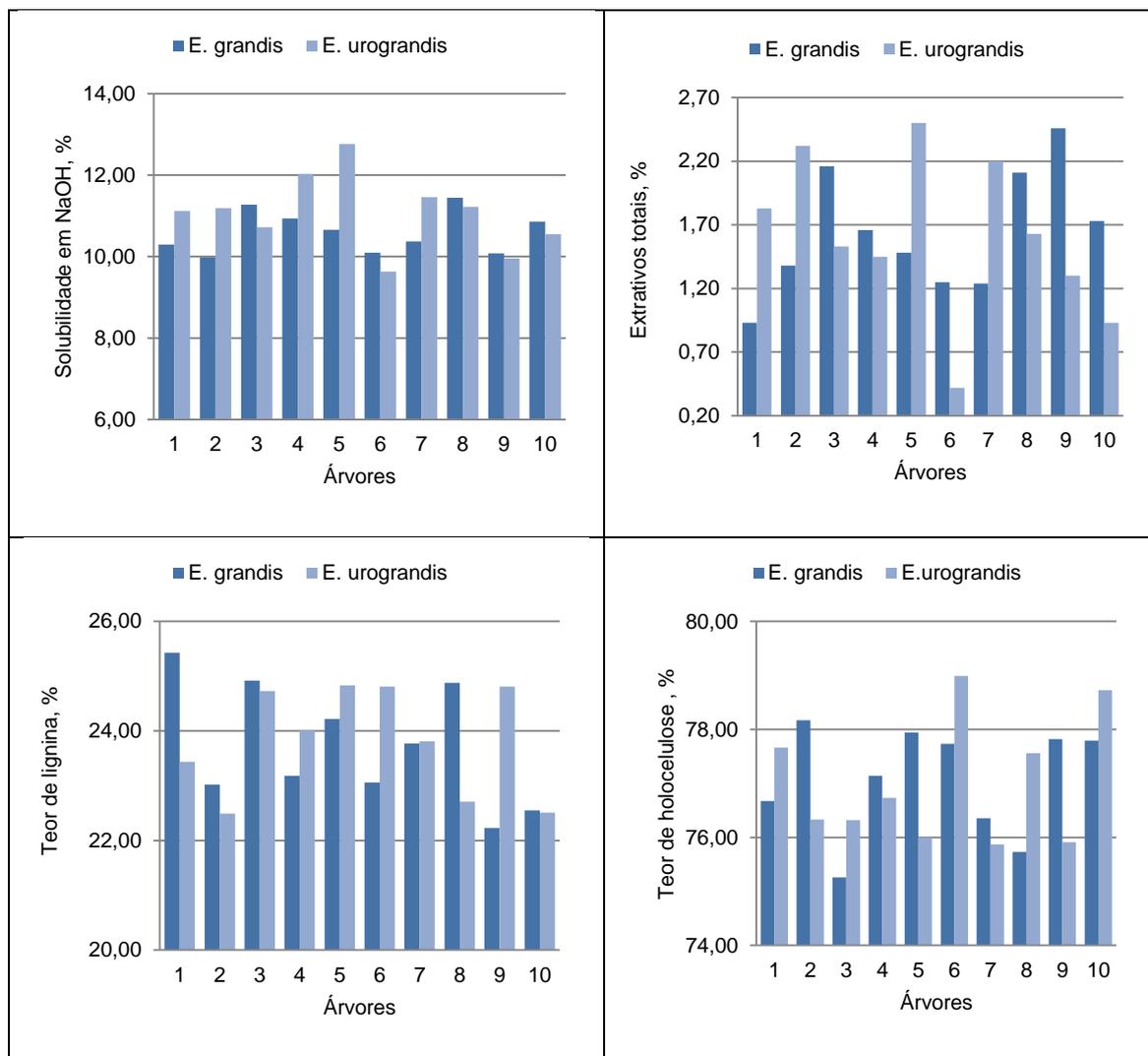


Figura 3. Resultados individuais das árvores para composição química

#### 5.4 Polpação Kraft das madeiras

A polpação Kraft do clone *E. grandis* e do híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* foram realizadas com álcali ativo de 14% e 16% e foram analisados o número kappa, os rendimentos bruto e depurado, teores de rejeitos base madeira e base celulose e consumo específico da madeira.

A Tabela 4 mostra os resultados médios da polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 14%. Através da análise do teste de Tukey no nível de 5% observa-se que houve uma diferença estatística significativa entre todos os resultados dos materiais estudados.

Tabela 4. Resultados médios da polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 14%.

Madeiras	<i>E. grandis</i>	<i>E. grandis x E. urophylla</i>
Número kappa	24,97 b	26,37 a
Rendimento bruto, %	54,23 b	57,05 a
Rendimento depurado, %	51,34 b	52,52 a
Rejeitos base madeira, %	2,90 b	4,54 a
Rejeitos base celulose, %	5,29 b	7,90 a
Cons. espec. madeira, m <sup>3</sup> /t cel.as.	4,286 a	3,740 b

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey no nível de 5%.

A Figura 4 mostra os resultados individuais das árvores na polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 14%.

A determinação do número kappa fornece o desempenho e a eficácia do processo de cozimento, pois informa o grau de deslignificação atingido na polpa. O resultado do número kappa para carga com álcali ativo 14% foi acima do esperado (17 - 18) variando de 23,3 a 27,1 para o clone *E. grandis* e 24,8 a 28,2 para o híbrido *E. grandis x E. urophylla*. Os coeficientes de variação foram baixos com valores de 5,8 e 3,7%, respectivamente.

Os resultados de rendimento bruto (Rb) e depurado (Rd) da celulose do *E. grandis* foram 54,23% e 51,34%, respectivamente. Ferreira et al. (1997) encontraram valores do Rb igual a 53,87% e Rd igual a 53,83% em madeira de *E. grandis* com 6 anos de idade. O teor de rejeito base madeira encontrado por estes autores foi 0,03%, bem abaixo do encontrado neste trabalho (2,90%). O híbrido *E. grandis x E. urophylla* apresentou um maior Rb (57,05%) e Rd (52,52%) da celulose. Os teores de rejeitos base madeira (4,54%) e base celulose (7,90%) também foram maiores no híbrido *E. grandis x E. urophylla*.

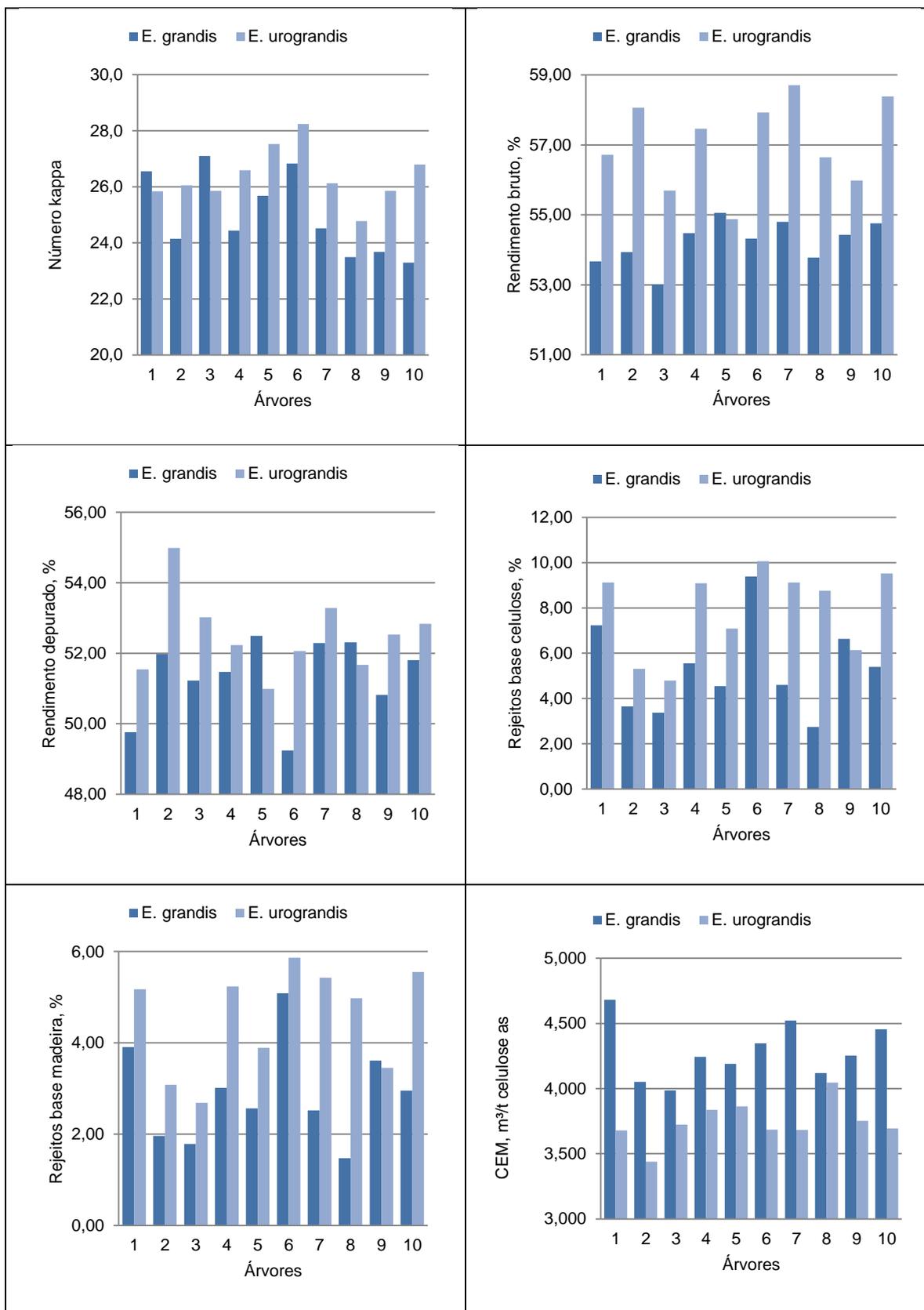


Figura 4. Resultados individuais das árvores na polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 14%.

O consumo específico da madeira (CEM) normalmente é expresso em volume (m<sup>3</sup>) de madeira sólida sem casca necessária para a produção de uma tonelada de celulose. Variáveis como a densidade básica da madeira, o rendimento da madeira e as perdas de madeira ocorridas durante a produção de cavacos podem afetar o CEM (MORAES et al., 2013).

O CEM da madeira de menor densidade resultou em um valor maior que o de maior densidade. Na Figura 4 é possível observar que todas as árvores de menor densidade (*E. grandis*) apresentaram um maior CEM quando comparado com as de maior densidade (*E. grandis* x *E. urophylla*).

A polpa foi submetida ao classificador de fibras *Bauer Mcnett*. Os resultados apresentados na Tabela 5 não se diferiram estatisticamente. A maior porcentagem de fibras ficou retida nas peneiras de 16-30 e 30-50 mesh com os respectivos valores para o *E. grandis* de 44,50% e 39,00% e para o *E. grandis* x *E. urophylla* de 44,85% e 37,55%.

A porcentagem de finos (>200 mesh) apresentou um valor de 5,30% para o *E. grandis* e 6,10% para o *E. grandis* x *E. urophylla*. Os finos na madeira são basicamente células de parênquima, mas na celulose incluem também fragmentos de fibras e de elementos de vasos que são gerados nas operações como picagem, bombeamento, mistura dinâmica, prensagem, desaguamento, etc. (FOELKEL, 2007).

Tabela 5. Comprimento das fibras na celulose (%) do cozimento com carga de álcali ativo 14%.

Peneiras, mesh	<i>E. grandis</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
> 16	0,60 a	0,60 a
16 - 30	44,50 a	44,85 a
30 - 50	39,00 a	37,55 a
50 - 100	9,30 a	9,35 a
100 - 200	1,30 a	1,55 a
< 200	5,30 a	6,10 a

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey no nível de 5%.

Devido ao alto valor do número kappa foi realizado um novo cozimento com o álcali ativo de 16% como pode-se observar na Tabela 6, que mostra os resultados médios na polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 16%.

Diferente do cozimento com álcali ativo 14% o resultado dos rendimentos bruto e depurado da celulose não apresentaram diferença estatística significativa neste cozimento com álcali ativo 16 %, apresentando um resultado inferior nos dois materiais (*E. grandis* e *E. grandis* x *E. urophylla*) comparando ao cozimento anterior (álcali ativo 14%). Portanto, neste cozimento o número kappa resultou num valor esperado conforme a literatura não apresentando diferença significativa entre os materiais. Os coeficientes de variação referentes ao número kappa foram de 5,18% para o clone *E. grandis* e 8,08% para o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*. Gomide et al. (2005) afirmam que uma demanda de altas cargas de álcali constitui uma característica altamente desfavorável, uma vez que provoca perda de rendimento, degradação mais intensa das cadeias dos carboidratos, sobrecarga da caldeira de recuperação e aumento do custo de produção.

Os teores rejeitos base madeira e base celulose se diferiram estatisticamente, sendo que o híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* também apresentou resultados superiores que o clone *E. grandis*.

Tabela 6. Resultados médios na polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 16%.

Madeiras	<i>E. grandis</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Número kappa	17,54 a	18,33 a
Rendimento bruto, %	50,97 a	52,44 a
Rendimento depurado, %	50,04 a	50,87 a
Rejeitos base madeira, %	0,86 b	1,58 a
Rejeitos base celulose, %	1,69 b	3,01 a
Cons. espec. madeira, m <sup>3</sup> /t cel.as.	4,401 a	3,869 b

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey no nível de 5%.

A Figura 5 mostra os resultados individuais das árvores na polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 16%.

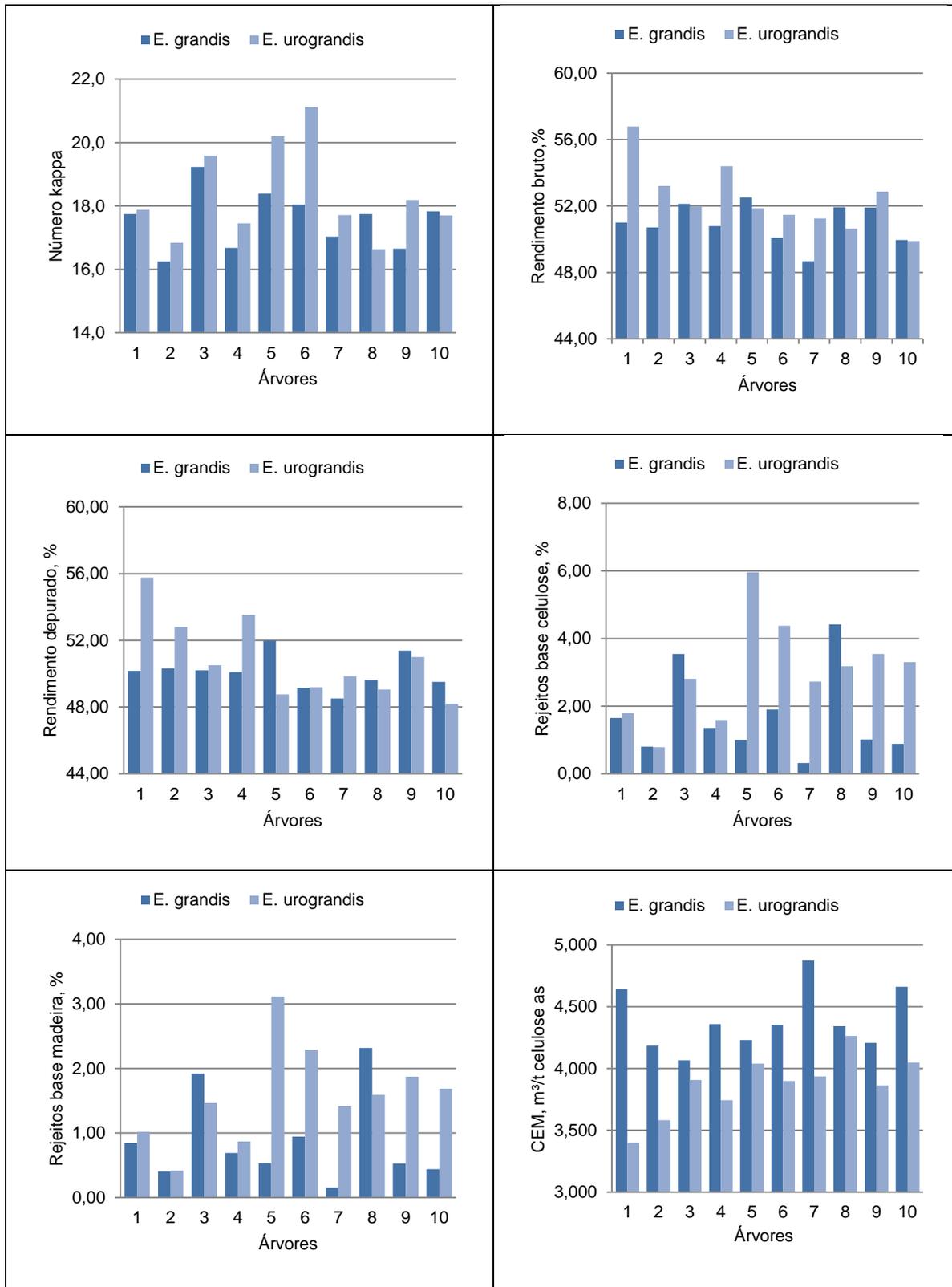


Figura 5. Resultados individuais das árvores na polpação Kraft utilizando carga de álcali ativo de 16%.

O CEM apresentou diferença estatística entre os materiais com valores superiores no clone *E. grandis*. Assim como mostrado na Figura 4, o CEM com carga de álcali ativo 16% (Figura 5) também se apresentou maior em todas as árvores do clone *E. grandis* (menor densidade). Madeiras com densidade mais alta são mais recomendadas para o uso em indústrias de celulose e papel por apresentarem maior rendimento e menor consumo específico da madeira, utilizando menos madeira e produzindo mais celulose.

O material com a densidade mais elevada (*E. grandis* x *E. urophylla*) resultou em um maior teor de rejeito base madeira e celulose em ambas as cargas de álcali ativo (14 e 16%). A densidade básica da madeira influenciou no rendimento da celulose apenas na carga de álcali ativo 14%, no qual houve diferença entre os resultados dos materiais.

Os resultados do rendimento encontrado neste estudo condizem com a literatura, onde Foelkel (2013) afirma que os rendimentos de madeiras de eucalipto do cozimento kraft variam entre 45 a 57% levando em consideração o tipo de madeira, número kappa desejado, tecnologias utilizadas e otimizações nas variáveis do processo. No Brasil estabelece-se um rendimento de 50% como limite inferior para seleção de clones na produção de celulose e papel (GOMIDE et al.,2005).

Tabela 7. Comprimento das fibras na celulose (%) do cozimento com carga de álcali ativo 16%.

Peneiras, mesh	<i>E. grandis</i>	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
> 16	0,70 a	0,50 a
16 - 30	42,55 a	48,25 a
30 - 50	40,25 a	36,05 a
50 - 100	9,05 a	9,10 a
100 - 200	2,00 a	2,25 a
< 200	5,45 a	3,85 a

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey no nível de 5%.

O resultado da classificação das fibras com carga de álcali ativo 16%, observadas na Tabela 7, não apresentaram diferença significativas entre eles e as maiores percentagens de fibras ficaram retidas nas duas peneiras entre 16 a 50 mesh. A percentagem de finos foi de 5,45% para o *E. grandis* e 3,85% para o *E. grandis* x *E. urophylla*.

Grande (2012) classificou fibras pelo método de Bauer Mcnett utilizando amostras de celulose provenientes de cavacos grandes, de cavacos pequenos e de cavacos controle e os resultados mostraram que a maior quantidade de fibras ficou retida nas peneiras com malha entre 16 a 50 mesh.

## 6 CONCLUSÕES

Com este trabalho pode-se concluir que:

O híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* se caracterizou por apresentar maior densidade básica da madeira e densidade aparente da árvore e o *E. grandis* menores densidades.

Os resultados da composição química dos materiais não apresentaram diferença estatística entre eles.

No cozimento utilizando o álcali ativo 14% resultou em um valor do número kappa superior ao esperado (NK= 17-18). Os rendimentos bruto e depurado foram maiores para o material de alta densidade.

Os rendimentos da celulose álcali ativo 16% não apresentaram diferença significativa entre os materiais. O valor do número kappa foi o esperado de 17,54 para o *E. grandis* e 18,33 para o *E. grandis* x *E. urophylla*.

As madeiras com densidade mais alta apresentaram um menor consumo específico da madeira, ou seja, utiliza-se menor volume de madeira em m<sup>3</sup> para produção de uma tonelada de celulose.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA). Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2012.pdf>>. Acesso em: 10/10/2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). Disponível em: <[http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13\\_BR.pdf](http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf)>. Acesso em: 05/01/2014.

BARRICHELO, L.E.G. & BRITO, J.O. A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel. **PRODEPEF**. Série divulgação, Brasília, (13): 1-145, 1976.

BARROSO, D. G. **Qualidade de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. urophylla* produzidas em tubetes e em blocos prensados com diferentes substratos**. Campo do Goytacases: Universidade Estadual do Norte Fluminense, 1999. 79p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, 1999.

BUSNARDO, C.A.; FOELKEL, C.E.B.; ZVINAKEVICIUS, C.; KAJIYA, S.; ALVES, E.E. Estudo comparativo da qualidade da madeira de algumas espécies de eucaliptos tropicais. In: CONGRESSO NACIONAL ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 11., 1978, São Paulo. **Trabalhos técnicos**. São Paulo: ABTCP, 1978. p.191-197.

BUSNARDO, C.A.; GONZAGA, J.V.; FOELKEL, C.E.B.; VESZ, J.B.V. Em busca da qualidade ideal da madeira do eucalipto para produção de celulose. II. Inter-relações entre propriedades das árvores e de suas madeiras. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., 1983, São Paulo. **Trabalhos técnicos**.

São Paulo: ABCP, 1983. v.1, p.45-69.

CARVALHO, H. G. **Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose kraft branqueada de eucalipto.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1986. 104 p. (Tese de Mestrado)

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, 31.,1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1998. p.367-381.

CARVALHO, A. M.; NAHUZ, M. A. R. Interferência na qualidade e rendimento de polpa celulósica de eucalipto devido ao uso múltiplo da madeira. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 242-256, jul./dez. 2004.

FANTUZZI NETO, H. **qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft.** 2012. 105p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa 2012.

FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; KLEIN, J. E. M. Produção de florestas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em segunda rotação, conduzidas com um broto por touça e submetidas a interplântio. **Ciência florestal**, Santa Maria, v.3, n.1, p.185-201, 1993.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M. & BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, (2/3): 65-74. 1971.

FOELKEL, C. E. B.; MOURA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **O Papel**, p. 35-40, maio, 1990.

FOELKEL, C. E. B. As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose Kraft para a fabricação de papel. In: **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2007. 48 p. Disponível em: < [http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT03\\_fibras.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT03_fibras.pdf)> Acesso em: 15 dez. 2013.

FOELKEL, C.E.B. Individualização das fibras da madeira do eucalipto para a produção de celulose Kraft. In: **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2009a. 107p. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT16\\_IndividualizacaoFibras.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT16_IndividualizacaoFibras.pdf)> Acesso em: 20 mai. 2014.

FOELKEL, C.E.B. Propriedades papeleiras das árvores, madeiras e fibras celulósicas do eucalipto. In: **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2009b. 111p. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT14\\_PropPapeleiras.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT14_PropPapeleiras.pdf)> Acesso em: 20 mai. 2014.

FOELKEL, C. E. B. Aspectos práticos e conceituais sobre a fabricação de celulose de mercado do tipo kraft branqueada a partir de madeira de eucalipto In: **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2013. 111 p. Disponível em: <[http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT31\\_ProcessoKraftEucalipto.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT31_ProcessoKraftEucalipto.pdf) > Acesso em: 18 dez. 2013.

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil**. 2ª Aproximação. Belo Horizonte: Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado, 1978. 66p.

GOMES, A.F. Avaliação **das características da madeira e da polpa de *Eucalyptus* mediante aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. 141 pp. 2007.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. de; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005.

GONZAGA, J.V. **Qualidade da madeira e da celulose kraft de treze espécies de *Eucalyptus***. Viçosa: UFV. 1983. 119 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa, 1983.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Avaliação da madeira e da polpação kraft em clones de eucaliptos. **R. Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 6, p.1175-1185, 2009.

GRANDE, J. P. **Dimensões de cavacos industriais de eucalipto e relações com polpação, resistência e morfologia de fibras na polpa**. 2012. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal/Tecnologia da Madeira) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

GULLICHSEN, J.;C.J. FOGELHOLM. **Chemical Pulping**. Atlanta: TAPPI Press, Helsinki. 693 p. 1999.

HILLIS, W.; BROWN, A. G. **Wood quality and utilization**. In: *Eucalyptus for Wood Productions*. ed. Australia, p. 260-290, 1978.

MALLAN, F. A. *Eucalyptus* improvement for lumber production. In Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria, 1995, São Paulo. Anais... São Paulo: IPEF/IPT, 1995. P.1-19.

MILAGRES, F. R. **Avaliação da madeira de híbridos de *Eucalyptus globulus* com *E. grandis* e *E. urophylla*, para produção de celulose, utilizando espectroscopia nir**. 2009. 142f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2009.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. Sociedade Brasileira de Silvicultura, São Paulo, SP. 2000.

MORAES, F. A. B; PIRATELLI, C. L.; ACHCAR, J. A. Condições ideais para o consumo específico de madeira na produção de celulose. *Prod.* [online]. ahead of print, pp. 0-0. Epub Sep 24, 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/pdf/prod/2013nahead/aop\\_prod0497.pdf](http://www.scielo.br/pdf/prod/2013nahead/aop_prod0497.pdf)>

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para construção civil.** 1997.429p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, J. T. da S.; SILVA, J. de C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.381-385, 2003.

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

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. de. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.6, p.901-909, 2004.

ROWELL, W.C. **Handbook of wood chemistry and wood composites.** Boca Raton, CRC Press, 2005. 487 p.

SAMISTRARO, G. **Propriedades químicas e físicas da polpa e papel kraft por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).** 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

SANTOS, C. R. **Métodos não-convencionais para determinação de celulose como parâmetro de seleção de árvores matrizes visando a produção de polpa kraft-AQ.** 2000. 117f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeira)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SANTOS, S.; SANSÍGOLO, C. A. Influência da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa branqueada. **Ciência Florestal**, v.7, n.1, p.53-63, 2007.

SHIMOYAMA, V. R. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* sp.** 1990. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1990.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira.** 2002. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, M. G. **Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada.** 2011. 91p. Dissertação (Mestrado em

Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

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

SMOOK, G. A. **Manual para técnicos de pulpa y papel**. Vancouver: A. Wilde, 397p. 1990.

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

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

VASCONCELOS DIAS, R. L. ; CLÁUDIO-DA-SILVA JÚNIOR, E. A influência da densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* em suas características químicas, e propriedades de polpação do papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP – Semana do papel, 18. **Anais**. São Paulo, 1985. P.31-55.

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