

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA  
MADEIRA E DA POLPA DE *Eucalyptus*  
MEDIANTE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS NÃO  
DESTRUTIVOS NA ÁRVORE VIVA**

**ADRIANA DE FÁTIMA GOMES**

**2007**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Gomes, Adriana de Fátima.

Avaliação das características da madeira e da polpa de *Eucalyptus* mediante a aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva / Adriana de Fátima Gomes.

-- Lavras : UFLA, 2007.

124 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2007.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Métodos não destrutivos. 2. *Eucalyptus*. 3. Polpação. 4. Madeira. 5.

Química da madeira. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 676.121

**ADRIANA DE FÁTIMA GOMES**

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA  
E DA POLPA DE *Eucalyptus* MEDIANTE A  
APLICAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS NA  
ÁRVORE VIVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador  
Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

**Lavras  
Minas Gerais- Brasil  
2007**

**ADRIANA DE FÁTIMA GOMES**

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA  
E DA POLPA DE *Eucalyptus* MEDIANTE A  
APLICAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS NA  
ÁRVORE VIVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 7 de março de 2007

Prof. Dr. José Tarcísio Lima           UFLA  
Profª. Dra. Maria Lúcia Bianchi       UFLA  
Profª. Dra. Ana Márcia M. L. Carvalho   UFVJM

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho  
UFLA  
(Orientador)

**Lavras  
Minas Gerais- Brasil  
2007**

**DEDICO**

A Deus,

**OFEREÇO**

Aos meus pais, Jorge e Carminha.  
Aos meus irmãos, Cristiane, Claudia e  
Douglas.  
Ao meu sobrinho Davi.  
Ao meu noivo, Reginaldo.  
A amiga Gisely.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Paulo Fernando Trugilho, Jorge Luiz Colodette e José Lívio Gomide, pelo apoio e pela grande contribuição no decorrer deste trabalho e, acima de tudo, pela confiança depositada em mim.

À Capes e à Fapemig, pelo apoio financeiro.

À Cenibra (Celulose Nipo-Brasileira S.A.), nas pessoas do Everton e Antônio Marcos.

Aos amigos de Lavras e Viçosa que fizeram parte da realização deste trabalho.

A todos os alunos, funcionários e professores do Laboratório de Celulose e Papel/UFV e Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira de Lavras/UFLA.

## SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	i
GENERAL ABSTRACT.....	ii
<b>CAPÍTULO 1 Avaliação das características da madeira e da polpa de <i>Eucalyptus</i> mediante a aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva</b>	01
1 Introdução geral.....	01
2 Referencial teórico.....	03
2.1 Qualidade da madeira para produção de celulose e papel.....	03
2.1.1 Densidade básica.....	03
2.1.2 Características morfológicas.....	04
2.1.3 Composição química da madeira.....	05
2.1.4 Uniformidade da madeira.....	09
2.2 Técnicas convencionais (destrutivas) de avaliação dos índices de qualidade da madeira para fabricação de celulose e papel.....	09
2.3 Técnicas não convencionais (não destrutivas) de avaliação dos índices de qualidade da madeira para fabricação de celulose e papel.....	13
2.3.1 Espectroscopia de infravermelho próxima para avaliação da qualidade da madeira.....	13
2.3.2 Extensômetro.....	15
2.3.3 Temporizador de ondas de tensão ( <i>stress wave timer</i> ).....	16
2.3.4 Resistograph®.....	16
2.3.5 Pilodyn®.....	17
2.4 Relação entre madeira, polpa e propriedades do papel.....	17
3 Referências Bibliográficas.....	19
<b>CAPÍTULO 2 Caracterização da madeira por métodos não destrutivo</b>	i
Resumo.....	i
Abstract.....	ii
1 Introdução .....	24
2 Material e métodos.....	25

2.1 Material Biológico.....	25
2.2 Local de experimentação.....	26
2.3 Métodos Não Destrutivos.....	27
2.3.1 Extensômetro.....	27
2.3.2 Resistógraph®.....	27
2.3.3 Pilodyn®.....	28
2.3.4 Temporizador de ondas de tensão ( <i>stress wave Timer</i> ).....	29
2.3.5 Espectroscopia de infravermelho próximo (NIR).....	30
2.3.5.1 Amostras.....	31
2.3.5.2 Calibração e geração de modelos de predição.....	32
2.4. Análise estatística.....	34
3 Resultados e Discussão.....	35
3.1 Extensômetro, Resistógraph®e <i>Pilodyn</i> ®.....	35
3.2 Ondas de Tensão.....	42
3.3 Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIRS).....	47
4 Conclusões.....	52
5 Referências Bibliográficas.....	54
<b>CAPÍTULO 3 Avaliação da madeira por métodos destrutivos</b>	<b>i</b>
Resumo.....	i
Abstract.....	ii
1 Introdução.....	56
2 Material e Métodos.....	58
2.1 Material Biológico.....	58
2.2 Local de experimentação.....	58
2.3 Métodos destrutivos.....	58
2.3.1 Densidade básica da madeira.....	58
2.3.2 Determinação das dimensões das fibras e vasos.....	59
2.3.3 Análise da composição química da madeira.....	59
2.3.4 Preparo e classificação dos cavacos.....	60
2.3.5 Polpação Kraft.....	60
2.3.6 Lavagem e depuração.....	62
2.3.7 Determinação do número kappa e viscosidade da polpa celulósica ..	62
2.4 Análise estatística.....	63
3 Resultados e Discussão.....	64
3.1 Densidade básica e morfologia das fibras.....	64
3.2 Composição química da madeira.....	68
3.3 Polpação Kraft.....	72
3.4 Polpação <i>versus</i> composição química.....	76
4 Conclusões.....	90
5 Referências Bibliográficas.....	91

<b>CAPÍTULO 4 Relação entre as características não destrutivas e destrutivas da madeira</b>	i
Resumo.....	i
Abstract.....	ii
1 Introdução.....	94
2 Material e Métodos.....	96
2.1 Material biológico.....	96
2.2 Local de experimentação.....	96
2.3 Análise Estatística.....	96
3 Resultados e Discussão.....	97
4 Conclusão.....	122
5 Referências Bibliográficas.....	123

## RESUMO GERAL

GOMES, Adriana de Fátima. **Avaliação das características da madeira e da polpa de *Eucalyptus* mediante a aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva**. 2007. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

A madeira de eucalipto é a principal matéria-prima utilizada na produção de celulose kraft branqueada no Brasil. Os métodos convencionais para se avaliar a qualidade da madeira para a produção de celulose incluem métodos laboratoriais demorados e caros de produção e determinação da qualidade da madeira. A avaliação da qualidade da madeira por técnicas mais simples e rápidas é uma necessidade fundamental na qualificação de florestas de *Eucalyptus* destinadas à fabricação de celulose. O objetivo da realização deste estudo foi caracterizar seis clones de eucalipto e estudar diferentes técnicas não destrutivas da madeira e correlacioná-las com os métodos convencionais de análise laboratorial. As amostras foram coletadas nas regiões de Cocais, Guanhães, Rio Doce-Ipaba e Santa Bárbara, no estado de Minas Gerais, sendo compostas por cinco árvores-amostra por clone, com 3 anos de idade, em plantio comercial e com espaçamento de 3,0 x 3,3. Os clones foram caracterizados por diferentes métodos não destrutivos (extensômetro, resistograph®, pilodyn®, temporizador de ondas de tensão e NIRS) utilizados na árvore viva, a 1,3 m da altura do solo (DAP) e por métodos destrutivos (densidade básica, morfologia das fibras, composição química da madeira e polpação), realizados em laboratório, após a derrubada das árvores. Os resultados mostraram que os métodos do extensômetro e do *pilodyn* são viáveis para a predição de densidade básica da madeira. O valor de deformação residual longitudinal (DRL), obtido por meio do extensômetro, apresentou boa correlação com o rendimento depurado e o teor de celulose. Entre as características avaliadas para caracterização da polpa celulósica, a densidade básica e a relação siringila/guaicila (S/G) da lignina foram as que mais influenciaram a qualidade da polpa. O número kappa e os rendimentos em celulose apresentaram correlações significativas com a relação S/G. A técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS) mostrou-se viável para estimar a relação S/G da lignina e a densidade básica da madeira.

---

Comitê Orientador: Paulo Fernando Trugilho-UFLA (Orientador), Jorge Luiz Colodette-UFV, José Tarcísio Lima-UFLA e José Reinaldo Moreira da Silva –UFLA (Co-orientadores)

## GENERAL ABSTRACT

GOMES, Adriana de Fátima. **Evaluation of the characteristics of the wood and of the pulp of *Eucalyptus* by the application nondestructive methods in living trees.** 2007. 124 p. Dissertation (Master Program in Forest Engineer) - Federal University of Lavras, Lavras, MG.

The eucalyptus wood is the main raw material used for bleached kraft pulp production in Brazil. The conventional methods to evaluate the wood quality for cellulose production include slow and expensive laboratorial methods of production and determination of the wood quality. The quality evaluation of the wood for simpler and faster techniques is a fundamental need in the qualification of *Eucalyptus* forests destined to the cellulose production. The objective of this study was characterizing six *Eucalyptus* clones and studying different wood non-destructive techniques and to correlate them with the conventional methods of laboratorial analysis. The samples were collected from commercial plantations (3,0 x 3,33m line spacing) in the areas of Cocais, Guanhães, Rio Doce-Ípaba and Santa Bárbara, in the state of Minas Gerais, with five three-year-old sample-trees by clone being used. The clones were characterized by different non-destructive methods (extensometer, resistograph®, pilodyn®, stress waves time and NIRS), using living trees at 1,3 m from the ground (DAP) and by destructive methods (basic density, morphology of the fibers, wood chemical composition and pulping), carried out in a laboratory on the whole chipped trees. The results showed that the extensometer and pilodyn methods are viable for the prediction of wood basic density. The value of longitudinal residual strain (DRL), obtained through the extensometer, presented good correlation with the pulping yield and the cellulose content. Among the characteristics evaluated for characterization of the cellulose pulp, it was the basic density and the lignin syringyl/guaicyl (S/G) ratio that influenced the pulp quality the most. The kappa number and the pulping yield showed significant correlations with the S/G ratio. The spectroscopy near infrared (NIRS) showed viable for estimation of lignin S/G ratio and wood basic density.

---

Guidance Committee: Paulo Fernando Trugilho – UFLA (Supervisor),  
Jorge Luiz Colodette – UFV, José Tarcísio Lima – UFLA e José  
Reinaldo Moreira da Silva – UFLA (Co-supervisors)

## **CAPÍTULO 1**

### **AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA E DA POLPA DE *EUCALYPTUS* MEDIANTE A APLICAÇÃO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS NA ÁRVORE VIVA**

#### **1 INTRODUÇÃO GERAL**

O programa brasileiro de investimentos do setor de celulose e papel, para o período 2003-2012, foi orçado em US\$ 14,4 bilhões. Seu objetivo é duplicar as exportações de celulose no período, manter a participação do país no mercado internacional de papel e suprir plenamente a expansão da demanda doméstica de papel, colaborando, assim, para a redução das importações. Para que essas metas sejam atingidas, três fatores foram considerados essenciais pela Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa): a expansão da base florestal, a ampliação da capacidade industrial e a promoção da competitividade (Gazeta Mercantil, 2005).

A madeira das espécies de eucalipto é a principal matéria-prima usada no processo de fabricação de celulose kraft branqueada no Brasil. Pelas suas características químicas e morfológicas das fibras, ela é largamente usada na fabricação de papéis de escrita (imprimir e escrever) e absorventes (higiênico, toalha, guardanapo, lenços, etc).

Cada um desses segmentos de produtos tem suas peculiaridades e exigências de qualidade da celulose (Carpim et al., 1987; Demuner & Bertolucci, 1993; Silva Jr. et al. 1996; Dinus & Welt, 1997; Foelkel, 1997).

Por sua vez, as fábricas procuram diferenciar seus produtos para manter e conquistar fatias de mercado num ambiente altamente competitivo. São duas as principais alternativas de diferenciação das polpas celulósicas: a qualidade da madeira e o processo de produção.

Os métodos convencionais para se avaliar a qualidade da madeira para a produção de celulose incluem produção laboratorial da celulose e determinação da constituição química dos principais componentes da madeira, como teor de lignina, carboidratos e extrativos. Estes métodos são demorados, caros e trabalhosos, o que os torna inviáveis em grande número de amostras. Normalmente, apenas de 8 a 10 amostras podem ser analisadas para a determinação do teor de lignina, por homem/dia e, dificilmente, mais do que 4 amostras podem ser processadas, por homem/dia, para a produção de celulose em escala laboratorial.

A necessidade de realização de centenas de análises das propriedades da madeira como critério de seleção de clones para programas de melhoramentos florestais provocou, recentemente, forte demanda por novos métodos de avaliação. Assim, a busca por novos métodos, que sejam mais rápidos e econômicos, permitindo o processamento de grande número de amostras com confiabilidade, tem aumentado nos últimos anos. Esses métodos permitem o processamento de grande número de amostras, o que acelera a seleção de material genético no campo, reduzindo o custo e o tempo do melhoramento.

O objetivo geral deste trabalho foi estudar diferentes técnicas não destrutivas da madeira e correlacioná-las com os métodos convencionais de análise laboratorial.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Qualidade da madeira para a produção de celulose e papel

#### 2.1.1 Densidade básica

A densidade básica é uma propriedade chave na produção de celulose e de produtos sólidos da madeira. A facilidade de sua determinação tem encorajado seu uso como índice de qualidade. Segundo Lelis & Silva (1993), citados por Queiroz (2002), a densidade básica é uma propriedade física que retrata a qualidade da madeira, por ser influenciada por diversos fatores inerentes a cada gênero, espécie e árvore, não sendo aconselhável a sua utilização isolada como parâmetro de qualidade.

Foelkel et al. (1977) recomendam o uso de madeiras de eucalipto para a produção de celulose kraft com densidade básica na faixa de 450-550 kg/m<sup>3</sup>.

A densidade da madeira é influenciada por diversos fatores, tais como: espessura da parede celular, quantidades de vasos e de parênquima, dimensões da fibra, teor de extrativos, origem da semente, condições edafoclimáticas, sistema de implantação e condições da floresta. Ela varia em função da taxa de crescimento, local de origem, espaçamento, idade, procedência, entre gêneros, espécie, entre árvores da mesma espécie e, ainda, dentro da mesma árvore, no sentido base-topo e medula-casca (Foelkel et al., 1975; Ferreira & Kageyana, 1978; Rocha et al., 1983; Tomazello Filho, 1985; Souza et al., 1986; Busnardo et al., 1987; Kibblewhite et al., 1998, citados por Foelkel et al., 1990).

As empresas procuram desenvolver madeira de rápido crescimento e de maior densidade para aplicação na indústria de celulose e papel e na indústria de produtos sólidos. No entanto, a melhoria de um desses índices pode impactar negativamente o outro. Além disso, as tentativas de melhoramento ou explicitação de muitos traços, ao mesmo tempo, são onerosas e de resultados incertos. Essas constatações, entretanto, não são universais, pois, nos programas

de melhoramento das espécies de eucalipto, tanto a densidade básica como as produtividades geralmente aumentaram. Considerando o grande impacto do crescimento no lucro, os esforços nos cruzamentos estão mais focados na produtividade da floresta.

### **2.1.2 Características morfológicas**

Os componentes anatômicos das madeiras de folhosas são os elementos de vasos, responsáveis pela condução da seiva; os fibrotraqueídeos e as fibras libriformes, responsáveis pela resistência mecânica da madeira; os tecidos de reservas são os responsáveis pelo armazenamento de compostos e os raios, pela transferência do material no sentido radial.

As fibras de eucalipto têm seu comprimento variando de 0,75 a 1,30 mm, mostrando uma média próxima de 1 mm. São consideradas fibras curtas, quando comparadas às fibras de coníferas (traqueídeos), denominadas de fibras longas, as quais apresentam comprimento três a cinco vezes superior.

Os parâmetros usualmente considerados nos estudos tecnológicos das fibras são definidos por quatro dimensões fundamentais: comprimento, largura, diâmetro e espessura da parede.

Segundo Florsheim (1992) e Urbinati (1998), o comprimento e a espessura da parede celular das fibras são os parâmetros anatômicos mais intensamente estudados, pois as variações nas dimensões das fibras podem ter influência na qualidade da madeira e na produção de papel.

Muitas investigações sobre a variação anatômica no sentido radial têm mostrado que o comprimento celular próximo à medula é pequeno, tanto para coníferas quanto para folhosas de clima temperado, mas aumenta rapidamente nos primeiros anéis e estabiliza-se após atingir um valor máximo (Urbinati, 1998).

Florsheim (1992) e Tomazello Filho (1985), citados por Queiroz (2002), observaram que o diâmetro do lume e a espessura da parede das fibras tendem a aumentar no sentido radial, bem como um aumento no diâmetro tangencial dos vasos, uma diminuição no número de vasos/mm<sup>2</sup> no sentido radial. Estes autores observaram estabilidade na frequência de vasos/mm<sup>2</sup> a partir da posição de 75% da altura do tronco e aumento no comprimento das fibras no sentido medula-casca, atingindo valores acima de 1,0 mm a partir da posição 25%-50% do raio.

Almeida et al. (1997) relataram que o maior volume de licor de cozimento no interior do lume das fibras permite uma maior homogeneidade de concentração do licor no interior das mesmas, pois a difusão de álcali através da parede celular é um processo moroso e incapaz de suprir, na mesma proporção, as necessidades de álcali consumido por reações com os componentes da madeira à temperatura de polpação. Um maior diâmetro do lume mantém uma maior quantidade de massa de álcali no licor em direção à parede celular e, conseqüentemente, facilita a deslignificação. Segundo os mesmos autores, a relação volume médio de lume/área interna média das fibras parece estar diretamente relacionada à facilidade de deslignificação da madeira e, por conseqüência, diretamente relacionada ao rendimento depurado. Estes mesmos pesquisadores concluíram que a densidade básica, apesar de ser um parâmetro de qualidade importante, é insuficiente para indicar o possível comportamento da madeira frente ao processo de polpação, mesmo estando associada à composição química.

### **2.1.3 Composição química da madeira**

As madeiras de folhosas são constituídas por 70% de carboidratos, 25%-30% de lignina e 3%-4% de extrativos. O termo holocelulose é aplicado à fração da madeira constituída pela celulose mais as hemiceluloses.

A celulose, principal componente da parede celular, é um polissacarídeo linear constituído de unidades anidro pirano glicose com ligações glicosídicas do tipo  $\beta(1-4)$ , com alto grau de polimerização. A celulose é o principal constituinte da polpa, determinando a maioria das propriedades do papel. Ela exerce influência na resistência da fibra individual e nas ligações entre as fibras e, associada com as hemiceluloses, determina as características da polpa celulósica, em termos de rendimento e de resistência.

As hemiceluloses também são polissacarídeos e diferem da celulose por serem polímeros ramificados e de cadeia com menor grau de polimerização. O termo pentosana é aplicado às hemiceluloses cujas unidades monoméricas têm apenas 5 carbonos. São polissacarídeos não celulósicos presentes na madeira e consistem, principalmente, de xilanas e arabinanas. As xilanas são as principais hemiceluloses das folhosas. Sabe-se que as hemiceluloses são constituintes desejáveis na polpação, pois contribuem para o rendimento e apresentam efeitos benéficos na ligação interfibras e na resistência da 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. Resultados obtidos por Bertolucci & Penchel (1993), com testes em nove clones de *Eucalyptus*, mostraram significativa variação entre os teores de hemiceluloses na madeira.

A lignina é um dos principais constituintes da madeira. A sua maior concentração está na lamela média, existindo menor concentração no interior da parede secundária. A lignina é um composto amorfo, tridimensional, de composição química bastante complexa, que se constitui de unidades de fenil propano, tendo uma cadeia altamente ramificada. É o componente mais hidrofóbico da madeira, tendo função adesiva entre fibras, o que confere dureza e rigidez à parede celular.

A lignina é um constituinte considerado indesejável para a produção de polpa celulósica. As operações de cozimento e branqueamento visam remover a maior parte possível da lignina, sem causar dano apreciável às fibras. Entretanto, a existência de um residual ótimo de lignina na polpa não branqueada concorre para que a fibra se torne mais rígida, o que resulta em polpa celulósica com boas propriedades de resistência. Por outro lado, madeiras com alto teor de lignina, normalmente, exigem maior carga de produtos químicos para a sua deslignificação. Uma pequena redução no teor de lignina teria importante impacto no rendimento, custos de processamento e impactos ambientais. Em geral, os métodos para medir e monitorar alterações no teor de lignina são demorados, caros e imprecisos. No entanto, inovações mais recentes são promissoras, como a utilização da espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS) com madeira moída (Kiyohara & Redko, 1997; Rodrigues et al., 1997).

Extrativos é um termo usado para descrever um número de vários compostos químicos, contidos dentro da madeira, mas não é parte de sua estrutura essencial. Os extrativos incluem: polifenóis, óleos, gorduras, gomas, resinas, ceras e amido (Bootle, 1983) e é nomeado como tais porque eles podem ser extraídos por meio de solventes. Silvério et al. (2006) estudando Madeira de *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus Grandis*, com idade de 5 a 7 anos e avaliando o teor de extrativos, por meio de extrações com acetona, mistura de tolueno:etanol (2:1), clorofórmio e diclorometano, não verificaram nenhuma diferença significativa entre as porcentagens de compostos lipofílicos dos extratos obtidos em acetona ou tolueno:etanol.

Os extrativos localizam-se nos canais resiníferos, ductos gomíferos (aqueles derivados dos terpenos) nas células parenquimáticas (célula armazenadora de substâncias gordurosas, amido etc) e no cerne como um todo, onde encontramos os compostos fenólicos presentes, também na parede celular,

os quais são responsáveis pela durabilidade desse tecido. Os diversos compostos olifenólicos (flavonóides, estilbenos, quinonas, etc.) são os responsáveis pela cor característica do lenho.

O teor de extrativos da madeira é de fundamental importância para a produção de celulose, pois resulta em maior demanda de reagentes químicos na polpa celulósica, com conseqüente redução do rendimento, inibições de reações, incrustações de materiais na polpa e nos equipamentos, corrosão e dificuldades no branqueamento. No caso da madeira de coníferas, os extrativos podem ser reaproveitados, dando origem a subprodutos valiosos.

Os vários componentes químicos da madeira podem ser agrupados em: carboidratos, substâncias fenólicas, terpenos e terpenóides, ácidos alifáticos, álcoois, proteínas, aldeídos, hidrocarbonetos, alcalóides, ácidos dibásicos, etc. Entretanto, a fração mais significativa da massa da madeira é representada pelos carboidratos, principalmente celulose e hemiceluloses, e pelas substâncias fenólicas, especialmente a lignina. Colodette et al. (2004) avaliaram 10 madeiras do gênero *Eucalyptus*, incluindo *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus grandis*, híbrido de *urophylla* e *urograndis*, com idade variando de 4,8 a 11,0, e concluíram que os teores de carboidratos, lignina e extrativos em etanol/tolueno variam nas faixas de 70%-74,5%, 24,1%-28% e 1,3%-2,7%, respectivamente.

Em 2004, foi desenvolvido um estudo, com a participação das principais empresas brasileiras produtoras de celulose kraft branqueada de *Eucalyptus*, para o estabelecimento da qualidade das madeiras dos clones de última geração. Os resultados indicaram a alta qualidade dos clones de *Eucalyptus* atualmente plantados no Brasil para produção de celulose (Gomide et al., 2005). Possivelmente, esse é o único estudo publicado em que se analisou a qualidade da madeira dos melhores clones de *Eucalyptus* utilizados no Brasil para a produção de celulose.

#### **2.1.4 Uniformidade da madeira**

Métodos clássicos de cruzamentos têm contribuído para a redução da variabilidade natural da madeira. Por causa da importância de madeiras de reação na fabricação de celulose, a retidão e a forma do fuste são incluídas como importantes características para a melhoria dos índices de qualidade da madeira e de uniformidade da floresta. Além disso, retidão e forma são índices fáceis e baratos de serem determinados, além de serem atributos fortemente herdáveis, ou seja, árvores com essas qualidades, quando cruzadas, repassam essas características para a descendência.

Muitos esforços têm sido despendidos para a melhoria da uniformidade da floresta e da qualidade da madeira. Aspectos de fitossanidade das florestas têm também sido considerados. Por exemplo, a herdabilidade para densidade básica da madeira juvenil até madeira madura é alta e a correlação genética entre esses traços é positiva e forte. Logo, os melhoristas poderiam aumentar a densidade básica da madeira juvenil, cuja herdabilidade é alta, sem comprometer a densidade da madeira madura. Estudos demonstram que progênies de certas árvores têm melhor desempenho em alguns lugares do que em outros (Wehr, Barrichello, 1992; Rocha et al., 1995; Fonseca et al., 1997).

A produção de árvores superiores, por meio da clonagem de outras árvores também superiores, permite a eliminação de variabilidade e aumenta a produtividade dos plantios. A clonagem permite a captura de traços herdáveis de uma árvore ou de espécies e a sua propagação.

#### **2.2 Técnicas convencionais (destrutivas) de avaliação dos índices de qualidade da madeira para fabricação de celulose e papel**

Para a indústria de polpa e papel, algumas características da madeira são valiosas, independentemente do tipo de produto final. No entanto, o custo da madeira posta na fábrica é um grande componente do custo variável de

fabricação. Além disso, uniformidade de suprimento ininterrupto ao longo dos anos e a uniformidade física da madeira (retidão, ausência de nós, diâmetro médio etc.) têm se tornado atributos de extrema importância, por causa dos seus impactos na eficiência do processo e na qualidade dos produtos finais. Como resultado dessas demandas, as empresas, as organizações e os melhoristas florestais, responsáveis pelos cruzamentos e crescimento das árvores, têm priorizado características como taxa de incremento médio anual (IMA), forma, resistência a doenças e desempenho no processo de transformação da madeira em polpa celulósica, definido pelo incremento médio anual em termos de produção de celulose por hectare e por ano (IMACEL). Estes índices de produtividade propiciam alternativas relativamente simples e eficientes, além do baixo custo para a tomada de decisão de novos plantios, porém, não asseguram a qualidade da madeira para tal finalidade.

Segundo Rocha et al. (1995), dos vários parâmetros de qualidade da madeira e polpa, alguns estão diretamente ligados ao processo ou interferem de forma significativa no mesmo. Normalmente, antes e durante a fase de colheita da floresta, são feitas medições de volume de madeira ( $m^3$ /hectare), coletadas amostras em diferentes talhões, povoamentos ou plantios homogêneos de florestas e realizadas diversas análises para a verificação da qualidade da madeira para fabricação de celulose. Essas medições e análises, além de auxiliarem na adequação do processo fabril, fornecem subsídios ao melhorista florestal para tomar decisões de manter a rebrota ou realizar reforma da floresta com novas e melhoradas mudas via clonagem ou semente. A amostragem e os testes de árvores só podem ser feitos quando a madeira atinge sua juvenilidade (4-5 anos) ou na fase de colheita, pois, a maioria das propriedades (densidade, comprimento e espessura de parede de fibras etc.) da madeira varia com a sua idade. Mais recentemente, grandes esforços têm sido despendidos para a realização de seleção precoce das árvores, com conseqüente ganho de tempo na

propagação das novas florestas (Silva Jr. & Braga, 1997). Uma das rotas é a floração precoce com polinização controlada (Demuner & Bertolucci, 1993).

Os métodos de amostragem da floresta para garantir representatividade dos indivíduos têm sido objetos de intensa discussão, principalmente por causa dos custos envolvidos e do tempo requerido para a obtenção dos resultados. Quase todos os artigos e estudos que envolvem a amostragem de árvores na floresta e a execução de análises se baseiam em pequenos números de amostras, mesmo correndo o perigo de selecionar os piores e deixar de selecionar bons indivíduos e, assim, comprometer a qualidade da floresta. O ideal seria a aplicação de um cuidadoso delineamento experimental e o estabelecimento *a priori* de coeficientes de variação aceitáveis para cada uma das propriedades contempladas na avaliação. O tamanho da amostra e o número de análises seriam aumentados progressivamente, até que o coeficiente de variação medido se enquadrasse ao valor previamente estabelecido (Flores et al., 1999). O procedimento mais adequado é o enfatizado por Zobel & Talbert (1984), o qual é baseado no pleno conhecimento e na intuição. Este procedimento, quando aplicado na avaliação da qualidade da madeira e no desempenho no processo de fabricação de celulose, pressupõe a execução de testes como:

- determinação do volume da madeira na floresta (talhão), que permite determinar o IMA;
- medições dendrométricas de algumas árvores;
- corte do tronco em toretes de 50 a 100 cm de comprimento, nas alturas de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% do comprimento comercial da árvore;
- picagem dos toretes em cavacos, classificação e amostragem dos mesmos, por quarteamento, para testes diversos;
- determinação da densidade básica, da densidade aparente ( $\text{kg/m}^3$ ) e da umidade;

- análise das características químicas da madeira: teor de extrativos em álcool/tolueno, teores de lignina solúvel, insolúvel e total, teor de celulose (glicanas corrigidas) e teor de hemiceluloses;
- cozimentos laboratoriais com grau de deslignificação idêntico ao realizado em escala industrial ( $\kappa$  16 a 18 para eucalipto) seguido de determinação de rendimento total, depurado e teor de rejeitos;
- determinação da viscosidade da polpa;
- pré-branqueamento da polpa marrom, com oxigênio, conforme deslignificação obtido industrialmente ( $\kappa$  7-12);
- branqueamento com seqüência típica (ex.: D(EPO) DP),
- análise das características físicas e químicas da polpa branqueada (alvura, viscosidade, teor de extrativos em diclorometano e teor de pentosanas);
- moagem da polpa em laboratório, confecção de folhas de 60 g/m<sup>2</sup> e avaliação de suas propriedades físicas.

Os resultados desses testes devem ser suficientes para orientar as áreas de produção e comercial das empresas, na tomada de decisão de manejar da floresta. Obviamente, empresas mais exigentes poderiam exigir um maior número de testes, como análise físico-química da polpa (cátions, ânions, AOX etc.) e características morfológicas das fibras da madeira (coarseness, número de fibras por grama, comprimento médio, diâmetro médio, percentual de vasos, espessura de parede etc.). Como já enfatizado, cada teste aumenta o custo, demandando tempo e recursos humanos.

Do exposto, observa-se que a determinação dos índices de qualidade da madeira e das florestas não é uma tarefa fácil, uma vez que há necessidade de se fazer uma amostragem adequada, a qual, geralmente, envolve a coleta de muito material no campo. A adequação das novas florestas às necessidades dos

processos de fabricação e às demandas do mercado deverá seguir uma seqüência de ações individualizadas e de parcerias entre clientes, áreas comercial e industrial da fábrica e área florestal, incluindo preparação da madeira, transporte, colheita, manejo florestal, plantio, melhoria, clonagem, biotecnologia, cruzamentos (hibridação) e projeto de plantios florestais.

### **2.3 Técnicas não convencionais (não destrutivas) de avaliação dos índices de qualidade da madeira para fabricação de celulose**

Existem várias técnicas de avaliação não-destrutiva da madeira. Essas técnicas apresentam particularidades e graus diferenciados de associação com as características da madeira. Neste estudo serão abordadas algumas técnicas não destrutivas, as quais vêm sendo usadas em diferentes situações e usos da madeira.

#### **2.3.1 Espectroscopia de infravermelho próximo para a avaliação da qualidade da madeira**

Segundo Pasquini (2003), a bem sucedida aplicação da tecnologia NIRS espectroscopia de infravermelho próximo, ou NIRS, do inglês *near infra red spectroscopy*, no campo analítico, depende de uma série de fatores igualmente relevantes. Mas, as vantagens da espectroscopia NIR vêm da possibilidade do uso de amostras intactas apresentadas diretamente ao instrumento. Este fato implica em promover interação não convencional da radiação com a matéria, a fim de extrair informação espectral e gerar diferentes modos de mensuração.

O NIRS tem sido utilizado em várias aplicações para madeira, tanto na determinação da constituição química como na produção de celulose, como, por exemplo, para estimar o número kappa, os teores de celulose e lignina (Easty et al., 1990; Garbutt et al., 1992, Wallbacks et al., 1991, Wright et al., 1990), o

rendimento de polpação (Wright et al., 1990) e o teor de fibras curtas em papéis (Garbutt et al., 1992).

Schultz & Burns (1990) demonstraram que esta técnica de análise apresentou melhores resultados de determinação de celulose, hemiceluloses e lignina em madeiras que a técnica de infravermelho com transformada de Fourier. O NIRS foi, também, utilizado para a determinação de teor de fibras de folhosa no papel (Easty et al., 1990), tendo sido verificado que esta técnica é mais rápida que a mensuração por microscopia, não requerendo treinamento especial do analista. Neste mesmo estudo foi demonstrado que a diferença de determinação de lignina pelo processo Klason e por NIRS foi de apenas 0,2%. Além da utilização para análises químicas da madeira, o NIRS também tem sido utilizado para estimar o rendimento da polpação e a carga de álcali necessária para a obtenção de determinado número kappa (Wright & Birkett, 1990; Michell, 1995).

Em estudo realizado para determinar as modificações da madeira durante o cozimento kraft, utilizando diferente métodos espectrofotométricos ( $C^{13}CP/MAS$  NMR, FTIR e NIR), o NIR foi o melhor método para estimar os teores de glicose, xilose e lignina. Garbutt et al. (1992) verificaram que os valores estimados pelo NIRS apresentavam alta correlação, quando comparados com os obtidos pelos métodos convencionais, tanto para lignina ( $r = 0,991$ ) como para celulose ( $r = 0,953$ ).

Olsson et al. (1995), na Suécia, utilizaram o NIRS para avaliação da qualidade da madeira para a produção de celulose, determinando rendimento de polpação, número kappa e teores de ligninas, glicose, xilose e ácidos urônicos. Estes autores verificaram que esta técnica apresenta alta eficiência e boa correlação com os métodos convencionais.

Medições dos espectros de NIR, obtidos de serragem de madeira, foram utilizados para determinar as variações entre árvores, com precisão aceitável,

dos rendimentos da polpação kraft de madeira de *Eucalyptus*. Em estudo recente, Schimleck et al. (2000) utilizaram, com sucesso, a técnica de NIRS para determinar o efeito do local de plantio na variabilidade das propriedades dentro de uma mesma árvore de madeira de *Eucalyptus*.

### **2.3.2 Extensômetro**

Este equipamento tem sido utilizado para a determinação indireta das tensões longitudinais de crescimento na árvore viva. O aparelho consiste de um relógio comparador, o qual é fixado no tronco da árvore por dois pinos, distantes 45 mm, na direção da grã e, em seguida, com um arco de pua, faz-se um orifício, de 20 mm de diâmetro, na posição mediana entre os dois pinos. A liberação da tensão é registrada no mostrador.

A perfuração do orifício fornece uma estimativa da liberação total das deformações próxima a ele, sendo 15% inferior ao valor obtido com a remoção completa da peça de madeira (Nicholson, 1971). Conseqüentemente, este método é apenas indicado para trabalhos de campo, onde se deseja obter a intensidade aproximada das deformações de crescimento, sua distribuição periférica e sua variação entre árvores e espécies. Este método é chamado de método de Nicholson. O CIRAD-Forêt desenvolveu um equipamento para a determinação dessas deformações longitudinais na árvore viva, o qual, devido ao pequeno dano físico no tronco, é considerado como não destrutivo.

Uma vez determinada a deformação de uma peça em relação ao seu comprimento, basta multiplicar este valor pelo módulo de elasticidade correspondente, determinado na própria peça em que foi medida a alteração do comprimento, ou alternativamente, multiplicá-lo pelo valor médio deste módulo, determinado em laboratório para a espécie em questão, para estimar o valor das tensões de crescimento (Lisboa, 1993). Outra alternativa seria a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, por exemplo, pelo método de ondas de tensão

(*stress wave timer*) em amostras de madeira retiradas das regiões de medição das deformações periféricas no tronco. Vários trabalhos com essas técnicas têm sido conduzidos, visando à determinação da magnitude e das diferenças entre materiais genéticos no campo (Trugilho et al., 2002; Cardoso Jr, 2004; Pádua, 2004).

### **2.3.3 Temporizador de ondas de tensão (*stress wave timer*)**

Este aparelho é utilizado para medir o tempo de propagação da velocidade das ondas de tensão (*stress wave timer*), tanto em árvores vivas como em amostras de madeira no laboratório. É um método muito usado para a classificação não destrutiva de chapas de madeira (compensados, laminados, etc.) na indústria. A velocidade das ondas de tensão está associada ao módulo de elasticidade dinâmico da madeira, sendo, portanto, um indicativo da rigidez do material. As ondas de tensão são influenciadas por diversos fatores, tais como a presença de nó, a umidade, etc.

### **2.3.4 Resistograph®**

A medição da resistência à perfuração da madeira com uma broca depende da sua densidade. A furadeira Resistograph® (resistógrafo) mede a resistência da madeira à penetração de uma broca especial de 3 mm de diâmetro e comprimento variável. A diferença existente entre a densidade da madeira intacta e as zonas apodrecidas é registrada com alta precisão e mesmo as variações dentro dos anéis de crescimento podem ser observadas.

Dessa forma, o aparelho denominado resistógrafo pode ser utilizado para descrever o perfil radial de variação da madeira, o qual está relacionado com a sua dureza e densidade. Hein (2006) relatou que o Resistograph® não se mostrou um equipamento adequado para a estimativa da densidade básica da

madeira de *Eucalyptus*. Fatores, como as tensões de crescimento, podem afetar o valor da amplitude registrada por este aparelho.

### **2.3.5 Pilodyn®**

O *pilodyn* é um aparelho que funciona por meio da injeção de um pino dentro da madeira, lendo-se a profundidade de penetração por meio de uma escala lateral. A resistência à penetração do pino está diretamente relacionada com a densidade da madeira, porém, bem mais relacionada com a madeira da camada mais externa do tronco.

As principais vantagens da utilização do *pilodyn* são: rapidez na medição, facilidade de utilização, baixo custo de avaliação e por caracterizar-se como um método não destrutivo. É um equipamento versátil, com grande potencial de utilização nas medições nas árvores vivas. Gough & Barners (1984) compararam métodos para estimar densidade e confirmaram a eficiência do *pilodyn* no ordenamento de diferentes famílias de *Pinus elliottii* em Zimbabwe. Os autores citam como vantagem a redução de custos e tempo. O uso do *pilodyn* exigiu apenas 5% do tempo gasto para a coleta e o preparo de amostras de madeira.

## **2.4 Relação entre madeira, polpa e propriedades do papel**

Na fabricação de papéis para escrita, as exigências mais fortes têm sido altas refinabilidade, volume específico (bulk) e opacidade. Para papéis absorventes, procuram-se alta maciez e resistência à tração. Nesses papéis, busca-se também diminuir a poeira (dust ou lint) que se acumula na descarga do secador “Yankee” e na barra de crepagem do papel, provenientes de vasos e células de parênquima, que se desprendem da polpa e se acumulam nos equipamentos, exigindo paradas de máquina para limpeza.

Mais recentemente, as qualidades das polpas produzidas nas grandes fábricas têm sido alteradas em razão de melhorias da qualidade da madeira, de inovações tecnológicas e de mudanças nas prioridades e nas demandas do mercado. Por sua vez, as fábricas procuram diferenciar seus produtos para manter e conquistar fatias de mercado em um ambiente altamente competitivo. São duas as principais alternativas de diferenciação das polpas celulósicas: a madeira e o processo.

### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J.M.; JESUS, D. Inclusão de um novo e importante parâmetro potencial de seleção de eucalipto para produção de polpa. In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTO, 6., 1997, Campos do Jordão, SP. **Anais...** Campos do Jordão, SP: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1997. p.228-231.

BETOLUCCI, F.L.; PENCHEL, R.M. Clonagem do eucalipto: efeitos sobre a produtividade e qualidade da madeira. **Ciência Hoje**, v.16, n.91, p.16, 1993.

BOOTLE, K. **Wood in Australia: types, properties and uses.** Sydney: McGraw-Hill Book, 1983.

CARDOSO JR., A.A. **Tensões de crescimento em *Eucalyptus* e suas relações com espaçamento, idade e material genético.** 2004. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG

CARPIM, M.A.; BARRICHELO, L.E.G.; SILVA JUNIOR, C.S.; DIAS, R.L.V. A influência do número de fibras por grama nas propriedades óticas do papel. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 20., 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1987. p.183.

COLODETTE, J.L.; MOKFIENSKI, A.; GOMIDE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. Relative importance of wood density and carbohydrate content on pulping yield and product quality. **Journal of Tianjin University of Science and Technology**, Tianjin, v.19, p.71-80, 2004. Supplement Book A.

DEMUNER, B.J.; BERTOLUCCI, F. de L.G. Seleção florestal: Uma nova abordagem a partir de estimativas de parâmetros genéticos e fenotípicos para características da madeira e polpa de eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 26., 1993, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ABTCP, 1993. p.411.

DINUS, R.J.; WELT, T. Tailoring fiber properties to paper manufacture: Recent development. **Tappi Journal**, Atlanta, v.82, n.4, p.127, 1997.

EASTY, D.B.; BERBEN, S.A.; THOMAS, F.A.; BRIMMER, P.J. Near infrared spectroscopy for the analysis of wood pulp: quantifying hardwood - softwood mixtures and estimating lignin content **Tappi Journal**, Atlanta, v.73, n.10, p.257, 1990.

FLORES, D. M.M.; CARDOSO, G.V.; FOELKEL, C.E.B.; FRIZZO, S.M.B. Amostragem de árvore para estudos tecnológicos da madeira para produção de celulose: Tamanho da amostra, número mínimo de repetições e variabilidade das propriedades para um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 33., 1999, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ABTCP, 1999.

FLORSHEIM, S.M.B. **Variações da estrutura anatômica e densidade básica da madeira de árvore de aroeira *Myracrodruon urundeuva* F.F. & M.F. Alemão (ANACARDIACEAE)**. 1992. 252p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

FOELKEL, C.E.B. Qualidade da madeira de eucalipto para atendimento das exigências do mercado de celulose e papel. In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTOS, 3., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: EMBRAPA/SIF/IPEF, 1997. p.15-22.

FOELKEL, C.E.B.; MORA, E.; MEMOCHELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão, SP: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1990. p.719-728.

FONSECA, S.M.; FERNANDES, D.E.; BORGES, J.F.; MARTINI, S.L.; SILVEIRA, P.N. Efeitos do espaçamento e da idade de corte sobre a produtividade e qualidade da madeira e o custo da celulose Kraft de eucalipto. **O Papel**, São Paulo, n.9, p.61, 1997.

GAZETA MERCANTIL. **O mercado de celulose**. Disponível em: <[www.gazetamercantil.com.br](http://www.gazetamercantil.com.br)>. Acesso em: 28 mar. 2005.

GARBUTT, D.C.F.; DONKIN, M.J.; MEYER, J.H. Near-infrared reflectance analysis of cellulose and lignin in wood. **Paper Southern Africa**, v.2, n.4, p.45, 1992.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C.; SILVA, C.M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.1, p.129-137, 2005.

GOUGH, G.; BARNES, R.D.A. A comparison of three methods of wood density assesment in a *Pinus elliottii* progeny test. South African **Forestry Journal**, Pretoria, n.128, p.22-25, 1984.

HEIN, P.R.G. **Adequação do Resistógraph® para estimativa da densidade básica da madeira de Eucalyptus**. 2006. 40p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

KIYOHARA, P.K.; REDKO, B.V.P. Comparação de características de clones de *Eucalyptus* spp plantado em regiões diferentes por espectroscopia eletrônica de varredura. In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTOS, 3., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: EMBRAPA/SIF/IPEF, 1997. p.69.

LELIS, A.; SILVA, D. J. **Análise comparativa entre três métodos de determinação de densidade básica da madeira:** medição direta de volume, medição indireta de volume-balança hidrostática e máximo teor de umidade. Viçosa, MG: UFV/DEF, 1993. 20p. (Relatório técnico. Disciplina ENF 353- Tecnologia da madeira)

LISBOA, C.D.J. **Estudo das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden**. 1993. 298 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

MICHELL, A.J. Pulpwood quality estimation by near-infrared spectroscopic measurements on eucalypt woods. **Appita Journal**, Melbourne, v.48, n.6, p.425, 1995.

NICHOLSON, J.E. A rapid method for estimating longitudinal growth stresses in logs. **Wood Science and Technology**, Atlanta, v.5, n.1, p.40-48, 1971.

OLSSON, R.J.O.; TOMANI, P.; KARLSSON, M.; JOSEFFSON, T.; SJOBERG, K.; BJORKLUND, C. Multivariate characterization of chemical and physical descriptors in pulp using NIR. **Tappi Journal**, Atlanta, v.78, n.158, p.26-32, 1995.

PÁDUA, F.A. de. **Estimativas de parâmetros genéticos das tensões de crescimento em clones de *Eucalyptus***. 2004. 66p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

PASQUINI, C. Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of Brazilian Chemical Society**, Rio de Janeiro, n.14, v.2, p.198-219, 2003.

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

ROCHA, M.G.B.; FONSECA, M.J.O.; CAMPOS, W.O.; ZVINAKEVICIUS, C. Estratégia para melhoramento das características tecnológicas de *Eucalyptus spp.* na Cenibra. In: WORKSHOP SOBRE QUALIDADE DO PRODUTO FINAL, 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SIF/UFV, 1995.

RODRIGUES, J.; GRAÇA, J.; PEREIRA, H.; Influence of extractives and particle size on the FTIR lignin content determination in eucalypt wood In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTOS, 3., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: EMBRAPA/SIF/IPEF, 1997. v.3, p.242.

SCHIMLECK, L.R.; MICHELL, A.J.; RAYMOND, C.A. Effect of site on the within-tree variation of wood properties of eucalypts as determined by NIR spectroscopy and multivariate analysis **Appita Journal**, Melbourne, v.53, n.4, p.318-322, 2000.

SCHULTZ, T.P.; BURNS, D.A. Rapid secondary analysis of lignocellulose: comparison of near infrared and fourier transform infrared (ftir), **Tappi Journal**, Atlanta, v.73, n.5, p. 209, 1990.

SILVA JR., F.G.; BRAGA, E.P. Potencialidade da seleção precoce de *Eucalyptus urophylla* em função da qualidade da madeira destinada a produção de celulose. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1997. p.281.

SILVA JR, F.G.; VALLE, C.F.; MUNER, J.C.G. Programa de qualidade da madeira da Votorantim Celulose e Papel – VCP. **O Papel**, São Paulo, n.1, p.35, 1996.

SILVÉRIO, F.; ALMEIDA, L.C.; GOMIDE, J.L.; REIS, P. R., PILO-VELOSO, D. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.30, n.6, p.1009-1016, 2006.

TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; ROSADO, S.C.S.; MENDES, L.M.; MORI, F.A.; SOUZA, M.A.M. Avaliação da tensão de crescimento em clones de *Eucalyptus*. **Ciência e Ambiente**, Seropédica, RJ, v.9, n.1, p.38-44, 2002.

URBINATI, C.V. **Variação estrutural no lenho de *Terminalia ivorensis* A.Chev.-Combretaceae**. 1998. 70p. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

WALLBACKS, L.; EDLUND, U.; NORDEN, B.; BERLUNG, I. Multivariate characterization of pulp using solid-state <sup>13</sup>C NMR, FTIR, AND NIRS. **Tappi Journal**, Atlanta, v.74, n.10, p.201, 1991.

WEHR, T.R.; BARRICHELLO, L.E.G. Cozimentos kraft com madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes densidades básicas e dimensões de cavacos. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 25., 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1992. p.33.

WRIGHT, J.A.; BIRKETT, M.D.; GAMBINO, M.J.T. Geometry and characterization of wrinkles in paper **Tappi Journal**, Atlanta, v.73, n.8, p.164, 1990.

ZOBEL, B.; TALBERT, J. **Applied forest tree improvement**. New York: J. Willey, 1984. 505p.

## CAPÍTULO 2

### CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA POR MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

#### RESUMO

GOMES, Adriana de Fátima. Caracterização da madeira por métodos não destrutivos. In: \_\_\_\_\_. **Avaliação das características da madeira e da polpa de *Eucalyptus*, mediante a aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva.** 2007. Cap.2, p.24-55. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

Foram investigados diferentes métodos de avaliação não destrutiva da madeira, visando à classificação de clones de eucalipto com 3 anos de idade e plantados comercialmente com espaçamento de 3,0 x 3,3 m. As amostras foram coletadas nas regiões de Cocais, Guanhões, Rio Doce-Ipaba e Santa Bárbara, sendo utilizadas cinco árvores-amostra por clone. Utilizaram-se, neste estudo, cinco métodos de avaliação não destrutiva da madeira: (1) extensômetro (medidor de deformação residual de crescimento longitudinal-DRL e tangencial-DRT), (2) temporizador de ondas de tensão (*stress wave timer*), (3) resistograph® (amplitude), (4) pilodyn® e (5) espectroscopia de infravermelho próximo-NIRS. As medições foram feitas na árvore viva, a 1,30 m de altura do solo. Verificou-se que, no tronco dos clones, a face voltada para a parte de cima do declive do terreno apresentaram, no geral, maiores valores de DRL, em todas as regiões. Verificou-se, também, que o clone 7074 foi o que apresentou os menores níveis de tensão de crescimento, ou seja, menores magnitudes de DRL e DRT, exceto para a região do Rio Doce. Para os valores médios de amplitude (resistografia) e penetração do pino do *pilodyn*, verificou-se que o clone 7074 foi o que apresentou os menores valores médios de amplitude e maiores de penetração, em todas as regiões avaliadas, sendo o mais baixo na região de Santa Bárbara e o mais elevado na região do Rio Doce. A velocidade de propagação da onda de tensão no sentido transversal foi maior que no sentido longitudinal ao tronco das árvores, exceto para o clone 7074, nas regiões de Cocais, Guanhões e Rio Doce. A espectroscopia NIRS mostrou-se uma técnica vantajosa para avaliar algumas características da madeira, desde que sejam bem amostradas.

---

Comitê Orientador: Paulo Fernando Trugilho – UFLA(Orientador), Jorge Luiz Colodette – UFV, José Tarcísio Lima-UFLA e José Reinaldo Moreira da Silva – UFLA (Co- Orientadores)

## CHAPTER 2

GOMES, Adriana de Fátima. Characterization of the Wood by non-Destructive Methods. In: \_\_\_\_\_. **Evaluation of the characteristics of the wood and of the pulp of Eucalyptus by the application of non-destructive methods in living trees**. 2007. Chap.2, p.24-55. Dissertation (Master Program in Forest Engineer) - Federal University of Lavras, Lavras, MG.

### ABSTRACT

Different methods of wood non-destructive evaluation were investigated, aiming at the classification of three-year-old *Eucalyptus* clones planted commercially with line spacing of 3,0 x 3,3 m. The samples were collected in the areas of Cocais, Guanhões, Rio Doce-Ipaba and Santa Bárbara, with five sample-trees by clone being used. In this study five methods of non-destructive evaluation of the wood: (1) extensometer (meter of residual strain of growth longitudinal-DRL and tangential-DRT), (2) the stress wave timer, (3) the resistograph® (width), (4) pilodyn® and (5) Near Infra Red Spectroscopy -NIRS. The measurements were carried out in the living tree at 1,30 m from the ground. In, showed the highest values of DRL in all the areas. It was also verified that the clone 7074 was the one with the lowest levels of growth tension, i. e. lowest magnitudes of DRL and DRT, except for the one of Rio Doce area. For the medium values of width (resistography) and penetration of the pin of Pilodyn, it was verified that the 7074 clone was the one that presented the lowest medium **values of width** and the highest of penetration of the pin of *pilodyn* in all the appraised areas, with the lowest being in Santa Bárbara area and the highest in Rio Doce area. The speed of propagation of the tension wave in the transversal direction was higher than in the longitudinal direction to trunk of the trees, except for the 7074 clone in the areas of Cocais, Guanhões and Rio Doce. The NIRS spectroscopy showed to be an adequate technique to evaluate some characteristics of the wood, but good sampling is paramount.

---

Guidance Committee: Paulo Fernando Trugilho – UFLA (Supervisor),  
Jorge Luiz Colodette – UFV, José Tarcísio Lima – UFLA e José  
Reinaldo Moreira da Silva – UFLA (Co-supervisors)

## 1 INTRODUÇÃO

A avaliação não destrutiva da madeira é uma importante ferramenta para o conhecimento da variação existente entre indivíduos e a classificação de materiais no campo. As técnicas não destrutivas têm sido cada vez mais utilizadas por vários setores industriais.

Existem vários métodos e equipamentos disponíveis para a avaliação não destrutiva da madeira. O uso desses métodos e os ensaios não destrutivos, relacionados diretamente com propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira, é uma realidade.

Nesse contexto, várias pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de se predizer as propriedades da madeira por meio de métodos não-destrutivos. Trabalhos de Matos (1997), Souza (2002), Cardoso Júnior (2004), Pádua (2004), Trugilho (2005) e Oliveira (2005) são alguns exemplos da utilização de métodos não destrutivos na avaliação da madeira. Estas pesquisas têm contribuído para o avanço do conhecimento da variabilidade natural da madeira, permitindo a identificação de materiais que possuam madeira mais homogênea e livre de defeitos internos, o que auxilia na escolha da forma mais adequada de sua utilização.

Os ensaios não destrutivos apresentam como principais vantagens a rapidez na coleta de dados, o baixo custo de aplicação e a possibilidade de avaliação de um grande número de amostras (indivíduos), o que favorece a seleção de genótipos superiores, mesmo em condição de campo.

Assim, o objetivo da realização deste estudo foi o de caracterizar a madeira de clones de *Eucalyptus* por meio de métodos de avaliação não destrutivos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Material biológico

Foram utilizados, neste trabalho, seis clones de *Eucalyptus* (Tabela 1), provenientes de quatro diferentes locais, no estado de Minas Gerais, a saber: Cocais, Guanhães, Rio Doce-Ipaba e Santa Bárbara. Selecionaram-se árvores com diâmetro médio $\pm$ desvio padrão em uma parcela de 10 x 10 plantas. Foram coletadas cinco árvores-amostra, por clone e local, totalizando 120 amostras.

TABELA 1 Clones de *Eucalyptus* avaliados

Material genético	Espécie
Clone 57	Híbrido natural <i>E.grandis</i>
Clone 1046	Híbrido de <i>E.grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Clone 1213	Híbrido de <i>E.grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Clone 1215	Híbrido de <i>E.grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Clone 1274	Híbrido de <i>E.grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Clone 7074	<i>Eucalyptus Grandis</i>

## 2.2 Local de experimentação

Os clones foram selecionados em plantios comerciais com espaçamento de 3,0 x 3,3 m e 3 anos de idade. Na Tabela 2 estão descritas as principais características dos locais onde foram coletadas as árvores-amostra.

TABELA 2 Características dos locais

Local	Clone	Altitude (m)	Pluviosidade (mm)	Latitude	Longitude	Relevo
Cocais	57	995/1230	1291,5	42°55'51"	19°24'53"	Montanhoso
	1046			42°52'59"	19°28'19"	Montanhoso
	1213			42°55'54"	19°27'72"	Montanhoso
	1215			42°55'34"	19°27'56"	Montanhoso
	1274			42°55'44"	19°27'22"	Montanhoso
	7074			12°52'59"	19°28'11"	Montanhoso
Guanhães	57	820/980	1191,2	42°55'37"	18°41'0"	Ondulado
	1046			42°55'05"	18°40'19"	Ondulado
	1213			42°58'29"	18°32'45"	Ondulado
	1215			42°51'03"	18°42'04"	Ondulado
	1274			42°54'27"	18°42'33"	Ondulado
	7074			42°55'56"	18°40'57"	Ondulado
Rio Doce-Ipaba	57	206/380	1235,3	42°29'01"	19°43'48"	Ondulado
	1046	131/369		42°29'39"	19°19'29"	Ondulado
	1213	206/380		42°24'00"	19°34'24"	Ondulado
	1215			42°23'42"	19°33'54"	Ondulado
	1274			42°27'59"	10°43'20"	Ondulado
	7074			42°28'31"	10°5'20"	Montanhoso
Santa Bárbara	57	709/1203	1455,6	43°21'01"	20°7'49"	Ondulado
	1046			43°20'25"	20°8'17"	Ondulado
	1213	864/838		43°20'27"	20°7'55"	Ondulado
	1215			43°20'02"	19°58'11"	Ondulado
	1274	709/1203		43°20'25"	20°7'10"	Ondulado
	7074			43°20'47"	20°7'54"	Ondulado

## 2.3 Métodos não destrutivos

### 2.3.1 Extensômetro

O instrumento utilizado para realizar esta avaliação foi o extensômetro, adaptado para funcionar com dois relógios comparadores (0,01 mm). O primeiro relógio é para medir a deformação residual longitudinal (DRL) e o outro para medir a deformação residual tangencial (DRT). As medições foram feitas na árvore em pé, a 1,30 m de altura do solo (DAP), fazendo-se três medidas, sendo na face voltada para a parte de cima e baixo do declive do terreno (posições de dentro da linha de plantio), além de uma na posição de entre a linha de plantio.

As medições com o extensômetro (Figura 1) forneceram dados digitais de deformação residual longitudinal (DRL) e deformação residual tangencial (DRT), as quais são indicadoras da tensão longitudinal e tangencial de crescimento.



FIGURA 1 Extensômetro usado para a obtenção indireta da tensão longitudinal (DRL) e tangencial (DRT) de crescimento na árvore viva

### 2.3.2 Resistograph®

O aparelho usado para avaliar a resistografia na madeira foi o resistógrafo (“resistograph”), mostrado na Figura 2. As medições foram feitas na altura do DAP, nas posições entre e dentro da linha de plantio.

Os dados gerados pelo aparelho são impressos em uma escala relativa de resistência à penetração de uma broca, variando de 0% a 100% (amplitude). Por meio desses dados pode-se inferir sobre a densidade, a sanidade (ataque de brocas e cupins) e as propriedades mecânicas da madeira.



FIGURA 2 Resistógrafo em aplicação para a obtenção de dados de resistência mecânica à penetração de broca na madeira.

FIGURA 2 Resistógrafo em aplicação para a obtenção de dados de resistência mecânica à penetração de broca na madeira

### 2.3.3 Pilodyn®

As medições realizadas com o *pilodyn* (resistência à penetração do pino do *pilodyn*) foram nas mesmas posições de amostragem do resistógrafo. As medidas foram tomadas em torno da circunferência do tronco das árvores vivas, ou seja, duas opostas dentro da linha e duas opostas entre as linhas de plantio. O esquema de utilização do aparelho é mestrado na Figura 3. O procedimento adotado foi conforme Oliveira (2001).

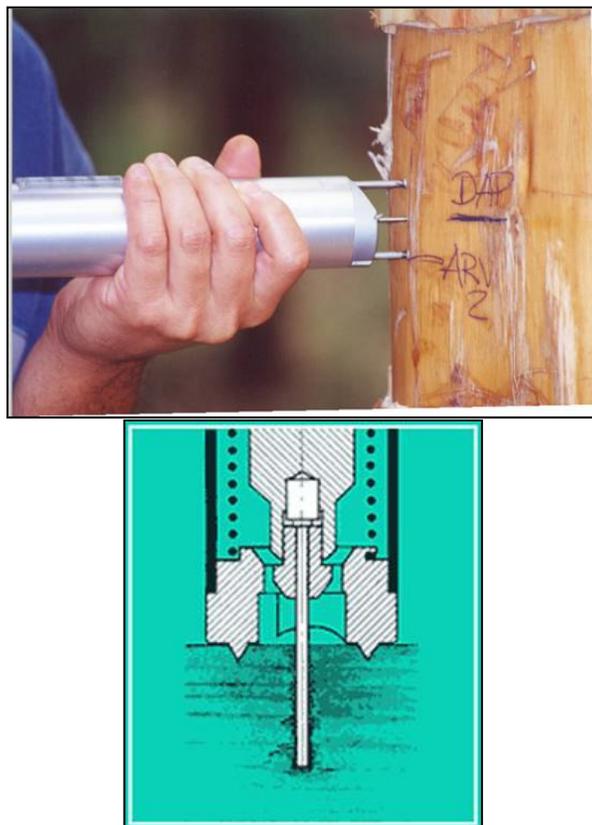


FIGURA 3 Esquema de utilização do *pilodyn* na árvore viva

#### 2.3.4. Temporizador de ondas de tensão (*stress wave timer*)

O temporizador de ondas de tensão (*stress wave timer*), mostrado na Figura 4, foi utilizado para se obter o tempo de propagação das ondas de tensão (T), as quais, após a obtenção da densidade básica (ensaio destrutivo), foram convertidas em módulo de elasticidade dinâmico ( $MOE_d$ ) (Equação 1). Foram feitas cinco leituras nas direções transversal e longitudinal do tronco das árvores, na posição entre e dentro das linhas de plantio, na altura a 1,3 m do solo (DAP). A distância de propagação considerada no sentido transversal variou de acordo

com o diâmetro das árvores amostradas, enquanto que, no sentido longitudinal, foi igual a 38 cm. Todas as leituras foram feitas após a remoção completa das cascas das árvores (Figura 4).

$$MOE_d = \frac{1}{g} * T^2 * Db \quad (1)$$

Em que:  $MOE_d$  = módulo de elasticidade dinâmico ( $kgf/cm^2$ );  
 $g$  = aceleração da gravidade ( $9,804 m/s^2$ );  
 $V$  = velocidade das ondas de tensão ( $cm/s$ );  
 $Db$  = densidade básica ( $g/cm^3$ ).



FIGURA 4 Temporizador de ondas de tensão em aplicação na direção transversal e longitudinal na árvore (detalhes do registrador do tempo em microssegundos)

### 2.3.5 Espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS)

Amostras de serragem foram retiradas na altura a 1,30 m de DAP, com uma furadeira, e foram processadas em moinho tipo ciclone até a obtenção de amostras com granulometria uniforme de, aproximadamente, 0,05 mm. O registro dos espectros de absorção das amostras foi obtido utilizando-se o espectrômetro da marca FOSS, modelo NirSystem 5000 (Figura 5), que opera na

região espectral de 1.100 a 2.500 nm. Os espectros foram coletados em intervalos de 2 nm, o que totaliza 700 valores de absorbância. Esses valores foram armazenados em um microcomputador e utilizados nas análises. Foram realizadas duas leituras para cada amostra. O espectro utilizado para a geração dos modelos de calibração foi proveniente da média dessas duas leituras. As amostras foram previamente acondicionadas em uma sala climatizada, para que as leituras fossem realizadas em temperatura e umidade constantes, para todas as amostras.



FIGURA 5 Espectrômetro NIRS, da marca FOSS, modelo NirSystem 5000

#### **2.3.5.1 Amostras**

Foram realizadas leituras das 120 amostras com modelos pré-existentes da Cenibra para a predição das características de rendimento depurado, lignina total, extrativo e densidade básica.

Para lignina total e extrativo, os modelos utilizados foram criados a partir de serragem de cavacos de plantio comercial, aos 7 anos. Para a densidade básica, álcali efetivo e rendimento depurado, o modelo utilizado foi desenvolvido a partir de serragem de cavacos de plantio experimental, aos 5,5 anos de idade.

A partir dos espectros obtidos das 120 amostras, 96 foram selecionadas para a geração de um modelo para celulose, hemiceluloses, lignina, densidade básica e relação siringila/guaiacila (S/G) e 24 para a validação externa.

Esses modelos foram desenvolvidos com base nos dados de químicas úmidas, que serão apresentados no Capítulo 3.

Para a polpação, não foram desenvolvidos modelos com os espectros das 120 amostras, uma vez que não foi obtido resultado laboratorial para a calibração. Isso porque as 5 árvores-amostra foram misturadas e formaram um amostra composta para a realização de 24 cozimentos.

### 2.3.5.2 Calibração e geração de modelos de predição

Na etapa de construção e validação dos modelos quimiométricos, foi utilizado o software Unscrambler, versão 9.6. Esse processo seguiu o esquema apresentado na Figura 6.

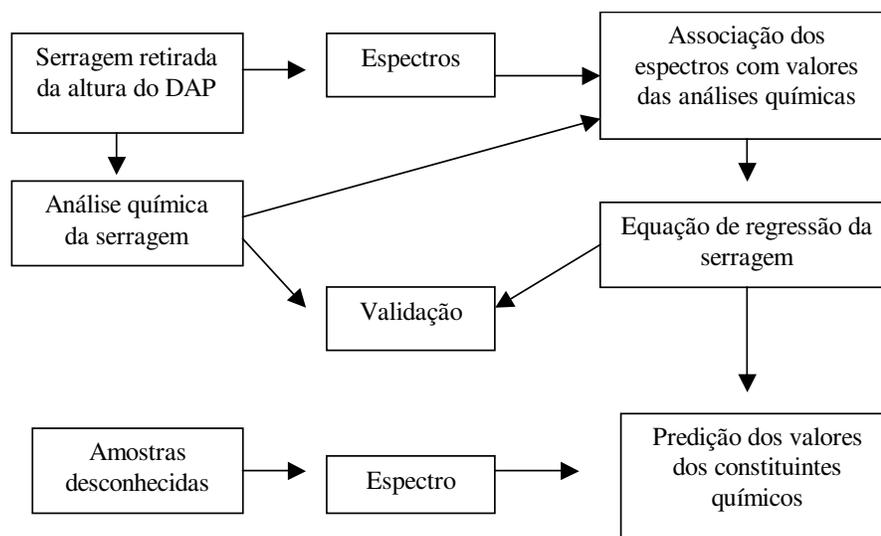


FIGURA 6 Esquema e calibração, validação e predição via NIRS

O pré-tratamento matemático utilizado foi a primeira derivada para a retirada de ruídos. Após a retirada das amostras consideradas (*outliers*), por meio da análise de componentes principais (PCA) e escores, foi empregada a técnica de regressão pelo método dos mínimos quadrados parciais (PLS), que é um processo de busca dos coeficientes que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos, em que a matriz  $X = 700$ , que são valores de absorvância ÷ matriz  $Y =$  valores obtidos em laboratório.

A análise de componentes principais (PCA) é uma técnica estatística poderosa que pode ser utilizada para a redução do número de variáveis e para fornecer uma visão estatisticamente privilegiada do conjunto de dados. A análise de componentes principais fornece as ferramentas adequadas para identificar as variáveis mais importantes no espaço das componentes principais.

As novas variáveis, que são os chamados fatores, correspondem ao número de componentes principais necessários para descrever o conjunto de dados na regressão PLS. A não escolha adequada do número de fatores pode resultar em um desajuste no modelo.

A mensuração de como a validação se ajusta aos dados é representada pelo  $R^2$  e RMSEP. O  $R^2$  indica o grau de associação entre os valores obtidos nas análises tradicionais de laboratório e os valores preditos nos modelos gerados; para se obter uma melhor performance de uma curva de calibração, este valor deve ser o mais próximo de 1. O RMSEP (Equação 2) é o erro da predição, proveniente da validação cruzada, que consiste na retirada de uma amostra por vez, gerando modelo com o restante e predizendo as amostras retiradas, ou da validação externa, que consiste na predição de um novo conjunto de amostras e na comparação desses resultados com os valores de laboratório. O RMSEC (Equação 3) é o erro da calibração, que é calculado com amostras presentes no

modelo; é a média dos desvios dos resultados de laboratório e NIRS. Os valores RMSEP e RMSEC devem ser o mais próximo de zero.

$$\text{RMSEP} = \text{erro padrão da predição} \quad \text{SEP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NP} (\hat{y}_i - y_i)^2}{(NP-1)}} \quad (2)$$

em que:

$\hat{y}_i$  = valor do constituinte de interesse da amostra i, predita pela calibração,

$y_i$  = valor de referência da amostra i, ou seja, o valor conhecido,

NP= número de amostra da predição.

$$\text{RMSEC} = \text{erro padrão da calibração} \quad \text{SEC} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NC} (\hat{y}_i - y_i)^2}{(NC-K-1)}} \quad (3)$$

em que:

$\hat{y}_i$  = valor do constituinte de interesse para a validação da amostra i, estimado usando a calibração,

$y_i$  = valor conhecido do constituinte de interesse da amostra i,

NC= número da amostra usada para o desenvolvimento da calibração,

K= número de fatores usados para o desenvolvimento da calibração.

#### 2.4. Análise Estatística

Na avaliação utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial com dois fatores (clones e locais) e cinco repetições (árvores-amostra).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Extensômetro, Resistograph® e Pilodyn®

Os valores médios da deformação residual longitudinal (DRL), tangencial (DRT), amplitude (resistografia) e resistência à penetração do pino (PIL), por clone e local de amostragem, além do teste de comparação múltipla realizado, encontram-se na Tabela 3.

Pela DRL e DRT verifica-se que existe grande variabilidade entre os clones e locais avaliados. Observa-se, também, que o clone 7074 foi o que apresentou os menores níveis de tensão de crescimento (DRL), ou seja, menores magnitudes de DRL e DRT, em todos os locais estudados, exceto para a região do Rio Doce, em que o clone 1046 foi o que apresentou o menor nível de tensão de crescimento (DRL = 104  $\mu\text{m}$ ). Os valores de DRL observados estão de acordo com os relatados por Lima et al. (2004).

A região de Cocais foi a que apresentou, na média, as maiores magnitudes de tensão de crescimento, em especial para os clones 1046 (DRL = 116  $\mu\text{m}$ ), 1213 (DRL = 146  $\mu\text{m}$ ), 1215 (DRL = 127  $\mu\text{m}$ ) e 1274 (DRL = 149  $\mu\text{m}$ ). A maior altitude e o relevo bastante montanhoso podem ter contribuído para esse fenômeno. Os clones 57 e 7074 apresentaram maiores magnitudes de tensão de crescimento na região do Rio Doce, DRL de 142 e 116  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Para a DRT, os clones 1046 e 1213 apresentaram as menores magnitudes médias na região de Santa Bárbara (DRT = 11  $\mu\text{m}$ ). Os clones 57, 1274 e 7074 apresentaram menores magnitudes na região de Guanhães, com DRT média de 15, 16 e 12  $\mu\text{m}$ , respectivamente. O clone 1215 apresentou menor magnitude média na região do Rio Doce (DRT = 11  $\mu\text{m}$ ).

O Clone 7074 apresentou os maiores e menores valores de amplitude (AMP) e penetração do pino do *pilodyn* em todas as regiões pesquisadas, respectivamente.

TABELA 3 Valores médios para a deformação residual longitudinal (DRL) e tangencial (DRT), penetração do pino do *pilodyn* (PIL) e de amplitude (resistografia), por clone e por local de amostragem

Clone	Local	CARACTERÍSTICA			
		DRL( $\mu\text{m}$ )	DRT ( $\mu\text{m}$ )	AMP (%)	PIL (mm)
57	Cocais	138 a	25	14,6 b	17,8 a
	Guanhães	104 b	15	17,0 a	16,3 b
	Rio Doce	142 a	29	17,6 a	13,8 c
	Santa Bárbara	104 b	24	19,0 a	16,4 b
1046	Cocais	116 a	20	19,1 a	16,2 b
	Guanhães	111 a	18	19,2 a	16,3 b
	Rio Doce	104 a	21	13,0 b	15,4 b
	Santa Bárbara	114 a	11	19,3 a	17,4 a
1213	Cocais	146 a	19	18,9 b	18,5 a
	Guanhães	136 a	22	18,0 b	16,8 b
	Rio Doce	110 b	18	22,6 a	16,2 b
	Santa Bárbara	127 a	11	20,7 a	17,1 b
1215	Cocais	127 a	14	19,7 a	18,1 a
	Guanhães	112 a	20	20,5 a	16,4 b
	Rio Doce	115 a	11	20,4 a	17,2 b
	Santa Bárbara	102 a	20	22,8 a	16,7 b
1274	Cocais	149 a	25	14,3 c	16,8 a
	Guanhães	106 b	16	23,7 a	15,3 b
	Rio Doce	121 b	27	18,1 b	15,3 b
	Santa Bárbara	119 b	20	19,5 b	16,9 a
7074	Cocais	91 a	16	9,8 a	18,6 a
	Guanhães	95 a	12	10,6 a	19,4 a
	Rio Doce	121 a	14	11,9 a	19,2 a
	Santa Bárbara	95 a	16	8,0 a	20,2 a

DRL e DRT= deformação residual média longitudinal e tangencial, AMP= amplitude do resistógrafo, PIL= penetração do pino do Pilodyn.

Médias seguidas de mesma letra, dentro de clone, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Na Tabela 4 observa-se que a DRT mais elevada foi a do clone 57 e a menor do clone 7074. Verifica-se que a maior DRT ocorreu na regional de Cocais e Guanhães, e a menor foi na regional de Rio Doce e Santa Bárbara.

TABELA 4 Valores médios dos efeitos principais para a DRT

Clone	DRT ( $\mu\text{m}$ )	Regional	DRT ( $\mu\text{m}$ )
57	23 a		
1046	18 b	Cocais	20 a
1213	18 b	Rio Doce	17 a
1215	16 b	Guanhães	20 a
1274	22 a	Santa Bárbara	17 a
7074	15 b		

DRT= deformação residual tangencial

O resumo da análise de variância para o delineamento experimental adotado para a DRL, DRT, amplitude e resistência à penetração do pino do *pilodyn* encontra-se na Tabela 5. Verifica-se que os efeitos de clone, local e interação clone x local foram significativos, a 1% de probabilidade, para todas as características, exceto para a DRT, em que somente o efeito de clone foi significativo, a 5% de probabilidade (Tabela 4).

A interação clone x local significativa indica a existência de dependências entre os dois fatores. Dessa forma, optou-se por estudar o desdobramento e a avaliação do efeito do local dentro de clone para DRL, amplitude e *pilodyn*.

O resumo da análise de variância para o desdobramento da interação e avaliação do efeito de local dentro de clone para deformação residual longitudinal, amplitude e penetração do pino do *pilodyn* encontra-se na Tabela 6.

TABELA 5 Resumo da análise de variância para a deformação residual longitudinal média (DRLM), deformação residual transversal média (DRTM), resistência à penetração do pino do *pilodyn* (PILM) e amplitude (AMPM)

FV	GL	Quadrado médio			
		DRLM	DRTM	AMPM	PILM
Clone(C)	5	2365,0083 **	205,1883 *	299,0814 **	30,5947 **
Local(L)	3	2047,7861 **	85,4750 ns	30,7180 **	13,7898 **
C x L	15	844,9594 **	104,455000 ns	30,8049 **	3,4728 **
Resíduo	96	368,6791	68,6708	5,5268	0,8077
Total	119				
Média		116,76	18,44	17,43	17,02
CV(%)		16,45	44,94	13,49	5,28

FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\*, \* e ns = significativo, a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

Para a DRL, verifica-se que os clones 57, 1213 e 1274 apresentaram diferença significativa entre os locais analisados, enquanto que os clones 1046, 1215 e 7074 não apresentaram diferença significativa entre os mesmos locais. Para a amplitude, observa-se que os clones 1215 e 7074 não apresentaram diferença entre os locais avaliados. Para os valores de penetração do pino do *pilodyn*, verifica-se que todos os clones apresentaram diferença significativa entre os locais. Os clones 57, 1213, 1274 sofrem influência do ambiente, para a DRL, amplitude e penetração do pino do *pilodyn*, demonstrando não serem clones plásticos.

Nas Figuras 7 e 8 está ilustrado o comportamento dos clones dentro dos locais e posição de amostragem. Pode-se observar que, no tronco das árvores, a face voltada para a parte de cima do declive do terreno apresentou, no geral, maiores valores de DRL, em todas as regiões. A DRT não seguiu esse mesmo padrão.

TABELA 6 Resumo da análise de variância para o desdobramento da interação e avaliação do efeito de local dentro de clone para a deformação residual longitudinal média, deformação residual transversal média, resistência à penetração do pino do *pilodyn* e amplitude

FV	GL	Quadrado médio		
		DRLM	AMPM	PILM
Local/Clone 57	3	2172,0666 **	17,1233 *	13,8246 **
Local/Clone 1046	3	153,9333 ns	48,3978 **	3,3260 **
Local/Clone 1213	3	1145,9333 *	21,19650 *	4,8591 **
Local/Clone 1215	3	528,9333 ns	9,3893 ns	2,9845 *
Local/Clone 1274	3	1646,9833 **	75,2685 **	3,9045 * *
Local/Clone 7074	3	624,7333 ns	13,3673 ns	2,2551 *
Resíduo	96	368,6791	5,526875	0,8077

DRL = deformação residual longitudinal, AMP= amplitude do resistógrafo, PIL= penetração do pino do *pilodyn*, FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\*, \* e ns = significativo, a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

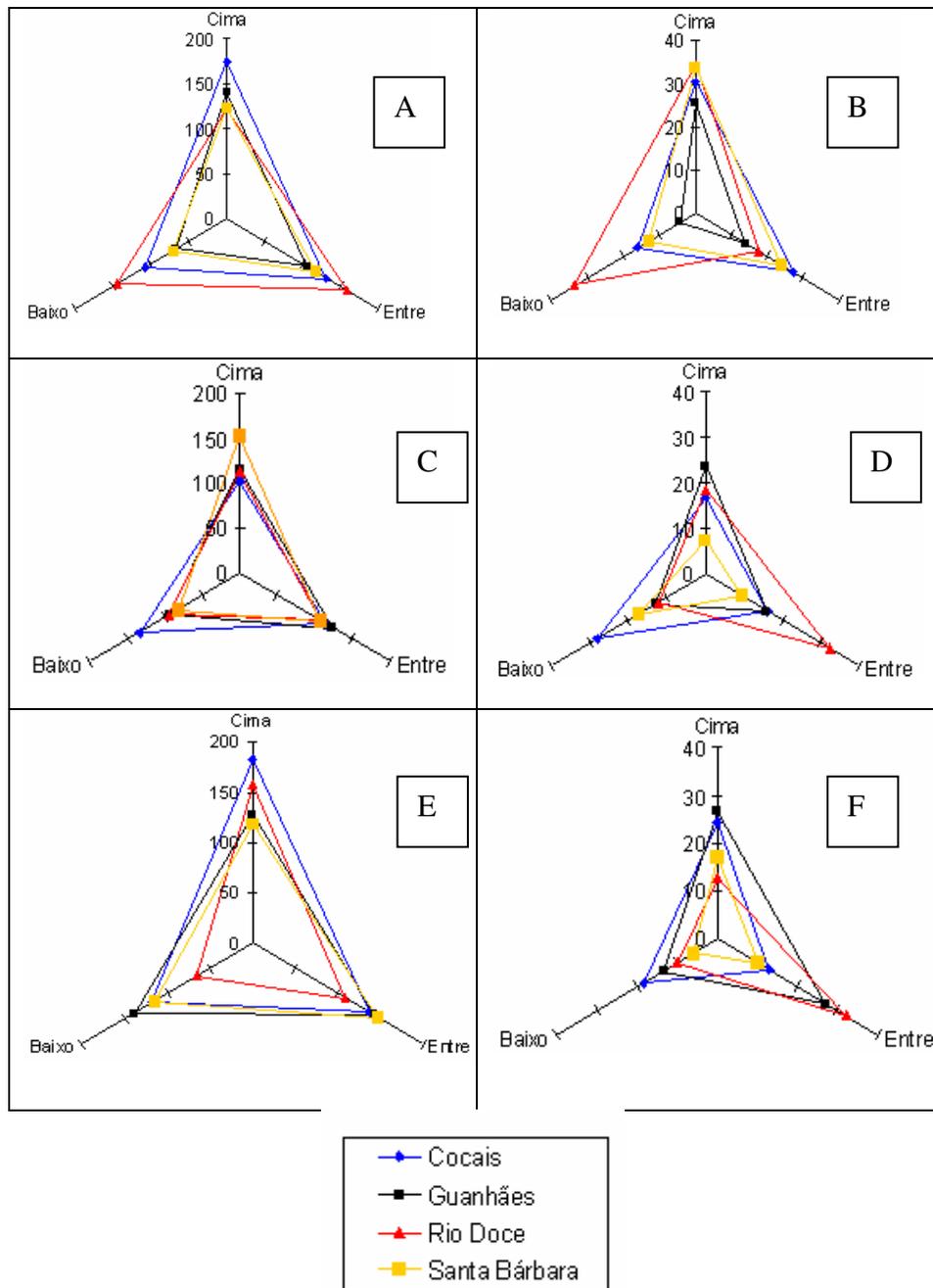


FIGURA 7 Distribuição da DRL (A, C e E) e DRT (B, D e F), nas posições de amostragem para os clones 57 (A e B), 1046 (C e D) e 1213 (E e F), nos quatro locais avaliados

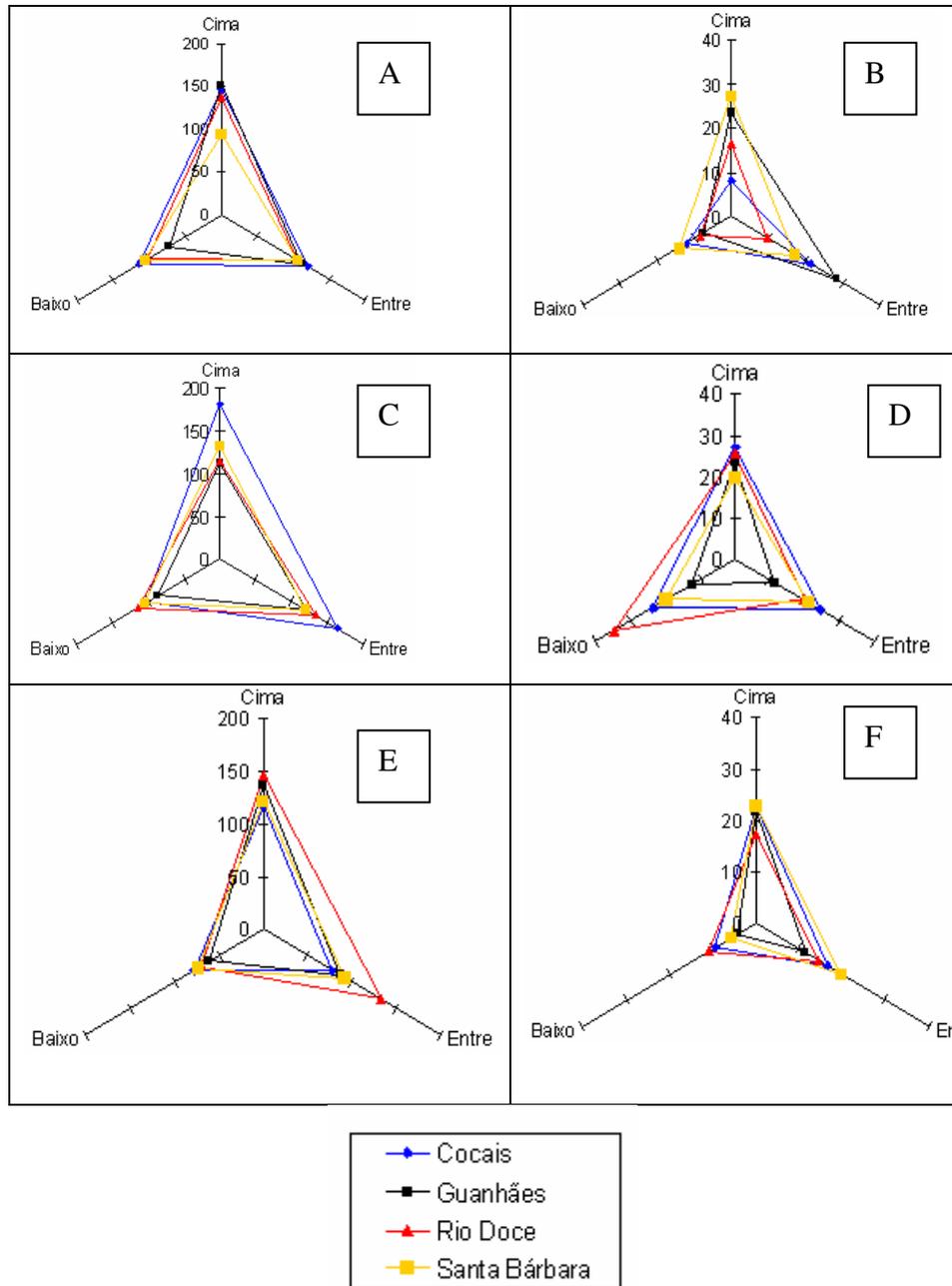


FIGURA 8 Distribuição da DRL (A, C e E) e DRT (B, D e F) nas posições de amostragem para os clones 1215 (A e B), 1274 (C e D) e 7074 (E e F), nos quatro locais avaliados

### 3.2 Ondas de tensão

Os valores médios da velocidade da onda de tensão por clone e local encontram-se na Tabela 7. Observa-se que a velocidade da onda de tensão no sentido transversal foi maior que no sentido longitudinal do tronco das árvores, exceto para o clone 7074, nas regiões de Cocais, Guanhães e Rio Doce. Esse mesmo comportamento foi observado por Oliveira (2005).

TABELA 7 Valores médios para a velocidade da onda de tensão por clone e local

Clone	Local	Velocidade da onda de tensão (cm/s)	
		VMT	VML
57	Cocais	96177,8 b	88810,2 c
	Guanhães	96174,7 b	94049,6 b
	Rio Doce	110392,4 a	99824,4 a
	Santa Bárbara	112591,6 a	91946,5 b
1046	Cocais	99384,8 a	90530,6 a
	Guanhães	102947,3 a	85751,4 b
	Rio Doce	99820,1 a	90730,4 a
	Santa Bárbara	109427,7 a	83429,0 b
1213	Cocais	95446,0 a	84130,0 b
	Guanhães	97717,2 a	90630,1 a
	Rio Doce	96357,3 a	92703,8 a
	Santa Bárbara	105078,3 a	88432,9 a
1215	Cocais	87475,1 b	84607,3 b
	Guanhães	113763,2 a	91555,5 a
	Rio Doce	92487,2 b	83792,3 b
	Santa Bárbara	109588,1 a	89481,5 a
1274	Cocais	99940,1 b	91112,5 a
	Guanhães	118846,8 a	88636,0 a
	Rio Doce	92584,2 b	90937,5 a
	Santa Bárbara	105933,0 b	84565,1 b
7074	Cocais	83747,7 b	88809,9 a
	Guanhães	80572,2 b	82798,1 b
	Rio Doce	79153,3 b	83024,7 b
	Santa Bárbara	92536,8 a	79778,9 b

VMT e VML= velocidade das ondas de tensão no sentido transversal e longitudinal. Médias seguidas de mesma letra, dentro de clone, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

O clone 7074 foi o que apresentou os menores valores de velocidade de propagação da onda de tensão em todas as regiões amostradas, tanto no sentido transversal como no longitudinal, indicando possuir madeira de baixa resistência mecânica e conseqüentemente, de baixa densidade básica.

Na Tabela 8 encontra-se o resumo da análise de variância para o delineamento experimental adotado para a velocidade da onda de tensão no sentido transversal (VMT) e no longitudinal (VML). Pelos dados da Tabela 8 verifica-se que os efeitos de clone, local e interação clone x local foram significativos, a 1% de probabilidade. Observa-se que o valor para a velocidade transversal apresentou maior variabilidade, ou seja, maior coeficiente de variação experimental.

TABELA 8 Resumo da análise de velocidade média de propagação da onda de tensão nos sentidos transversal e longitudinal

FV	GL	Quadrado médio	
		VMT	VML
Clone(C)	5	1,20722134E+0009 **	211353032,5724 **
Local(L)	3	926892857,7433 **	80529323,2803 **
CxL	15	246258942,4786 **	69636440,7524 **
Resíduo	96	68147603,7245	7910985,7650
Total	119	1,905283936E+0010	3,102354377E+0009
Média		99198,17	88336,155
CV(%)		8,32	3,18

VMT e VML= velocidade média da onda de tensão no sentido transversal e longitudinal, FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\*, \* e ns = significativo, a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

Os dados da Tabela 9 referem-se ao desdobramento da interação e avaliação do efeito de local dentro de clone para a velocidade de propagação da onda de tensão, sentido transversal e longitudinal ao tronco da árvore.

TABELA 9 Resumo da análise de variância para o desdobramento da interação e avaliação do efeito de local dentro de clone para as velocidades de propagação da onda de tensão, sentido transversal e longitudinal

FV	GL	Quadrado médio	
		VMT	VML
Local/Clone 57	3	336822028,5800 **	107680811,8245 **
Local/Clone 1046	3	107426942,7405 ns	65338047,5820 **
Local/Clone 1213	3	96190941,7991 ns	67351643,6060 **
Local/Clone 1215	3	819877830,6085 **	70681884,5313 **
Local/Clone 1274	3	617569622,4205 **	46463259,0018 **
Local/Clone 7074	3	180300203,9880 ns	71195880,4966 **
Resíduo	96	68147603,7245	7910985,7650

VMT e VML= velocidade média da onda de tensão no sentido transversal e longitudinal.  
 FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\* e ns = significativo, a 1% probabilidade e não significativo, respectivamente.

Observa-se, pelos dados da Tabela 9, que o efeito de local foi significativo dentro de todos os clones para a velocidade de propagação da onda de tensão, sentido longitudinal. Para a velocidade de propagação da onda de tensão, sentido transversal do tronco da árvore, o efeito de local foi não significativo para os clones 1046, 1213 e 7074. Este fato sugere que estes clones apresentam maior estabilidade, não sendo influenciados pelos locais, para esta característica.

Na Tabela 10 apresentam-se os valores médios das estimativas do módulo de elasticidade dinâmico (MOEd), usando a densidade básica em relação à média da árvore e a obtida no DAP. Verifica-se que as estimativas dos MOEds foram mais elevados quando levaram-se em consideração a densidade básica na posição do DAP (DBDAP) e a velocidade de propagação da onda de tensão no sentido transversal ao tronco das árvores.

TABELA 10 Valores médios para os módulos dinâmicos

Clone	Local	Característica (kgf/cm <sup>2</sup> )			
		MMMT	MMML	MDMT	MDML
57	Cocais	4532 a	3628 c	4958 b	4007 b
	Guanhães	4507 a	4295 b	4650 b	4429 b
	Rio Doce	5980 b	4877 a	6122 a	4997 a
	Santa Bárbara	6079 b	4040 b	6123 a	4064 b
1046	Cocais	4767 a	3918 a	5158 a	4249 a
	Guanhães	5166 a	3559 b	5291 a	3641 b
	Rio Doce	4722 a	3887 a	4841 a	3984 a
	Santa Bárbara	5785 a	3348 b	5668 a	3291 b
1213	Cocais	4567 a	3531 c	5101 a	3970 a
	Guanhães	4915 a	4222 a	4848 a	4172 a
	Rio Doce	4878 a	4465 a	4811 a	4404 a
	Santa Bárbara	5562 a	3932 b	5434 a	3841 a
1215	Cocais	3660 b	3393 b	3883 b	3508 b
	Guanhães	6544 a	4251 a	6413 a	4171 a
	Rio Doce	4240 b	3455 b	4154 b	3391 b
	Santa Bárbara	5940 a	3933 a	5819 a	3857 a
1274	Cocais	4831 b	4013 a	6028 b	4986 a
	Guanhães	7259 a	4019 a	7230 a	3999 b
	Rio Doce	4265 b	4111 a	4339 c	4185 b
	Santa Bárbara	5338 b	3399 b	5294 b	3365 c
7074	Cocais	2881 a	3248 a	2930 a	3308 a
	Guanhães	2749 a	2820 b	2778 a	2849 a
	Rio Doce	2731 a	2975 a	2768 a	3007 a
	Santa Bárbara	3371 a	2501 b	3395 a	2513 a

MMMT= módulo de elasticidade dinâmico, sentido radial usando a densidade básica do dap, MMML= módulo de elasticidade dinâmico, sentido longitudinal, usando a densidade básica do dap, MDMR= módulo de elasticidade dinâmico médio, sentido radial usando a densidade básica. Médias seguidas de mesma letra, dentro de clone, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Os dados da Tabela 11 representam o resumo da análise de variância para os valores de módulo de elasticidade dinâmico (MOEd). De modo geral, o MOEd apresentou maior variação, quando estimado a partir da velocidade de propagação da onda de tensão no sentido transversal (MMMT e MDMT), pelo

fato de esta velocidade de propagação da onda de tensão ter apresentado o mesmo comportamento.

TABELA 11 Resumo da análise de variância para o módulo de elasticidade dinâmico

FV	GL	Quadrado médio			
		MMMT	MMML	MDMT	MDML
Clone(C)	5	17261592,148 **	4255237,068 **	19566309,000 **	5197898,933 **
Local(L)	3	9117251,163 **	1236731,808 **	4462131,922 **	1758139,711 **
CxL	15	3002114,4638**	632959,708 **	3016146,808 **	769727,471 **
Resíduo	96	657317,362	86109,620	811082,800	188372,10
Total	119				
Média		4803,24	3742,91	4918,55	3841,53
CV(%)		16,88	7,84	18,31	11,30

MMMT= módulo de elasticidade dinâmico, sentido transversal usando a densidade básica média, MMML= módulo de elasticidade dinâmico, sentido longitudinal, usando a densidade básica média, MDMT= módulo de elasticidade dinâmico, sentido transversal usando a densidade básica do dap, MDML= módulo de elasticidade dinâmico, sentido longitudinal, usando a densidade básica média, FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\* = significativo, a 1% de probabilidade.

Os dados sobre o desdobramento da interação e avaliação do efeito de local dentro de clone para o MOEd encontram-se na Tabela 12. Observa-se que, para os valores de MMML, todos os clones apresentaram diferença significativa entre os locais. Para o MMTT e MDMT, os clones 1046, 1213 e 7074 não apresentaram diferença significativa, enquanto que, para o MDML, apenas o clone 1213 não apresentou diferença significativa entre os locais. Verifica-se que os clones 1046, 1213 e 7074 não sofreram efeito do ambiente para a estimativa de módulo de elasticidade MMTT e MDMT.

TABELA 12 Resumo da análise de variância para o desdobramento da interação e avaliação do efeito de local dentro de clone para o módulo de elasticidade dinâmico

FV	GL	MMMT	MMML	MDMT	MDML
Local/Clone 57	3	3805835,600 **	1366457,466 **	2979197,916 *	1036498,450 **
Local/Clone 1046	3	1210240,450 ns	373026,733 **	586093,133 ns	866465,11 **
Local/Clone 1213	3	872476,400 ns	806984,400 **	412384,266 ns	302410,050 ns
Local/Clone 1215	3	9341490,9833 **	832166,450 **	7692438,266 **	624623,866 *
Local/Clone 1274	3	8449287,650 **	536451,783 **	7440207,133 **	2229660,583 **
Local/Clone 7074	3	448492,400 ns	486443,516 **	432545,250 ns	547119,000 *
Resíduo	96	657317,3625	86109,6208	811082,8000	188372,1041

MMMT= módulo de elasticidade dinâmico, sentido transversal usando a densidade básica média, MMML= módulo de elasticidade dinâmico, sentido longitudinal, usando a densidade básica média, MDMT= módulo de elasticidade dinâmico, sentido transversal usando a densidade básica do dap, MDML= módulo de elasticidade dinâmico, sentido longitudinal, usando a densidade básica média, FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\*, \* e ns = significativo, a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

### 3.3 Espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS)

Os espectros NIR das 120 amostras de serragem estão sobrepostos na Figura 6. Os dados espectrais foram obtidos e tratados por análise multivariada, que corresponde a um grande número de métodos e técnicas, as quais utilizam simultaneamente todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos.

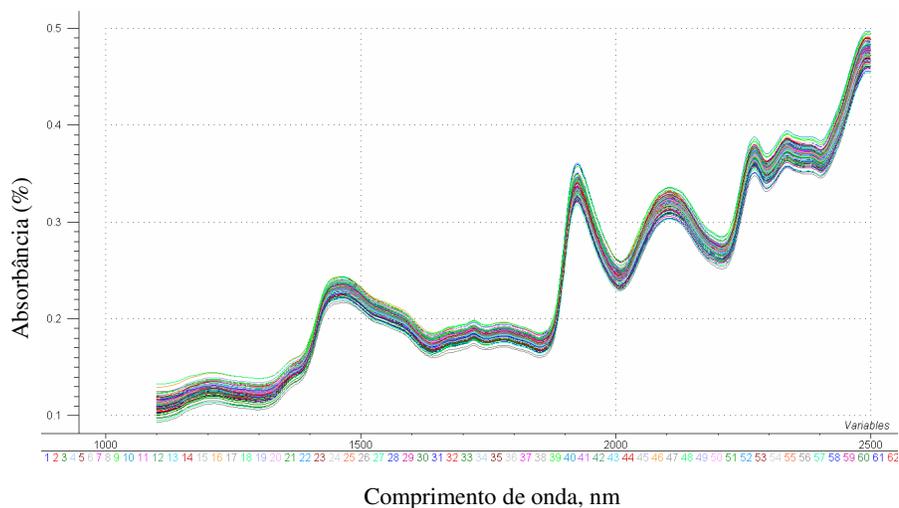


FIGURA 9 Espectros NIR das 120 amostras de madeira de *Eucalyptus*

Na Tabela 13 apresentam-se as características dos modelos do NIR pré-existent da Cenibra, para cada um dos constituintes. O valor de rendimento depurado apresentou boa correlação, de 89%, enquanto os valores de densidade básica, extrativos e lignina total apresentaram baixa correlação, sendo de 66%, 57% e 20%, respectivamente.

TABELA 13 Estatística para calibração NIR dos modelos de polpação e química da Cenibra

Características	Fatores	R <sup>2</sup>	RMSEP	RMSEC
Rendimento depurado (%)	3	0,89	0,51	0,48
Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	5	0,66	0,021	0,019
Extrativos (%)	4	0,57	0,012	0,27
Lignina total (%)	6	0,20	1,26	1,38

Na Tabela 14 são apresentadas as características dos constituintes para os modelos criados a partir das 120 amostras do experimento, das quais 96 foram utilizadas para a geração do modelo e 24 para a validação externa.

TABELA 14 Estatística para calibração NIR para 96 amostras provenientes dos modelos criados a partir de amostras deste experimento

Características	Fatores	R <sup>2</sup>	RMSEP	RMSEC
Celulose (%)	4	0,53	1,98	1,84
Hemiceluloses (%)	5	0,52	1,31	1,15
Lignina total (%)	4	0,57	1,16	1,08
Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	10	0,84	0,017	0,013
Relação S/G (mol/mol)	5	0,42	0,16	0,17

Observa-se que o modelo para o teor de celulose teve correlação de 53%, erro padrão médio de predição de 1,98% e erro de calibração de 1,84%. Para gerar o modelo, foi necessária a retirada de 4 amostras consideradas *outliers*. O teor de hemiceluloses teve correlação de 52%, erro padrão médio de predição de 1,31% e erro de calibração de 1,84%, sendo necessária a retirada de duas amostras consideradas *outliers*.

O teor de lignina é um importante parâmetro na seleção de indivíduos potenciais para a indústria de celulose papel e, por isso, o desenvolvimento de um modelo de predição para esse parâmetro é de grande importância. Queiroz (2002), citando Wehr & Barrichelo (1993), afirma que a composição química da madeira é de grande importância para os resultados da polpação, pois existe alta correlação entre a proporção dos constituintes químicos e o gasto de reagentes e também com o rendimento da polpação.

O modelo para o teor de lignina total teve correlação de 57%, erro médio de predição de 1,16% e erro de calibração de 1,08%. Para gerar o modelo, foi necessária a retirada de oito amostras consideradas *outliers*. O resultado encontrado para o teor de lignina total não foi satisfatório, uma vez que a

estimativa de erro obtido ficou muito distante do erro encontrado em análises de laboratórios.

Segundo Rodrigues et al. (1998), além do teor de lignina na madeira, a sua natureza é um importante parâmetro para a produção de celulose, no que se refere à taxa de deslignificação, consumo de químicos e rendimento de polpa. A relação S/G da lignina dá idéia da sua reatividade durante o processo de polpação. No modelo gerado para a relação S/G (Figura 10), o coeficiente de correlação foi de 42%, erro padrão médio de predição de 0,16 e erro de calibração de 0,17. Esses valores foram obtidos utilizando-se a técnica de validação cruzada e estão de acordo ou próximos dos erros encontrados em análises laboratoriais convencionais.

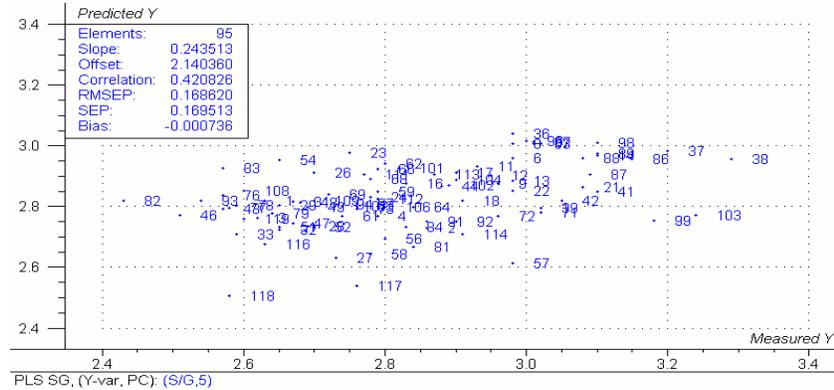


FIGURA 10 Predito versus mensurado para relação S/G obtido por meio de validação cruzada

Os valores das características dos constituintes obtidos por meio da validação externa encontram-se na Tabela 15. Quanto mais próximo de zero, menor o erro de predição. Observa-se que os valores para o teor de celulose, hemiceluloses e lignina não foram bons, enquanto os valores de densidade básica e S/G ficaram próximos de zero.

TABELA 15 Erro de predição da validação externa para 24 amostras provenientes desse experimento

Características	RMSEP
Celulose (%)	2,03
Hemiceluloses (%)	0,99
Lignina (%)	1,65
Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	0,019
Relação S/G (mol/mol)	0,16

A validação externa compara o resultado obtido nas análises usuais no laboratório com o resultado obtido pelo modelo ajustado, usando amostras que não fizeram parte do ajuste do modelo, o que comprova a eficiência ou não do mesmo.

#### 4 CONCLUSÕES

- ✓ O clone 7074 foi o que apresentou os menores níveis de tensão de crescimento, ou seja, menores magnitudes de DRL e DRT, em todos os locais estudados, exceto para a região do Rio Doce, onde o clone 1046 foi o que apresentou o menor nível de tensão de crescimento.
- ✓ A região de Cocais, caracterizada por relevos montanhosos, foi a que apresentou, na média, as maiores magnitudes de tensão longitudinal de crescimento.
- ✓ O clone 7074 foi o que apresentou os menores valores médios de amplitude e maiores de penetração do pino do Pilodyn em todas as regiões avaliadas, sendo mais baixo na região de Santa Bárbara e mais elevado na região do Rio Doce.
- ✓ A velocidade da onda de tensão no sentido transversal foi maior que no sentido longitudinal ao tronco das árvores, exceto para o clone 7074, nas regiões de Cocais, Guanhães e Rio Doce.
- ✓ O clone 7074 foi o que apresentou os menores valores de velocidade de propagação da onda de tensão em todas as regiões amostradas, tanto no sentido transversal como no longitudinal.
- ✓ Para todas as características avaliadas, os efeitos de clone e local e interação (clone x local) foram significativas, exceto para a DRT.
- ✓ Para a amplitude, o desdobramento da interação e a avaliação do efeito de local dentro de clone mostraram que somente o clone 1215 não sofreu influência significativa dos locais, sendo mais estável para essa característica.
- ✓ Para a velocidade de propagação da onda de tensão, o desdobramento da interação e do efeito de local dentro de clone mostra que o efeito de local foi significativo dentro de todos os clones, considerando o sentido longitudinal.

Para a velocidade de propagação da onda de tensão no sentido transversal ao tronco da árvore, o efeito de local foi não significativo dentro dos clones 1046 e 1213.

- ✓ A estimativa dos módulos de elasticidade dinâmica foi mais elevada quando levaram-se em consideração a densidade básica na posição do DAP e a velocidade de propagação da onda de tensão no sentido transversal. De modo geral, os módulos de elasticidade apresentaram maiores variações quando estimados a partir da velocidade de propagação da onda de tensão no sentido transversal, pois esta velocidade também apresentou maiores variações.
- ✓ As predições obtidas por meio dos modelos pré-existente da Cenibra não foram satisfatórias.
- ✓ Os modelos desenvolvidos para análise química apresentaram melhor desempenho em relação aos modelos pré-existente da Cenibra.
- ✓ Os dados que apresentam melhor reprodutibilidade em laboratório, como densidade básica e relação S/G, apresentaram os melhores modelos.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARDOSO JÚNIOR, A.A. **Tensões de crescimento em *Eucalyptus* e suas relações com espaçamento, idade e material genético.** 2004. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

LIMA, J.T.; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S.; CRUZ, C.R. Deformações residuais longitudinais decorrentes de tensões de crescimento em *Eucalyptus* e suas associações com outras propriedades. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.1, p.107-116, jan./fev. 2004.

MATOS, J.L.M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** 1997. 117 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

OLIVEIRA, A.N. **Previsão de ganho genético nas propriedades da madeira de *Eucalyptus* avaliadas em amostragens destrutivas e não destrutivas.** 2005. 78p. Tese (Doutorado em Floresta de Produção) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

OLIVEIRA, L.J.R. **Uso do Piodyn para a estimativa da densidade básica e propriedades mecânicas da madeira de eucalipto.** 2001. 62p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

PÁDUA, F.A. **Estimativas de parâmetros genéticos das tensões de crescimento em clones de *Eucalyptus*.** 2004. 66p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

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

RODRIGUES, J.; MEIER, D.; FAIX, O.; PEREIRA, H. Determination of tree to tree variation in syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus globulus* wood lignin

analytical pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.48, p.121-128, 1998.

SOUZA, M.A.M. **Deformação residual longitudinal (DRL) causada pelas tensões de crescimento em clones híbridos de *Eucalyptus***. 2002. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

TRUGILHO, P.F. **Tensão de crescimento em árvores vivas de clones de *Eucalyptus* spp. e de *Eucalyptus dunnii* Maiden e propriedades de sua madeira**. 2005. 123p. Tese (Pós-Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

WEHR, T.R.; BARRICHELO, L.E.G. **Cozimento kraft com madeiras de *Eucalyptus grandis* de diferentes densidades básicas e dimensões de cavacos 1992–1993: test methods**. Atlanta: Technical Association of the American Pulp and Paper Industry, 1993.

## CAPÍTULO 3

### CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA POR MÉTODOS DESTRUTIVOS

#### RESUMO

GOMES, Adriana de Fátima. Caracterização da madeira por métodos destrutivos. In: \_\_\_\_\_. **Avaliação das características da madeira e da polpa de *Eucalyptus* mediante a aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva**. 2007. Cap.3, p.56-93. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

A produção de celulose de baixo custo e alta qualidade requer madeira adequada e bem selecionada. A seleção de clones superiores tem sido realizada com base em critérios como densidade básica, rendimento gravimétrico da polpação e composição química da madeira, especialmente de celulose, hemiceluloses, extrativos, lignina e relação siringila/guaiacila (S/G) da lignina. O objetivo deste estudo foi o de avaliar a qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de polpa celulósica, por diferentes métodos destrutivos, normalmente usados na seleção de genótipos superiores. Utilizaram-se 5 árvores de 6 clones, com 3 anos de idade, plantadas em espaçamento 3,0 x 3,3 m, nas regiões de Cocais, Guanhões, Rio Doce-Ipaba e Santa Bárbara. A densidade básica foi medida em discos extraídos a 1,3 m de altura do solo (DAP) e em cavacos da árvore inteira (amostra composta). A composição química foi medida em amostras de serragem, retiradas no DAP. Os cozimentos foram efetuados a partir de cavacos da árvore inteira. Verificou-se que a densidade medida no DAP foi ligeiramente superior à medida nos cavacos da árvore toda. A composição química geral da madeira foi muito influenciada pelo local de plantio e tipo de clone. A relação S/G influenciou mais o rendimento da polpação que o teor de lignina. Clones com maiores relações S/G apresentam maiores rendimentos, independentemente do teor de lignina. Para uma carga fixa de álcali ativo, há correlação negativa entre relação S/G e número kappa da polpa. A madeira do clone 7074 da região de Santa Bárbara apresentou qualidade inferior em relação aos demais clones estudados.

---

Comitê Orientador: Paulo Fernando Trugilho-UFLA(Orientador), Jorge Luiz Colodette-UFV, José Tarcísio Lima-UFLA e José Reinaldo Moreira da Silva –UFLA (Co- Orientadores)

### CHAPTER 3

GOMES, Adriana de Fátima. Characterization of the wood by destructive methods. In: \_\_\_\_\_. Evaluation of the characteristics of the wood and of the pulp of *Eucalyptus* by the application of non-destructive methods in living trees. 2007. Chap.3, p.56-93. Dissertation (Master Program in Forest Engineer) - Federal University of Lavras, Lavras, MG.

#### ABSTRACT

Low cost and high quality pulp production requires proper wood selection. The selection of superior clones has been accomplished based in criteria such as basic density, pulping yield and wood chemical composition, especially of cellulose, hemicelluloses, extractive and lignin contents, and lignin syringyl/guaicyl (S/G) ratio. This study aimed at evaluating the *Eucalyptus* wood quality for the production of cellulose pulp by different destructive methods, generally used for selection of superior genotypes. Five trees obtained from six three-year-old clones commercial plantations (line spacing 3,0 x 3,3 m), in the areas of Cocais, Guanhães, Rio Doce-Ipaba and Santa Bárbara, within Minas Gerais State, Brazil. The basic density was measured in disks extracted at 1,3 m from the ground (DAP) and in whole tree chips (composed sample). The chemical composition was measured in sawdust samples, taken from DAP disks. The pulping was carried out on whole tree chips. It was verified that the density measured in DAP was lightly superior to that measured in the whole tree chips. The general wood chemical composition was very influenced by the planting place and clone type. The S/G ratio influenced pulping yield more than the lignin content. Clones with higher S/G ratio presented higher yield, despite the lignin content. For a fixed load of active alkali, there is negative correlation between S/G ratio and pulp kappa number. The 7074 clone wood in Santa Bárbara area presented inferior quality in relation to the other clones studied.

---

Guidance Committee: Paulo Fernando Trugilho – UFLA (Supervisor),  
Jorge Luiz Colodette – UFV, José Tarcísio Lima – UFLA e José  
Reinaldo Moreira da Silva – UFLA (Co-supervisors)

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material heterogêneo. As grandes variações na sua composição química podem ser atribuídas às variações entre espécies, embora ocorram algumas alterações significativas dentro de uma mesma espécie, em virtude da idade e de fatores genéticos e ambientais.

Dentro de uma mesma espécie, a composição química varia com a altura do tronco e no sentido medula-casca. Além disso, há diferenças significativas entre cerne e alburno, madeira de início e madeira de fim de estação de crescimento. Em escala microscópica, observam-se diferenças até mesmo entre células individuais. Todas essas considerações atestam a necessidade de analisar com cuidado os dados referentes à composição química da madeira (Browning, 1963).

A estrutura da madeira no sentido radial é a mais importante fonte de variação. A sua extensão é determinada, principalmente, pela presença da madeira juvenil, pela sua proporção relativa no tronco e pelas suas características físico-químicas e anatômicas. A elevação do gradiente de variação dentro da zona juvenil diminui com o passar do tempo (Malan, 1995).

As variações durante o período juvenil são encontradas, principalmente, nas dimensões celulares e na organização da parede celular. De modo geral, sabe-se que as variações das características da madeira correspondem a uma elevação rápida dos valores de densidade, comprimento de fibra, etc., durante o período juvenil, até atingirem a maturidade, quando os valores se mantêm mais ou menos constantes. O período de juvenilidade é variável, podendo ser superior a 20 anos, para

alguns *Eucalyptus* de plantios comerciais na Austrália (Jankowsky, 1979). Segundo Koga (1988), o lenho juvenil é formado nos primeiros anos, na região próxima da medula; sua duração é variável, podendo ocupar 85% do tronco em uma árvore de 15 anos e cerca de 10%, aos 30 anos.

A heterogeneidade da madeira afeta a sua utilização final, seja ela artesanal ou industrial. Ela pode inviabilizar o seu uso, devido à perda de qualidade do produto e ao aumento dos custos de produção.

A qualidade da madeira é um fator de extrema importância quando o objetivo é a produção de polpa celulósica com alto rendimento industrial, baixo custo e elevada qualidade. Características como a densidade básica, dimensões das fibras e constituição química estão entre os principais critérios de seleção da madeira para esta atividade.

A qualidade da polpa celulósica depende da matéria-prima e do processo de polpação. Com relação a este processo, a maioria das variáveis já foi bem estudada e, sabe-se, sofre alterações em função da matéria-prima. Assim, a fim de se atingir o objetivo de produção de polpa celulósica de alta qualidade, o maior desafio da indústria é a seleção de matéria-prima adequada, para o seu suprimento.

O objetivo desse estudo foi caracterizar madeiras de *Eucalyptus*, provenientes de vários clones e locais de plantio, por meio de diferentes métodos de avaliação destrutiva (densidade básica, morfologia das fibras e composição química da madeira). Foram também investigadas as relações entre a densidade básica, a composição química da madeira e a taxa de deslignificação e seletividade do processo de polpação kraft.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Material biológico**

O material biológico foi o mesmo descrito no Capítulo 2, porém, na etapa de polpação kraft, foram utilizadas 24 amostras de cavacos, compostas pela mistura das 5 amostras/árvores de cada clone/local.

### **2.2 Local de experimentação**

O local do experimento foi o mesmo descrito no Capítulo 2.

### **2.3 Métodos destrutivos**

#### **2.3.1 Densidade básica da madeira**

Foram determinadas densidades básicas da madeira, por dois diferentes métodos de amostragem, ou seja, uma determinada a 1,3 m de altura do solo (DAP) e outra como a média composta da árvore (amostra composta). A densidade a 1,3 m foi determinada em um disco de 2,5 cm de espessura, utilizando-se o método da medição indireta do volume (balança hidrostática), descrito pela norma TAPPI 258 om-85. A densidade básica média da árvore foi determinada em amostra de cavacos, que continha material retirado na base, a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco, considerada até um diâmetro mínimo de 7 cm. Nessas posições foram retirados toretes de 1 m de comprimento, os quais foram picados e os cavacos selecionados.

A densidade básica determinada nos discos foi obtida pela média de duas cunhas opostas e a dos cavacos foi a medida de uma amostra composta, representada por uma mistura de todos os pontos da amostragem longitudinal considerada no tronco das árvores.

#### **2.3.2 Determinação das dimensões das fibras e vasos**

A preparação do macerado para a análise das fibras, visando à determinação das suas dimensões, foi feita de acordo com o método utilizado por Ramalho (1987), também conhecido como método do peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) utiliza como solução macerante água oxigenada 30% e ácido acético glacial, na proporção 1:1. A seguir as lâminas foram coradas com azul de astra.

Foram mensuradas 45 fibras por árvore-amostra e por clone e local. As mensurações foram realizadas por meio do microscópio óptico “Olympus BX 41” acoplado ao sistema de análise de imagem de concepção canadense “Win Cell”. As imagens foram coletadas com o auxílio de uma câmera de captura digital para o microcomputador, no qual foram realizadas as medições.

### **2.3.3 Análise da composição química da madeira**

A composição química da madeira foi determinada em serragem obtida em moinho Willey, a partir dos cavacos, conforme a norma TAPPI T 257 om-92. As análises foram efetuadas na fração de serragem que passou pela peneira com malha de 40 mesh e que ficou retida na peneira de malha de 60 mesh (ASTM). Após classificação, a serragem foi acondicionada em ambiente climatizado e, em seguida, armazenada em frasco hermeticamente fechado. A determinação do teor absolutamente seco foi realizada de acordo com a norma TAPPI 264 om-88.

Na Tabela 1 estão apresentadas as análises químicas realizadas e as respectivas normas utilizadas.

TABELA 1 Análises químicas da madeira de eucalipto

Características	Metodologia
Extrativos em acetona	SCAN TEST CM 49-93
Lignina insolúvel	Gomide & Demuner (1986)
Lignina solúvel	Godschmid (1971)
Relação siringila/guaiacila (S/G)	Lin & Dence (1992)
Grupos acetilas	Solar et al. (1987)
Ácidos urônicos	Scott (1979)
Análise de carboidratos	Kaar (1991)

### 2.3.4 Preparo e classificação dos cavacos

Foram retirados toretes de 1 m de comprimento na base e a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco, considerado até um diâmetro mínimo de 7 cm. Os toretes foram picados, em picador laboratorial, na Cenibra. Os cavacos foram classificados manualmente no Laboratório de Celulose e Papel da UFV, sendo selecionados os que ficaram retidos em peneira de 16 mm x 16mm. Os nós, as cunhas e as cascas detectadas visualmente foram eliminados manualmente no momento da classificação. Os cavacos selecionados foram secos ao ar livre e armazenados em sacos de polietileno, para prevenir contra o ataque de microrganismos e a umidade.

### 2.3.5 Polpação kraft

Nesta etapa foram utilizadas 24 amostras de cavacos, compostas pela mistura das 5 árvores-amostra de cada clone e local. Os cozimentos kraft foram realizados em digestor rotativo, com 4 reatores individuais de 2 litros cada um, aquecido eletricamente e dotado de termômetro e manômetro, possibilitando a realização, numa única batelada, de quatro cozimentos simultaneamente. O tempo e a temperatura de cozimento foram monitorados por meio de controlador eletrônico acoplado a um computador, em que um sensor de temperatura (PT100) mantém-se em contato direto com os cavacos e o licor de cozimento.

As condições de cozimento estão apresentadas na Tabela 2. Foi estabelecida uma carga de álcali fixa de 18,4% para todas as 24 amostras. Esse valor foi definido conforme a Figura 1, a qual indica uma demanda de 18,4% de álcali ativo, objetivando alcançar número kappa 17, como NaOH, que é convencionalmente utilizado pela indústria nacional. Para a construção desta curva, foi escolhida a amostra de cavacos proveniente das 5 árvores do clone 57 da região do Rio Doce-Ipaba, por esta apresentar densidade básica, além de teor de lignina e extrativos mais próximos da média das 24 amostras.

O valor de rendimento depurado para número kappa 17 (RD17) foi calculado de acordo com a Equação 1, que prevê uma perda de 0,5% de rendimento para cada unidade de kappa reduzida no cozimento kraft de eucalipto (Colodette et al., 2006):

$$RD17 = RD + 0,5 * (17 - kappa) \quad (1)$$

em que: RD é o rendimento depurado e kappa é o número kappa.

TABELA 2 Condições utilizadas nos cozimentos

Fatores	Quantidade
Cavacos, g, absolutamente secos (a.s.)	250g
Sulfidez	25%
Álcali ativo, como NaOH	18,4 %
Relação licor/madeira	4/1
Temperatura máxima	170 °C
Tempo até a temperatura máxima	90 minutos
Tempo na temperatura máxima	60 minutos

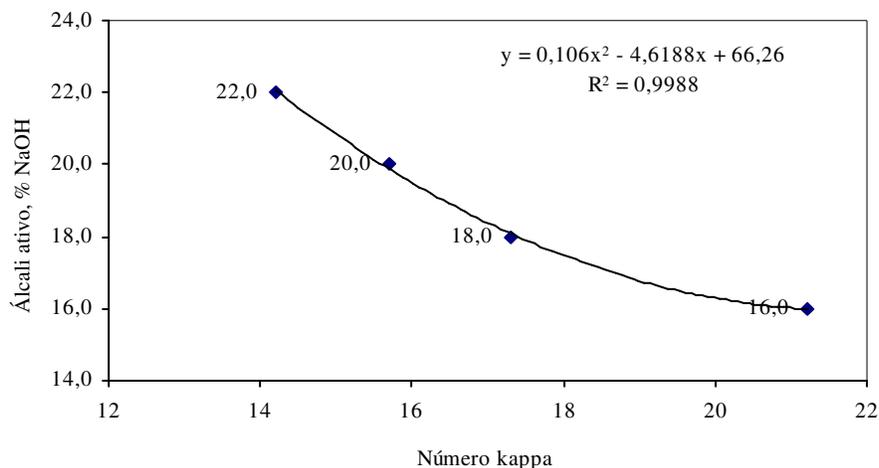


FIGURA 1 Estabelecimento da carga de álcali ativo requerida para kappa 17

### 2.3.6 Lavagem e depuração

Após os cozimentos, os cavacos foram descarregados no lavador de polpa com tela de aço inox de 150 mesh e lavados com água, à temperatura ambiente. A individualização das fibras foi realizada “hidrapulper” laboratorial de 25 litros de capacidade, numa consistência de aproximadamente 0,6%. A depuração da celulose foi realizada em depurador laboratorial Voith dotado de placa com fendas de 0,2 mm. A polpa foi lavada com excesso de água e, posteriormente, desaguada em centrífuga até uma consistência de aproximadamente 30%. Em seguida, foram realizadas análises de número kappa, viscosidade e rendimentos depurados.

### 2.3.7 Determinação do número kappa e da viscosidade da polpa celulósica

A formação da folha para posterior determinação do número kappa e viscosidade seguiu os procedimentos analíticos da Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI (2002), conforme descrito na Tabela 3.

TABELA 3 Procedimentos analíticos

Procedimento	Normas
Formação de folhas manuais	TAPPI T218 om-91
Número kappa	TAPPI 236 cm-85
Viscosidade	TAPPI 230 om-89

#### 2.4 Análise estatística

Utilizou-se delineamento inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial, com dois fatores: clones e locais. Para as características de densidade, morfologia das fibras e composição química da madeira, foram utilizadas cinco repetições (5 árvores-amostra) e, para as características de polpação, foram utilizadas duas repetições (cozimento em duplicata da mistura de 5 árvores-amostra).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Densidade básica e morfologia das fibras

Os valores médios e o teste de comparação múltipla para a densidade básica e morfologia das fibras encontram-se na Figura 4. Verifica-se que, na média, a densidade básica a 1,3 m do solo (DAP) é maior que a média da árvore inteira, exceto para o clone 1215. Foi também observada maior variabilidade entre árvores, nas medições efetuadas a 1,3 do solo (DAP), tendo em vista que a densidade da árvore inteira foi determinada em cavacos previamente selecionados e isento de defeitos, o que pode contribuir para a menor variabilidade entre árvores.

Por outro lado, os menores valores médios de densidade observados para a árvore inteira podem estar relacionados à variação que existe ao longo do seu fuste, sabendo que frações significativas do tronco apresentam densidade menor que a densidade a 1,3 do solo (DAP). O clone 7074 apresentou o menor valor de densidade básica em todos os locais avaliados, independentemente do método de medição.

TABELA 4 Resultados médios e testes de comparação de médias da densidade básica e morfologia de fibras, para os 24 clones/locais avaliados

Clones	Locais	DBM	DBDAP	COMP	LARG	LUME	ESPAR
57	Cocais	0,418 b	0,461	1,11 a	16,32 a	9,38 a	3,50 b
	Guanhães	0,441 a	0,455	0,97 b	16,29 a	8,63 a	3,86 a
	Rio Doce	0,444 a	0,455	1,04 a	15,71 a	8,77 a	3,49 b
	Sta Bárbara	0,434 a	0,437	0,89 c	14,02 b	7,18 b	3,42 b
	Média	0,434	0,452 b	1,00	15,59	8,49	3,57
1046	Cocais	0,434 a	0,472	1,10 a	17,41 a	9,71 a	3,88 b
	Guanhães	0,439 a	0,449	1,06 a	17,35 a	8,86 a	4,30 a
	Rio Doce	0,429 a	0,440	1,05 a	16,15 a	8,78 a	3,68 b
	Sta Bárbara	0,437a	0,429	0,93 b	13,81 b	6,69 b	3,56 b
	Média	0,435	0,448 b	1,04	16,18	8,51	3,86
1213	Cocais	0,453 b	0,511	1,02 b	17,73 a	9,92 a	3,93 a
	Guanhães	0,467 a	0,460	1,11 a	16,88 a	9,46 a	3,73 a
	Rio Doce	0,471 b	0,464	1,07 a	16,40 a	8,74 a	3,84 a
	Sta Bárbara	0,456 a	0,446	0,94 c	14,14 b	7,51 b	3,31 b
	Média	0,462	0,470 a	1,04	16,29	8,91	3,70
1215	Cocais	0,430 b	0,422	1,05 a	17,50 a	10,27 a	3,65 a
	Guanhães	0,459 a	0,450	1,06 a	17,06 a	9,40 a	3,86 a
	Rio Doce	0,447 a	0,439	1,00 b	14,69 b	8,05 b	3,32 b
	Sta Bárbara	0,446 a	0,438	0,95 b	14,21 b	7,57 b	3,32 b
	Média	0,446	0,437 b	1,02	15,87	8,82	3,54
1274	Cocais	0,439 b	0,545	1,07 a	16,85 a	10,13 a	3,40 b
	Guanhães	0,464 a	0,461	1,10 a	16,76 a	8,30 b	4,27 a
	Rio Doce	0,451 a	0,459	0,93 b	15,24 b	8,29 b	3,48 b
	Sta Bárbara	0,431 b	0,427	0,97 b	14,24 b	7,22 c	3,51 b
	Média	0,446	0,473 a	1,02	15,77	8,49	3,67
7074	Cocais	0,372 b	0,379	0,90 b	16,70 a	9,84 b	3,47 a
	Guanhães	0,372 b	0,375	1,07 a	17,76 a	11,40 a	3,21 a
	Rio Doce	0,392 a	0,396	0,87 b	14,44 b	8,05 c	3,20 a
	Sta Bárbara	0,355 c	0,357	1,00 a	15,27 b	8,70 c	3,29 a
	Média	0,373	0,377 c	0,96	16,04	9,50	3,29

DBDAP E DBM = densidade básica a 1,3 m de altura do solo (DAP) e densidade básica média da árvore ( $g/cm^3$ ), COMP, LARG, LUME E ESPAR = comprimento da fibra (mm), largura da fibra ( $\mu m$ ), diâmetro do lume ( $\mu m$ ) e espessura da parede ( $\mu m$ ).

Médias seguidas de mesma letra, dentro de clone, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

Os valores médios de DBM e DBDAP, por local (Tabela 5), indicam que as regionais de Cocais e Santa Bárbara apresentaram o maior e o menor valor de densidade básica no DAP (DBDAP), respectivamente. Contrariamente, as medições na árvore inteira mostram densidade básica (DBM) mais alta para Guanhães e mais baixa para Cocais. Esses resultados contraditórios realçam as diferenças nos dois métodos de medição de densidade e, para a indústria de celulose, o método da árvore inteira é mais recomendável.

TABELA 5 Valores médios dos efeitos principais para a densidade básica obtida na altura de 1,3 m do solo (DAP)

Local	DBM(g/cm <sup>3</sup> )	DBDAP (g/cm <sup>3</sup> )
Cocais	0,424 b	0,468 a
Guanhães	0,440 a	0,442 b
Rio Doce	0,439 a	0,442 b
Santa Bárbara	0,426 b	0,422 c

DBM= densidade básica média dos cavacos; DBDAP= densidade básica na DAP  
Médias seguidas de mesma letra, dentro de clone, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade

Em relação ao comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras foram verificadas pequenas, porém significativas, variações entre clones e locais (Tabela 4). O clone 7074 apresentou o maior diâmetro médio do lume (9,5 µm), a menor espessura média de parede (3,29 µm) e o menor comprimento da fibra em relação aos demais. Coincidentemente, esse clone foi o que também apresentou a menor densidade básica (DBDAP e DBM). Esse comportamento está de acordo com alguns pesquisadores (Brasil & Ferreira, 1972; 1979; Foekel, 1974 e Tomazello Filho, 1985; citados por Queiroz, 2002), que relataram uma correlação positiva entre espessura de parede e densidade da madeira.

Na Tabela 6 encontra-se o resumo da análise de variância para o delineamento experimental adotado. Os efeitos de clone e local foram significativos para densidade básica da madeira, comprimento de fibra, diâmetro do lume e espessura da parede, a 1% de probabilidade. Para a largura da fibra (LARG), o efeito de clone foi não significativo. A interação clone x local somente foi não significativa para DBDAP. Interação significativa indica a existência de dependência entre os fatores. Dessa forma, optou-se por fazer o desdobramento da interação e avaliação do efeito do local (regional) dentro do clone.

TABELA 6 Resumo da análise de variância para a densidade básica da madeira e dimensões das fibras

FV	GL	Quadrado médio					
		DBM	DBDAP	COMP	LARG	LUME	ESPES
Clone (C)	5	0,0191**	0,0243**	0,0164**	1,3872 ns	3,1045**	0,7213**
Local (L)	3	0,0020**	0,0106**	0,0777**	54,6636**	33,1636**	1,2428**
C x L	15	0,0003**	0,0019 ns	0,0212**	1,9192*	2,1297**	0,2208**
Resíduo	96	0,0001	0,0014	0,0032	1,0308	0,6960	0,0689
Total	119						
Média		0,433	0,444	1,01	15,96	8,78	3,60
CV(%)		2,71	8,43	5,60	6,36	9,50	7,29

FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\*, \* e ns = significativo, a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

O resumo da análise de variância para o desdobramento da interação e avaliação do efeito do local dentro do clone encontra-se na Tabela 7. Observa-se que somente os clones 1046 e 7074 não apresentaram diferença significativa para DBM e espessura da parede das fibras, respectivamente. Verifica-se que o ambiente interfere muito na densidade básica média da árvore (DBM) e sua morfologia das fibras da madeira.

TABELA 7 Resumo da análise de variância para o desdobramento da interação e avaliação do efeito de local dentro de clone, para densidade básica média e morfologia de fibra

FV	GL	Quadrado médio				
		DBM	COMP	LARG	LUME	ESPES
Local/Clone 57	3	0,0007 **	0,0461 **	5,8607 **	4,3422 **	0,1935 *
Local/Clone 1046	3	0,0001 ns	0,0255 **	14,1418 **	8,2542 **	0,5236 **
Local/Clone 1213	3	0,0003 **	0,0284 **	11,7437 **	5,5363 **	0,3689 **
Local/Clone 1215	3	0,0007 **	0,0130 **	13,7173 **	7,6532 **	0,3529 **
Local/Clone 1274	3	0,0010 **	0,0303 **	7,9233 **	7,2671 **	0,8287 **
Local/Clone 7074	3	0,0011 **	0,0403 **	10,8727 **	10,7591 **	0,0793 ns
Resíduo	96	0,0001	0,0032	1,0308 **	0,6960	0,0689

FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\*, \* e ns = significativo, a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

### 3.2 Composição química da madeira

Nas Tabelas 8 e 9 encontram-se os valores das características químicas das madeiras estudadas, por clone e região. Os clones plantados em regiões montanhosas - 57, 1213 e 1215, em Cocais e 7074, em Rio Doce-Ipaba (Cap 2, Tabela 2) - produziram madeira com maior teor de celulose. Os resultados da Tabela 9 indicam que as madeiras da região de Cocais se destacam pelos seus maiores teores de celulose, sendo estatisticamente diferente das demais. Esse resultado é explicado pelo fato de árvores de regiões montanhosas possuírem, usualmente, maior quantidade de madeira de tração, que contém camada gelatinosa na parede celular, rica em celulose (Timell, 1969).

Os clones 7074 e 1274 apresentaram os maiores teores de hemiceluloses (27,4%-27,5%) enquanto os menores valores desses polissacarídeos foram observados para o clone 57 e 1213 (25,2%-25,8%). As regiões mais montanhosas (Cocais) produziram madeiras com menores teores de hemiceluloses, refletindo seus maiores teores de celulose. O teor de extrativos em acetona das madeiras variou de 0,70% a 1,71%, sendo estatisticamente insignificantes as diferenças entre os vários clones e locais, exceto para o clone

1215 da região de Santa Bárbara que apresentou teor de extrativo significativamente inferior ao das demais regionais (Tabela 8).

O teor de lignina dos vários clones variou na faixa de 27,9%-32,2%. As madeiras com maiores teores de lignina foram encontradas nas regiões do Rio Doce e Santa Bárbara (Tabela 9) e para os clones 7074 e 57 (Tabelas 8 e 9). A relação siringila/guaiacila da lignina é bastante variável dentro da árvore, entre árvores e entre espécies (Wu et al., 1992; Ona et al., 1997). Para eucalipto, os dois principais tipos de lignina são siringila/guaiacila (S/G) (Bland, 1985; Wu et al., 1992). Nesse estudo, a relação S/G das ligninas variou na faixa de 2,50 a 3,12, sendo os maiores valores observados para os clones 1046 e 1213 (Tabela 8), não havendo efeito significativo das regionais nesse parâmetro.

A partir dos resultados apresentados, podê-se concluir que o clone 7074 da região de Santa Bárbara foi o de menor atratividade em relação qualidade da madeira para a produção de celulose, pois apresentou os piores atributos: alto teor de lignina (32,2%), baixo teor de celulose (38,7%), alto teor de extrativos (1,34%) e baixa relação S/G (2,50) em relação aos demais. Além disso, este clone foi o que apresentou a menor densidade básica dentre todos (Tabela 4). De acordo com Wallis et al. (1996), um bom clone é aquele que apresenta alto teor de celulose.

TABELA 8 Resultados médios de características químicas da madeira para os 24 clones/locais avaliados

Clones	Locais	Celulose*	Hemiceluloses**	Ligninas***	Extrativos****	S/G
57	Cocais	45,50 a	22,74 c	30,80 a	0,96 a	2,71 a
	Guanhães	42,25 b	26,26 a	30,56 a	0,93 a	2,70 a
	Rio Doce-Ipaba	42,50 b	25,05 b	31,22 a	1,22 a	2,78 a
	S. Bárbara	40,08 c	26,91 a	31,83 a	1,18 a	2,71 a
	Média	42,58 a	25,24 d	31,10 a	1,07 a	2,73 c
1046	Cocais	44,15 a	25,44 b	29,70 b	0,71 a	2,97 b
	Guanhães	44,78 a	25,71 b	28,58 b	0,92 a	3,10 a
	Rio Doce-Ipaba	41,54 b	26,14 b	30,98 a	1,34 a	2,77 b
	S. Bárbara	42,22 b	27,77 a	28,81 b	1,20 a	3,06 a
	Média	43,17 a	26,27 c	29,52 b	1,04 a	2,98 a
1213	Cocais	45,96 a	24,36 c	28,92 a	0,77 a	3,04 a
	Guanhães	40,26 c	27,68 a	30,48 a	1,57 a	2,91 b
	Rio Doce-Ipaba	43,54 b	25,12 c	30,26 a	1,08 a	2,78 b
	S. Bárbara	43,06 b	26,17 b	29,48 a	1,29 a	2,99 a
	Média	43,21 a	25,83 c	29,79 b	1,18 a	2,93 a
1215	Cocais	43,71 a	25,47 b	29,97 a	0,85 a	2,93 a
	Guanhães	40,29 b	27,63 a	30,36 a	1,71 a	2,61 a
	Rio Doce-Ipaba	40,31 b	27,48 a	30,88 a	1,32 a	2,60 a
	S. Bárbara	41,13 b	26,48 b	31,68 a	0,70 b	2,72 a
	Média	41,36 a	26,77 b	30,72 a	1,15 a	2,72 c
1274	Cocais	40,15 b	27,81 a	30,70 a	1,35 a	2,88 a
	Guanhães	44,51 a	26,59 b	27,91 b	0,99 a	2,70 b
	Rio Doce-Ipaba	40,91 b	28,10 a	30,19 a	0,80 a	2,66 b
	S. Bárbara	40,73 b	27,01 b	31,38 a	0,87 a	2,85 a
	Média	41,58 a	27,38 a	30,05 b	1,00 a	2,77 b
7074	Cocais	39,90 a	27,87 a	31,10 a	1,13 a	2,67 b
	Guanhães	39,28 a	27,85 a	31,84 a	1,03 a	2,88 a
	Rio Doce-Ipaba	41,16 a	26,43 b	31,26 a	1,15 a	3,12 a
	S. Bárbara	38,74 a	27,88 a	32,18 a	1,34 a	2,50 b
	Média	39,77 c	27,51 a	31,60 a	1,16 a	2,79 b

Médias seguidas de mesma letra, dentro de clone, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

\*Para o cálculo do teor de celulose, foi utilizado o teor de glicose total, descontado do teor de glicose associado às glicomananas

\*\* Somatório dos polímeros de xilanas, mananas, arabinanas, galactanas, ácidos urônicos e acetil

\*\*\* Somatório de lignina insolúvel e solúvel

\*\*\*\* Extrativos em acetona

TABELA 9 Composição química da madeira por regional

Local	Celulose (%)	Hemiceluloses (%)	Lignina Total (%)	Extrativos (%)	S/G (mol/mol)
Cocais	43,23 a	25,61 c	30,19 b	0,99 a	2,86 a
Guanhães	41,89 b	26,95 a	29,96 b	1,19 a	2,82 a
Rio Doce	41,66 b	26,38 b	30,79 a	1,12 a	2,78 a
Santa Bárbara	40,99 c	27,03a	30,89 a	1,09 a	2,82 a

Médias seguidas de mesma letra, dentro de clone, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade

Na Tabela 10 é apresentado o resumo da análise de variância para a composição química da madeira. Verifica-se que as interações clone x local foram significativas, a 1% de probabilidade. Assim sendo, optou-se por estudar o desdobramento do efeito do local dentro do clone, conforme mostrado na Tabela 11, pela qual se observa que, para os teores de celulose e de hemiceluloses, o efeito do local afetou significativamente todos os clones estudados. Isso indica que essas variáveis são muito sensíveis a variações do ambiente. Os clones 57, 1213, 1215 e 7074 não sofreram efeito significativo do local para o teor de lignina total, enquanto os clones 1213, 1215, 57 e 1274 não foram afetados significativamente para o teor de extrativos e relação S/G, respectivamente. Para o teor de lignina total, o efeito do local não afetou significativamente os clones 57, 1213, 1215 e 7074.

TABELA 10 Resumo da análise de variância para os resultados das análises químicas da madeira

FV	GL	Celulose	Hemiceluloses	Lignina total	Extrativos	S/G
Clone(C)	5	34,9081 **	15,7815 **	13,1403 **	0,1827 ns	0,2281 **
Local(L)	3	26,3317 **	12,9064 **	6,2266 **	0,2063 ns	0,0306 ns
CxL	15	15,1442 **	5,9534 **	3,8336 **	0,3973 **	0,1115 **
Resíduo	96	2,0224	0,6860	1,1910	0,1307	0,0159
Total	119					
Média		41,94	26,50	30,46	1,1054	2,8253
CV(%)		3,39	3,13	3,58	32,71	4,48

FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\*, \* e ns = significativo, a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

TABELA 11 Resumo da análise de variância para o desdobramento da interação e avaliação do efeito de local dentro de clone para análises químicas da madeira

FV	GL	Quadrado médio				
		Celulose	Hemiceluloses	Lignina Total	Extrativos	S/G
Local/Clone 57	3	24,839 **	16,8589 **	1,5654 ns	0,1108 ns	0,0064 ns
Local/Clone 1046	3	11,872 **	5,4424 **	5,9419 **	0,2863 ns	0,1098 **
Local/Clone 1213	3	27,251 **	10,3625 **	2,6049 ns	0,3574 *	0,0623 *
Local/Clone 1215	3	12,969 **	5,0065 **	2,7257 ns	1,0591 **	0,1166 **
Local/Clone 1274	3	19,662 **	2,4342 *	11,2945 **	0,2956 ns	0,0426 ns
Local/Clone 7074	3	5,4574 *	2,5689 *	1,2621 ns	0,0834 ns	0,2505 **
Resíduo	96	2,0224	0,6860	1,1910	0,1307	0,0159

FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\*, \* e ns = significativo, a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

### 3.3 Polpação kraft

Os resultados das análises dos cozimentos kraft estão apresentados na Tabela 12. A taxa de deslignificação, medida pelo número kappa após cozimento, variou de 14,6-17,5, para uma carga de álcali ativo fixa de 18,4%, como NaOH. O número kappa está relacionado com o teor de lignina residual na polpa produzida, ou seja, quanto maior o kappa, maior a quantidade de lignina residual na polpa e mais difícil e caro será o seu branqueamento. O número kappa da polpa indica também a polpabilidade da madeira, já que o álcali ativo foi constante para todas as 24 amostras. Os clones 57 e 1213 da regional de Cocais e Santa Bárbara apresentaram o maior número kappa (17,5) e o menor

número kappa (14,6), respectivamente. A polpabilidade da madeira de Santa Bárbara foi significativamente superior à das demais regiões (Tabela 12).

TABELA 12 Resultados experimentais e médios do cozimento kraft dos 24 clones avaliados

Clone	Local	Característica			
		Kappa	RD (%)	RD17 (%)	Viscosidade (cP)
57	Cocais	17,5 a	51,8 a	51,6 a	31,0 b
	Guanhães	17,3 a	51,8 a	51,7 a	36,6 a
	Rio Doce	16,5 a	51,8 a	52,1 a	32,3 b
	Santa Bárbara	17,2 a	51,9 a	51,8 a	35,8 a
	Média	17,1 a	51,8 a	51,8 c	33,9 b
1046	Cocais	15,7 b	52,3 a	53,0 a	31,2 d
	Guanhães	15,3 b	52,9 a	53,8 a	40,1 b
	Rio Doce	17,3 a	50,5 b	50,4 b	44,3 a
	Santa Bárbara	15,1 b	52,4 a	53,4 a	38,2 c
	Média	15,9 d	52,0 a	52,7 a	38,5 a
1213	Cocais	15,2 a	50,8 b	51,7 b	28,0 a
	Guanhães	15,7 a	51,4 a	52,1 b	28,1 a
	Rio Doce	16,1 a	51,5 a	52,0 b	26,0 b
	Santa Bárbara	14,6 a	51,9 a	53,1 a	29,1 a
	Média	15,4 d	51,4 b	52,2 b	27,8 c
1215	Cocais	15,7 b	51,2 a	51,9 a	31,2 c
	Guanhães	17,0 a	50,7 a	50,7 b	35,8 a
	Rio Doce	17,1 a	50,7 a	50,7 b	33,8 b
	Santa Bárbara	16,0 b	51,2 a	51,7 a	36,4 a
	Média	16,5 b	51,0 c	51,3 d	34,3 b
1274	Cocais	16,7 b	51,0 b	51,2 a	39,3 a
	Guanhães	17,4 a	51,9 a	51,7 a	41,1 a
	Rio Doce	17,2 a	51,0 b	50,9 a	31,6 b
	Santa Bárbara	16,4 b	51,2 b	51,5 a	40,2 a
	Média	16,9 a	51,3 b	51,3 d	38,1 a
7074	Cocais	16,9 a	50,3 b	50,4 b	38,3 b
	Guanhães	16,4 b	50,9 b	51,2 b	39,3 a
	Rio Doce	15,5 b	52,2 a	53,0 a	36,7 b
	Santa Bárbara	16,5 a	50,6 b	50,9 b	40,5 a
	Média	16,3 c	51,0 c	51,4 d	38,7 a

Médias seguidas de mesma letra, dentro de clone, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

O rendimento depurado do cozimento variou na faixa de 50,3%-52,9%, sendo mais alto para o clone 1046 na regional de Guanhões e o mais baixo para o clone 7074 da regional Cocais. Essa mesma tendência foi mantida comparando-se os rendimentos ao kappa fixo de 17. Colodette et al. (2006), trabalhando com um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* de número kappa 14-21, observaram que cada unidade de kappa reduzida no cozimento corresponde à perda de 0,5% de rendimento. Menores rendimentos depurados foram obtidos nas regionais de Cocais e Rio Doce (Tabela 13).

A viscosidade está relacionada com a degradação dos carboidratos provocada pelos reagentes de cozimento. Ela dá idéia da seletividade do cozimento kraft. Maiores valores de viscosidade indicam melhores seletividades. Neste estudo, foram obtidas viscosidades variando na faixa de 26,0-44,3 cP, indicando a existência de significativa variação entre as madeiras. Os maiores valores de viscosidade da polpa marrom foram alcançados com a madeira do clone 1046, regional do Rio Doce-Ipaba, enquanto que a de menor viscosidade foi obtida com a madeira do clone 1213, na mesma regional. Maiores seletividades de cozimento foram observadas nas regiões de Guanhões e Santa Bárbara (Tabela 13).

TABELA 13 Valores médios dos efeitos de local para as características de polpação

Local	kappa	RD(%)	RD17(%)	Viscosidade(cP)
Cocais	16,41 a	51,20 b	51,60 b	33,00 c
Guanhões	16,41 a	51,59 a	51,85 a	37,08 a
Rio Doce	16,58 a	51,30 b	51,51 b	34,00 b
Santa Bárbara	15,91 b	51,47 a	52,06 a	36,61 a

Médias seguidas de mesma letra, dentro de clone, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade

O resumo da análise de variância para as características da polpação é apresentado na Tabela 14. Observa-se que o efeito clone x local foi significativo

para todas as características estudadas. Procedeu-se, então, o desdobramento e avaliação do efeito do local dentro do clone, como mostrado na Tabela 15.

TABELA 14 Resumo da análise de variância para os resultados de cozimento

FV	GL	Quadrado médio			
		kappa	RD	RD 17	Viscosidade
Clone(C)	3	1,0000 **	0,3557 *	0,7436 **	47,3255 **
Local(L)	5	2,5833 **	1,4978 **	2,45450 **	136,174 **
CxL	15	0,8500 **	0,8910 **	1,6899 **	17,7495 **
Resíduo	24	0,1666	0,1043	0,1058	0,7308
Total	47				
Média		16,33	51,39	51,76	35,17
CV(%)		2,50	0,63	0,63	2,43

FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; \*\*, \* = significativo, a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Pela Tabela 15 verifica-se que os clones 57 e 1213, 57 e 1215, 57 e 1274 não sofrem efeito significativos do local de plantio para o número kappa, rendimento depurado (RD) e rendimento depurado em kappa 17 (RD17), respectivamente. Para a viscosidade da polpa, todos os clones foram afetados significativamente pelo local.

TABELA 15 Resumo da análise de variância para o desdobramento da interação e avaliação do efeito de local dentro de clone, para os resultados de cozimento

FV	GL	Quadrado médio			
		kappa	RD	RD 17	Viscosidade
Local/Clone 57	3	0,3333 ns	0,0012 ns	0,1012 ns	16,1250 **
Local/Clone 1046	3	1,8333 **	2,1045 **	4,5166 **	60,3945 **
Local/Clone 1213	3	0,4583 ns	0,5245 **	0,9545 **	3,6133 **
Local/Clone 1215	3	0,6666 *	0,1345 ns	0,7779 **	12,0445 **
Local/Clone 1274	3	1,1250 **	0,4816 *	0,2545 ns	37,8945 **
Local/Clone 7074	3	0,8333 **	1,5645 **	2,5883 **	6,0012 **
Resíduo	24	0,1666	0,1043	0,1058	0,7308

FV = fonte de variação, GL = grau de liberdade; \*\*, \* e ns = significativo, a 1% e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

### 3.4 Polpação *versus* composição química da madeira

Tendo em vista que o objetivo da polpação é a remoção seletiva da lignina e a 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 e consumo de álcali. Os extrativos causam prejuízos também por dificultarem a impregnação de cavacos (Wehr & Barrichelo, 1992). Por outro lado, a densidade básica da madeira e a relação S/G da lignina tem sido consideradas muito importantes para o desempenho da polpação kraft (Gomide et al., 2005). Além disso, por dar origem aos chamados ácidos hexenurônicos, o teor de hemiceluloses da madeira tem sido também considerado relevante durante a polpação kraft (Costa et al., 2001).

As curvas apresentadas nas Figuras 2 a 5 indicam a baixíssima correlação existente entre a eficiência de deslignificação, medida pelo número kappa da polpa após cozimento em álcali fixo, e a densidade básica, os teores de hemiceluloses, os extrativos e a lignina total da madeira. Porém, na Figura 6, observa-se boa correlação entre a eficiência de deslignificação e a relação S/G da lignina da madeira, analisando-se todos os clones e todos os locais.

Os efeitos da relação S/G na eficiência de deslignificação por regional e por clone, respectivamente, podem ser vistos nas Figuras 7 e 8. Verifica-se que as magnitudes das correlações foram elevadas, quando analisadas por clone, destacando-se clone 1046, e ainda significativos, quando analisados por local, particularmente as regionais Cocais e Guanhões. Tais resultados mostram a importância desse atributo em estudos da qualidade de madeira para a produção de celulose. Rodrigues et al. (1998) relatam que, além do teor de lignina na madeira, a natureza da lignina (relação S/G) é importante parâmetro para produção de polpa celulósica no que se refere à taxa de deslignificação, consumo de reagentes químicos e rendimento de polpa. A deslignificação não depende apenas da acessibilidade da lignina, mas também da sua reatividade

(Fergus & Goring, 1969), que é influenciada pela relação siringila/guaiacila (Chang & Sarkanen, 1973). Acredita-se que madeiras com alta relação siringila/guaiacila sejam mais fáceis de deslignificar. Estudos realizados por Colodette et al. (2005) demonstram também que a relação S/G da lignina influi mais decisivamente no rendimento do cozimento do que o conteúdo de lignina da madeira.

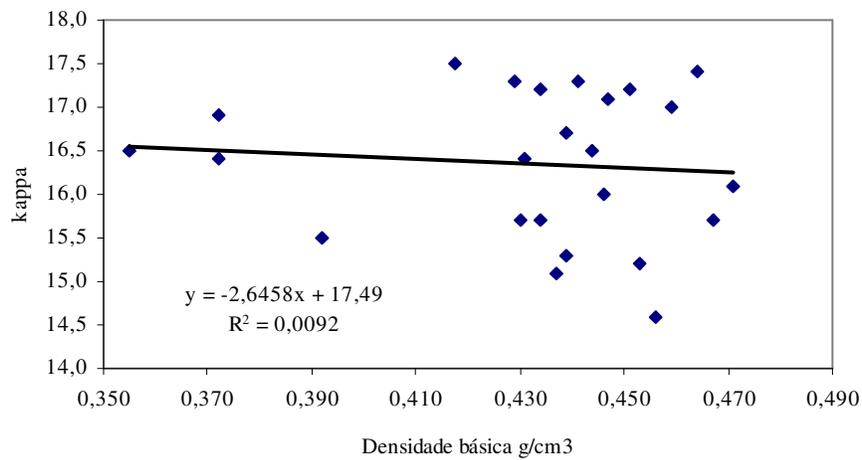


FIGURA 2 Relação entre a densidade básica da árvore inteira e número kappa

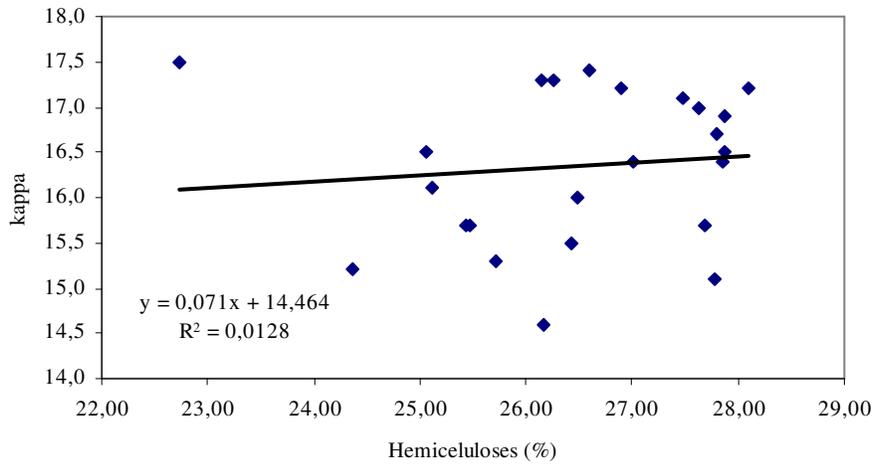


FIGURA 3 Relação entre o teor de hemiceluloses e número kappa

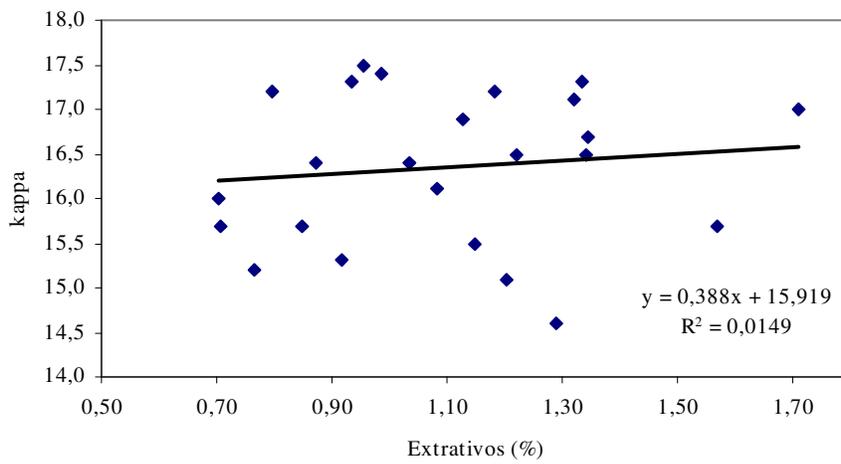


FIGURA 4 Relação entre o teor de extrativos e número kappa

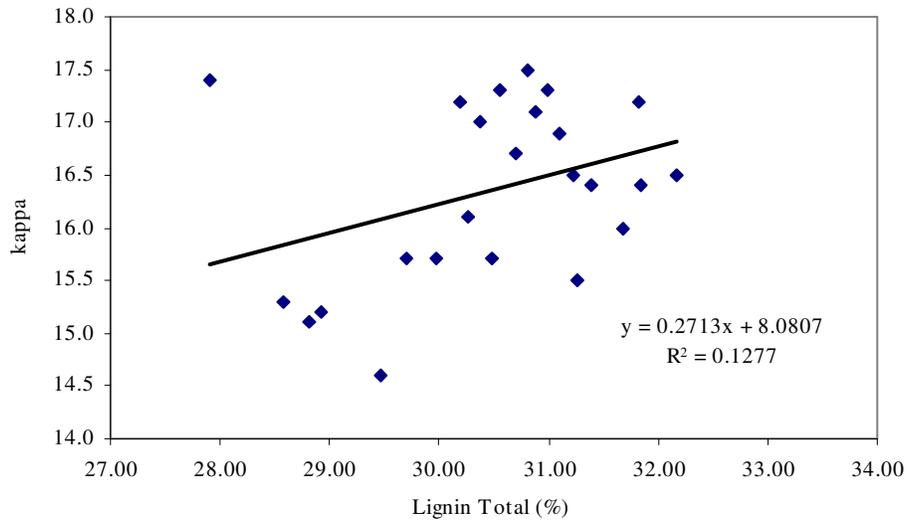


FIGURA 5 Relação entre o teor de lignina total e número kappa

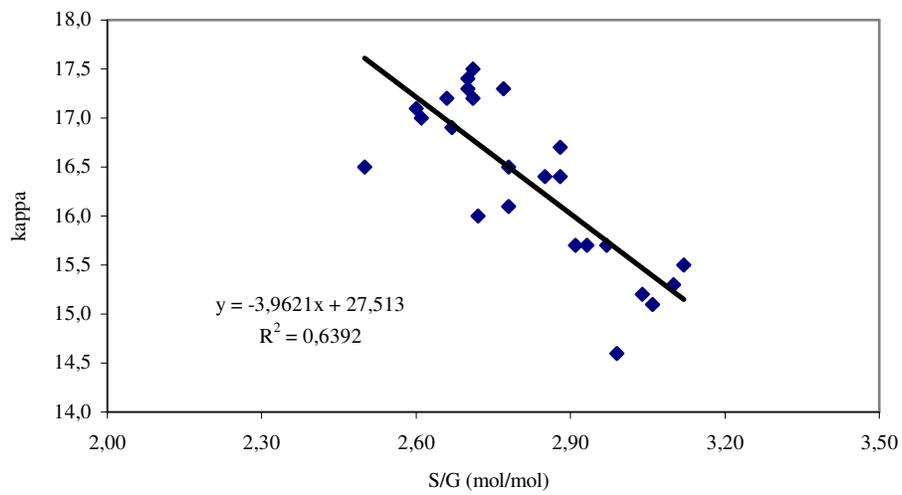


FIGURA 6 Relação entre S/G e número kappa

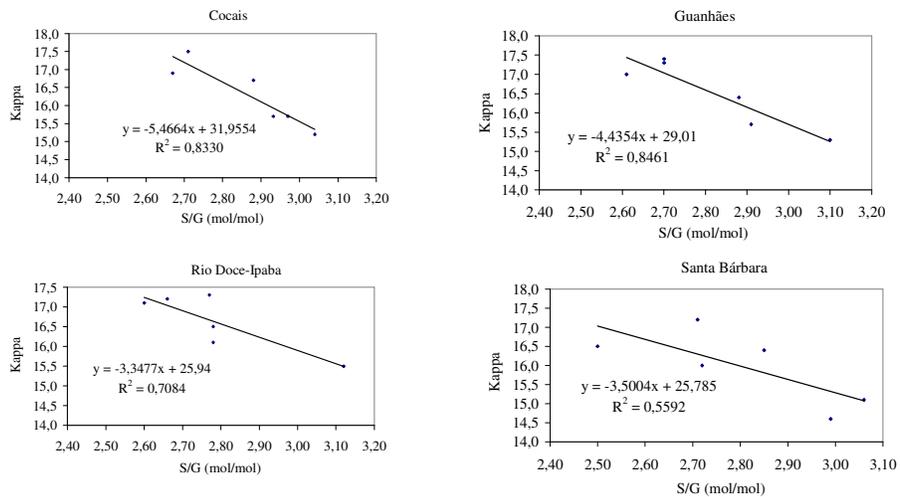


FIGURA 7 Relação entre S/G e número kappa, por regional

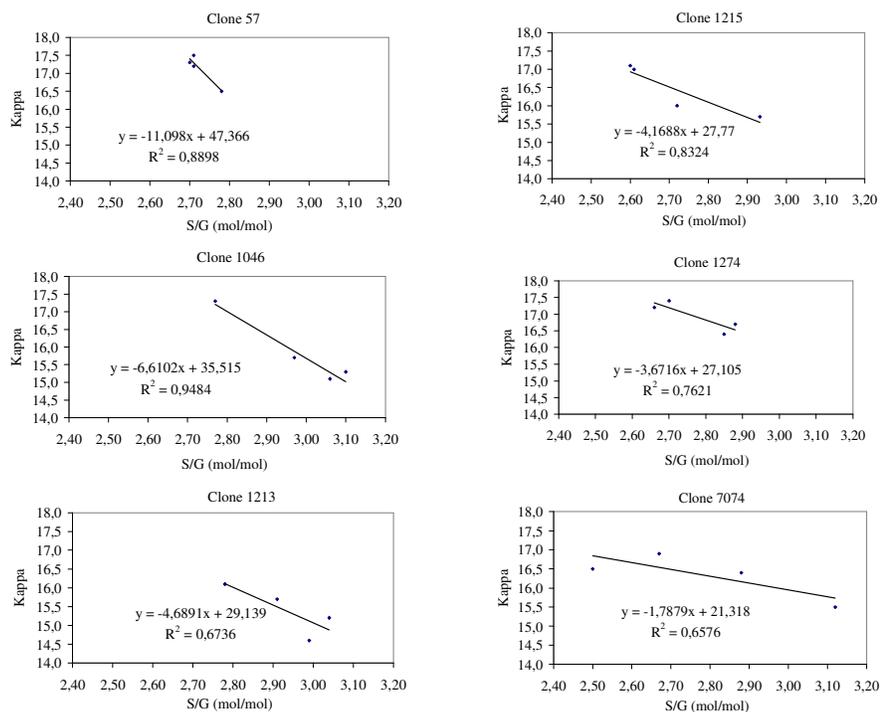


FIGURA 8 Relação entre S/G e número kappa, por clone

A seletividade do cozimento kraft pode ser medida pelos valores de rendimento e viscosidade da polpa, a um número kappa fixo. Isso porque, para um mesmo grau de deslignificação, valores mais altos de rendimento depurado e de viscosidade implicam em menor degradação e dissolução dos carboidratos da madeira na operação de cozimento.

As curvas apresentadas nas Figuras 9, 10, 11 e 12 mostram que o rendimento depurado do cozimento não apresenta boa correlação com a densidade, os teores de hemiceluloses, os extrativos e a lignina da madeira, considerando-se todos os clones e locais. Porém, a relação S/G da lignina apresentou correlação positiva e significativa com o rendimento depurado (Figura 13).

Analisando-se o impacto da relação S/G no rendimento depurado para cada regional (Figura 14) e clone (Figura 15), observa-se que as boas correlações foram mantidas, exceto para a regional de Cocais e para o clone 1213 e 1274, ratificando a grande importância desse parâmetro para seleção de clones de eucalipto, com vistas à produção de celulose kraft. Por exemplo, o clone 7074 da regional Rio Doce-Ipaba apresentou o mais alto valor de S/G (3,12) e um dos mais altos rendimentos em kappa 17 (53%), apesar do seu alto valor de lignina total (31,3%), indicando, assim, ser mais importante o tipo de lignina (S/G) do que a sua percentagem na madeira. Porém, a madeira ideal é mesmo aquela que possua alta relação S/G e baixo teor de lignina. Por exemplo, o clone 1046 apresentou os maiores rendimentos depurados em kappa 17, nas regiões de Guanhães (53,8%) e Santa Bárbara (53,4 %), associados a elevados valores de relação S/G (3,10 e 3,06) e baixos teores de lignina (28,6% e 28,8%).

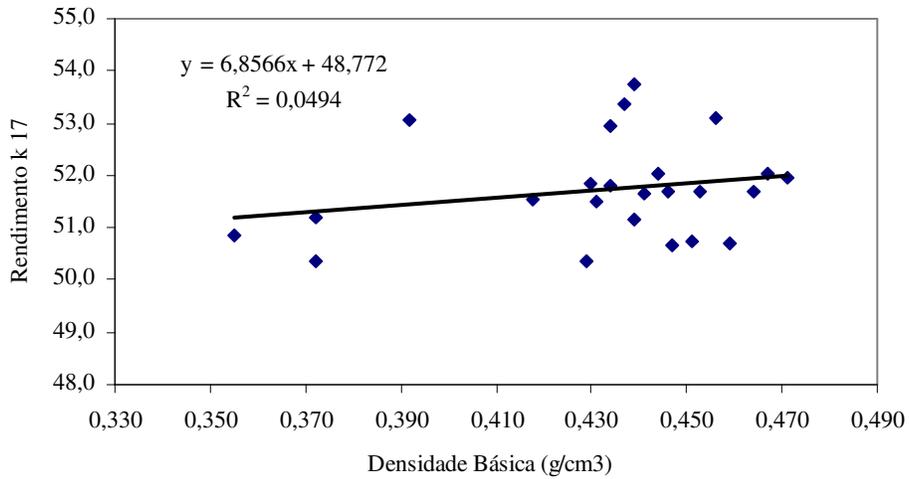


FIGURA 9 Relação entre a densidade básica da árvore inteira e rendimento k 17

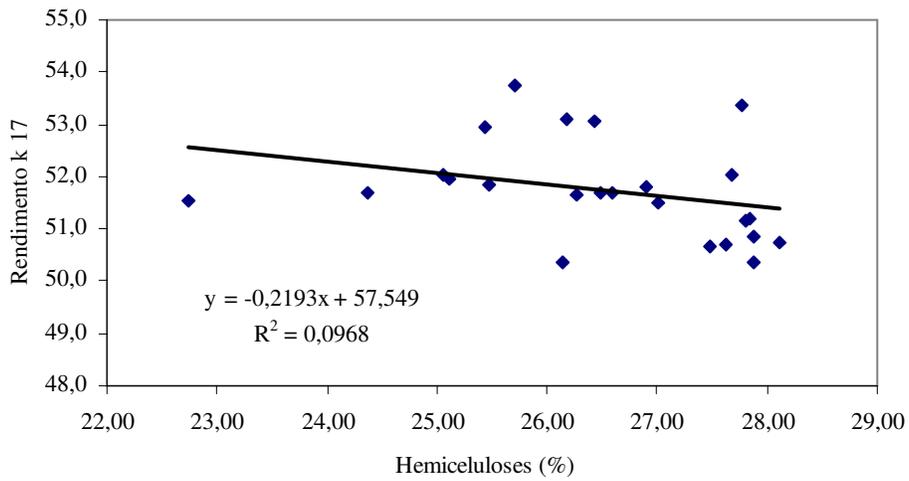


FIGURA 10 Relação entre teor de hemiceluloses e rendimento k 17

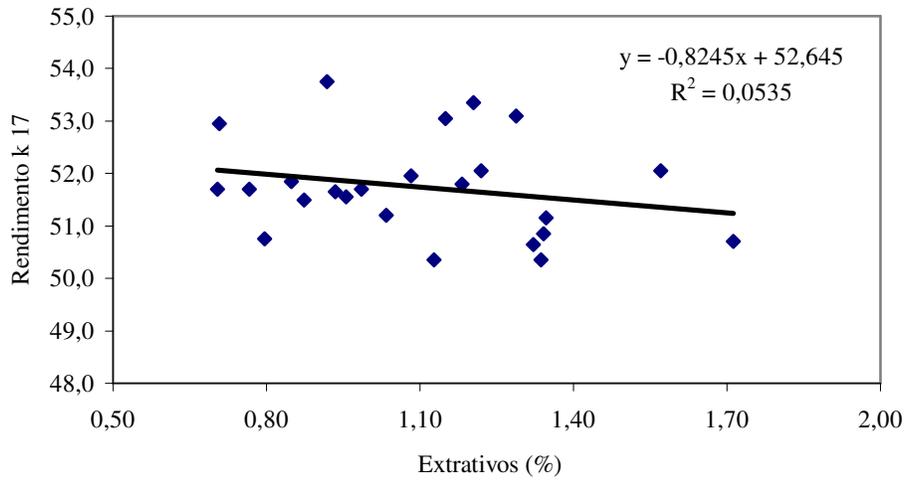


FIGURA 11 Relação entre o teor de extrativos e rendimento k 17

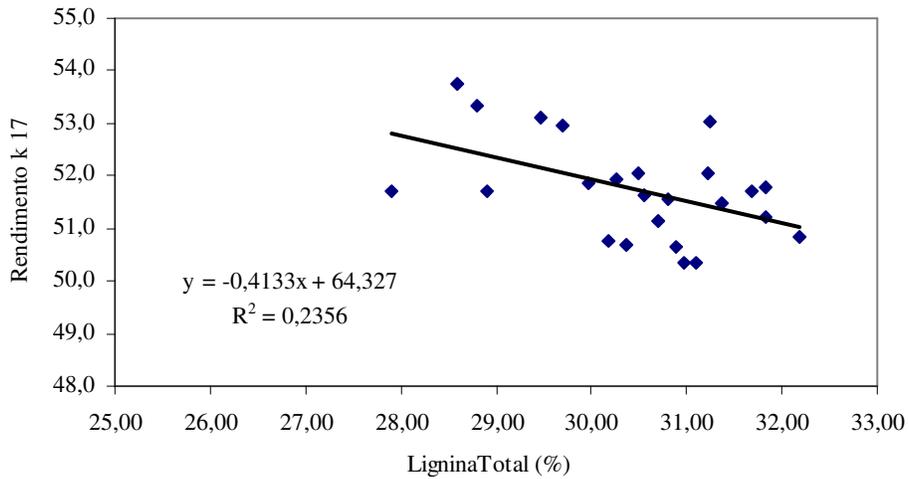


FIGURA 12 Relação entre o teor de lignina total e rendimento k 17

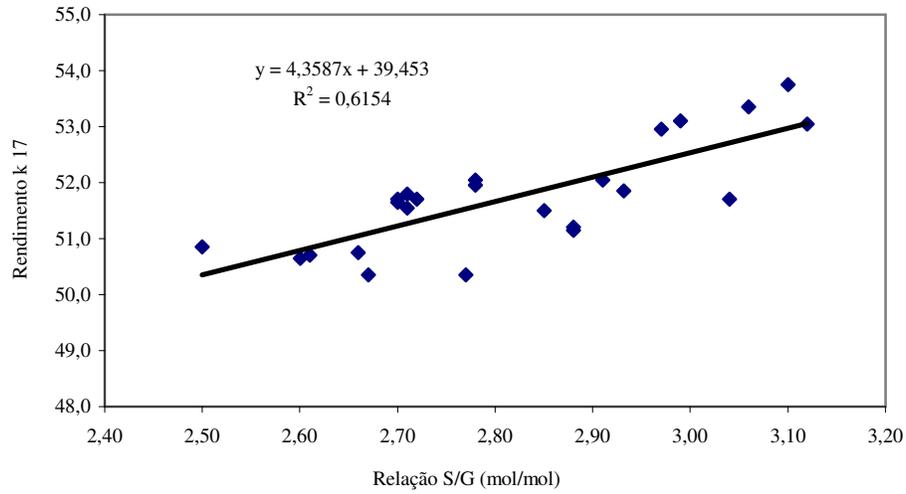


FIGURA 13 Relação entre a S/G e rendimento k 17

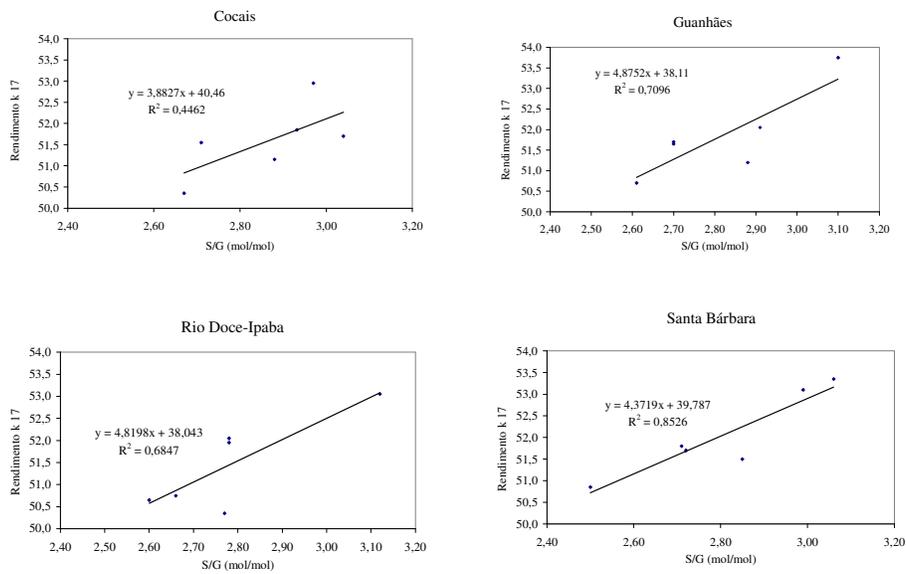


FIGURA 14 Relação entre a S/G e rendimento k 17, por regional

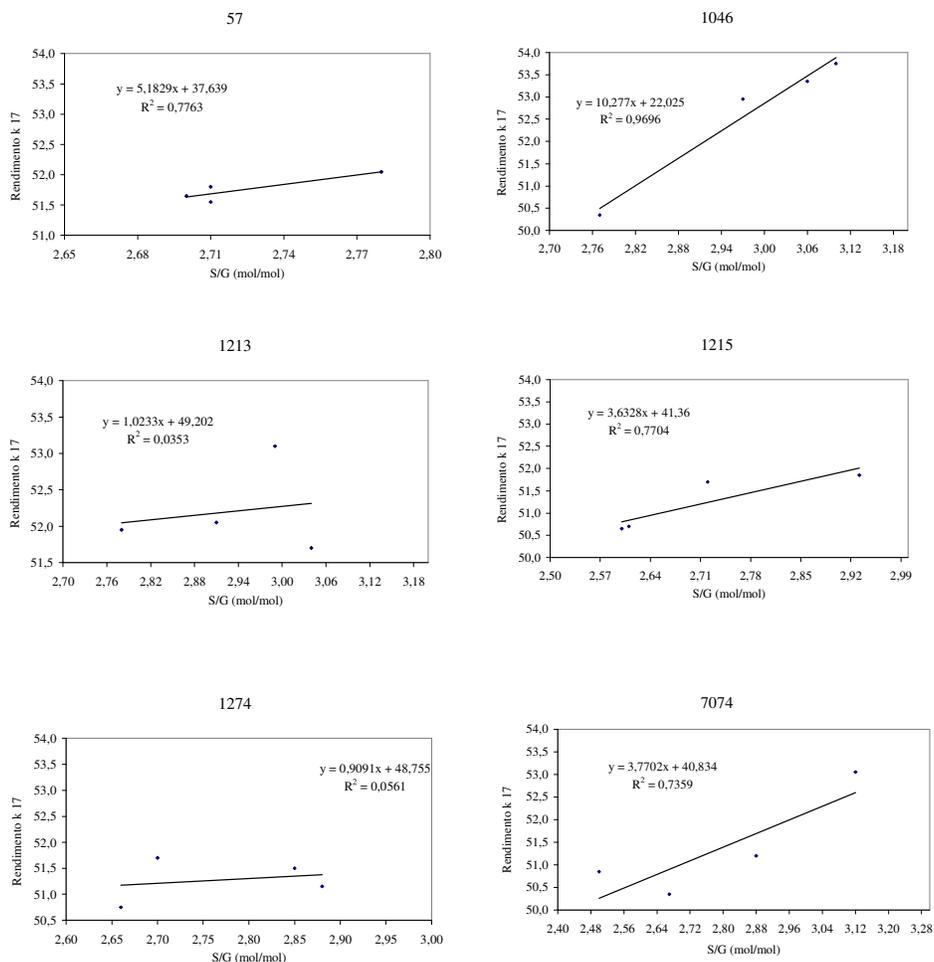


FIGURA 15 Relação entre S/G e rendimento k 17, por clone

Os resultados apresentados nas Figuras 16 a 20 indicam não haver boa correlação entre viscosidade da polpa marrom e densidade básica, teores de hemiceluloses, extrativos, ligninas e relação S/G das madeiras dos diferentes clones e regionais. Esta falta de correlação é explicada pelo fato de a viscosidade ser influenciada por inúmeros fatores, incluindo o grau de polimerização original da celulose da madeira, o teor de hemiceluloses retido na polpa após cozimento,

o álcali ativo utilizado no cozimento, o número kappa da polpa ao final do cozimento, a temperatura de cozimento, etc. Embora, neste estudo tenham sido utilizadas condições constantes de cozimento, o kappa final da polpa variou na faixa de 14,6-17,5, resultando em polpas marrons de viscosidade variando na faixa de 26-44,3 cP. Portanto, nesse caso, é muito difícil isolar o efeito das características da madeira, as quais influenciam as viscosidades finais da polpa, tendo em vista os cozimentos em diferentes números kappa. A opção de utilizar uma carga de álcali ativo fixa nos cozimentos, de forma a determinar o impacto da madeira na eficiência de deslignificação, prejudicou a interpretação dos resultados de viscosidade da polpa.

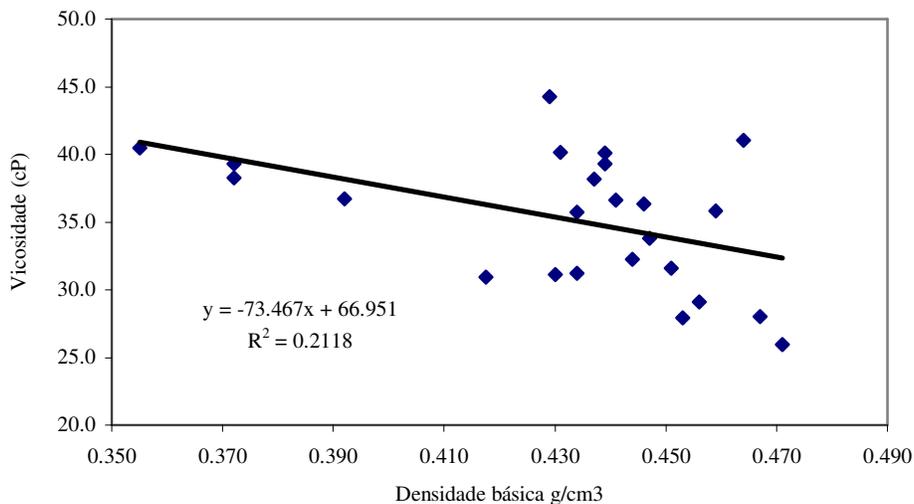


FIGURA 16 Relação entre densidade básica da árvore inteira e viscosidade da polpa marrom

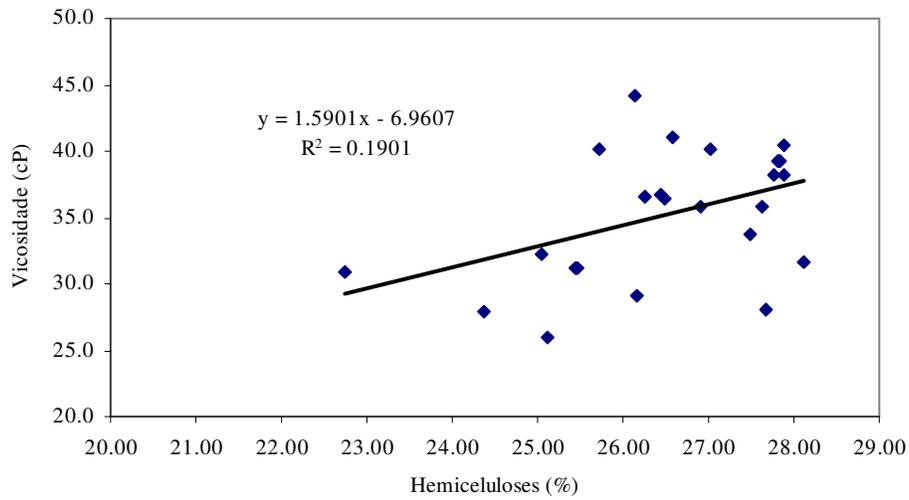


FIGURA 17 Relação entre o teor de hemiceluloses e viscosidade da polpa

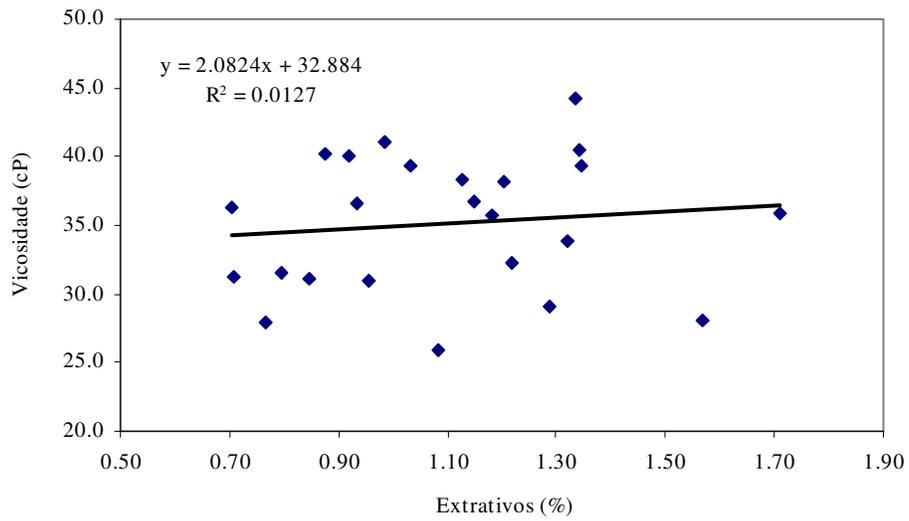


FIGURA 18 Relação entre o teor de extrativos e viscosidade da polpa

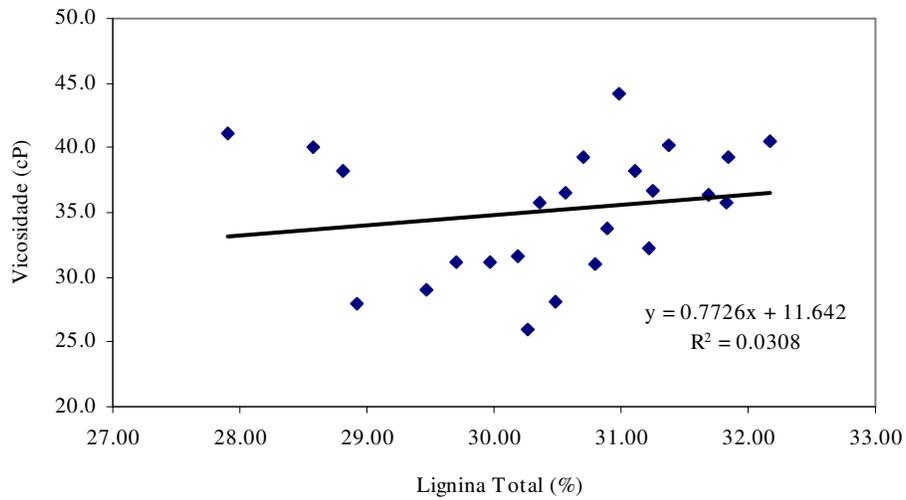


FIGURA 19 Relação entre o teor de lignina total e viscosidade da polpa

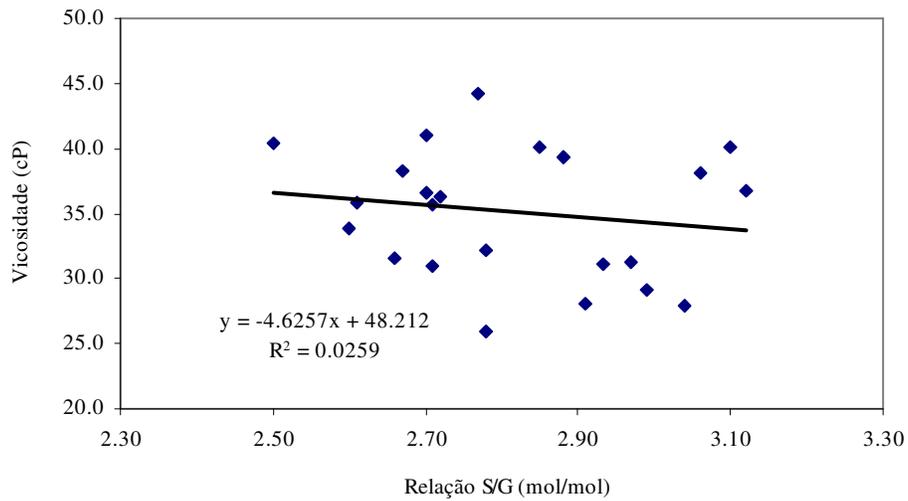


FIGURA 20 Relação entre S/G e viscosidade da polpa

#### 4 CONCLUSÕES

- ✓ A densidade da madeira, medida a 1,3 m do solo (DBDAP), foi ligeiramente superior a da árvore inteira (DBM).
- ✓ Tanto o tipo de clone quanto o local de plantio da árvore têm efeito significativo na densidade básica e na composição química da madeira, sendo o tipo de clone mais relevante que o local.
- ✓ O clone 7074, plantado na região de Cocais, mostrou-se de baixa atratividade pela sua baixa densidade ( $0,372 \text{ g/cm}^3$ ), a composição química desfavorável e o baixo rendimento depurado de polpação.
- ✓ Dentre as características da madeira avaliadas, a relação S/G da lignina foi a que apresentou melhor correlação com a eficiência de deslignificação e seletividade da polpação kraft.
- ✓ Os melhores rendimentos de polpação kraft foram alcançados com o clone 1046 nas regiões de Guanhães (53,8%) e Santa Bárbara (53,4%), associado a elevados valores de relação S/G (3,10 e 3,06) e baixos teores de lignina (28,6% e 28,8 %).

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLAND, D. The composition and analysis of eucalyptus woods. **Appita Journal**, Melbourne, v.38, n.4, p.291-294, 1985.

BROWNING, B.L. **The chemistry of wood**. New York: J. Wiley, 1963. 689p.

COLODETTE, J.L.; GOMES, A.F.; MAGATON, A. **Avaliação da relação Siringila/Guaiacila da Lignina de madeiras de Eucalipto da Cenibra**. Viçosa, MG: UFV/ Laboratório de Celulose e Papel, 2005. 224p. (Relatório Técnico).

COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L.; LONGUE JR., D.; GOMES, C.M. Improving the economics of eucalyptus kraft pulp ECF bleaching. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EMERGING TECHNOLOGIES OF PULPING AND PAPERMAKING, 3., 2006, Guangzhou. **Proceedings...** Guangzhou, 1997. v.1, p.330-335.

COSTA, M.M.; MOUTEER, A.H.; COLODETTE, J.L. Ácidos Hexenurônicos-Parte I: origem, quantificação, reatividade e comportamento durante a polpação Kraft. **O Papel**, São Paulo, v.62, n. 5, p.75-85, 2001.

CHANG, H.; SARKANEN, K.V. Species variation in lignin. **Tappi Journal**, Atlanta, v.56, p.132-134, 1973.

ERIKSON, R.G. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine and grand fir trees from northern Idaho. **Forest Products Journal**, v.50, n.7/8, p.59-65, 2000.

FERGUS, B.J.; GORING, D.A. The topochemistry of delignification in kraft and neutral sulphite pulping of birch wood. **Pulp and Paper Magazine of Canada**, Montreal, v.19, p.314-320, 1969.

GOLDSCHMID, O. Ultravioleta Spectra. In: SARKANEM, K.; LUDWING, C.H. **Lignins**: occurrence, formation, structure and reactions. New York: J. Wiley, 1971. p.241-298.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C.; SILVA, C.M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clone de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.1, p.129-137, 2005.  
GOMIDE, J.L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina na madeira: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v.47, p.36- 38, 1986.

JANKOWSKY, I.P. **Madeira juvenil: formação e aproveitamento industrial**. São Paulo: IPEF, 1979. 18p. (Circular Técnica, 81).

KAAR, W.E.; COOL, L.G.; MERRIMAN, M.M.; BRINK, D.L. The complete analysis of wood polysaccharides using HPLC. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v.11, p.447-463, 1991.

KOGA, M.E.T. Matérias-primas fibrosas. In: PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M.L.O. (Ed.). **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2.ed. São Paulo: IPT, 1988. p.15-44.

LIN, S.Y.; DENCE, C.W. **Methods in lignin chemistry**. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 578p.

MALAN, 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.

ONA, T.; SONODA, T.; ITOH, K.; SHIBATA, M. Relationship of lignin monomeric composition and hemicellulose composition in the same trunk sought by their within-tree variations in *Eucalyptus camaldulensis* and *E. globulus*. **Holzforchung**, v.51, p.396-404, 1997.

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

RAMALHO, R. S. **O uso de macerado no estudo anatômico de madeiras**. Viçosa, MG: UFV/DEF, 1987. 4 p. ( Relatório)

RODRIGUES, J.; MEIER, D.; FAIX, O.; PEREIRA, H. Determination of tree to tree variation in syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus globulus* wood lignin analytical pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.48, p.121-128, 1998.

ROSS, R.J. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, v.48, n.1, p.14-19, 1998.

**Scantest standard of scandinavian pulp**. Stockholm, 1994. (Paper and Board).

SCOTT, R.W. Colometric determination of hexuronic acids in plant materials. **Analytical Chemistry**, n.7, p.936-941, 1979.

SOLAR, R.; KACIK, F.; MELCER, I. Simple semi-micro method for the determination of O-acetyl groups in wood and related materials. **Nordic Pulp and Paper Research Journal**, Stockholm, v.4, p.139-141, 1987.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. Standard **methods of technical association of the pulp and paper industry**. Atlanta, 2002.

TIMELL, T.E. **The chemical composition of tension Wood**. New York, 1969. p. 173-181.

WALLIS, A.; WERNE, R.; WRIGHT, P. Chemical analysis of polysaccharides in plantation eucalypt woods and pulps. **Appita Journal**, Melbourne, v.49, p.427-432, 1996.

WEHR, T.R.; BARRICHELO, L.E.G. Cozimento kraft com madeiras de eucalyptus grandis de diferentes densidades básicas e dimensões de cavacos. In CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP.1992, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1992. v.25. p.1-17.

WU, J.; FUKAZAWA, K.; OHTANI, J. Distribution of syringyl and guaiacyl lignins in hardwoods in relation to habitat and porosity form in wood. **Holzforschung**, v.46, n.3, p.181-185, 1992.

## CAPÍTULO 4

### RELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS NÃO DESTRUTIVAS E DESTRUTIVAS DA MADEIRA

#### RESUMO

GOMES, Adriana de Fátima. Relação entre as características não destrutivas e destrutivas da madeira. In: \_\_\_\_\_. **Avaliação das características da madeira e da polpa de *Eucalyptus*, mediante a aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva**. 2007. Cap.4, p.94-124. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

A necessidade de avaliar, cada vez mais, um número maior de amostras de madeira, visando à caracterização do material para determinada finalidade, induz à busca por novas metodologias e equipamentos que agilizem esse trabalho e que, ao mesmo tempo, reduzam os custos operacionais, se possível, ainda em condição de campo. O objetivo da realização do presente trabalho foi verificar a relação existente entre as características obtidas pelos métodos não destrutivos e as análises convencionais (destrutivas) em laboratório visando à produção de polpa celulósica. Pelos resultados observa-se que a densidade básica da madeira apresentou correlação positiva com a deformação residual longitudinal (DRLM) e amplitude (AMPM) e negativa com a penetração do pino do *pilodyn* (PYLM). Os valores de DRL apresentaram correlação positiva com o teor de celulose e negativa com o de lignina. A AMPM apresentou correlação negativa com o teor de lignina. Observa-se que DRLM, PYLM e AMPM apresentaram correlação positiva com a relação siringila/guaiacila. A DRL e AMP apresentaram correlação negativa com o kappa e a viscosidade e positiva com o rendimento depurado. A velocidade de propagação de ondas e os módulos no sentido radial apresentaram correlação positiva com as características da polpação. As correlações obtidas por meio dos valores de predição externa e laboratório, usando modelos criados a partir das amostras do próprio experimento, foram melhores que os valores preditos pelos modelos pré-existentes construídos numa empresa florestal brasileira.

---

Comitê orientador: Paulo Fernando Trugilho-UFLA (Orientador), Jorge Luiz Colodette-UFV, José Tarcísio Lima-UFLA e José Reinaldo Moreira da Silva-UFLA (Co-Orientadores)

## CHAPTER 4

GOMES, Adriana de Fátima. Relation between the characteristic non-destructive and destructive of the wood. In: \_\_\_\_\_. **Evaluation of the characteristics of the wood and of the pulp of Eucalyptus by the application of non destructive methods in the living tree**. 2007. Chap.4, p.94-124 Dissertation (Master Program in Forest Engineer) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

### ABSTRACT

The wood quality evaluation for a given use requires measurement of very large number of trees in order to obtain precise results. This calls for development of techniques that are fast and low cost but at the same time reliable and suited to field applications. The objective of the present work was determining the relationship among certain parameters measured in living trees (non-destructive) with those obtained in conventional wet chemistry laboratorial analyses (destructive). The results showed that the wood basic density presented positive correlation with the longitudinal residual strain (DRLM) and width (AMPM) and negative correlation with the penetration of the pin of pilodyn (PYLM). The values of DRL presented positive correlation with the wood cellulose content and negative correlation with lignin content. The AMPM presented negative correlation with the lignin content. It was observed that the DRLM, PYLM and AMPM presented positive correlation with the syringyl/guaiacyl ratio. The DRL and AMP presented negative correlation with the kappa and the viscosity but positive with the pulping yield. The speed of propagation of waves and the modules in the radial direction presented positive correlation with the pulping characteristics. The correlations obtained through the external prediction values and laboratory by using models created from samples from the own experiment were better than the values predicted by an existing model constructed by a Brazilian Forest Company.

---

Guidance committee: Paulo Fernando Trugilho – UFLA (Supervisor), Jorge Luiz Colodette – UFV, José Tarcísio Lima – UFLA e José Reinaldo Moreira da Silva – UFLA (Co-supervisors)

## 1 INTRODUÇÃO

Existe um grande conhecimento de como a química da madeira afeta a produção de celulose, porém, ele se restringe às avaliações destrutivas a partir de resultados laboratoriais. A necessidade de avaliar, cada vez mais, um número maior de amostras de madeira, visando à caracterização do material para determinada finalidade, vem provocando a busca por novas metodologias e equipamentos que agilizem esse trabalho e, que ao mesmo tempo, reduzam os custos operacionais ainda em condição de campo. As técnicas de avaliação não destrutiva da madeira podem contribuir de maneira significativa para a resolução desse problema.

A avaliação não destrutiva compreende o uso de métodos e ensaios para a qualificação das propriedades do material, sem que haja o comprometimento de seu uso. O importante fator de uso das técnicas não destrutivas é a possibilidade de se fazer inúmeras determinações em um curto espaço de tempo. Além disso, permite também fazer uma pré-classificação do material, ainda em campo, o que contribui para a redução das avaliações destrutivas no âmbito dos laboratórios.

Dessa forma, é possível reduzir drasticamente os custos das avaliações no laboratório, com a redução do número de amostras a serem processadas. A avaliação não destrutiva é definida como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas, químicas e mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar suas capacidades de uso final (Ross, 1998). Segundo Erikson (2000), a avaliação não destrutiva é uma importante ferramenta para a caracterização da madeira, podendo ser utilizada pelas indústrias para melhorar o controle de

qualidade dos processos por meio de uma maior uniformidade na matéria-prima e em seus derivados.

Neste contexto, este trabalho foi realizado com o objetivo da realização do presente trabalho foi verificar a relação existente entre as características obtidas pelos métodos não destrutivos e as análises convencionais (destrutivas) em laboratório visando à produção de polpa celulósica.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Material biológico**

O material biológico foi o mesmo descrito no Capítulo 2.

### **2.2 Local de experimentação**

O local foi o mesmo descrito no Capítulo 2.

### **2.3 Análise estatística**

Foi utilizada análise de correlação simples para verificar a relação existente entre as características avaliadas por métodos não destrutivos e destrutivos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados da Tabela 1 referem-se às correlações simples obtidas entre as características densidade básica e morfologia das fibras com os resultados obtidos pela avaliação não destrutiva, utilizando-se métodos do extensômetro, resistógrafo e *pilodyn*, dentro das quatro regionais. Observa-se que a deformação residual longitudinal (DRLM) apresentou correlação positiva e elevada com a densidade básica média da árvore (DBM) e a densidade básica obtida a 1,3 m de altura do solo (DBDAP) em todas as regionais, exceto para Rio Doce-Ipaba (RD-Ipaba). Para a deformação residual tangencial (DRTM), as melhores correlações ocorreram com a DBDAP, exceto para a regional de Santa Bárbara.

O resistógrafo e o *pilodyn* apresentaram elevada correlação positiva e negativa, respectivamente, com as estimativas de densidade básica e de menor magnitude com a espessura da parede da fibra (ESPES).

O extensômetro, o resistógrafo e o *pilodyn* não apresentaram correlações muito definidas com o comprimento (COMP), largura (LARG) e diâmetro do lume (LUME).

TABELA 1 Correlações entre as estimativas de densidade básica da madeira e morfologia de fibras e as características obtidas por meio do extensômetro, do resistógrafo e do *pilodyn*, por regionais

Física e fibra	Local	Extensômetro		Resistógrafo	<i>Pilodyn</i>
		DRLM	DRTM	AMPM	PLYM
DBM	Cocais	0,8411	0,2958	0,8948	-0,3701
	Guanhães	0,6754	0,7902	0,7798	-0,9048
	RD-Ipaba	0,0629	0,2796	0,9048	-0,5967
	St. Bárbara	0,6746	-0,0460	0,9731	-0,9246
DBDAP	Cocais	0,8613	0,6913	0,5662	-0,4875
	Guanhães	0,5884	0,6917	0,8717	-0,9493
	RD-Ipaba	0,1947	0,5604	0,7394	-0,8086
	St. Bárbara	0,6343	0,0543	0,9662	-0,9578
COMP	Cocais	0,6474	0,5867	0,8508	-0,6672
	Guanhães	0,4447	0,3791	-0,3506	0,0194
	RD-Ipaba	-0,0488	0,2019	0,4999	-0,6396
	St. Bárbara	-0,2057	-0,2335	-0,5958	0,7425
LARG	Cocais	0,1508	-0,5341	0,4857	-0,0064
	Guanhães	-0,2546	-0,2446	-0,8773	0,7147
	RD-Ipaba	-0,1452	0,4497	0,3022	-0,6552
	St. Bárbara	-0,5720	0,0386	-0,8710	0,8836
LUME	Cocais	0,1192	-0,4863	0,1012	0,0860
	Guanhães	-0,2589	-0,3799	-0,9528	0,9760
	RD-Ipaba	0,0964	0,5909	0,1295	-0,7493
	St. Bárbara	-0,5518	0,0409	-0,7610	0,7962
ESPES	Cocais	0,0897	-0,3113	0,5058	-0,0700
	Guanhães	0,1853	0,3635	0,7639	-0,9021
	RD-Ipaba	-0,2886	0,3256	0,4236	-0,5474
	St. Bárbara	0,3345	-0,0266	0,2886	-0,3669

De acordo com os dados da Tabela 2, para as estimativas de módulo de elasticidade, todas as regionais apresentaram altas correlações positivas em relação às densidades básicas, o que era esperado, pois os valores de densidade são usados na sua estimativa. A velocidade de propagação de ondas no sentido transversal (VMT) apresentou altas correlações positivas com as medidas de densidade básica. A espessura de parede das fibras apresentou correlação positiva e elevada com a VMT, sendo mais elevada na regional de Guanhães (0,7986). A velocidade de propagação da onda de tensão no sentido longitudinal (VML) apresentou também correlação positiva com as estimativas de densidade básica, exceto para a regional de Cocais.

Para as características dimensionais das fibras, as correlações não foram muito consistentes, uma vez que existe uma alternância de sinal e de magnitude das mesmas, o mesmo ocorrido com o extensômetro, o resistógrafo e o *pilodyn*.

TABELA 2 Correlações entre as estimativas de densidade básica da madeira e a morfologia de fibras e as características obtidas por meio do *strees wave time*, por regionais

Física e fibra	Local	<i>Strees wave time</i>					
		VMT	VML	MMMT	MDMT	MMML	MDML
DBM	Cocais	0,7185	-0,2586	0,8470	0,7666	0,5917	0,5610
	Guanhães	0,8099	0,7081	0,8364	0,8368	0,9024	0,8648
	RD-Ipaba	0,5611	0,5045	0,6676	0,6188	0,7151	0,6495
	St. Bárbara	0,8521	0,7348	0,9331	0,9127	0,8996	0,8702
DBDAP	Cocais	0,8786	0,1828	0,9231	0,9708	0,8077	0,9009
	Guanhães	0,7545	0,7412	0,7699	0,7857	0,9016	0,9021
	RD-Ipaba	0,7210	0,7041	0,7987	0,7730	0,8541	0,8193
	St. Bárbara	0,8928	0,7939	0,9582	0,9456	0,9327	0,9124
COMP	Cocais	0,7876	0,2040	0,7844	0,6770	0,7272	0,5718
	Guanhães	0,2283	-0,4422	0,2637	0,2245	-0,1755	-0,2944
	RD-Ipaba	0,7957	0,6054	0,8184	0,7888	0,6952	0,6582
	St. Bárbara	-0,8600	-0,7962	-0,8251	-0,8485	-0,7879	-0,8109
LARG	Cocais	0,0478	-0,5880	0,2288	0,1050	-0,0085	-0,0982
	Guanhães	-0,4228	-0,9065	-0,4480	-0,4700	-0,8669	-0,9123
	RD-Ipaba	0,6715	0,7049	0,6961	0,6881	0,7465	0,7317
	St. Bárbara	-0,9322	-0,6165	-0,9515	-0,9429	-0,7765	-0,7599
LUME	Cocais	-0,2502	-0,3357	-0,1006	-0,0617	-0,0744	-0,0368
	Guanhães	-0,7670	-0,6237	-0,7618	-0,7946	-0,7570	-0,7941
	RD-Ipaba	0,7981	0,8374	0,7898	0,7998	0,8058	0,8160
	St. Bárbara	-0,8713	-0,4352	-0,8636	-0,8584	-0,6057	-0,5927
ESPES	Cocais	0,2251	-0,4689	0,3386	0,1640	0,0403	-0,0940
	Guanhães	0,7986	0,2745	0,7735	0,8059	0,4870	0,5112
	RD-Ipaba	0,5390	0,5739	0,5889	0,5677	0,6675	0,6344
	St. Bárbara	0,4851	-0,1045	0,4154	0,4201	0,0393	0,0386

Na Tabela 3 são apresentadas as correlações simples obtidas entre as características de densidade básica, morfologia das fibras com os resultados obtidos pela avaliação não destrutiva, pelos métodos do extensômetro, resistógrafo e *pilodyn*, dentro dos seis clones. Observa-se que a magnitude das correlações entre a DRLM e as densidades básicas foi menor que as apresentadas na Tabela 1, inclusive, em alguns casos, ocorrendo uma mudança do sinal. Somente para as correlações entre a DBM e a amplitude (AMPM) e *pilodyn* (PILM) os sinais, positivo e negativo, permaneceram iguais aos

relatados na Tabela 1, porém, com menores magnitudes. Essa mudança de sinal da correlação indica uma influência do local de amostragem.

TABELA 3 Correlações entre as estimativas de densidade básica da madeira e morfologia de fibras e as características obtidas através do extensômetro, do resistógrafo e do *pilodyn*, por clones

Característica	Clone	Extensômetro		Resistógrafo	<i>Pilodyn</i>
		DRLM	DRTM	AMPM	PILM
DBM	57	-0,2505	-0,1372	0,3415	-0,8410
	1046	0,6315	-0,5871	0,8893	-0,7206
	1213	-0,6993	0,4363	0,3478	-0,8881
	1215	-0,6337	0,494	0,2749	-0,9191
	1274	-0,5608	-0,3447	0,6809	-0,9109
	7074	0,7923	-0,4085	0,9691	-0,5818
DBDAP	57	0,6462	-0,0163	0,0374	0,0867
	1046	0,4152	0,6313	0,2483	-0,3564
	1213	0,6087	0,4298	-0,3221	0,7979
	1215	-0,6487	0,4867	0,2922	-0,9234
	1274	0,8350	0,4123	-0,4387	0,2537
	7074	0,7268	-0,3425	-0,9517	-0,6759
COMP	57	0,8613	0,3515	-0,3680	0,1195
	1046	-0,0823	0,9183	-0,1614	-0,7500
	1213	-0,0610	0,9287	-0,2560	-0,3800
	1215	0,7221	-0,1097	-0,8737	0,2973
	1274	0,0749	-0,5664	0,5133	0,0127
	7074	-0,5278	-0,4919	-0,3841	0,5373
LARG	57	0,4401	-0,2603	0,2897	0,1174
	1046	-0,0283	0,8327	-0,0111	-0,6512
	1213	0,4384	0,8799	-0,4242	0,3699
	1215	0,7344	0,0342	-0,7673	0,3980
	1274	0,2691	-0,1219	0,2341	-0,2466
	7074	-0,7229	-0,4319	-0,0831	-0,2812
LUME	57	0,7016	0,0623	-0,0522	0,1083
	1046	-0,0667	0,9181	-0,1654	-0,7467
	1213	0,5617	0,8864	-0,5650	0,4327
	1215	0,8351	-0,1037	-0,8094	0,5619
	1274	0,7830	0,4222	-0,3993	0,1366
	7074	-0,6368	-0,5590	-0,0114	-0,2139
ESPESS	57	-0,4226	-0,8786	0,9363	0,0786
	1046	0,0909	0,3620	0,3486	-0,2117
	1213	0,1776	0,8058	-0,1322	0,2262
	1215	0,3916	0,3580	-0,5548	-0,0432
	1274	-0,7342	-0,8332	0,9749	-0,5916
	7074	-0,6246	0,7172	-0,4180	-0,5064

Na Tabela 4 são apresentados os valores das correlações obtidas entre as densidades básicas e dimensões das fibras e as velocidades de propagação da onda de tensão e estimativas de módulos de elasticidade dinâmicos. Observa-se um resultado semelhante ao demonstrado na Tabela 3, ou seja, o efeito da

regional está influenciando os valores das correlações e alterando o sinal das mesmas para os diferentes clones.

TABELA 4 Correlações entre as estimativas de densidade básica da madeira e morfologia de fibras e as características obtidas por meio do *strees wave time*, por clones

POLPAÇAO	Clone	<i>strees wave time</i>					
		VMT	VML	MMMT	MDMT	MMML	MDML
DBM	57	0,4342	0,8779	0,5354	0,4488	0,9106	0,7918
	1046	0,5832	-0,7948	0,6403	0,7582	-0,7439	-0,5950
	1213	-0,3090	0,9348	-0,1208	-0,8523	0,9606	0,9008
	1215	0,8167	0,7076	0,8426	0,8422	0,8214	0,8214
	1274	0,4356	0,4179	0,5788	0,4625	0,6979	0,1126
	7074	-0,8881	0,3120	-0,8049	-0,8034	0,6079	0,5907
DBDAP	57	-0,7348	0,0118	-0,7172	-0,6573	-0,0265	0,2326
	1046	-0,7232	0,6195	-0,6845	-0,3846	0,6780	0,8238
	1213	-0,7065	-0,7221	-0,8281	-0,0699	-0,6641	-0,0478
	1215	0,8141	0,6984	0,8391	0,8387	0,8134	0,8136
	1274	-0,2375	0,7223	-0,2241	0,2325	0,5462	0,9659
	7074	-0,8893	0,4278	-0,8094	-0,8015	0,7022	0,6869
COMP	57	-0,5224	-0,0839	-0,5457	-0,4389	-0,1439	0,1246
	1046	-0,9413	0,7920	-0,9144	-0,7549	0,8335	0,8871
	1213	-0,7395	0,4696	-0,6242	-0,9381	0,5323	0,7869
	1215	-0,1693	0,0141	-0,1212	-0,1245	0,0297	0,0227
	1274	0,7143	0,1656	0,7204	0,9558	0,2679	0,4033
	7074	0,2508	-0,4818	0,1214	0,0936	-0,6198	-0,6200
LARG	57	-0,8300	0,0108	-0,7937	-0,7669	-0,0104	0,2209
	1046	-0,8394	0,6154	-0,7987	-0,6393	0,6677	0,7413
	1213	-0,9533	-0,2620	-0,9757	-0,6026	-0,1825	0,4159
	1215	-0,1741	0,0640	-0,1416	-0,1446	0,0174	0,0109
	1274	0,3189	0,6663	0,3917	0,6949	0,7244	0,7632
	7074	-0,1834	0,3541	-0,3333	-0,3253	0,1855	0,1890
LUME	57	-0,7050	-0,0224	-0,6975	-0,6258	-0,0662	0,1994
	1046	-0,9471	0,8118	-0,9218	-0,7554	0,8525	0,9073
	1213	-0,8940	-0,3335	-0,9300	-0,5274	-0,2584	0,3032
	1215	-0,3447	-0,1048	-0,3166	-0,3194	-0,1624	-0,1687
	1274	-0,2394	0,7942	-0,2063	0,2337	0,6425	0,9871
	7074	-0,2420	0,2490	-0,3913	-0,3904	0,1143	0,1147
ESPESS	57	-0,6666	0,0784	-0,5830	-0,6768	0,1222	0,1444
	1046	-0,3219	-0,0190	-0,2604	-0,1605	0,0426	0,1377
	1213	-0,9960	-0,1097	-0,9915	-0,7003	-0,0275	0,5965
	1215	0,2529	0,4537	0,2908	0,2877	0,4384	0,4323
	1274	0,8769	-0,1215	0,9430	0,7753	0,1980	-0,2482
	7074	0,2953	0,7446	0,2715	0,3187	0,5165	0,5361

Na Tabela 5 são apresentadas as correlações gerais entre as características de densidade básica, morfologia das fibras e os resultados obtidos por meio dos métodos não destrutivos. Observa-se que existe uma relação

positiva entre a densidade básica da madeira e os ensaios não destrutivos, exceto para o *pilodyn*, a qual foi negativa. Para os valores de DBM e DBDAP, tanto a DRLM quanto a DRTM apresentaram correlações positivas, porém, a DRLM apresentou a maior magnitude. As correlações com AMPM e PLYM foram de alta magnitude, sendo, positiva e negativa, respectivamente. As velocidades de propagação de onda no sentido transversal e longitudinal apresentaram correlação positiva com a densidade básica, sendo de maior magnitude a mensurada usando os cavacos (DBM). Para as características dimensionais das fibras, somente a espessura da parede celular (ESPES) apresentou correlação positiva e negativa com a amplitude (AMPM) e o *pilodyn* (PILM), respectivamente. Este resultado foi o mesmo observado para as densidades básicas, demonstrando a sua relação com a espessura da parede celular das fibras.

Os modelos ajustados para a determinação da densidade básica da madeira por meio dos valores obtidos com a amplitude e *pilodyn* encontram-se na Tabela 6. Observa-se que o modelo usando a amplitude apresentou um melhor ajuste, indicando que essa característica é mais adequada para estimar o valor da densidade básica da madeira.

TABELA 5 Correlações entre as estimativas de densidade básica da madeira e morfologia de fibras e as características obtidas nos ensaios não destrutivos, independente dos clones e regionais

Física/ Fibra	Extensômetro		Resistógrafo	<i>Pilodyn</i>		<i>Strees wave time</i>				
	DRLM	DRTM	AMPM	PILM	VMR	VML	MMMT	MDMT	MMML	MDML
DBM	0,457	0,248	0,864	-0,723	0,608	0,506	0,730	0,724	0,792	0,694
DBDAP	0,717	0,474	0,597	-0,533	0,397	0,475	0,477	0,637	0,650	0,827
COMP	0,317	0,222	0,169	-0,219	0,136	0,168	0,169	0,240	0,247	0,328
LARG	0,149	0,098	-0,075	0,042	-0,250	0,091	-0,201	-0,107	0,060	0,193
LUME	0,155	0,076	-0,348	0,278	-0,509	-0,007	-0,481	-0,373	-0,127	0,049
ESPES	0,043	0,075	0,486	-0,426	0,398	0,215	0,454	0,464	0,368	0,338

TABELA 6 Relação entre densidade básica média e os valores do *pilodyn* e do resistógrafo

Modelo quadrático	Equações			R <sup>2</sup>	CV (%)
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$		
<i>Pilodyn</i>	-0,114043	0,07652	-0,002585	0,5766**	3,18
Resistógrafo	0,261448	0,015752	-0,00032	0,7423**	2,48

\*\* : Significativo, a 1% de probabilidade, CV = coeficiente de variação.

A relação geral existente entre a densidade básica da madeira com o *pilodyn* e com a amplitude está ilustrada na Figura 1. Observa-se que, para a amplitude, os valores observados encontram-se mais próximos da curva estimada. Greaves et al. (1996), em estudo com diferentes espécies de eucalipto, encontraram altas relações entre a densidade básica com os valores obtidos por meio da penetração do pino do *pilodyn*.

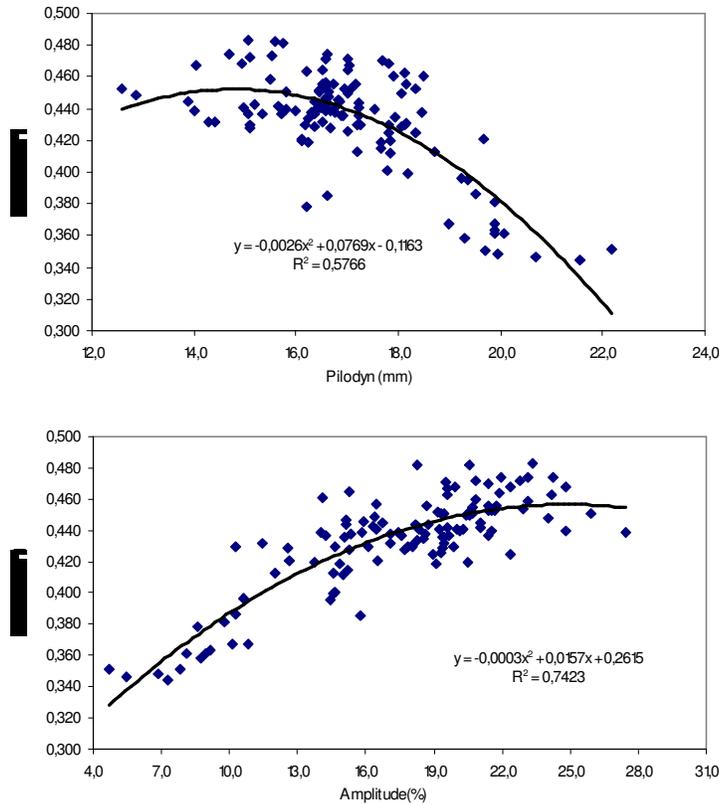


FIGURA 1 Relação funcional do pilodyn e amplitude com a densidade básica da madeira.

Na Tabela 7 são apresentadas as correlações simples obtidas entre as características químicas da madeira e as características não destrutivas, dentro das quatro regionais. Observa-se que a DRLM apresentou, no geral, correlação positiva com o teor de celulose e negativa com o teor de hemiceluloses, sendo de maior magnitude na regional de Santa Bárbara. Sugiyama et al. (1993) e Okuyama et al. (1994) observaram forte correlação entre o teor de celulose e as tensões de crescimento da madeira normal e de tração de várias folhosas que crescem no Japão.

A DRLM apresentou, ainda, correlação negativa e positiva com o teor de lignina total e relação siringila/guaiacila (S/G), respectivamente, tendo sido de

maior magnitude, em ambos os casos, na regional de Santa Bárbara. Bailleres et al. (1995), estudando várias espécies de eucalipto, encontraram, também, correlação positiva entre S/G e as tensões de crescimento.

As maiores correlações ocorreram entre os valores de amplitude (AMPM) e o teor de celulose e a relação S/G, tendo sido positivas. Os resultados encontrados estão de acordo com os de Nicholson et al. (1972). Estes autores, durante um estudo de *Eucalyptus regnans* de 30 anos de idade, descobriram que as tensões de crescimento foram correlacionadas negativamente com a lignina. Bamber (1979; 1987) encontrou tendência semelhante para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptu pilularis*. O *pilodyn* também apresentou correlação positiva com a relação S/G, porém, de menor magnitude que as observadas para a AMPM.

TABELA 7 Correlações entre as características químicas da madeira e as características obtidas por meio do extensômetro, do resistógrafo e do *pilodyn*, por regional

Química da madeira	Local	Extensômetro		Resistógrafo	<i>Pilodyn</i>
		DRLM	DRTM	AMPM	PILM
Celulose (%)	Cocais	0,4163	0,0616	0,7021	0,0789
	Guanhães	-0,1002	-0,0084	0,6211	-0,7096
	RD-Ipaba	0,1249	0,3259	0,3483	-0,3761
	St. Bárbara	0,8291	-0,5980	0,7266	-0,5576
Hemiceluloses (%)	Cocais	-0,3983	-0,2282	-0,5951	-0,1074
	Guanhães	0,1818	0,1054	-0,5865	0,5671
	RD-Ipaba	-0,2073	-0,1796	-0,0553	0,2702
	St. Bárbara	-0,4789	-0,1485	-0,7150	0,6710
Lignina total (%)	Cocais	-0,3759	0,2452	-0,6448	0,0136
	Guanhães	-0,1066	-0,2355	-0,6266	0,8111
	RD-Ipaba	-0,2906	-0,1635	-0,6402	0,1978
	St. Bárbara	-0,7118	0,8149	-0,3815	0,2270
Extrativo (%)	Cocais	0,0604	0,3874	-0,5133	-0,0160
	Guanhães	0,6325	0,7421	-0,0765	-0,0393
	RD-Ipaba	-0,1522	-0,4283	-0,2183	0,0896
	St. Bárbara	0,0451	-0,4923	-0,6004	0,5453
S/G (mol/mol)	Cocais	0,4868	-0,1449	0,7230	0,2752
	Guanhães	0,2014	0,0503	0,4582	0,2629
	RD-Ipaba	0,0305	-0,1985	0,6568	0,5723
	St. Bárbara	0,8497	-0,5747	0,6425	0,5350

Na Tabela 8 encontram-se os valores das correlações obtidas entre a velocidade da onda de tensão e as estimativas dos módulos de elasticidade dinâmicos dinâmica com as características químicas da madeira. Pode-se observar que a velocidade de propagação da onda de tensão no sentido transversal (VMT) apresentou correlação positiva com o teor de celulose e negativa com o teor de lignina total e hemiceluloses e, porém, de baixa magnitude. As estimativas de módulo de elasticidade dinâmico apresentaram correlação positiva com o teor de celulose e negativa com o teor de lignina total e hemiceluloses. As correlações foram, no geral, de baixa magnitude entre as características químicas da madeira e a velocidade da onda de tensão e as estimativas de módulo de elasticidade dinâmico.

TABELA 8 Correlações entre as características químicas da madeira e as características obtidas por meio do *Strees wave time*, por regional

Química da madeira	Local	Strees Wave Time					
		VMT	VML	MMMT	MDMT	MMML	MDML
Celulose (%)	Cocais	0,3071	-0,5237	0,3793	0,1974	0,0068	-0,0961
	Guanhães	0,5559	0,0192	0,5197	0,5649	0,1810	0,2429
	RD-Ipaba	0,4660	0,6708	0,5248	0,5076	0,6920	0,6594
	St. Bárbara	0,4999	0,3292	0,6315	0,5866	0,5720	0,5161
Hemiceluloses (%)	Cocais	-0,2762	0,3812	-0,2947	-0,1413	0,0166	0,0993
	Guanhães	-0,2903	-0,1088	-0,2421	-0,2997	-0,1561	-0,2645
	RD-Ipaba	-0,4921	-0,5819	-0,4919	-0,4879	-0,5172	-0,5064
	St. Bárbara	-0,4508	-0,7784	-0,5707	-0,5561	-0,8209	-0,8025
Lignina total (%)	Cocais	-0,2952	0,5961	-0,4562	-0,3132	-0,1043	-0,0370
	Guanhães	-0,7817	-0,0518	-0,7625	-0,7884	-0,3033	-0,3087
	RD-Ipaba	0,0244	-0,1021	-0,0898	-0,0542	-0,3017	-0,2484
	St. Bárbara	-0,2879	0,0488	-0,3760	-0,3350	-0,1951	-0,1444
Extrativo (%)	Cocais	-0,0409	0,5107	-0,1226	0,1031	0,1515	0,3625
	Guanhães	0,2413	0,3575	0,2811	0,2325	0,4306	0,3158
	RD-Ipaba	0,2275	-0,1214	0,1479	0,1416	-0,1794	-0,1788
	St. Bárbara	-0,4406	-0,3284	-0,4398	-0,4303	-0,3783	-0,3637
S/G (mol/mol)	Cocais	0,4422	-0,3988	0,6065	0,4965	0,3642	0,2865
	Guanhães	-0,4220	-0,6052	-0,4410	-0,4243	-0,5065	-0,4715
	RD-Ipaba	-0,5088	-0,2468	-0,5546	-0,5236	-0,4242	-0,3907
	St. Bárbara	0,5341	0,1668	0,6196	0,5839	0,4265	0,3799

Na Tabela 9 são apresentadas as correlações simples obtidas entre as características químicas da madeira e os resultados obtidos do extensômetro, do resistógrafo e do *pilodyn*, dentro dos seis clones. Observa-se que DRLM

apresentou correlação positiva e de alta magnitude para todos os clones avaliados com o teor de celulose, exceto para o clone 1274, o qual apresentou correlação negativa e para o clone 1213, que apresentou correlação de baixa magnitude. Níveis elevados de celulose foram considerados por Boyd (1980) como o fator mais importante dentro das tensões de crescimento geradas na madeira de eucaliptos.

A DRLM apresentou, ainda, correlação negativa e positiva, respectivamente, para o teor de lignina e a relação S/G, para todos os clones, tendo sido de maior magnitude com a relação S/G.

A amplitude (AMPM) apresentou correlação negativa e de alta magnitude com o teor de extrativos. Alguns estudos já comprovaram que a presença de extrativos no cerne de eucalipto causa uma coloração na madeira e um aumento notável no valor de sua densidade básica, em relação ao alburno, que é tipicamente livre de extrativos (Smith 1982; Wilkes 1984; Ona et al., 1997).

Yazaki et al. (1994), estudando compensado de *Eucalyptus pilularis* de 40 anos, cultivado em Queensland, descobriram que as amostras com cerne mais escuro e mais vermelho apresentaram densidade básica mais alta que amostras com o cerne mais claro.

A penetração do pino do *pilodyn* (PILM) também apresentou correlação de elevada magnitude com a relação S/G, porém, tendo sido negativa para os clones 57 e 7074 e positiva para os demais.

TABELA 9 Correlações entre as características químicas da madeira e as características obtidas por meio do extensômetro, do resistógrafo e do *pilodyn*, por clones

Química da madeira	Clone	Extensômetro		Resistógrafo	Pylodin
		DRLM	DRTM	AMPM	PILM
Celulose (%)	57	0,6893	0,1392	-0,2070	0,3895
	1046	0,5548	0,1788	0,6930	0,0852
	1213	0,1879	-0,2454	0,2701	0,6832
	1215	0,6897	-0,2133	-0,3623	0,8409
	1274	-0,7636	-0,7959	0,9671	-0,6546
	7074	0,8107	-0,1371	0,8598	-0,5844
Hemiceluloses (%)	57	-0,8030	-0,3880	0,4657	-0,3391
	1046	0,0770	-0,8894	0,1038	0,7187
	1213	0,0116	0,1770	-0,4339	-0,5067
	1215	-0,4658	0,0986	0,0845	-0,7344
	1274	0,6501	0,9963	-0,8827	0,0324
	7074	-0,9864	0,1902	-0,7562	0,1569
Lignina total (%)	57	-0,1673	0,5239	-0,5370	-0,2430
	1046	-0,6677	0,6593	-0,9045	-0,7873
	1213	-0,5539	0,4035	0,1149	-0,8997
	1215	-0,893	0,0314	0,9438	-0,5683
	1274	-0,5838	0,5723	-0,8252	0,7713
	7074	-0,2958	-0,1073	-0,6338	0,9334
Extrato (%)	57	0,1915	0,7240	-0,6249	-0,7099
	1046	-0,7361	-0,2292	-0,6840	-0,0880
	1213	-0,1648	0,0795	-0,2624	-0,6391
	1215	0,0387	0,3104	-0,4351	-0,4277
	1274	0,7667	0,1015	-0,2552	0,4705
	7074	-0,030	0,7463	-0,7129	0,6644
S/G (mol/mol)	57	0,6832	0,7399	-0,5721	-0,8747
	1046	0,7185	-0,6132	0,9354	0,7678
	1213	0,8575	-0,2462	-0,6058	0,8835
	1215	0,5977	-0,1232	-0,2511	0,7820
	1274	0,6677	0,0247	-0,4126	0,9761
	7074	0,8092	-0,6528	0,9789	-0,3793

Na Tabela 10 são apresentadas as correlações simples obtidas entre as características químicas da madeira e os resultados obtidos por meio das velocidades de propagação da onda de tensão e estimativas de módulos de elasticidade dinâmicos, dentro dos seis clones. Observa-se que a velocidade de propagação da onda de tensão no sentido transversal (VMT) e o módulo de elasticidade dinâmico (MMMT) apresentaram correlação negativa com a celulose, para todos os clones avaliados, exceto para o clone 1274, enquanto as hemiceluloses apresentaram correlação positiva, com exceção desse mesmo

clone. A VMT e o MMT apresentaram correlação positiva com os extrativos para todos os clones, tendo sido de alta magnitude para os clones 57 e 7074. As demais características não apresentaram correlações bem definidas.

TABELA 10 Correlações entre as características químicas da madeira e as características obtidas por meio do *Strees wave time*, por clones

Química da madeira	Clone	<i>Strees wave time</i>					
		VMT	VML	MMMT	MDMT	MMML	MDML
Celulose (%)	57	-0,7111	-0,3385	-0,7451	-0,6504	-0,3884	-0,1267
	1046	-0,2124	-0,0746	-0,1411	0,1085	0,0038	0,1876
	1213	-0,2530	-0,6563	-0,3814	0,3175	-0,6378	-0,2203
	1215	-0,6203	-0,4228	-0,6393	-0,6398	-0,5649	-0,5667
	1274	0,8366	-0,0893	0,9130	0,7251	0,2373	-0,2554
	7074	-0,7404	0,3570	-0,6283	-0,6195	0,6354	0,6220
Hemiceluloses (%)	57	0,5046	0,3321	0,5593	4404	0,3935	0,1421
	1046	0,9013	-0,7120	0,8678	0,7142	-0,7583	-0,8180
	1213	0,3592	0,4644	0,4494	-0,1237	0,4373	-0,0099
	1215	0,5196	0,3570	0,5544	0,5540	0,5167	0,5166
	1274	-0,9620	0,6622	-0,9209	-0,7428	0,4282	0,5706
	7074	0,5514	0,0997	0,4195	0,4309	-0,2188	-0,2021
Lignina total (%)	57	0,9176	0,0947	0,8733	0,8804	0,0961	-0,0913
	1046	-0,6481	0,8303	-0,7017	-0,8196	0,7833	0,6346
	1213	-0,0981	0,9196	0,0856	-0,7155	0,9288	0,7051
	1215	0,4378	0,2423	0,3974	0,4004	0,2504	0,2570
	1274	-0,6665	-0,2529	-0,7803	-0,6868	-0,5499	-0,0520
	7074	0,6513	-0,8461	0,5925	0,5569	-0,9632	-0,9608
Extrativo (%)	57	0,9744	0,5872	0,9715	0,9929	0,5716	0,4543
	1046	0,3249	-0,1548	0,2644	-0,0746	-0,2305	-0,4399
	1213	0,4244	0,5914	0,5356	-0,1392	0,5585	0,0587
	1215	0,3333	0,3111	0,3892	0,3870	0,4476	0,4434
	1274	0,0563	0,4175	0,0212	0,4746	0,2614	0,7947
	7074	0,8740	-0,5009	0,9384	0,9335	-0,6004	-0,5886
S/G (mol/mol)	57	0,5433	0,8309	0,5761	0,6299	0,7896	0,8498
	1046	0,5915	-0,7787	0,6483	0,7965	-0,7265	-0,5628
	1213	0,2652	-0,9269	0,0835	0,7746	-0,9481	-0,9080
	1215	-0,5478	-0,3536	-0,5728	-0,5731	-0,5074	-0,5086
	1274	-0,0217	-0,3099	-0,1682	0,1179	-0,5473	0,1686
	7074	-0,9017	0,0728	-0,8402	-0,8534	0,3865	0,3652

Na Tabela 11 são apresentadas as correlações gerais entre as características químicas da madeira e os resultados obtidos por meio dos métodos não destrutivos. Observa-se que a DRLM apresentou correlação positiva com o teor de celulose e extrativos e a relação SG, e negativa com o teor de hemiceluloses e lignina. A DRTM e o *pilodyn* (PILM) não apresentaram correlação com as características químicas da madeira. A AMPM apresentou

correlação positiva e negativa com o teor de celulose e lignina, respectivamente. Apesar de os valores das correlações não terem sido elevados existe uma indicação de que a DRLM está relacionada positivamente com o teor de celulose e extrativos e a relação S/G, e negativamente com o teor de hemiceluloses e lignina. Segundo Bailleres et al. (1995), existe correlação positiva entre a relação S/G e as tensões de crescimento.

TABELA 11 Correlações gerais entre as características químicas da madeira e as características obtidas nos ensaios não destrutivos, independente dos clones e regionais

Química da madeira	Extensômetro		Resistógrafo	<i>Pilodyn</i>		<i>Strees wave time</i>				
	DRLM	DRTM	AMPM	PILM	VMT	VML	MMMT	MDMT	MMML	MDML
Celulose	0,405	0,038	0,493	-0,239	0,196	0,105	0,253	0,303	0,252	0,297
Hemiceluloses	-0,415	-0,225	-0,295	0,142	-0,055	-0,211	-0,074	-0,134	-0,240	-0,300
Lignina total	-0,259	0,205	-0,505	0,280	0,025	-0,332	-0,415	-0,427	-0,211	-0,206
Extrativo	0,037	-0,027	-0,250	0,007	0,132	0,109	0,125	0,094	0,099	0,043
S/G	0,374	-0,223	0,044	0,113	-0,128	-0,228	-0,078	-0,035	-0,117	-0,042

Na Tabela 12 são apresentadas as correlações simples obtidas entre as características de polpação da madeira e os resultados obtidos por meio do extensômetro, do resistógrafo e do *pilodyn*, dentro das quatro regionais. Observa-se que a DRLM apresentou correlação negativa com kappa e viscosidade e correlação positiva com o rendimento depurado (RD) e rendimento em kappa 17. Chantre et al. (1995), estudando clones de eucalipto aos 7 anos, também encontraram correlação positiva do rendimento com os valores de DRL. DRTM, AMPM e PILM não apresentaram correlações consistentes com as características de polpação.

TABELA 12 Correlações entre as características de polpação da madeira e as características obtidas por meio do extensômetro, do resistógrafo e do *pilodyn*, por regional

Polpação	Local	Extensômetro		Resistógrafo	Pyloclin
		DRLM	DRTM	AMPM	PILM
Kappa	Cocais	-0,1437	0,5143	-0,4808	0,0180
	Guanhães	-0,4649	-0,3648	0,4931	-0,2519
	RD-Ipaba	-0,1214	0,2791	0,1562	-0,5503
	St. Bárbara	-0,6717	0,9011	-0,3236	0,0634
Viscosidade (cP)	Cocais	-0,3034	0,1580	-0,6764	-0,1406
	Guanhães	-0,8502	-0,6987	0,0578	-0,0066
	RD-Ipaba	-0,3329	-0,0933	-0,8215	0,1045
	St. Bárbara	-0,5646	0,3260	-0,4921	0,4199
Rendimento Depurado (%)	Cocais	0,1882	0,3706	0,6481	-0,7297
	Guanhães	0,0437	0,0279	0,3787	-0,4780
	RD-Ipaba	0,4778	0,0511	-0,1722	0,2947
	St. Bárbara	0,5461	-0,3430	0,5714	-0,5836
Rendimento em k 17 (%)	Cocais	0,2224	0,0482	0,7869	-0,6326
	Guanhães	0,2359	0,1793	0,0876	-0,2604
	RD-Ipaba	0,3549	-0,0756	-0,1707	0,3942
	St. Bárbara	0,6867	-0,6875	0,5234	-0,4011

Pelos dados da Tabela 13, observa-se que não houve tendência clara nas correlações para os valores obtidos entre as características de polpação e as velocidades e estimativas de módulos de elasticidade dinâmicos dinâmico. Este resultado era esperado, uma vez que as características de polpação não devem ter mesmo nenhuma relação com as propriedades de resistência da madeira

TABELA 13 Correlações entre as características de polpação da madeira e as características obtidas por meio do *Strees wave time*, por regional

Polpação	Local	<i>Strees wave time</i>					
		VMT	VML	MMMT	MDMT	MMML	MDML
Kappa	Cocais	-0,0721	0,5724	-0,2480	-0,1218	-0,0046	0,0861
	Guanhães	0,3505	0,4610	0,3577	0,3577	0,3383	0,3422
	RD-Ipaba	0,4321	0,1481	0,4034	0,4092	0,2165	0,2341
	St. Bárbara	-0,0198	0,1122	-0,1682	-0,1100	-0,1272	-0,0590
Viscosidade (cP)	Cocais	-0,1743	0,6420	-0,2766	-0,0764	0,1054	0,2300
	Guanhães	0,1504	-0,4692	0,0892	0,1184	-0,4797	-0,4275
	RD-Ipaba	-0,0767	-0,2685	-0,2176	-0,1671	-0,4405	-0,3658
	St. Bárbara	-0,3126	-0,6123	-0,4465	-0,4258	-0,6773	-0,6534
Rendimento depurado (%)	Cocais	0,6222	0,3263	0,5707	0,4103	0,05910	0,3275
	Guanhães	0,1912	-0,0989	0,1556	0,2056	0,0268	0,1137
	RD-Ipaba	-0,2333	0,1000	-0,2137	-0,2022	-0,0068	-0,0008
	St. Bárbara	0,7151	0,4099	0,7319	0,7240	0,5565	0,5425
Rendimento em k 17 (%)	Cocais	0,5566	0,3263	0,6011	0,4018	0,5021	0,2306
	Guanhães	-0,0061	-0,2542	-0,0356	0,0027	-0,1102	-0,0447
	RD-Ipaba	-0,3046	0,0117	-0,2822	-0,2772	-0,0836	-0,0865
	St. Bárbara	0,4734	0,1971	0,5562	0,5220	0,4134	0,3702

Na Tabela 14 são apresentadas as correlações simples obtidas entre as características de polpação da madeira e os resultados obtidos por meio do extensômetro, do resistógrafo e do *pilodyn*, dentro dos seis clones. A DRLM apresentou correlação negativa com o kappa, sendo a mais elevada magnitude encontrada no clone 7074. Em relação à viscosidade, a correlação foi negativa para todos os clones, exceto para o clone 1213. Este resultado foi semelhante ao observado na Tabela 12.

TABELA 14 Correlações entre as características de polpação da madeira e as características obtidas por meio do extensômetro, do resistógrafo e do *pilodyn*, por clone

Polpação	Clone	Extensômetro		Resistógrafo	Pylodin
		DRLM	DRTM	AMPM	PILM
Kappa	57	-0,4044	-0,5609	0,3636	0,9822
	1046	-0,8361	0,6886	-0,9744	-0,8591
	1213	-0,4375	0,7293	0,2111	-0,5363
	1215	-0,2205	-0,1419	-0,1639	-0,5237
	1274	-0,4982	-0,1614	0,5385	-0,9578
	7074	-0,9777	0,3977	-0,6872	-0,1324
Viscosidade (cP)	57	-0,9546	-0,7339	0,7630	-0,0102
	1046	-0,9054	0,0649	-0,6997	-0,3573
	1213	0,6230	-0,4246	-0,5726	0,4625
	1215	-0,9520	0,7292	0,7709	-0,9772
	1274	-0,0635	-0,7862	0,5120	0,4534
	7074	-0,7394	0,1732	-0,8841	0,6774
Rendimento depurado (%)	57	-0,5300	0,0780	-0,1484	0,1211
	1046	0,7963	-0,4682	0,9690	0,6787
	1213	-0,6289	-0,6462	0,4498	-0,6908
	1215	0,0562	0,1924	0,3336	0,4159
	1274	-0,7284	-0,9098	0,9886	-0,4628
	7074	0,9851	-0,4162	0,7716	0,0000
Rendimento em k 17 (%)	57	0,3404	0,5747	-0,3848	-0,9737
	1046	0,8165	-0,5442	0,9796	0,7435
	1213	-0,2611	-0,8428	0,2297	-0,2678
	1215	0,1821	0,1215	0,2104	0,5149
	1274	-0,4984	-0,9776	0,8170	0,0988
	7074	0,9883	-0,3919	0,7445	0,0335

Na Tabela 15 são apresentadas as correlações entre as características de polpação e as velocidades de propagação da onda de tensão, sentido transversal e longitudinal, e as estimativas de módulo de elasticidade dinâmico, usando a densidade básica média da árvore e a determinada a 1,3 m de altura do solo

(DAP). Pode-se observar que a VMT e a MMT apresentaram correlação positiva e de alta magnitude com a viscosidade da polpa, exceto para os clones 57 e 1046, os quais apresentaram correlações de baixas magnitudes. Verifica-se, ainda, que as características número kappa e os rendimentos apresentaram elevadas correlações com as velocidades de propagação da onda de tensão e as estimativas de módulo de elasticidade, porém, com alternância de sinais entre os clones.

TABELA 15 Correlações entre as características de polpação da madeira e as características obtidas por meio do *Strees wave time*, por clone

Polpação	Clone	<i>Strees wave time</i>					
		VMT	VML	MMMT	MDMT	MMML	MDML
Kappa	57	-0,6600	-0,9465	-0,7160	-0,7261	-0,9275	-0,9101
	1046	-0,6382	0,7615	-0,6892	-0,8713	0,7126	0,5361
	1213	-0,7489	0,6319	-0,6081	-0,9912	0,6938	0,9802
	1215	0,2868	0,1381	0,3309	0,3302	0,3114	0,3101
	1274	0,2499	0,5292	0,4070	0,2913	0,7798	0,1722
	7074	0,4782	0,4099	0,3687	0,3970	0,0880	0,1077
Viscosidade (cP)	57	0,1065	0,0532	0,1614	0,0265	0,1257	-0,0936
	1046	0,0778	-0,0834	0,0405	-0,3108	-0,1379	-0,3425
	1213	0,6766	-0,5516	0,5591	0,8245	-0,6061	-0,9362
	1215	0,9248	0,7959	0,9145	0,9157	0,8390	0,8424
	1274	0,8113	-0,5139	0,7169	0,8148	-0,4502	-0,1535
	7074	0,7974	-0,4555	0,6993	0,6869	-0,7193	-0,7064
Rendimento depurado (%)	57	0,6059	-0,2241	0,5614	0,5297	-0,1991	-0,4136
	1046	0,4261	-0,6282	0,4895	0,7000	-0,5647	-0,3730
	1213	0,8207	0,6014	0,9135	0,2626	0,5333	-0,0916
	1215	-0,2071	-0,0970	-0,2581	-0,2568	-0,2661	-0,2636
	1274	0,9386	-0,2577	0,9791	0,8111	0,0506	-0,3256
	7074	-0,5781	-0,2880	-0,4686	-0,4923	0,0428	0,0228
Rendimento em k 17 (%)	57	0,7404	0,9244	0,7915	0,7976	0,9086	0,8644
	1046	0,4989	-0,6772	0,5590	0,7621	-0,6179	-0,4294
	1213	0,9932	0,1529	0,9959	0,6819	0,0707	-0,5491
	1215	-0,2953	-0,1632	-0,3420	-0,3410	-0,3340	-0,3323
	1274	0,9648	-0,6245	0,9092	0,8128	-0,4288	-0,4496
	7074	-0,5433	-0,3165	-0,4313	-0,4556	0,0119	-0,0078

Na Tabela 16 são apresentadas as correlações gerais entre as características de polpação da madeira e as características obtidas nos ensaios não destrutivos. Pode-se observar que a DRLM e a amplitude (AMPM) apresentaram correlação negativa com o número kappa (Kappa) e a viscosidade,

e positiva com os rendimentos. A DRTM apresentou correlação positiva com o número kappa e negativa com a viscosidade e rendimentos. Apesar da baixa magnitude das correlações obtidas, verifica-se que existe a possibilidade de uso de técnicas, como o extensômetro e o resistógrafo, para estimar o rendimento e a viscosidade da polpa celulósica.

A penetração do pino do *pilodyn* (PILM), as velocidades de propagação da onda de tensão (VMT e VML) e as estimativas de módulo de elasticidade não apresentaram relação satisfatória com as características de polpação.

TABELA 16 Correlações gerais entre as características de polpação da madeira e as características obtidas nos ensaios não destrutivos, independente dos clones e regionais

Polpação	Extensômetro		Resistógrafo	Pylodin		<i>Strees wave time</i>				
	DRLM	DRTM	AMPM	PILM	VMT	VML	MMMT	MDMT	MMML	MDML
Kappa	-0,251	0,387	-0,035	-0,264	0,083	0,340	0,054	0,078	0,191	0,213
Viscosidade	-0,525	-0,138	-0,363	0,081	0,111	-0,259	0,006	0,006	-0,391	-0,342
Rend. Dep.	0,135	-0,043	0,392	-0,265	0,308	0,113	0,322	0,310	0,196	0,157
Rend. K 17	0,213	-0,206	0,293	-0,072	0,177	-0,070	0,199	0,181	0,054	0,019

Nas Figura 2, 3 e 4 mostra-se a relação observada entre os valores obtidos nas análises de laboratório de extrativos, lignina total, rendimento depurado, rendimento em kappa 17, densidade básica média da árvore e densidade básica na altura do DAP e as amostras preditas pelo NIR a partir de modelos pré-existentes, da Cenibra. Observa-se que os ajustes não foram bons, demonstrando a baixa relação funcional existente entre os valores preditos pelo NIR e os valores determinados em laboratório. Rezende et al. (2001), estudando clones plantados em vários sítios, também encontraram baixa correlação para os valores de lignina e densidade básica média.

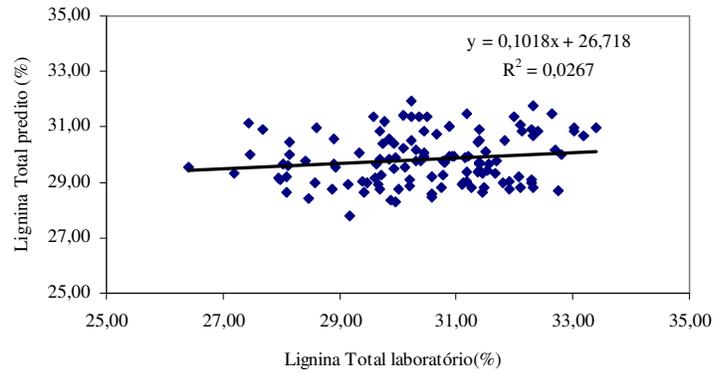
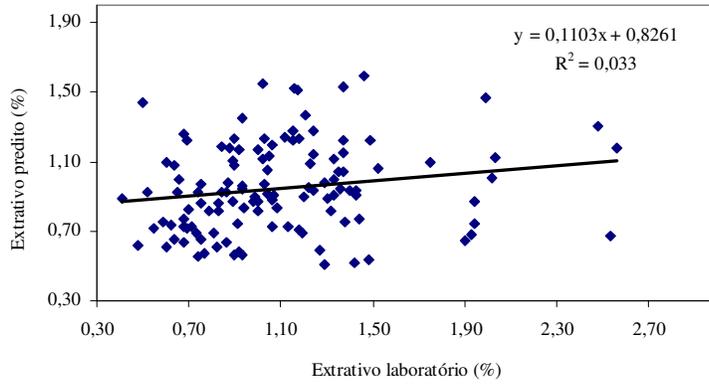


FIGURA 2 Relação entre análise de laboratório e amostras preditas no NIR para as características de extrativos em acetona e lignina total das 120 amostras.

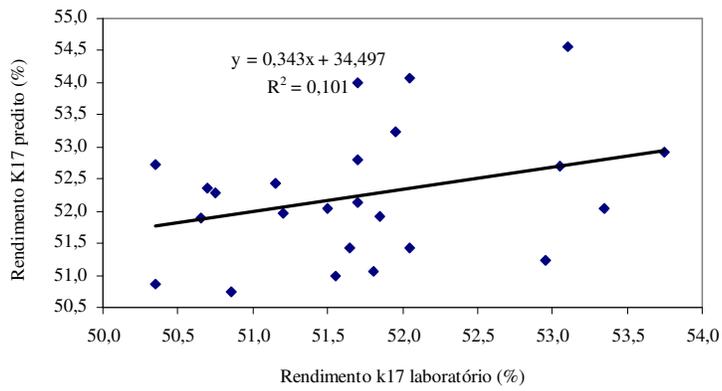
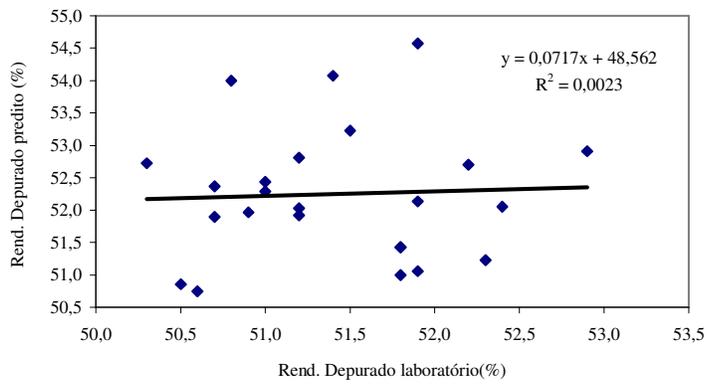


FIGURA 3 Relação entre análise de laboratório e amostras preditas no NIR para as características de rendimento e rendimento em k17 das 120 amostras.

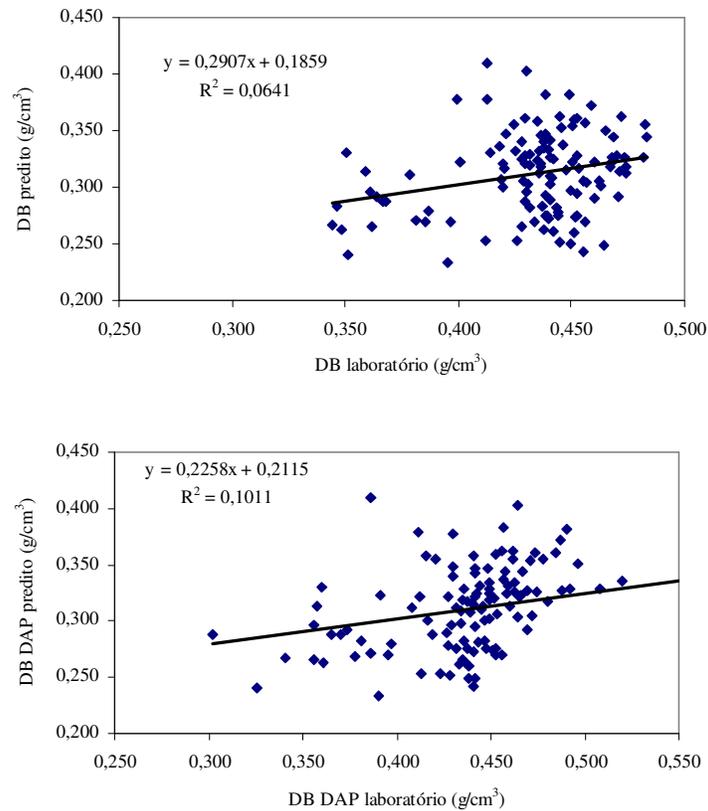


FIGURA 4 Relação entre análise de laboratório e amostras preditas no NIR para as características de densidade básica dos cavacos e densidade básica na altura do DAP das 120 amostras.

Nas Figuras 5, 6 e 7 mostra-se a relação observada entre os valores obtidos nas análises de laboratório de celulose e hemiceluloses, lignina total e relação S/G, densidade básica média da árvore e densidade básica no DAP e as preditas na validação externa pelo método do NIR.

Pelas Figuras 5 e 6 verifica-se que entre as características químicas da madeira os melhores ajustes ocorreram para o teor de hemiceluloses e relação

S/G. Os teores de celulose e de lignina total na madeira não apresentaram bons ajustes.

De acordo com a Figura 7, observa-se que a relação funcional existente entre os valores de densidade básica, média da árvore e no DAP, e as preditas na validação externa pelo método do NIR, foi mais forte que para as características químicas da madeira. O ajuste para densidade básica média da árvore foi superior ao valor obtido por meio da densidade básica no DAP, de 0,77 e 0,46, respectivamente. Esse resultado pode ser considerado esperado, tendo em vista a grande variabilidade existente ao longo do tronco da árvore. A variação longitudinal da densidade básica da madeira de eucalipto possui vários tipos de tendência. Em algumas espécies, a densidade tende a ser decrescente da base para o topo e, em outras, tende a ser crescente a partir do nível do DAP, podendo, ainda, em outras espécies, apresentar valores alternados com tendência decrescente e crescente (Barrichelo et al., 1983). A variação da densidade básica no sentido medula-casca, geralmente, é crescente, isto é, aumenta gradativamente do cerne para o alburno (Foelkel et al., 1983).

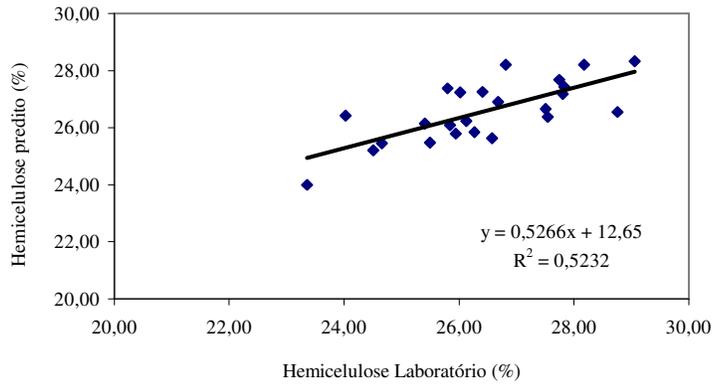
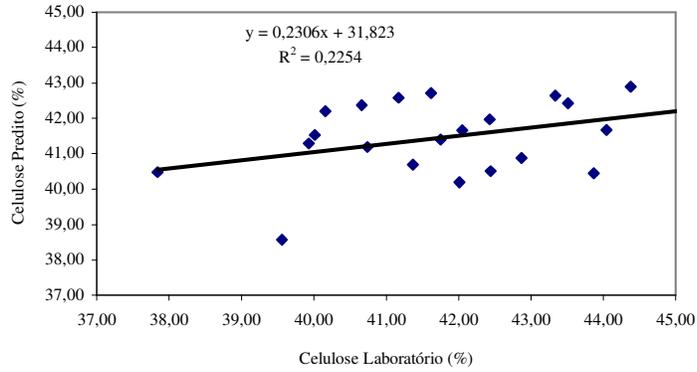


FIGURA 5 Relação entre análise de laboratório e amostras preditas na validação externa para as características de densidade básica dos cavacos e densidade básica na altura do DAP das 24 amostras.

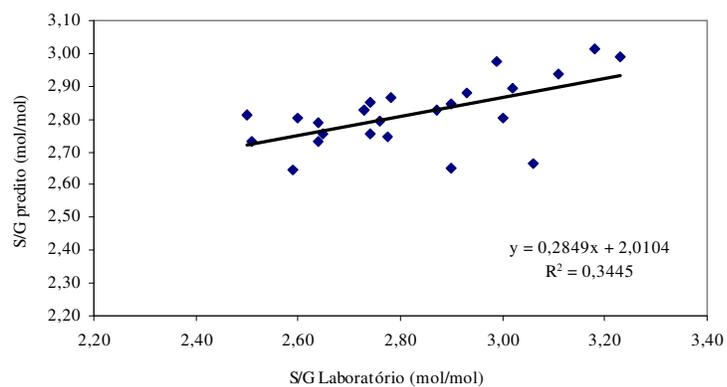
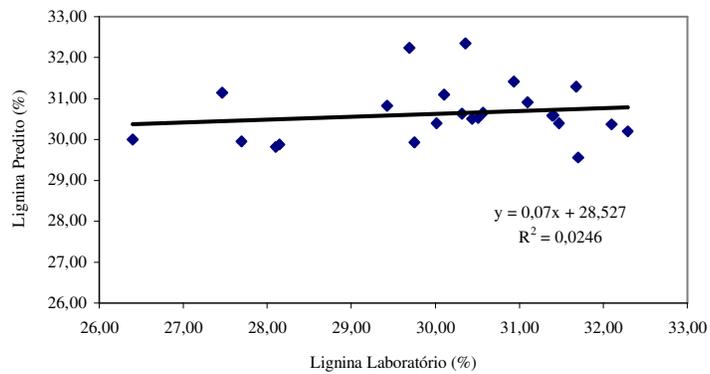


FIGURA 6 Relação entre análises de laboratório e amostras preditas na validação externa para as características de lignina total e relação S/G das 24 amostras.

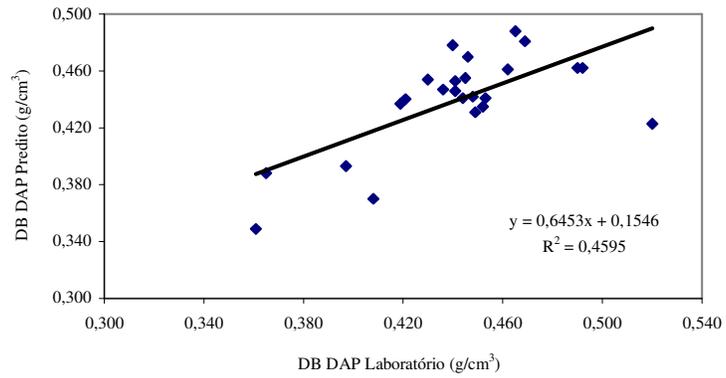
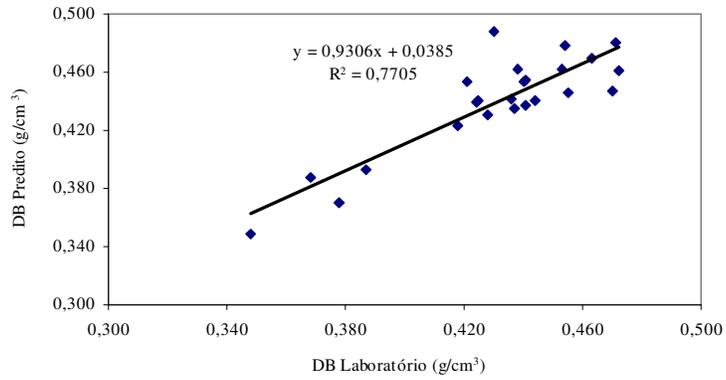


FIGURA 7 Relação entre análise de laboratório e amostras preditas na validação externa para as características de densidade básica dos cavacos e densidade básica na altura do DAP das 24 amostras.

#### 4 CONCLUSÃO

- ✓ De modo geral, as magnitudes das correlações foram maiores com a densidade média da árvore (DBM).
- ✓ As velocidades de propagação das ondas de tensão e as DRLs apresentaram correlações positivas e significativas com as densidades básicas, porém, de baixa magnitude.
- ✓ As correlações mais importantes ocorreram entre a densidade básica média da árvore inteira (DBM) e a amplitude (AMP) e com o *pilodyn* (PILM), sendo de 0,864 e - 0,723, respectivamente, demonstrando a possibilidade de estimar a densidade básica da madeira com uma dessas ferramentas, o qual é um importante parâmetro de qualidade da madeira para a indústria de celulose.
- ✓ O extensômetro mostrou ser um equipamento possível de ser utilizado para a predição de celulose e rendimento da polpa celulósica.
- ✓ Os valores preditos pelo NIR a partir de modelos pré-existentes da Cenibra não foram satisfatórios, em função das inconsistências dos modelos para as amostras.
- ✓ Os valores de predição externa apresentaram melhores resultados, visto que o modelo utilizado foi gerado a partir de amostras similares.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAILLERES, H.; CHANSON, B.; FOURNIER, M.; TOLLIER, M.; MONTIES, B. Wood structure, chemical composition, and growth strains in Eucalyptus clones. **Annales des Sciences Forestieres**, v.52, n.2, p.157-172, 1995.

BAMBER, R. The origin of growth stresses. **Forpride Digest**, v.8, n.1, p.75-79, 96, 1979.

BAMBER, R. The origin of growth stresses: a rebuttal. **IAWA Bulletin**, v.8, n.1, p.80-84, 1987.

BOYD, J. Relationships between fibre morphology, growth strains and physical properties of wood. **Australian Forest Research**, v.10, p.337-360, 1980.

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O.; MIGLIORINI, A.J. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO – SILVICULTURA, 4., 1983, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBS, 1983.

CHANTRE, G.; GOUARI-MOUKINI, R.; GÉRARD, J. Longitudinal residual strains of manuration and kraft pulp yield in the Genus Eucalyptus- First Results. In: CONFERENCE EUCALYPTUS PLANTATIONS: improving fibre yield and quality, 1995, Hobart. **Proceeding...**, Hobart, Tasmania: CRCTHF – IUFRO, 1995. p.79.

ERIKSON, R.G. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine and grand fir trees from northern Idaho. **Forest Products Journal**, v.50, n.7/8, p.59-65, 2000.

FOELKEL, C.E.B.; BUSNARDO, C.A.; DIAS, C. SCHMIDT, C.; SILVA, R.M.R.; VESZ, J.B.V. Variabilidade radial da madeira de *Eucalyptus saligna*. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO - SILVICULTURA. 4., 1983, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBS, 1983. v.8, n.28, p.726-731.

GREAVES, B.L.; BORRALHO, N.M.G.; RAYMOND, C.A.; FARRINGTON, A. Use of a Pilodyn for the indirect selection of basic density in Eucalyptus nitens, **Canadian Journal of Forest Research**, v. 26, n.9, p. 1643-1650, 1996.

NICHOLSON, J.; CAMPBELL, G.; BLAND, D. Association between wood characteristics and growth stress level: A preliminary study. **Wood Science**, v.5, n.2, p.109-112, 1972.

OKUYAMA, T.; YAMAMOTO, H.; YOSHIDA, Y.; HATTORI, Y.; ARCHER, R. Growth stresses in tension wood: Role of microfibrils and lignification. **Annual Science Forestry**, v.51, p.291-300, 1994.

ONA, T.; SONODA, T.; SHIBATA, M. Relationship between various extracted basic densities and wood chemical components in *Eucalyptus camaldulensis*. **Wood Science and Technology**, v.31, p.205-216, 1997.

REZENDE, G. D.S. P.; SCHIMLECK L.; DEMUNER B.J. Near infrared spectroscopy as an alternative to evaluate eucalypt wood quality at Aracruz. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM IN THE CHEMISTRY OF LIGNINS AND OTHER WOOD COMPONENTS, 7., 2001, Viçosa. **Proceeding...** Viçosa, MG: UFV, 2001. p.25-28.

ROSS, R.J. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, v.48, n.1, p.14-19, 1998.

SMITH, W. Wood quality of some Queensland re-growth open forest hardwoods. IN: ROUTINE RESEARCH CONFERENCE, 1982, Queensland, 1982. **Proceedings...** Queensland, Australia: Qld Dept Forestry, 1982. p. 83

SUGIYAMA, K.; OKUYAMA, T.; YAMAMOTO, H.; YOSHIDA, M. Generation process of growth stresses in cell walls: Relation between longitudinal released strain and chemical composition. **Wood Science and Technology**, v.27, p.257-262, 1993.

WILKES, J. The influence of rate of growth on the density and heartwood extractives content of eucalypt species. **Wood Science and Technology**, v.18, n.113-120, 1984.

YAZAKI, Y.; COLLINS, P.; MCCOMBE, B. Variations in hot water extractives content and density of commercial wood veneers from blackbutt (*Eucalyptus pilularis*). **Holzforschung**, v.48, p.107-111, 1994.