



ALLAN MOTTA COUTO

**MODELAGEM DA DENSIDADE BÁSICA E
CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA EM CLONES
DE *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis***

**LAVRAS-MG
2011**

ALLAN MOTTA COUTO

**MODELAGEM DA DENSIDADE BÁSICA E CARACTERIZAÇÃO
QUÍMICA EM CLONES DE *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Madeira como matéria-prima, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Paulo Fernando Trugilho

**LAVRAS - MG
2011**

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

Couto, Allan Motta.

Modelagem da densidade básica e caracterização química em clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* / Allan Motta Couto. – Lavras : UFLA, 2011.

72 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Resistograph®. 2. Pilodyn®. 3. Não-destrutivo. 4. Eucalyptus.
5. Propriedades. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.1

ALLAN MOTTA COUTO

**MODELAGEM DA DENSIDADE BÁSICA E CARACTERIZAÇÃO
QUÍMICA EM CLONES DE *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Madeira como matéria-prima, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 18 de fevereiro de 2011

Dra. Angélica de Cássia Oliveira Carneiro UFV

Dr. Natalino Calegário UFLA

Dr. Paulo Fernando Trugilho
Orientador

**LAVRAS – MG
2011**

A Deus.

Aos meus pais Antônio e Sara.

Ao meu irmão Alysson.

Aos meus amigos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Sou especialmente grato ao professor Paulo Fernando Trugilho pelos ensinamentos passados, confiança nos trabalhos realizados e paciência em minha orientação.

Aos professores Natalino Calegário e Angélica de Cássia pelas críticas e sugestões que engrandeceram e muito este trabalho.

Aos professores do Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira: Dr. José Tarcísio Lima, Dr. José Reinaldo Moreira da Silva, Dr. Lourival Marin Mendes e Dr. Fábio Akira Mori.

Aos laboratoristas e funcionários Claret, Wilson (Melão), Hernani, Chica, Cris e Meire, pelo auxílio nos momentos em que precisei.

A ArcelorMittal Bioenergia pelo suporte e apoio logístico necessários à condução deste trabalho.

Aos estagiários Thiaginho, Aliny, Vinição, Luana, Thais e Anelise pela imensa ajuda na coleta dos dados e análise do experimento.

Aos amigos Lina, Xisto, Natália, Tatti, Tião, Selma, Pedrão, Thiza, Claudinéia, Mariza, Claudão e Lúcia pela amizade e convivência.

Aos quase irmãos Gabriel e Thiago, pelos inúmeros momentos que passamos juntos (incluindo os ruins).

Aos parceiros de república Davi e Ivo pela por terem feito com que eu me sentisse em casa, mesmo estando longe dela.

Aos meus pais Antônio e Sara, pela minha formação moral, apoio incondicional e por terem se privado de seus sonhos para que eu pudesse realizar os meus.

Ao meu irmão Alysson pela parceria e companheirismo mesmo a distância.

À Vânia, pela paciência e por partilhar carinhosamente das minhas tristezas e alegrias.

Ao programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira e ao órgão financiador CAPES pela concessão de bolsa de estudos.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho e aqueles que por ventura tiveram seus nomes omitidos.

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho avaliar a eficiência dos aparelhos de avaliação não destrutiva Pilodyn® e Resistograph® na inferência sobre a qualidade da madeira em clones de *E. grandis* e *E. urophylla*. Para isto utilizou-se madeira de 49 clones de *E. grandis* e *E. urophylla* oriunda de teste clonal pertencente a ArcelorMittal Bioenergia implantado em Martinho Campos, Minas Gerais. Foram realizadas leituras com o Pilodyn® e Resistograph®, posteriormente as árvores foram abatidas e destas foram retirados discos aos 2, 10, 30, 50 e 70% da altura comercial e um disco extra em 1,30 m. Os discos foram enviados à UFLA onde foram realizados análises física, química e energética dos materiais. A utilização dos aparelhos de avaliação não destrutiva na inferência sobre a qualidade da madeira, Pilodyn® e Resistograph®, apresentou precisão baixa e mediana, respectivamente. As correlações entre a densidade básica e a Amplitude média registrada nos quatro primeiros centímetros de profundidade foram maiores comparadas a Amplitude média da leitura em sua totalidade. Os materiais avaliados apresentaram altos teores em lignina e densidade básica, além de baixos teores em minerais, características favoráveis ao uso energético. Dentre os materiais avaliados praticamente não houve variação nos teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e poder calorífico superior. As correlações mais relevantes observadas foram entre o poder calorífico volumétrico e densidade básica (0,99), teor de lignina e holocelulose (-0,92), carbono e oxigênio elementar (-0,99), não foram evidenciados fortes correlações entre o poder calorífico superior e os teores elementares nem com o teor de lignina da madeira.

Palavras-chave: Resistograph®. Pilodyn®. Não destrutivo. *Eucalyptus*.

ABSTRAT

This study aimed of work was to evaluate the efficiency of the non destructive equipments for inference about the wood quality in clones of *E. grandis* and *E. urophylla*. It was evaluated wood of 49 clones of *E. grandis* and *E. urophylla* from a clonal test planted by ArcelorMittal Bioenergia, in Martinho Campos, Minas Gerais. After the evaluations with Pilodyn® and Resistograph® the trees were harvested and disc sample were extracted from 2, 10, 30, 50 and 70% of the commercial height of the tree. One extra disc sample was extracted at 1,30 m height. The discs were sent to UFLA for physical, chemical and energy analysis. The utilization of the non destructive equipments, Pilodyn® and Resistograph®, for inference about the wood quality showed low and mediun precision respectively. The correlations between basic density and the Resistograph (amplitude) in the first four centimeters of depth were higher compared with the average Resistograph (amplitude). The materials didn't present variation in carbon, hydrogen and oxygen contests and in the calorific value. The material presenteds high values of basic density and lignin content, low values of ash content, which are favorable characteristics for the energetic use. The more relevant correlation observed were between volumetric calorific value and basic density (0,99), lignin and holocelulose content (-0,92) and carbon and oxygen content (-0,99). It was not evidence strong correlations between calorific value and elementary and lignin content of the clones wood evaluated.

Keywords: Resistograph®. Pilodyn®. Nondestructive tests. *Eucalyptus*.

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 13 |
| 2.1 | A avaliação não destrutiva | 13 |
| 2.1.1 | Pilodyn® | 14 |
| 2.1.2 | Resistograph® | 15 |
| 2.2 | Caracterização da madeira | 16 |
| 2.2.1 | Densidade básica | 16 |
| 2.2.2 | Teor de extrativos | 17 |
| 2.2.3 | Teor em lignina | 18 |
| 2.2.4 | Teor em minerais | 19 |
| 2.2.5 | Composição química elementar | 19 |
| 2.2.6 | Poder calorífico superior | 20 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 21 |
| 3.1 | Material biológico | 21 |
| 3.2 | Amostragem | 23 |
| 3.3 | Avaliação não destrutiva | 23 |
| 3.4 | Amostragem longitudinal | 24 |
| 3.5 | Preparação do material para avaliação destrutiva | 25 |
| 3.6 | Determinação da densidade básica | 27 |
| 3.7 | Análise química da madeira | 27 |
| 3.7.1 | Determinação dos teores em extrativos totais | 27 |
| 3.7.2 | Determinação dos teores em lignina | 27 |
| 3.7.3 | Determinação dos teores em minerais | 28 |
| 3.7.4 | Determinação do teor de holocelulose | 28 |
| 3.7.5 | Determinação dos teores elementares | 29 |
| 3.8 | Determinação do poder calorífico superior e densidade energética da madeira | 29 |
| 3.9 | Análise estatística | 29 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 31 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.1 | Avaliação não destrutiva da madeira..... | 31 |
| 4.2 | Comparação entre os métodos amostrais..... | 51 |
| 4.3 | Caracterização química e densidade básica da madeira..... | 53 |
| 4.4 | Caracterização elementar e energética..... | 58 |
| 4.5 | Correlações entre as variáveis avaliadas..... | 63 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 66 |
| | REFERÊNCIAS..... | 68 |

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos recursos naturais mais consumidos pelo homem, tal afirmação deve-se ao fato de a mesma ser utilizada para diferentes objetivos, dentre os quais se destacam a geração de energia, produção de celulose e papel, conversão em painéis reconstituídos, além de promover serviços ambientais como imobilização do carbono atmosférico. Seu caráter renovável é uma vantagem significativa comparada a materiais que apresentam caráter inverso.

Um dos reflexos de uma grande gama de aplicações é o crescimento da demanda por madeira. Este fato aliado ao quadro alarmante relativo aos problemas ambientais, a maior exploração deste recurso em fontes naturais se torna de certa forma um inconveniente. Portanto, a busca por fontes alternativas e sustentáveis de madeira tem se intensificado nas últimas décadas.

O *Eucalyptus* é um gênero que se adaptou muito bem às condições climáticas do Brasil e por apresentar um rápido crescimento tem sido utilizado maciçamente nos mais diversos ramos do setor florestal, sua elevada produtividade tem contribuído para a redução da pressão sobre as fontes naturais de madeira.

A utilização da madeira em sua forma mais adequada tem por exigência o conhecimento sobre suas propriedades físicas, anatômicas, químicas e mecânicas, fazendo com que os estudos sobre a avaliação de sua qualidade como matéria-prima envolvam processos demorados e de custo elevado. Dessa forma, o desenvolvimento de técnicas que possibilitem reduzir estes fatores desfavoráveis seja de grande valia para o setor florestal.

Neste contexto, os métodos ou ensaios não destrutivos podem ser importantes ferramentas de avaliação das propriedades da madeira, pois estas técnicas visam qualificar o material sem que haja o comprometimento do seu

uso futuro. Assim, estes métodos podem propiciar uma economia de tempo, custo, além de permitir a análise de um maior número de amostras.

Vários equipamentos foram desenvolvidos e adaptados para realizar a avaliação não destrutiva para a madeira, a exemplo dos aparelhos Resistograph® e Pilodyn®. Estes equipamentos foram desenvolvidos para avaliar, a princípio, a sanidade em peças de madeira e atualmente têm sido utilizados, além de seu propósito inicial, como ferramentas que auxiliam na inferência sobre a qualidade da madeira.

Diante do exposto este trabalho foi conduzido tendo por objetivo geral avaliar a eficiência dos aparelhos de análise não destrutiva (Resistograph® e Pilodyn®) na inferência sobre a qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus*.

Por sua vez os objetivos específicos foram:

- a) ajustar modelos preditivos da densidade básica utilizando variáveis não destrutivas;
- b) caracterizar a madeira de clones de *Eucalyptus* quanto às propriedades física e químicas;
- c) avaliar as relações existentes entre as características analisadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A madeira é produzida pelo tecido xilemático (câmbio primário e secundário) dos vegetais superiores, e é um composto de extrema complexidade devido à presença de vários tipos celulares em sua estrutura. Em sua constituição anatômica há células especializadas em funções como sustentação, armazenamento, transformação e condução de substâncias nutritivas, sendo assim, caracterizado como um material heterogêneo e variável.

Sua estrutura e composição química, bem como suas propriedades físicas e mecânicas, variam significativamente entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie, e ainda, entre diferentes posições em uma mesma árvore, alterando ao longo do tronco e na direção da medula até a casca.

Diante de tamanha variabilidade, a madeira apresenta uma gama praticamente infindável de utilizações. Com o rápido avanço técnico e científico, o número de utilizações atribuídas à madeira apresenta tendência apenas de crescimento.

A utilização da madeira sob sua forma mais proveitosa depende diretamente das propriedades que a mesma apresenta, pois os processos e qualidade dos produtos nos quais a madeira se faz presente dependem diretamente das suas atribuições químicas, físicas, anatômicas e mecânicas. Portanto, a adequada caracterização da madeira se torna uma etapa vital para o sucesso deste material como matéria-prima.

2.1 A avaliação não destrutiva

Avaliação não destrutiva da madeira, segundo Ross, Brashaw e Pellerin (1998), é a ciência de inferir sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas

de uma peça de determinado material sem o que mesmo perca sua capacidade de uso final.

Em materiais homogêneos e isotrópicos, como o aço, por exemplo, a avaliação não destrutiva é capaz de detectar falhas decorrentes do processo produtivo. Na madeira defeitos ocorrem naturalmente em função de sua forma de crescimento, e a influência destes sobre a qualidade da madeira pode ser avaliada através de métodos não destrutivos (BUCUR, 1995, p. 132).

A avaliação não destrutiva pode ser considerada uma ferramenta de expressiva importância para avaliação das características da madeira, por ser mais rápida e barata comparada aos métodos destrutivos de avaliação, ela permite a análise de um maior número de amostras, entretanto, esta praticidade tem por desvantagem uma menor precisão.

A utilização dos aparelhos de avaliação não destrutiva pode ser útil em programas de melhoramento genético, pois seus resultados podem ser utilizados na qualificação da madeira sem que para isto o indivíduo seja destruído, logo não há perda do material genético podendo o mesmo ser replicado.

Vários são os equipamentos utilizados na avaliação não destrutiva, dentre eles destacam-se os Raios-X, Ondas de Tensão, Extensômetro (medidor de deformações residuais), NIR, Ultrassom, além do Pilodyn® e Resistograph®.

2.1.1 Pilodyn®

O Pilodyn® foi desenvolvido, a princípio, com objetivo de avaliar a sanidade de postes de transmissão de energia. Atualmente é utilizado como uma ferramenta na inferência sobre a qualidade da madeira. Este consiste basicamente de um pino rígido impulsionado por uma mola à pressão constante. A penetração deste pino deve se correlacionar negativamente com a densidade básica, uma vez que quanto maior a densidade do material maior a resistência à

penetração e conseqüentemente menor a profundidade alcançada pelo do pino do Pilodyn®.

Desta forma, o Pilodyn® tem sido útil na estimativa da densidade básica em populações, famílias ou pontos amostrais (MCKENZIE et al., 2003). Bons resultados foram observados por Raymond e MacDonald (1998) ao relacionar a penetração do pino do Pilodyn® com a densidade básica da madeira de *E. glóbulos* e *E. nitens*, estes em diferentes idades e sítios.

Downes et al. (1997, p. 144) citam as vantagens referentes à avaliação da madeira utilizando o Pilodyn® e entre estas estão: ser não destrutivo, rápida aplicação, ajustável a um grande número de amostras, etc. O autor ainda cita alguns pontos negativos como: baixa representatibilidade do caule, difícil aplicação em árvores de menores dimensões, avaliação apenas da madeira próxima ao câmbio e a avaliação pode sofrer influência do lenho de reação.

Contudo, apesar das vantagens, há pesquisadores que não creditam o método de análise do Pilodyn® para inferência sobre a densidade básica da árvore individual (MCKENZIE et al., 2003). Isto devido às baixas e médias correlações observadas entre ambas às variáveis.

2.1.2 Resistograph®

O Resistograph®, a exemplo do Pilodyn, também foi um equipamento desenvolvido com o objetivo inicial de avaliar a sanidade do lenho de árvores e da madeira utilizada em estruturas. Atualmente, além de realizar o objetivo inicialmente proposto, tem sido utilizado indiretamente para realização de inferências quanto à qualidade da madeira.

Este aparelho utiliza um dispositivo de microperfuração equipado com uma broca de três milímetros de espessura e comprimento variados automaticamente adaptado a um mecanismo de velocidade de perfuração

(RINN; SCHWEINGRUBER; SCHAR, 1996). Um dispositivo de coleta registra uma grandeza relativa à dificuldade de perfuração da madeira pela broca (Amplitude), isto com uma resolução posicional de 0,01 mm. Assim a média dos valores em Amplitude é correlacionada com a densidade do material. Em teoria, quanto mais denso o material maior a dificuldade de perfuração pela broca e, portanto, maior o valor em Amplitude média.

Rinn, Schweingruber e Schar (1996) utilizando o Resistograph® em madeira de diferentes espécies e Lima et al. (2006) em madeira de *Eucalyptus*, encontraram boas relações entre a Amplitude e a densidade básica da madeira.

Como todo aparelho, o Resistograph® apresenta certas vantagens como: representabilidade de porções mais internas das peças de madeira, rápida aplicação sendo assim ajustável a um grande número de amostras. Entretanto, sua utilização na presença de correntes de ar não é recomendada, pois há um desequilíbrio das tensões podem influenciar os valores em amplitude.

2.2 Caracterização da madeira

A utilização da madeira sob a forma mais adequada depende diretamente de suas propriedades químicas, físicas, anatômicas e mecânicas, de modo que a caracterização adequada da madeira se torna, de certa forma, necessária para a inferência sobre a sua melhor forma de utilização.

2.2.1 Densidade básica

A densidade básica é a propriedade considerada como melhor índice de qualidade da madeira. Tal afirmação está relacionada ao fato de a densidade ser reflexo da interação entre as propriedades químicas e anatômicas do material.

Existem diversos trabalhos relacionando a densidade com as dimensões das fibras, particularmente espessura da parede, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre lenho juvenil e tardio, e arranjo dos elementos anatômicos.

A instabilidade dimensional, resistência mecânica (PANSHIN; ZEEUW, 1980), propriedades elétricas e acústicas (LOSCHI NETO et al., 2008), dentre outras são afetadas também pela densidade da madeira.

A densidade básica apresenta diversos níveis de variação: variação entre espécies, entre indivíduos de mesma espécie e inclusive em diferentes posições dentro de um fuste. Tal variabilidade é devido ao tipo, forma e organização celular da madeira, que por sua vez sofre influência genética, ambiental, da idade do indivíduo, entre outras (PANSHIN; ZEEUW, 1980).

A densidade básica é uma característica que influencia praticamente todos os processos industriais, bem como a qualidade do produto final, nos quais a madeira se faz presente (BRITO; BARRICHELO, 1977; QUEIROZ et al., 2004). Diversos trabalhos tiveram por objetivo avaliar a influência da densidade básica sobre processos como a polpação (SHIMOYAMA; BARRICHELLO, 1991), carbonização (TRUGILHO et al., 2005), laminação entre outros.

2.2.2 Teor de extrativos

Os extrativos são constituintes químicos considerados como secundários ou acidentais da madeira, sendo considerados como compostos químicos que não fazem parte da estrutura da parede celular. Estes se caracterizam por serem solúveis em água ou em solventes orgânicos como o diclorometano, clorofórmio, etanol, tolueno, metanol etc. São compostos de baixo peso molecular, exceto os taninos e lignanas, e se apresentam em menor quantidade comparativamente aos demais componentes químicos orgânicos da madeira.

Apesar de sua pequena proporção considerando a madeira com um todo, é indesejável no processo de polpação, pois reduz o rendimento do processo. Por outro lado pode contribuir com o valor calórico da madeira, sendo assim benéfico quando o objetivo é a geração de energia (PHILIPP; D'ALMEIDA, 1988).

2.2.3 Teor em lignina

A lignina é um composto amorfo, tridimensional, de composição química bastante complexa, que se constitui de unidades de fenilpropano, tendo uma cadeia altamente ramificada. É o componente mais hidrofóbico da madeira, com função adesiva entre fibras, o que confere dureza e rigidez à parede celular (ROWELL, 2005, p. 487).

Está intimamente relacionada aos demais carboidratos, não apenas física, mas também quimicamente (BARRICHELO; BRITO, 1985). Atua como agente ligante entre as fibras (PETTERSEN, 1984, p.72), além de proporcionar maior resistência à parede celular.

É o componente químico mais interessante sob o ponto de vista energético, pois devido a sua complexidade e força de ligação entre seus elementos constituintes, é o composto termicamente mais resistente na madeira. Tal comportamento reflete diretamente sobre a produção e qualidade do carvão vegetal produzido. Espera-se um maior rendimento da carbonização e qualidade superior do carvão produzido quando se utiliza, para este fim, madeiras com maiores teores em lignina (BRITO; BARRICHELO, 1977)

Em contrapartida, madeiras com maior teor de lignina não são interessantes para o processo de polpação, pois a individualização das fibras se torna dificultosa uma vez que a lignina é o composto responsável pela ligação entre as mesmas.

2.2.4 Teor em minerais

Os minerais são os compostos com menor proporção na madeira, são geralmente formados por óxidos dentre outros, de cálcio, magnésio, fósforo, silício e potássio.

O teor em minerais na madeira na grande maioria das vezes varia entre 0,2 a 1% da massa seca, sendo rara a ocorrência fora deste intervalo (TSOUMIS, 1991, p. 494). A presença de alguns elementos como cálcio, fósforo e enxofre em elevadas dosagens pode prejudicar ou até mesmo limitar o uso de uma dada madeira para finalidades industriais (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996). Por exemplo, a utilização de carvão vegetal em autofornos siderúrgicos com altos teores de enxofre e fósforo pode comprometer significativamente a qualidade do ferro gusa produzido. A presença destes elementos na liga de ferro causa um fenômeno denominado segregação, ou seja, no local onde há uma maior concentração em fósforo e enxofre ocorre um incremento na rigidez da liga originando assim um local mais propenso a fissuras.

2.2.5 Composição química elementar

Sobre a composição química elementar da madeira, pode-se afirmar que a mesma não apresenta variações expressivas levando em consideração madeiras de espécies diferentes.

Dentre os componentes elementares o carbono, hidrogênio e o oxigênio são os de presença mais expressiva, apresentando em média 50, 6 e 43% respectivamente (BRITO; BARRICHELO, 1979). Por sua vez os elementos como o nitrogênio e enxofre aparecem em quantidades praticamente nulas, sendo em média 0,2 e 0,1%, respectivamente.

A determinação dos teores elementares (CHNS-O) é de grande importância na caracterização de um material com finalidade energética, uma vez que a energia liberada durante a combustão está diretamente correlacionada com os teores em carbono e hidrogênio, e inversamente com o teor em oxigênio.

Uma vantagem da utilização da biomassa, em relação aos demais combustíveis fósseis, é a não emissão de gases sulfurosos durante sua combustão, isso devido ao baixo teor de enxofre presente em materiais lenhosos. Gases desta natureza causam impactos ambientais como acidificação da água da chuva e aquecimento global (CUNHA et al., 1989).

2.2.6 Poder calorífico superior

A seleção de um material como fonte de energia deve basear-se, dentre outros, no poder calorífico superior do mesmo. O poder calorífico superior define-se como a máxima energia liberada na forma de calor durante a combustão de uma unidade em massa de qualquer material combustível, onde o calor latente do vapor de água é contabilizado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1983, p. 13).

Na madeira o poder calorífico superior está intimamente relacionado à sua composição elementar (DINIZ et al., 2004; VALE et al., 2000) e aos teores dos seus principais componentes químicos (lignina, holocelulose e minerais) (VALE et al., 2000).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A seguir foi apresentada uma descrição geral da área e das condições de estudo, a realização da avaliação não destrutiva, o preparo do material destinado a análise laboratorial, determinação das variáveis físicas e químicas da madeira e por fim análise estatística dos dados.

3.1 Material biológico

Neste estudo foram utilizadas madeiras de 49 clones de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* oriundos de teste clonal pertencente a AcelorMittal Bioenergia localizado em Martinho Campos, região Centro Oeste do Estado de Minas Gerais. A região de coleta localiza-se a 19°19'S e 45°14'O e apresenta temperatura média anual e precipitação anual acumulada de 22 °C e 1150 mm respectivamente. Dentre os materiais houve variação em espécie e idade como apresentado na Tabela 1. Como critério de seleção foi utilizado o incremento médio anual, onde foram avaliados de forma destrutiva e não destrutiva os 49 clones superiores neste critério.

Tabela 1 Relação dos clones utilizados com respectivas idades e espécie

| Idade (meses) | Espécie | Clone | Idade (meses) | Espécie | Clone |
|------------------|---------------------|-------|------------------|---------------------|-------|
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U032 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U026 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U057 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U028 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U059 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U030 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U091 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U034 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U095 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U058 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U101 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U060 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U103 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U063 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U139 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U073 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U142 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U083 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U221 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U102 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U251 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U108 |
| 42 | <i>E. urophylla</i> | U275 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U127 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G001 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U133 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G002 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U260 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G003 | 54 | <i>E. urophylla</i> | U271 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G005 | 54 | <i>E. grandis</i> | G006 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G012 | 54 | <i>E. grandis</i> | G008 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G085 | 54 | <i>E. grandis</i> | G022 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G088 | 54 | <i>E. grandis</i> | G023 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G113 | 54 | <i>E. grandis</i> | G084 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G116 | 54 | <i>E. grandis</i> | G094 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G120 | 54 | <i>E. grandis</i> | G114 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G125 | 54 | <i>E. grandis</i> | G118 |
| 42 | <i>E. grandis</i> | G129 | 54 | <i>E. grandis</i> | G122 |
| | | | 54 | <i>E. grandis</i> | G127 |

A área do teste clonal passou pelo processo de subsolagem e adubação base de 300 kg.ha⁻¹ de fosfato Gafsa, posteriormente recebeu adubação complementar (cobertura) de 170 Kg.ha⁻¹ de NPK 6/30/6, Zn (1%), Cu (0,7%) e B (1%).

3.2 Amostragem

A área experimental, de aproximadamente seis hectares, foi subdividida em cinco áreas idênticas, áreas estas não consideradas como blocos devido à proximidade entre as mesmas.

Em cada subdivisão foram implantados, em linha, dez indivíduos de cada clone, assim cada clone foi representado por 50 indivíduos, dez em cada subdivisão. A árvore com DAP mais próximo ao DAP médio, considerando os dez indivíduos de cada clone em cada subdivisão, foi selecionada para avaliação destrutiva e não destrutiva da madeira, isto foi repetido para cada uma das cinco subdivisões.

3.3 Avaliação não destrutiva

Em cada árvore foi determinado o diâmetro a aproximadamente 1,30 metros de altura do solo (DAP) e abertos painéis para realização da avaliação não destrutiva. Nos painéis foram realizadas leituras com dois aparelhos, o Pilodyn® e o Resistograph® como mostra a Figura 1.

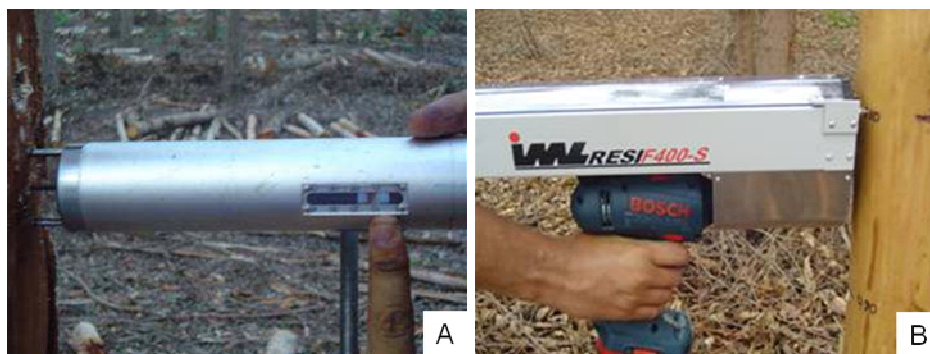


Figura 1 Aparelhos de avaliação não destrutiva, Pilodyn® (A) e o Resistograph® (B)

Utilizando o Pilodyn® foram feitas quatro leituras, duas na direção da linha de plantio e duas na direção perpendicular a linha de plantio. Já para o Resistograph® foram feitas apenas duas leituras, uma na direção da linha de plantio e a outra na direção perpendicular a linha de plantio. A Figura 2 mostra esquematicamente os pontos de atuação dos aparelhos de avaliação não destrutiva.

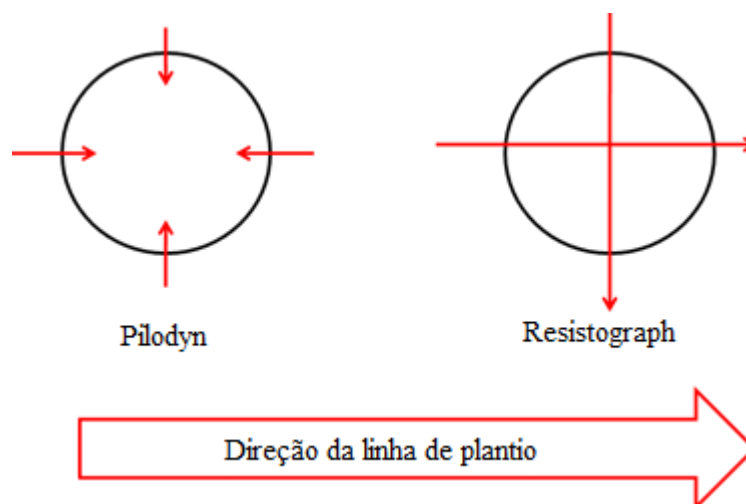


Figura 2 Pontos de aplicação dos aparelhos de avaliação não destrutiva

3.4 Amostragem longitudinal

Após a realização da avaliação não destrutiva, as árvores foram derrubadas e das quatro primeiras subdivisões foram retirados discos de aproximadamente 2,5 cm de espessura nas alturas relativas aos 2, 10, 30, 50 e 70% da altura comercial, considerada até o diâmetro de 5 cm, conforme amostragem proposta de Downes et al, (1997, p. 144), foi retirado também um disco extra na altura de 1,30 m de altura do solo (DAP). A Figura 3 ilustra a

forma da amostragem longitudinal das árvores pertencentes às quatro primeiras subdivisões.

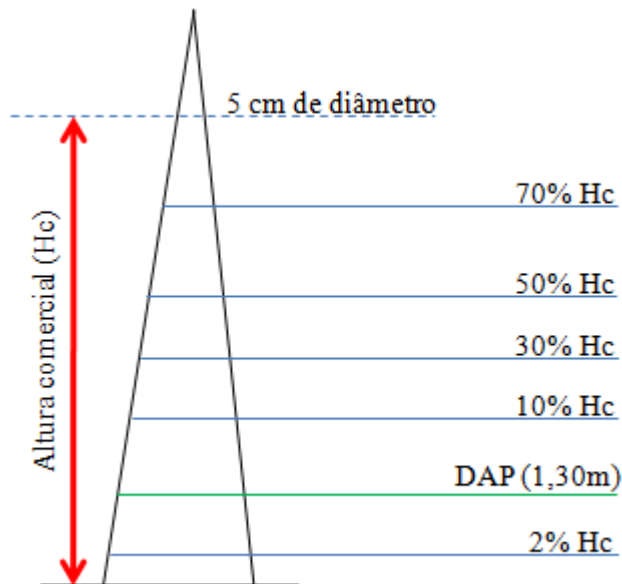


Figura 3 Esquema da amostragem longitudinal nas árvores pertencentes às quatro primeiras subdivisões (Hc: Altura comercial)

As árvores da quinta subdivisão foram amostradas diferentemente, ou seja, após a avaliação não destrutiva foram retirados discos de 2,5 cm de espessura na altura da base, DAP e a partir daí de metro em metro até a altura comercial do fuste. Esta amostragem diferenciada nos permite avaliar se amostragem adotada nas subdivisões de um a quatro foi eficiente.

3.5 Preparação do material para avaliação destrutiva

Os discos foram transportados ao Laboratório de Ciências e Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Lavras para análise destrutiva. Os discos foram seccionados em quatro cunhas passando pela medula. Duas cunhas

opostas foram utilizadas para determinação da densidade básica, as demais para análise química e energética como mostra a Figura 4.

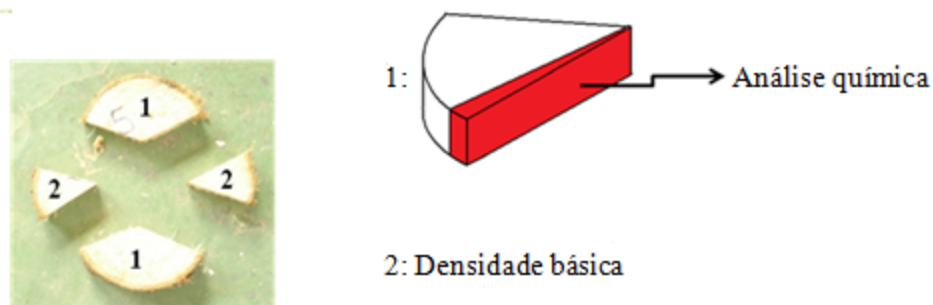


Figura 4 Subdivisão dos discos para análise destrutiva da madeira

Os materiais destinados a análise química e energética foram retirados das cunhas opostas de maiores dimensões com auxílio de uma plaina elétrica, as maravalhas obtidas foram moídas em moinho tipo Willey para redução dimensional das partículas. Estas por sua vez foram classificadas com auxílio de conjunto de peneiras, sendo que cada fração foi destinada a análises diferentes como mostra a Figura 5. As partículas devidamente classificadas foram acondicionadas em câmara climática a $60 \pm 5\%$ de Umidade Relativa e 20 ± 3 °C para estabilização da umidade base seca da serragem em torno de 12%.

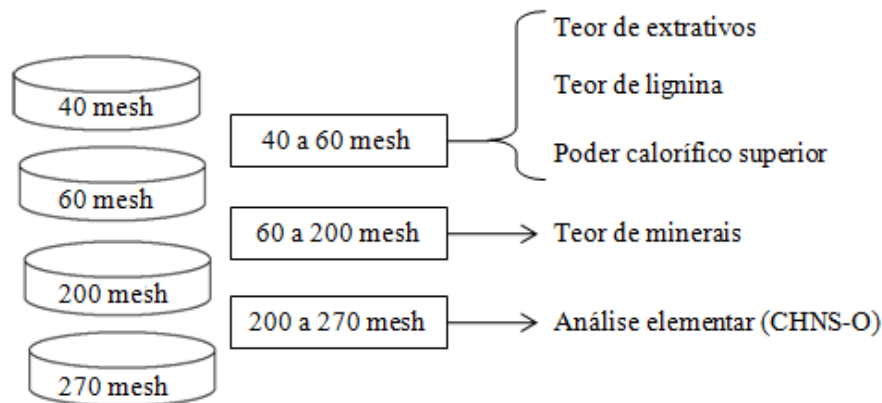


Figura 5 Classificação das partículas em função da granulometria

3.6 Determinação da densidade básica

A densidade básica da madeira foi determinada segundo a norma analítica NBR 11941 da Associação brasileira de normas técnicas - ABNT (2003). Foi obtida a densidade básica média da árvore como sendo a média aritmética das posições longitudinais de amostragem.

3.7 Análise química da madeira

Foram determinados os teores dos principais componentes químicos da madeira utilizando as normativas analíticas citadas a seguir.

3.7.1 Determinação dos teores em extrativos totais

O teor em extrativos totais foi determinado segundo a norma analítica da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP (1974), M 3/69.

3.7.2 Determinação dos teores em lignina

O teor de lignina insolúvel (Klason) foi determinado segundo o procedimento descrito por Gomide e Demuner (1986). O teor de lignina solúvel em ácido sulfúrico foi determinado por meio de espectrofotometria utilizando equação descrita por Goldschimid (1971, p. 57). O teor em lignina total é a resultante da soma das ligninas solúvel e insolúvel.

3.7.3 Determinação dos teores em minerais

O teor em minerais totais foi determinado segundo a norma analítica da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP (1974), M 11/77.

3.7.4 Determinação do teor de holocelulose

O teor de celulose foi obtido pela Equação 1, ou seja foi determinada por diferença entre os demais componentes químicos da madeira.

$$A = 100 - B - C - D \quad (1)$$

em que:

A = Teor de Holocelulose;

B = Teor de Lignina total;

C = Teor de Extrativos totais;

D = Teor de Minerais.

3.7.5 Determinação dos teores elementares

Foram utilizados dois miligramas de serragem com granulometria entre 200 e 270 mesh, as quais foram secas em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ e posteriormente acondicionadas em analisador elementar Vario Micro Cube. Desta forma, foram obtidos os teores em nitrogênio, carbono, hidrogênio, enxofre e, por diferença, o teor em oxigênio.

3.8 Determinação do poder calorífico superior e densidade energética da madeira

O poder calorífico foi determinado em calorímetro conforme a norma NBR 8633 da Associação brasileira de normas técnicas - ABNT (1983). Já a densidade energética foi obtida pela multiplicação entre o Poder calorífico superior e a densidade básica do material

3.9 Análise estatística

Na avaliação do experimento utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado com 24 e 25 tratamentos (clones), avaliados separadamente em função da idade, sendo representado cada tratamento por cinco indivíduos (repetições). Para comparação múltipla, devido ao grande número de tratamentos, utilizou-se o teste de média Scott-Knott aos 5% de probabilidade.

Foram realizadas também análises de regressão e dos desvios para avaliar as relações funcionais entre as análises não destrutivas e a densidade básica dos materiais. No intuito de aperfeiçoar as equações realizou-se também ajustes anulando a presença de outliers.

Análises de correlação foram realizadas no intuito de observar as inter-relações entre as propriedades avaliadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir foram abordados todos os resultados e suas respectivas discussões acerca do potencial de utilização das variáveis não destrutivas na inferência sobre a qualidade da madeira. Abordaram-se também os resultados oriundos da caracterização física, química e energética do material em questão.

4.1 Avaliação não destrutiva da madeira

A Tabela 2 apresenta os valores médios, máximos, mínimos e coeficiente de variação para a densidade básica média da árvore (DB MED), densidade básica a 1,30m do solo (DB DAP), Amplitude média registrada pelo Resistograph® (AMP) e penetração do pino do Pilodyn® (PIL) para as duas espécies consideradas, aos 42 e 54 meses de idade.

Tabela 2 Valores médios, máximo, mínimo e desvio padrão para DB MED, DB DAP, AMP e PIL para as duas espécies consideradas, ambas aos 42 e 54 meses de idade

| Idade | Espécie | Característica | Média | Máximo | Mínimo | CV (%) |
|----------|---------------------|-----------------------------|-------|--------|--------|--------|
| 42 meses | <i>E. grandis</i> | AMP (%) | 12,57 | 24,12 | 5,24 | 34,53 |
| | | PIL (mm) | 10,75 | 14,50 | 7,00 | 17,22 |
| | | DB MED (g/cm ³) | 0,489 | 0,585 | 0,412 | 7,95 |
| | | DB DAP (g/cm ³) | 0,482 | 0,609 | 0,407 | 8,47 |
| | <i>E. urophylla</i> | AMP (%) | 13,69 | 24,03 | 5,23 | 27,82 |
| | | PIL (mm) | 10,95 | 15,00 | 8,00 | 13,59 |
| | | DB MED (g/cm ³) | 0,541 | 0,616 | 0,458 | 5,73 |
| | | DB DAP (g/cm ³) | 0,520 | 0,604 | 0,429 | 7,65 |
| 54 meses | <i>E. grandis</i> | AMP (%) | 11,77 | 21,03 | 6,61 | 29,07 |
| | | PIL (mm) | 12,32 | 15,38 | 9,25 | 13,03 |
| | | DB MED (g/cm ³) | 0,510 | 0,634 | 0,408 | 8,27 |
| | | DB DAP (g/cm ³) | 0,503 | 0,617 | 0,426 | 9,27 |
| | <i>E. urophylla</i> | AMP (%) | 12,99 | 28,79 | 5,95 | 33,88 |
| | | PIL (mm) | 12,18 | 15,25 | 8,00 | 13,88 |
| | | DB MED (g/cm ³) | 0,561 | 0,664 | 0,480 | 8,83 |
| | | DB DAP (g/cm ³) | 0,540 | 0,649 | 0,454 | 9,48 |

DB MED: Densidade básica média; DB DAP: Densidade básica em 1,30m; AMP: Amplitude registrada pelo Resistograph®; PIL: Profundidade de penetração pelo pino do Pilodyn®; CV(%): Coeficiente de variação.

Os Gráficos 1, 2 e 3 apresentam a influência da idade sobre a DB MED, AMP e PIL respectivamente para as duas espécies. Observa-se um incremento em DB MED e AMP, e uma redução dos valores de PIL com o acréscimo em idade. Este resultado já era esperado, pois, com o incremento em idade há um incremento em densidade, este incremento em densidade correlaciona-se positivamente com a AMP e negativamente com PIL. Uma vez que quanto maior a densidade maior a resistência pela madeira à perfuração por uma broca e penetração por um pino, assim maior será a AMP registrada e menor a penetração pelo pino do Pilodyn®.

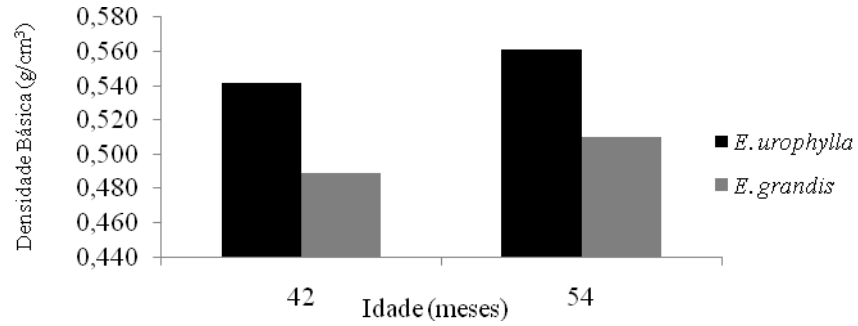


Gráfico 1 Influência da idade sobre a Densidade básica média

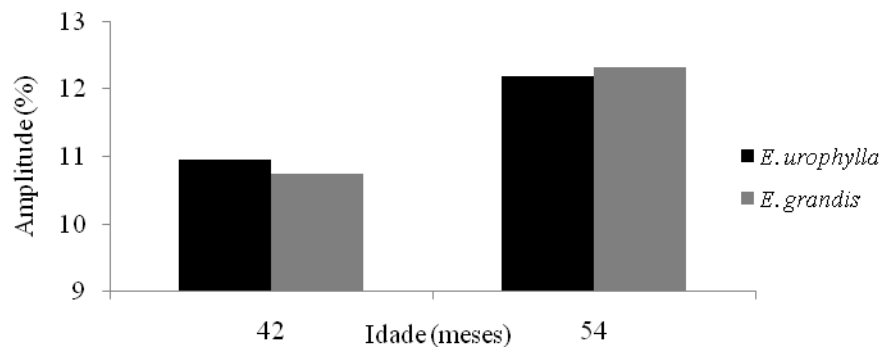


Gráfico 2 Influência da idade sobre a Amplitude

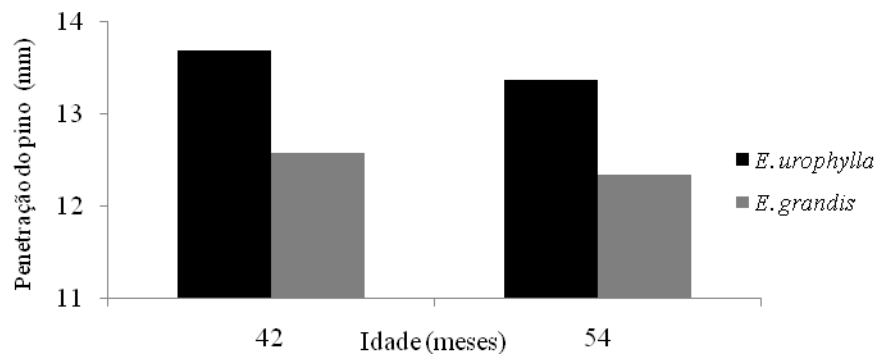


Gráfico 3 Influência da idade sobre a Penetração do pino do Pilodyn®

Ferreira et al. (1979) analisando a madeira de diferentes espécies de *Eucalyptus*, estas em diferentes idades, observaram valores médios em DB MED de 0,430 e 0,464 g/cm³ para *E. grandis* aos três e quatro anos de idade respectivamente. Já para *E. urophylla* aos sete anos o mesmo autor observou valores em torno de 0,516 g/cm³. Estes valores são consideravelmente inferiores aos encontrados neste trabalho, tal fato pode estar relacionado ao avanço das práticas de melhoramento genético, em pesquisas de nutrição vegetal, práticas silviculturais etc.

A Tabela 3 apresenta as correlações lineares de Pearson entre as variáveis não destrutivas com DB MED e DB DAP. Observam-se boas correlações entre a variável não destrutiva AMP com a densidade básica média e a densidade básica no DAP. Fracas correlações foram observadas entre PIL com DB MED e DB DAP, exceto para *E. grandis* aos 54 meses onde a correlação foi de magnitude compatível com a variável AMP, porém de sinal inverso.

Tabela 3 Correlações lineares de Pearson entre as variáveis destrutivas com DB MED e DB DAP

| Idade | Espécie | Correlações | | | | |
|----------|---------------------|-------------|------|--------|--------|-------|
| | | AMP | PIL | DB MED | DB DAP | |
| 42 meses | <i>E. grandis</i> | AMP | 1,00 | -0,12 | 0,73 | 0,65 |
| | | PIL | | 1,00 | 0,01 | -0,17 |
| | | DB MED | | | 1,00 | 0,74 |
| | | DB DAP | | | | 1,00 |
| | <i>E. urophylla</i> | AMP | 1,00 | -0,34 | 0,75 | 0,70 |
| | | PIL | | 1,00 | -0,32 | -0,35 |
| | | DB MED | | | 1,00 | 0,87 |
| | | DB DAP | | | | 1,00 |
| 54 meses | <i>E. grandis</i> | AMP | 1,00 | -0,54 | 0,55 | 0,63 |
| | | PIL | | 1,00 | -0,62 | -0,75 |
| | | DB MED | | | 1,00 | 0,83 |
| | | DB DAP | | | | 1,00 |
| | <i>E. urophylla</i> | AMP | 1,00 | -0,22 | 0,69 | 0,81 |
| | | PIL | | 1,00 | -0,34 | -0,22 |
| | | DB MED | | | 1,00 | 0,86 |
| | | DB DAP | | | | 1,00 |

DB MED: Densidade básica média; DB DAP: Densidade básica em 1,30m; AMP: Amplitude registrada pelo Resistograph®; PIL: Profundidade de penetração pelo pino do Pilodyn®.

Gonçalves (2006, p. 167) avaliando a eficácia dos aparelhos Pilodyn® e Resistograph® na determinação da densidade básica de um híbrido de *E. urograndis* aos 70 e 166 meses observou correlação entre a penetração do pino do Pilodyn® e densidade básica no DAP de -0,63. O mesmo autor não observou correlações entre a amplitude e a densidade básica considerando a mesma posição longitudinal. Lima et al. (2006) também avaliando a eficiência do Resistograph® na inferência sobre a densidade básica de *E. grandis* encontrou correlações variando de 0,70 a 0,81.

As Tabelas 4 e 5 apresentam as estatísticas inerentes aos ajustes entre os valores relativos a avaliação não destrutiva (PIL e AMP) e a variável física DB MED. Apresenta também a análise residual de cada ajuste (soma, desvio padrão, normalidade e homocedasticidade), para o *E. grandis* e *E. urophylla* nas duas idades consideradas. Pode-se observar que as relações funcionais obtidas apresentaram precisão variando de baixa à média entre DB MED e as variáveis não destrutivas. Estes resultados podem estar relacionados à baixa sensibilidade dos aparelhos de avaliação não destrutiva e à possibilidade de se obter dados gerados através de leituras não padronizadas.

Tabela 4 Estatísticas inerentes aos ajustes entre as variáveis de avaliação não destrutiva (PIL e AMP) e a variável física DB MED, juntamente com a análise residual de cada ajuste para *E. grandis* e *E. urophylla* aos 42 meses de idade

| Espécie | Modelos | Coeficientes | R ² | Fc | Resíduos | | | |
|---------------------|------------------|--------------|---------------------|------|-------------------|-------|--------------------|--------------------|
| | | | | | S _{xy} | W | GQ | |
| <i>E. grandis</i> | DB MED=f(PIL) | β_0 | 0,486* | 0,00 | 0,0 ^{ns} | 0,038 | 0,96 ^{ns} | 1,61 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,000 ^{ns} | | | | | |
| | DB MED=f(AMP) | β_0 | 0,407* | 0,53 | 65* | 0,027 | 0,98 ^{ns} | 2,14* |
| | | β_1 | 0,006* | | | | | |
| | DB MED=f(DB DAP) | β_0 | 0,149* | 0,55 | 70* | 0,026 | 0,96 ^{ns} | 1,94* |
| | | β_1 | 0,704* | | | | | |
| <i>E. urophylla</i> | DB MED=f(PIL) | β_0 | 0,613* | 0,10 | 6,4* | 0,029 | 0,97 ^{ns} | 0,74 ^{ns} |
| | | β_1 | -0,006* | | | | | |
| | DB MED=f(AMP) | β_0 | 0,457* | 0,57 | 75* | 0,020 | 0,95* | 1,48 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,005* | | | | | |
| | DB MED=f(DB DAP) | β_0 | 0,1874* | 0,76 | 185* | 0,015 | 0,99 ^{ns} | 1,54 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,6808* | | | | | |

DB MED: Densidade básica média; AMP: Amplitude registrada pelo Resistograph®; PIL: Profundidade de penetração do Pino do Pilodyn®, DB DAP: Densidade básica a 1,30m; β : coeficientes ajustados; R²: Coeficiente de determinação ajustado; Fc: Valor de F calculado; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; e^{ns}: Valor não significativo aos 95% de probabilidade; e*: Valor significativo aos 95% de probabilidade.

Pela Tabela 4 pode-se verificar que os clones aos 42 meses não apresentaram relação funcional satisfatória entre a penetração do pino do Pilodyn® com a DB MED. Mesmo o desvio padrão residual apresentando baixos valores e os testes de normalidade (W) e homocedasticidade (GQ) residual não apresentando significância estatística, não se recomenda utilizar esta variável na predição da DB MED. Por outro lado as relações funcionais encontradas entre a DB MED e a AMP já se mostraram mais precisas comparadas aos ajustes utilizando o PIL, tal resultado pode estar conexo ao fato de o Pilodyn® avaliar apenas as porções mais externas enquanto que o Resistograph® avalia toda a porção diametral do fuste.

Tabela 5 Estatísticas inerentes aos ajustes entre as variáveis avaliação não destrutiva (PIL e AMP) e a variável física DB MED, juntamente com a análise residual de cada ajuste para *E. grandis* e *E. urophylla* aos 54 meses de idade

| Espécie | Modelos | Coeficientes | R ² | Fc | Resíduos | | | |
|---------------------|------------------|--------------|----------------|------|-----------------|-------|--------------------|--------------------|
| | | | | | S _{xy} | W | GQ | |
| <i>E. grandis</i> | DB MED=f(PIL) | β_0 | 0,710* | 0,38 | 29* | 0,033 | 0,98 ^{ns} | 0,53 ^{ns} |
| | | β_1 | -0,016* | | | | | |
| | DB MED=f(AMP) | β_0 | 0,429* | 0,31 | 21* | 0,035 | 0,95* | 0,23 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,006* | | | | | |
| | DB MED=f(DB DAP) | β_0 | 0,133* | 0,68 | 104* | 0,024 | 0,98 ^{ns} | 0,59 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,748* | | | | | |
| <i>E. urophylla</i> | DB MED=f(PIL) | β_0 | 0,681* | 0,11 | 9,4* | 0,047 | 0,96* | 1,46 ^{ns} |
| | | β_1 | -0,009* | | | | | |
| | DB MED=f(AMP) | β_0 | 0,460* | 0,47 | 65* | 0,036 | 0,96* | 0,78 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,007* | | | | | |
| | DB MED=f(DB DAP) | β_0 | 0,111* | 0,74 | 206* | 0,025 | 0,95* | 1,41 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,832* | | | | | |

DB MED: Densidade básica média; AMP: Amplitude registrada pelo Resistograph®; PIL: Profundidade de penetração do Pino do Pilodyn®, DB DAP: Densidade básica a 1,30m; β : coeficientes ajustados; R²: Coeficiente de determinação ajustado; Fc: Valor de F calculado; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; e^{ns}: Valor não significativo aos 95% de probabilidade; e*: Valor significativo aos 95% de probabilidade.

Pela Tabela 5 pode-se observar que os clones aos 54 meses, diferentemente dos materiais aos 42 meses, apresentaram melhores relações funcionais entre a variável não destrutiva PIL com a DB MED. Tal resultado pode ser reflexo de uma estabilização da densidade nas porções mais próximas cambio em materiais de idade mais avançada, assim a densidade nesta região pode estar mais próxima a densidade média do fuste, favorecendo uma maior correlação entre a penetração do pino do Pilodyn® e a DB MED.

O coeficiente de determinação dos modelos ajustados utilizando a AMP para inferência da DB MED variou de 0,31 a 0,57, valores considerados baixo e

moderados respectivamente. Tal resultado pode estar relacionado à facilidade de se obter dados gerados por leituras não padronizadas (outliers), como por exemplo, leituras indicando a presença de nós na madeira ou que não passem sistematicamente pela medula, assim estas leituras não corresponderiam corretamente à densidade básica média do fuste.

No geral os ajustes utilizando DB DAP para inferência da DB MED apresentaram precisão variando de média a alta tanto para o *E. urophylla* como o *E. grandis* nas duas idades consideradas. Este resultado sugere que a DB DAP pode ser utilizada na inferência sobre a DB MED da árvore. Levando em consideração o alto custo de determinação da densidade básica utilizando a madeira de vários pontos ao longo do fuste, a determinação da densidade da madeira apenas em 1,30m acarreta uma economia em tempo e custo desta análise.

Com o objetivo de melhorar a qualidade dos ajustes novos testes foram realizados, porém, sem a presença de dados identificados como outliers. A Tabela 6 apresenta as correlações entre as variáveis avaliadas sem a presença de outliers para as duas espécies nas duas idades consideradas. Comparativamente a Tabela 3 nota-se uma melhoria dos valores de correlações entre as variáveis de avaliação não destrutiva e a densidade básica média e em 1,30m.

Tabela 6 Correlações entre as variáveis avaliadas sem a presença de outliers para as duas espécies nas duas idades consideradas

| Idade | Espécie | Correlações | | | | |
|----------|---------------------|-------------|------|--------|--------|-------|
| | | AMP | PIL | DB MED | DB DAP | |
| 42 meses | <i>E. grandis</i> | AMP | 1,00 | -0,08 | 0,82 | 0,73 |
| | | PIL | | 1,00 | 0,01 | -0,17 |
| | | DB MED | | | 1,00 | 0,86 |
| | | DB DAP | | | | 1,00 |
| | <i>E. Urophylla</i> | AMP | 1,00 | -0,51 | 0,82 | 0,72 |
| | | PIL | | 1,00 | -0,63 | -0,66 |
| | | DB MED | | | 1,00 | 0,87 |
| | | DB DAP | | | | 1,00 |
| 54 meses | <i>E. grandis</i> | AMP | 1,00 | -0,60 | 0,73 | 0,75 |
| | | PIL | | 1,00 | -0,62 | -0,74 |
| | | DB MED | | | 1,00 | 0,85 |
| | | DB DAP | | | | 1,00 |
| | <i>E. Urophylla</i> | AMP | 1,00 | -0,30 | 0,79 | 0,84 |
| | | PIL | | 1,00 | -0,57 | -0,45 |
| | | DB MED | | | 1,00 | 0,91 |
| | | DB DAP | | | | 1,00 |

DB MED: Densidade básica média; DB DAP: Densidade básica em 1,30m; AMP: Amplitude registrada pelo Resistograph®; PIL: Profundidade de penetração pelo pino do Pilodyn®.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os novos ajustes entre as variáveis não destrutivas e a densidade básica média, para os clones aos 42 e 54 meses de idade respectivamente, apresenta também a estatística inerente aos resíduos gerados pelos mesmos.

Comparativamente às equações anteriores, verifica-se uma pequena melhora nos ajustes, ou seja, uma elevação dos coeficientes de determinação e redução do desvio padrão residual, inferindo assim em uma melhoria na precisão dos ajustes. Observa-se também a não significância dos testes de normalidade

(W) e homocedasticidade (GQ) residual, antes significativa em alguns dos modelos ajustados.

Tabela 7 Estatísticas inerentes aos ajustes entre as variáveis de avaliação não destrutiva (PIL e AMP) e a variável física DB MED, juntamente com a análise residual de cada ajuste para *E. grandis* e *E. urophylla* aos 42 meses de idade. Ajustes estes sem a presença de outliers

| Esp. | Modelos | Coeficientes | R ² | Fc | Resíduos | | | O. | |
|---------------------|------------------|--------------|---------------------|------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|---|
| | | | | | S _{xy} | W | GQ | | |
| <i>E. grandis</i> | DB MED=f(PIL) | β_0 | 0,486* | 0,00 | 0,0 ^{ns} | 0,038 | 0,9 ^{ns} | 1,6 ^{ns} | 0 |
| | | β_1 | 0,000 ^{ns} | | | | | | |
| | DB MED=f(AMP) | β_0 | 0,404* | 0,67 | 104* | 0,021 | 0,9 ^{ns} | 1,0 ^{ns} | 5 |
| | | β_1 | 0,006* | | | | | | |
| | DB MED=f(DB DAP) | β_0 | 0,086* | 0,74 | 151* | 0,020 | 0,9 ^{ns} | 0,9 ^{ns} | 3 |
| | | β_1 | 0,835* | | | | | | |
| <i>E. urophylla</i> | DB MED=f(PIL) | β_0 | 0,657* | 0,39 | 30* | 0,017 | 0,9 ^{ns} | 2,3* | 4 |
| | | β_1 | -0,01* | | | | | | |
| | DB MED=f(AMP) | β_0 | 0,448* | 0,67 | 112* | 0,018 | 0,9* | 0,6 ^{ns} | 4 |
| | | β_1 | 0,006* | | | | | | |
| | DB MED=f(DB DAP) | β_0 | 0,187* | 0,76 | 185* | 0,015 | 0,9 ^{ns} | 0,8 ^{ns} | 0 |
| | | β_1 | 0,680* | | | | | | |

Esp.: Espécie; DB MED: Densidade básica média; AMP: Amplitude registrada pelo Resistograph®; PIL: Profundidade de penetração do Pino do Pilodyn®, DB DAP: Densidade básica em 1,30m; β : coeficientes ajustados; R²: Coeficiente de determinação ajustado; Fc: Valor de F calculado; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; O.: número de outliers; e^{ns}: Valor não significativo aos 95% de probabilidade; e*: Valor significativo aos 95% de probabilidade.

Tabela 8 Estatísticas inerentes aos ajustes entre as variáveis de avaliação não destrutiva (PIL e AMP) e a variável física DB MED, juntamente com a análise residual de cada ajuste para *E. grandis* e *E. urophylla* aos 54 meses de idade. Ajustes estes sem a presença de outliers

| Esp. | Modelos | Coeficientes | R ² | Fc | Resíduos | | | O. | |
|---------------------|------------------|--------------|----------------|------|-----------------|-------|-------------------|-------------------|---|
| | | | | | S _{xy} | W | GQ | | |
| <i>E. grandis</i> | DB MED=f(PIL) | β_0 | 0,675* | 0,39 | 26* | 0,027 | 0,9 ^{ns} | 1,4 ^{ns} | 2 |
| | | β_1 | -0,013* | | | | | | |
| | DB MED=f(AMP) | β_0 | 0,419* | 0,54 | 47* | 0,024 | 0,9 ^{ns} | 0,7 ^{ns} | 5 |
| | | β_1 | 0,007* | | | | | | |
| | DB MED=f(DB DAP) | β_0 | 0,139* | 0,72 | 116* | 0,020 | 0,9 ^{ns} | 1,4 ^{ns} | 2 |
| | | β_1 | 0,737* | | | | | | |
| <i>E. urophylla</i> | DB MED=f(PIL) | β_0 | 0,743* | 0,32 | 31* | 0,037 | 0,9* | 2,0* | 4 |
| | | β_1 | -0,015* | | | | | | |
| | DB MED=f(AMP) | β_0 | 0,441* | 0,62 | 109* | 0,029 | 0,9 ^{ns} | 1,8* | 5 |
| | | β_1 | 0,008* | | | | | | |
| | DB MED=f(DB DAP) | β_0 | 0,095* | 0,82 | 325* | 0,020 | 0,9 ^{ns} | 1,7 ^{ns} | 3 |
| | | β_1 | 0,859* | | | | | | |

Esp.: Espécie; DB MED: Densidade básica média; AMP: Amplitude registrada pelo Resistograph®; PIL: Profundidade de penetração do Pino do Pilodyn®, DB DAP: Densidade básica em 1,30m; β : coeficientes ajustados; R²: Coeficiente de determinação ajustado; Fc: Valor de F calculado; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; O.: número de outliers; e^{ns}: Valor não significativo aos 95% de probabilidade; e*: Valor significativo aos 95% de probabilidade.

Rosado et al. (1983) e Gonçalves (2006) observaram correlações negativas e moderadas entre a penetração do pino do Pilodyn® e a densidade básica do material. Em contrapartida Raymond e MacDonald (1998) encontraram fortes correlações entre as variáveis em questão.

Devido à avaliação de porções mais externas do fuste o Pilodyn ® é criticado por vários autores, isto se deve devido ao fato de a densidade básica da madeira próxima ao cambio, em indivíduos com menor idade, não representar

bem a densidade básica média do indivíduo, porém devido a sua praticidade de aplicação pode ser utilizado para uma classificação prévia materiais em uma população contendo diferentes materiais genéticos.

Rinn, Schweingruber e Schar (1996) avaliando a madeira de diferentes espécies e Lima et al. (2006) trabalhando com madeira de *Eucalyptus*, observaram altos valores de correlação entre a amplitude (Resistograph®) e a densidade básica do material avaliado.

Os Gráficos 4 a 7 representam a relação entre as variáveis não destrutivas com a DB MED, juntamente com a curva média ajustada para *E. grandis* e *E. urophylla* aos 42 meses de idade, ajustes estes desconsiderando os outliers. Os Gráficos 8 e 9 mostram a relação entre a DB DAP com a DB MED.

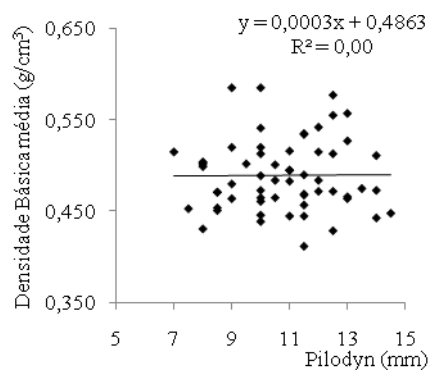


Gráfico 4 Relação entre DB MED e PIL para *E. grandis* aos 42 meses de idade

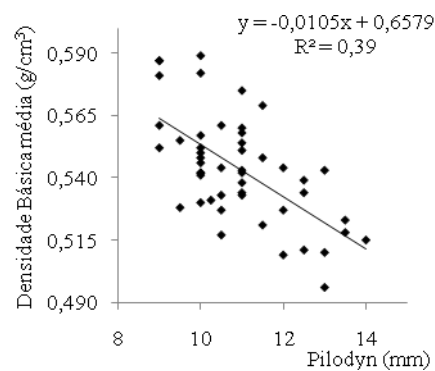


Gráfico 5 Relação entre DB MED e PIL para *E. urophylla* aos 42 meses de idade

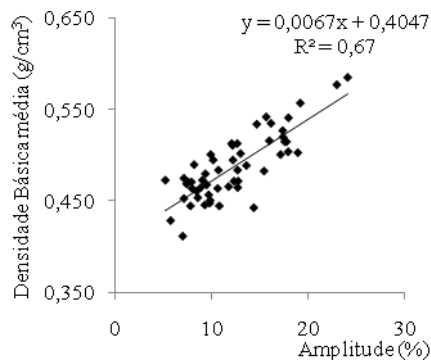


Gráfico 6 Relação entre DB MED e AMP para *E. grandis* aos 42 meses de idade

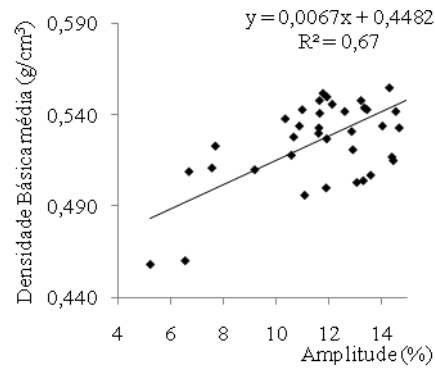


Gráfico 7 Relação entre DB MED e AMP para *E. urophylla* aos 42 meses de idade

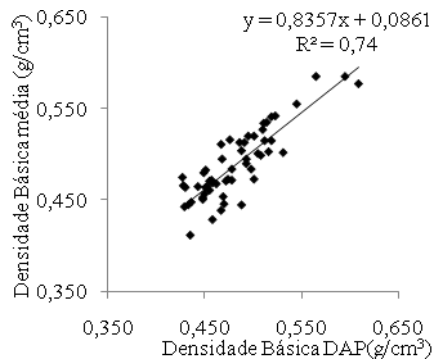


Gráfico 8 Relação entre DB MED e DB DAP para *E. grandis* aos 42 meses de idade

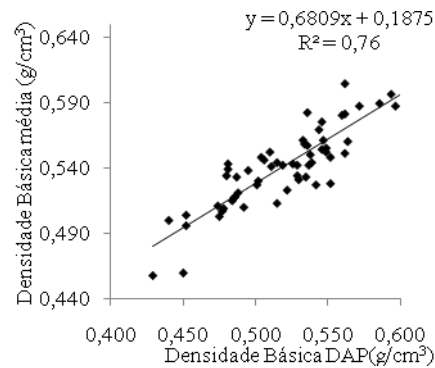


Gráfico 9 Relação entre DB MED e DB DAP para *E. urophylla* aos 42 meses de idade

Os Gráficos 10 a 14 representam a relação entre as variáveis não destrutivas com a DB MED, juntamente com a curva média ajustada para *E. grandis* e *E. urophylla* aos 54 meses de idade, ajustes estes desconsiderando os outliers. Os Gráficos 15 a 16 mostram a relação entre a DB DAP com a DB MED.

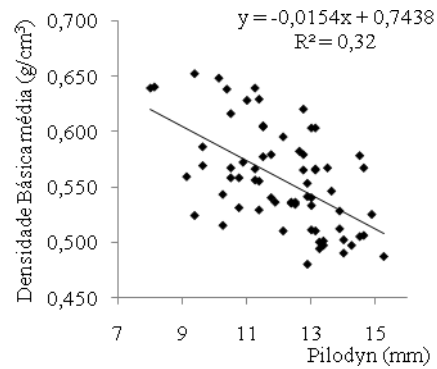
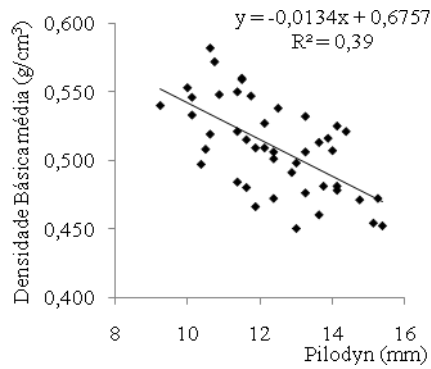


Gráfico 10 Relação entre DB MED e PIL para *E. grandis* aos 54 meses de idade

Gráfico 11 Relação entre DB MED e PIL para *E. urophylla* aos 54 meses de idade

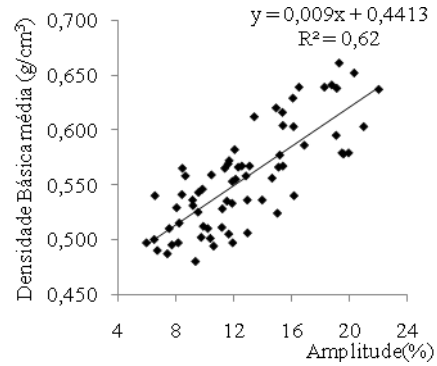
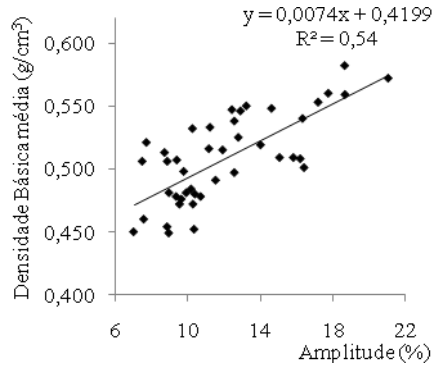


Gráfico 12 Relação entre DB MED e AMP para *E. grandis* aos 54 meses de idade

Gráfico 13 Relação entre DB MED e AMP para *E. urophylla* aos 54 meses de idade

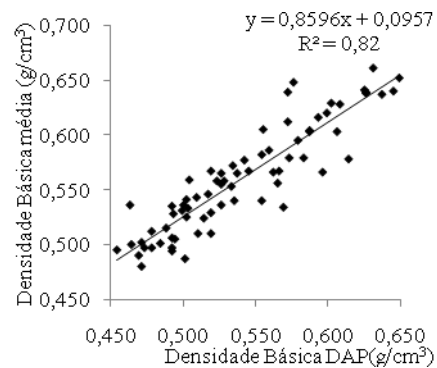
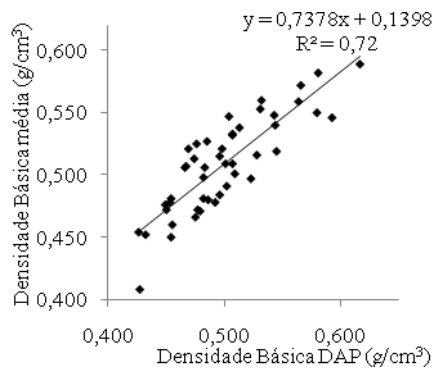


Gráfico 14 Relação entre DB MED e DB DAP para *E. grandis* aos 54 meses de idade

Gráfico 15 Relação entre DB MED e DB DAP para *E. urophylla* aos 54 meses de idade

Como discutido anteriormente, os ajustes entre AMP e DB MED apresentou baixa precisão, entretanto relacionando apenas parte da leitura coletada pelo Resistograph® com a DB MED observa-se uma relativa melhora na precisão dos ajustes.

As Tabelas 9 e 10 apresentam os ajustes entre a DB MED e AMP em sete diferentes profundidades de penetração da broca do Resistograph®, isto para os clones aos 42 e 54 meses de idade, respectivamente, além da estatística relativa aos ajustes e aos resíduos gerados pelos mesmos.

Tabela 9 Estatísticas inerentes aos ajustes entre a amplitude média registrada em diferentes profundidades de penetração pela broca do Resistograph® e DB MED, juntamente com a análise residual dos mesmos para *E. grandis* e *E. urophylla* aos 42 meses de idade

| Espécie | Pr. (cm) | Coeficientes | | Valor t | R ² aj | Fc | Resíduos | | |
|---------------------|-------------|--------------|-----------|------------|----------------------|------|-----------------|--------------------|-------------------|
| | | β_0 | β_1 | | | | S _{xy} | W | GQ |
| <i>E. grandis</i> | 1 | β_0 | 0,407 | 18* | 0,19 | 14* | 0,035 | 0,96 ^{ns} | 2,2* |
| | | β_1 | 0,021 | 3,8* | | | | | |
| | 2 | β_0 | 0,403 | 34* | 0,50 | 58* | 0,027 | 0,97 ^{ns} | 2,0* |
| | | β_1 | 0,016 | 7,6* | | | | | |
| | 3 | β_0 | 0,405 | 44* | 0,63 | 99* | 0,024 | 0,96 ^{ns} | 1,0* |
| | | β_1 | 0,013 | 9,9* | | | | | |
| | 4 | β_0 | 0,401 | 45* | 0,67 | 113* | 0,023 | 0,96 ^{ns} | 0,9 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,013 | 10* | | | | | |
| | 5 | β_0 | 0,407 | 45* | 0,62 | 93* | 0,023 | 0,97 ^{ns} | 1,1* |
| | | β_1 | 0,011 | 9,6* | | | | | |
| | 6 | β_0 | 0,405 | 43* | 0,63 | 95* | 0,024 | 0,98 ^{ns} | 2,1* |
| | | β_1 | 0,011 | 9,7* | | | | | |
| | 7 | β_0 | 0,403 | 44* | 0,65 | 107* | 0,023 | 0,97 ^{ns} | 1,7 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,010 | 10* | | | | | |
| <i>E. urophylla</i> | 1 | β_0 | 0,493 | 39* | 0,22 | 16* | 0,023 | 0,97 ^{ns} | 0,7 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,010 | 4,1* | | | | | |
| | 2 | β_0 | 0,480 | 57* | 0,52 | 62* | 0,018 | 0,98 ^{ns} | 1,1 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,009 | 7,8* | | | | | |
| | 3 | β_0 | 0,468 | 67* | 0,70 | 129* | 0,014 | 0,98 ^{ns} | 1,7 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,009 | 11* | | | | | |
| | 4 | β_0 | 0,465 | 65* | 0,70 | 129* | 0,014 | 0,96 ^{ns} | 1,1 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,009 | 11* | | | | | |
| | 5 | β_0 | 0,467 | 61* | 0,66 | 108* | 0,015 | 0,97 ^{ns} | 1,4 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,008 | 10* | | | | | |
| | 6 | β_0 | 0,466 | 60* | 0,66 | 107* | 0,015 | 0,98 ^{ns} | 1,4 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,008 | 10* | | | | | |
| | 7 | β_0 | 0,468 | 56* | 0,61 | 87* | 0,016 | 0,98 ^{ns} | 1,1 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,007 | 9,3* | | | | | |

Pr.: Profundidade; β : coeficientes ajustados; R²aj: Coeficiente de determinação ajustado; Fc: Valor de F calculado; Soma: Soma dos desvios; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; e^{ns}: Valor não significativo a 95% de probabilidade; e*: Valor significativo a 95% de probabilidade.

Tabela 10 Estatísticas inerentes aos ajustes entre a amplitude registrada em diferentes profundidades de penetração pela broca do Resistograph® e DB MED, juntamente com a análise residual de cada ajuste para *E. grandis* e *E. urophylla* aos 54 meses de idade

| Espécie | Pr. (cm) | Coeficientes | | Valor t | R ² aj | Fc | S _{xy} | Resíduos | |
|---------------------|-----------|--------------|-----------|---------|-------------------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | β_0 | β_1 | | | | | W | GQ |
| <i>E. grandis</i> | 1 | β_0 | 0,4676 | 25* | 0,09 | 5,2* | 0,033 | 0,95 ^{ns} | 0,84 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,0070 | 2* | | | | | |
| | 2 | β_0 | 0,4469 | 30* | 0,29 | 19,6* | 0,029 | 0,95* | 0,57 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,0093 | 4* | | | | | |
| | 3 | β_0 | 0,4404 | 32* | 0,36 | 26,5* | 0,027 | 0,96 ^{ns} | 0,38 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,0097 | 5* | | | | | |
| | 4 | β_0 | 0,4262 | 35* | 0,54 | 51,9* | 0,024 | 0,94* | 0,36 ^{ns} |
| β_1 | | 0,0118 | 7* | | | | | | |
| 5 | β_0 | 0,4328 | 35* | 0,47 | 41,0* | 0,025 | 0,97 ^{ns} | 0,33 ^{ns} | |
| | β_1 | 0,0105 | 6* | | | | | | |
| 6 | β_0 | 0,4308 | 34* | 0,48 | 42,2* | 0,025 | 0,97 ^{ns} | 0,34 ^{ns} | |
| | β_1 | 0,0103 | 6* | | | | | | |
| 7 | β_0 | 0,4305 | 30* | 0,47 | 40,5* | 0,025 | 0,96 ^{ns} | 0,34 ^{ns} | |
| | β_1 | 0,0098 | 40* | | | | | | |
| <i>E. urophylla</i> | 1 | β_0 | 0,4557 | 27* | 0,37 | 42,9* | 0,038 | 0,99 ^{ns} | 0,83 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,0187 | 6* | | | | | |
| | 2 | β_0 | 0,4487 | 38* | 0,58 | 98,5* | 0,031 | 0,98 ^{ns} | 0,88 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,0155 | 9* | | | | | |
| | 3 | β_0 | 0,4433 | 44* | 0,68 | 146,7* | 0,027 | 0,97 ^{ns} | 0,74 ^{ns} |
| | | β_1 | 0,0146 | 12* | | | | | |
| | 4 | β_0 | 0,4419 | 46* | 0,70 | 164,7* | 0,026 | 0,97 ^{ns} | 0,66 ^{ns} |
| β_1 | | 0,0138 | 12* | | | | | | |
| 5 | β_0 | 0,4427 | 46* | 0,70 | 167,1* | 0,026 | 0,97 ^{ns} | 0,62 ^{ns} | |
| | β_1 | 0,0132 | 12* | | | | | | |
| 6 | β_0 | 0,4442 | 46* | 0,70 | 160,7* | 0,026 | 0,97 ^{ns} | 0,60 ^{ns} | |
| | β_1 | 0,0127 | 12* | | | | | | |
| 7 | β_0 | 0,4457 | 45* | 0,68 | 146,9* | 0,027 | 0,97 ^{ns} | 0,58 ^{ns} | |
| | β_1 | 0,0122 | 12* | | | | | | |

Pr.: Profundidade; β : coeficientes ajustados; R²aj: Coeficiente de determinação ajustado; Fc: Valor de F calculado; Soma: Soma dos desvios; S_{xy}: Desvio padrão residual; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; e^{ns}: Valor não significativo a 95% de probabilidade; e*: Valor significativo a 95% de probabilidade.

Nota-se na Tabela 9 que houve uma maior precisão dos ajustes entre a DB MED e a AMP registrada nos quatro primeiros centímetros de perfuração. Comparado aos ajustes utilizando toda a leitura registrada pelo Resistograph® o coeficiente de determinação passou de 0,53 a 0,66 para *E. grandis* e 0,57 a 0,70 no *E. urophylla*, ambos aos 42 meses de idade. O alto coeficiente de determinação, significância dos coeficientes do modelo e não significância dos testes de normalidade e heterocedasticidade indicam que os ajustes se adéquam para inferência sobre a DB MED utilizando apenas parte da leitura registrada pelo Resistograph®. Resultado semelhante foi também observado para o material aos 54 meses de idade (Tabela 10).

Em teoria o perfil da AMP na seção diametral de um fuste deveria ser semelhante ao padrão de variação diametral da densidade, sendo maior próximo a casca e menor próximo à medula, porém Lima et al. (2007) em estudos relacionando a DB MED com AMP, afirmaram que tal comportamento não ocorre na maioria das vezes, o autor relata que há um padrão crescente de AMP com a profundidade de penetração. Os Gráficos 16 e 17 apresentam um exemplo de um perfil diametral de AMP esperado (16) e um que ocorreu em maior frequência neste estudo (17), este último perfil ilustra o comportamento descrito por Lima et al. (2007). Outro ponto a ser levado em consideração é a dificuldade de broca passar precisamente pela medula, este fator também pode afetar o valor da AMP e conseqüentemente influencia negativamente os ajustes.

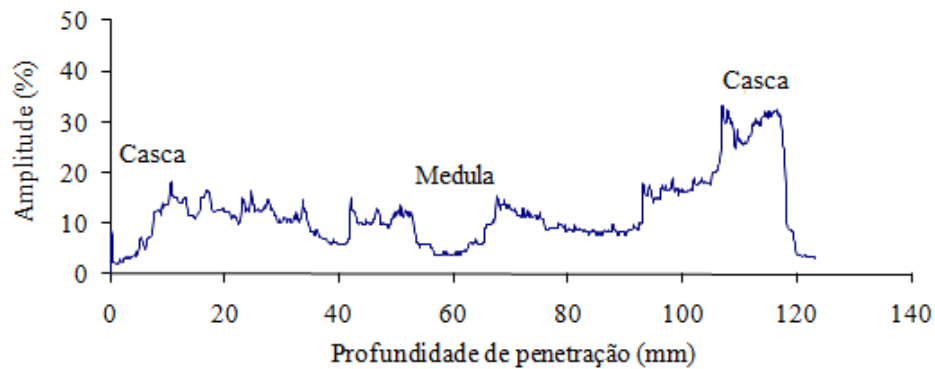


Gráfico 16 Exemplos de padrão diametral da amplitude esperado

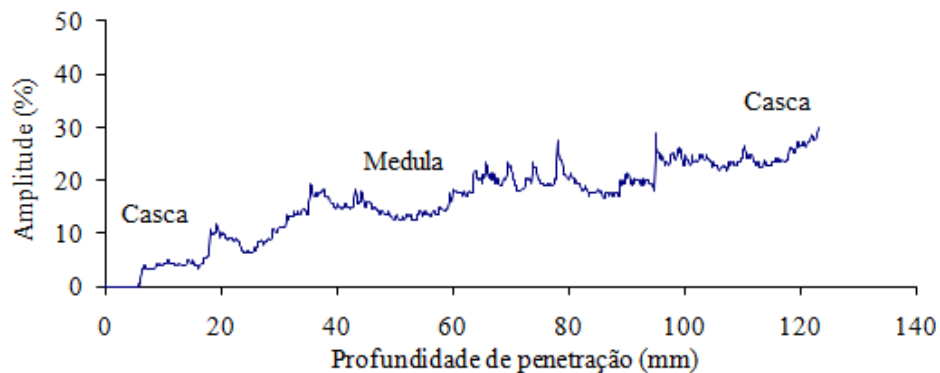


Gráfico 17 Exemplos de padrão diametral da amplitude frequentemente observado

O padrão crescente de AMP, que normalmente ocorre, pode estar relacionado a um maior atrito gerado entre a broca e a madeira durante perfuração, causando assim uma maior resistência a penetração da broca e até mesmo devido a presença de extrativos da madeira, como gomas, resinas e mucilagens, que podem aumentar o atrito da broca com o material.

O inesperado comportamento diametral da AMP, possivelmente causado pelo atrito entre a madeira e a broca durante a perfuração, pode afetar negativamente a sua relação com a DB MED. Assim, em menores profundidades

de leitura, onde o atrito é menor, pode haver uma melhor relação entre a DB MED a AMP.

Pode-se observar que a precisão dos modelos ajustados entre a AMP em diferentes profundidades e a DB MED variou muito, os modelos ajustados com a AMP registrada nos dois primeiros centímetros apresentaram baixa precisão, porém ao observar os ajustes com AMP registrada em profundidades próximas aos quatro centímetros nota-se um significativo aumento, tal resultado pode ser devido a densidade nos quatro primeiros centímetros de profundidade ser próxima à densidade média do fuste.

4.2 Comparação entre os métodos amostrais

Os Gráficos 18, 19, 20 e 21 apresentam as correlações entre a DB MED observada entre os indivíduos da repetição 5 (discos retirados de metro em metro) e os indivíduos das repetições 1, 2, 3 e respectivamente (amostragem proposta por Downes et al. (1997, p. 144)).

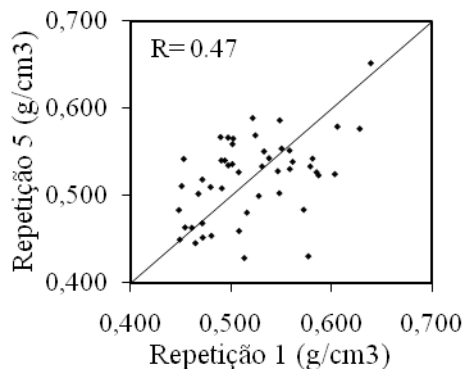


Gráfico 18 Corelação entre a DB MED da repetição 5 (metro a metro) e a DB MED da repetição 1

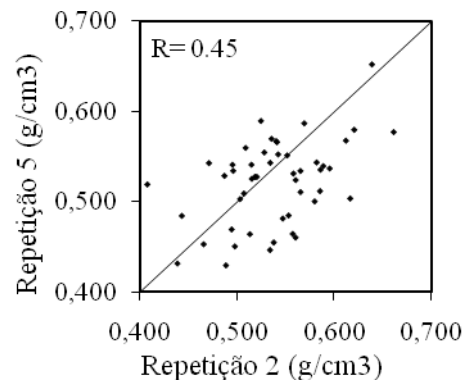


Gráfico 19 Corelação entre a DB MED da repetição 5 (metro a metro) e a DB MED da repetição 2

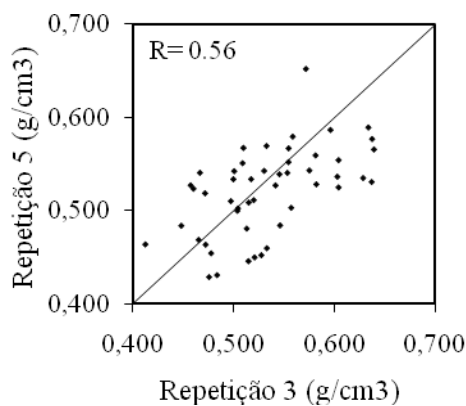


Gráfico 20 Corelação entre a DB MED da repetição 5 (metro a metro) e a DB MED da repetição 3

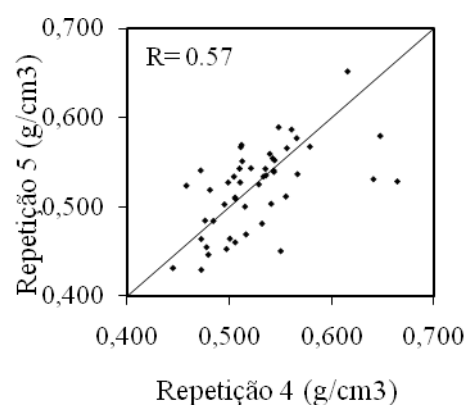


Gráfico 21 Corelação entre a DB MED da repetição 5 (metro a metro) e a DB MED da repetição 4

Pode-se observar que não houve fortes correlações entre a DB MED da repetição cinco com a DB MED das repetições um a quatro. Observa-se também que o comportamento não foi semelhante à linha diagonal, considerada esta como comportamento ideal, tal comportamento sugere que amostragem proposta por Downes et al. (1997, p. 144) não corresponde perfeitamente com uma amostragem mais acurada como a de metro a metro. Outro fator a ser considerado é a diferença entre os locais de plantio, estes apesar de próximos,

podem oferecer diferenças quanto às propriedades químicas, físicas e mecânicas do solo. Existe ainda a variação dentro dos materiais genéticos que pode também contribuir para este resultado.

Pádua (2009, p. 99) avaliando diferentes métodos de amostragem encontrou fortes correlações entre DB MED determinada com a amostragem de metro a metro e a amostragem proposta por Downes (1997, p. 144). A autora afirmou também que a amostragem convencional (0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial) tende a superestimar os valores em densidade, indicando assim a utilização da amostragem de 2, 10, 30, 50 e 70% da altura comercial.

4.3 Caracterização química e densidade básica da madeira

A Tabela 11 apresenta o resumo da análise de variância para as características químicas e densidade básica da madeira dos clones aos 42 e 54 meses de idade. A análise de variância mostrou haver efeito significativo de clone, em nível de 5% de probabilidade, para a densidade básica média (DB MED), teor de extrativos (EXT), lignina total (LIG TOT) e teor de minerais (CIN), para as duas idades consideradas. Pode-se observar também que o coeficiente de variação experimental foi baixo para a densidade básica média e teor de lignina total, sendo mais elevado para o teor de extrativos e minerais na madeira. Tal resultado já era esperado devido ao grande número e variabilidade de materiais genéticos avaliados.

Tabela 11 Resumo da análise de variância para as características químicas e densidade básica da madeira dos clones aos 42 e 54 meses de idade

| Idade (meses) | FV | GL | QM | | | | |
|------------------|-------|-----|--------|--------|---------|--------|---------|
| | | | DB MED | EXT | LIG TOT | CIN | HOLO |
| 42 | Clone | 23 | 0,005* | 5,329* | 18,086* | 0,009* | 17,561* |
| | Erro | 96 | 0,00 | 1,03 | 1,63 | 0,00 | 2,826 |
| | CV(%) | | 6,58 | 23,73 | 4,16 | 20,36 | 2,60 |
| 54 | Clone | 24 | 0,007* | 2,546* | 14,076* | 0,006* | 19,882* |
| | Erro | 100 | 0,00 | 0,75 | 1,67 | 0,00 | 2,99 |
| | CV(%) | | 7,36 | 18,82 | 4,60 | 13,02 | 2,58 |

FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; DB MED: Densidade básica média; EXT: Teor de extrativos totais; LIG TOT; Teor de lignina total; CIN: Teor de Minerais; CV(%): Coeficiente de variação experimental; e*: Valor significativo em nível de 95% de probabilidade.

As Tabelas 12 e 14 apresentam a classificação dos clones segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott aos 5% de probabilidade para as características químicas e densidade básica dos clones aos 42 e 54 meses de idade respectivamente. Pode-se observar uma grande variabilidade das propriedades analisadas entre os materiais genéticos. A caracterização química e física da madeira é importante para inferência sobre a melhor forma de utilização da mesma, isto é devido à influência dessas propriedades sobre o processo produtivo e a qualidade final do produto gerado.

Tabela 12 Classificação segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott aos 5% de probabilidade para as características químicas e densidade básica da madeira dos clones aos 42 meses de idade

| Clone | DB MED | EXT | LIG TOT | CIN | HOLO |
|--------|-------------------|-------------|---------|--------|---------|
| | g/cm ³ | -----%----- | | | |
| U059 | 0,572 A | 4,98 A | 30,96 C | 0,23 A | 63,81 B |
| U221 | 0,555 A | 3,84 B | 28,00 D | 0,25 B | 67,89 C |
| U275 | 0,555 A | 5,36 A | 30,70 C | 0,17 A | 63,76 B |
| U101 | 0,553 A | 5,58 A | 28,22 D | 0,18 A | 66,00 C |
| U142 | 0,551 A | 3,34 B | 31,12 C | 0,24 A | 65,30 C |
| U095 | 0,550 A | 4,02 B | 29,26 D | 0,22 A | 66,48 C |
| U032 | 0,539 A | 6,44 A | 30,14 D | 0,19 A | 63,21 B |
| U057 | 0,531 A | 5,48 A | 28,32 D | 0,22 A | 65,97 C |
| U139 | 0,525 A | 4,26 B | 28,47 D | 0,24 A | 67,01 C |
| G129 | 0,524 A | 5,50 A | 32,85 B | 0,22 A | 61,40 A |
| U103 | 0,522 A | 4,29 B | 35,12 A | 0,32 B | 60,26 A |
| U251 | 0,521 A | 5,84 A | 28,88 D | 0,28 B | 64,98 C |
| G085 | 0,517 A | 3,49 B | 31,73 C | 0,25 B | 64,51 B |
| U091 | 0,517 A | 5,19 A | 29,56 D | 0,18 A | 65,06 C |
| G116 | 0,500 B | 4,01 B | 33,24 B | 0,27 B | 62,46 A |
| G005 | 0,496 B | 3,35 B | 31,88 C | 0,33 B | 64,42 B |
| G125 | 0,494 B | 3,21 B | 28,85 D | 0,21 A | 67,72 C |
| G003 | 0,488 B | 3,62 B | 29,91 D | 0,25 B | 66,20 C |
| G002 | 0,483 B | 2,89 B | 32,47 B | 0,28 B | 64,35 B |
| G120 | 0,477 B | 3,61 B | 29,32 D | 0,31 B | 66,74 C |
| G113 | 0,476 B | 4,48 B | 30,75 C | 0,26 B | 64,50 B |
| G012 | 0,475 B | 3,02 B | 31,42 C | 0,22 A | 65,32 C |
| G088 | 0,475 B | 3,16 B | 32,89 B | 0,28 B | 63,65 B |
| G001 | 0,461 B | 3,44 B | 32,81 B | 0,30 B | 63,44 B |
| Média | 0,515 | 4,27 | 30,71 | 0,25 | 64,77 |
| Máximo | 0,572 | 6,45 | 35,12 | 0,34 | 67,89 |
| Mínimo | 0,461 | 2,89 | 28,01 | 0,17 | 60,26 |
| CV % | 6,19 | 24,18 | 6,19 | 17,72 | 2,89 |

DB MED: Densidade básica média; EXT: Teor em extrativos totais; LIG TOT; Teor em lignina total; CIN: Teor em Minerais; HOLO: Teor de Holocelulose; CV (%): Coeficiente de variação.

Os materiais aos 42 meses apresentaram boas características para produção energética, a alta densidade e teor de lignina, aliado ao baixo teor de minerais propõem que a maioria destes materiais dará origem a carvão de qualidade superior. O clone U103 apresentou um teor de lignina total de

35,12%, valor considerado alto, logo poderá ser utilizado em programas de melhoramento genético com o objetivo de produzir materiais superiores neste componente químico.

Trugilho et al. (2001) trabalhando com madeira de *E. grandis* e *E. saligna* aos sete anos idade destinados a produção de carvão, encontraram valores variando de 0,508 a 0,603 g/cm³, 4,87 a 7,75%, 30,53 a 34, 23%, 0,10 a 0,20% para densidade básica média, teor de extrativos totais, teor de lignina total e teor de cinzas respectivamente. Estes valores estão em conformidade aos encontrados neste trabalho.

Trugilho, Lima e Mendes (1996) avaliando as propriedades da madeira de *Eucalyptus saligna* em diferentes idades, observaram, para o material aos 48 meses de idade, valores em densidade básica, teor de lignina, minerais e extrativos totais de 0,518 g/cm³, 24,5, 0,22 e 3,70%, respectivamente. Resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho.

Tabela 14 Classificação segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott aos 5% de probabilidade para as características químicas e densidade básica da madeira dos clones aos 54 meses de idade

| Clones | DB_MED g/cm ³ | EXT | LIG_TOT | CIN | HOLO |
|--------|-----------------------------|--------|---------|--------|---------|
| | -----%----- | | | | |
| U060 | 0,623 A | 5,66 A | 30,36 A | 0,25 A | 63,71 A |
| U083 | 0,614 A | 5,14 A | 29,11 B | 0,22 A | 65,52 A |
| U034 | 0,602 A | 5,58 A | 25,97 D | 0,24 A | 68,19 B |
| U073 | 0,585 A | 3,72 B | 30,25 A | 0,29 B | 65,72 A |
| G008 | 0,563 B | 4,39 B | 25,10 D | 0,26 B | 70,23 C |
| U108 | 0,561 B | 3,61 B | 26,23 D | 0,27 B | 69,88 C |
| U028 | 0,561 B | 5,95 A | 29,45 B | 0,30 B | 64,29 A |
| U133 | 0,560 B | 3,53 B | 28,09 B | 0,23 A | 68,14 B |
| U030 | 0,556 B | 4,31 B | 27,20 C | 0,32 B | 68,15 B |
| U260 | 0,555 B | 4,28 B | 25,27 D | 0,28 B | 70,15 C |
| U063 | 0,551 B | 5,01 A | 26,99 C | 0,32 B | 67,67 B |
| G094 | 0,538 C | 5,13 A | 27,33 C | 0,28 B | 67,25 B |
| U026 | 0,536 C | 4,70 A | 26,36 D | 0,18 A | 68,74 C |
| U102 | 0,534 C | 3,65 B | 27,25 C | 0,28 B | 68,80 C |
| U271 | 0,534 C | 5,52 A | 28,76 B | 0,28 B | 65,42 A |
| G127 | 0,526 C | 3,98 B | 27,23 C | 0,24 A | 68,53 B |
| U058 | 0,525 C | 5,23 A | 29,97 A | 0,23 A | 64,55 A |
| G006 | 0,517 C | 4,90 A | 29,53 B | 0,27 B | 65,28 A |
| G114 | 0,513 C | 4,85 A | 30,74 A | 0,30 B | 64,10 A |
| U127 | 0,516 C | 4,84 A | 27,38 C | 0,33 B | 67,44 B |
| G118 | 0,505 C | 4,11 B | 28,52 B | 0,22 A | 67,13 B |
| G022 | 0,493 C | 3,75 B | 28,91 B | 0,22 A | 67,10 B |
| G122 | 0,485 C | 4,85 A | 30,39 A | 0,28 B | 64,47 A |
| G084 | 0,482 C | 4,02 B | 26,35 D | 0,30 B | 69,30 C |
| G023 | 0,470 C | 4,00 B | 28,64 B | 0,26 B | 67,08 B |
| Média | 0,540 | 4,59 | 28,06 | 0,27 | 67,08 |
| Máximo | 0,623 | 5,95 | 30,74 | 0,33 | 70,23 |
| Mínimo | 0,470 | 3,53 | 25,11 | 0,18 | 63,72 |
| CV % | 7,34 | 15,54 | 5,98 | 13,55 | 2,97 |

DB MED: Densidade básica média; EXT: Teor em extrativos totais; LIG TOT; Teor em lignina total; CIN: Teor em Minerais; HOLO: Teor de Holocelulose; CV (%): Coeficiente de variação.

Os clones U060, U083, U034, U073 apresentaram densidade básicas médias mais elevadas, densidades estas consideradas elevadas considerando a idade do material. Rezende e Ferraz (1985) trabalhando com madeira de *E.*

grandis aos 13 anos de idade encontraram valores em densidade básica variando de 0,566 a 0,575 g/cm³, valores semelhantes aos encontrados nos clones, classificados como superiores nesta propriedade, deste trabalho. Este fato está relacionado à melhoria da tecnologia de melhoramento genético florestal.

No geral, os materiais avaliados apresentaram altos valores em densidade básica e teor de lignina total, apresentaram também baixos teores de minerais, se caracterizando como de boa qualidade para geração de energia.

4.4 Caracterização elementar e energética

A Tabela 14 apresenta o resumo da análise de variância para os teores elementares de nitrogênio (N%), carbono (C%), hidrogênio (H%), enxofre (S%) e oxigênio (O%), além do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico superior volumétrico (PCSv) para os clones nas duas idades consideradas. Observa-se que houve efeito significativo de clone para PCS e PCSv e todos os teores elementares, exceto para o teor de hidrogênio na madeira dos clones aos 54 meses.

Tabela 14 Análise de variância resumida para os teores e poder calorífico superior nas duas idades consideradas

| Idade (meses) | FV | GL | QM | | | | | | |
|------------------|-------|-----|------|------|-------------------|-------|------|---------|------------------|
| | | | N% | C% | H% | S% | O% | PCS | PCS _v |
| 42 | Clone | 23 | 0,0* | 1,6* | 0,0* | 0,0* | 1,4* | 17255* | 127535* |
| | Erro | 96 | 0,00 | 0,54 | 0,01 | 0,00 | 0,80 | 2467,48 | 23666,10 |
| | CV(%) | | 21,7 | 1,53 | 1,76 | 29,31 | 1,98 | 1,09 | 6,52 |
| 54 | Clone | 24 | 0,0* | 2,1* | 0,0 ^{ns} | 0,0* | 2,2* | 9585* | 163300* |
| | Erro | 100 | 0,00 | 0,98 | 0,02 | 0,00 | 1,18 | 5575,47 | 35508,13 |
| | CV(%) | | 21,1 | 2,01 | 2,35 | 32,35 | 2,46 | 1,63 | 7,60 |

FV: Fonte de variação; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio; N%: Teor em nitrogênio; C%: Teor em carbono; H% Teor em hidrogênio; S%: Teor em enxofre; O%: Teor em oxigênio; PCS: Poder Calorífico Superior; PCSv: Poder calorífico superior volumétrico; CV(%): Coeficiente de variação experimental; e*: Valor significativo aos 95% de probabilidade; e^{ns}: Valor não significativo aos 95% de probabilidade.

As Tabelas 15 e 16 apresentam a classificação segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott, aos 5% de probabilidade, para os teores de nitrogênio, carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre, poder calorífico superior e poder calorífico superior volumétrico dos clones aos 42 e 54 meses de idade respectivamente. Pode-se observar uma baixa variabilidade das propriedades analisadas entre os materiais genéticos, com exceção apenas dos teores em enxofre e nitrogênio. A caracterização elementar e calorífica da madeira é de grande importância quando o objetivo é a geração de energia.

Tabela 15 Classificação segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott aos 5% de probabilidade para os teores elementares e PCS dos materiais aos 42 meses de idade

| Clone | N% | C% | H% | S% | O% | PCS | PCSv |
|-------|-------------|--------|--------|--------|--------|-------------------|---------------------|
| | -----%----- | | | | | (cal/g) | cal/cm ³ |
| U101 | 0,09B | 47,94B | 6,260B | 0,154A | 45,54B | 4700 ^a | 2598A |
| U059 | 0,09B | 48,35A | 6,240B | 0,192B | 45,12B | 4518D | 2585A |
| U221 | 0,09B | 48,58A | 6,282B | 0,144A | 44,90A | 4638B | 2576A |
| U275 | 0,09B | 48,79A | 6,194B | 0,128A | 44,79A | 4619B | 2567A |
| U142 | 0,08B | 48,11B | 6,346A | 0,156A | 45,30B | 4647B | 2564A |
| U032 | 0,07B | 48,07B | 6,162B | 0,204B | 45,48B | 4673 ^a | 2522A |
| U095 | 0,07B | 48,00B | 6,270B | 0,234B | 45,41B | 4504D | 2478B |
| U057 | 0,08B | 48,65A | 6,228B | 0,160A | 44,87A | 4624B | 2456B |
| U139 | 0,10B | 47,73B | 6,288B | 0,160A | 45,71B | 4555C | 2392B |
| U091 | 0,08B | 49,41A | 6,360A | 0,210B | 43,93A | 4623B | 2392B |
| G129 | 0,10B | 49,26A | 6,310A | 0,228B | 44,10A | 4555C | 2389B |
| G085 | 0,08B | 48,61A | 6,322A | 0,168A | 44,81A | 4618B | 2389B |
| U251 | 0,10B | 49,13A | 6,156B | 0,120A | 44,48A | 4576C | 2384B |
| U103 | 0,09B | 48,68A | 6,314A | 0,142A | 44,77A | 4555C | 2378B |
| G005 | 0,07B | 47,97B | 6,264B | 0,182A | 45,50B | 4548C | 2260C |
| G116 | 0,09B | 47,67B | 6,332A | 0,346C | 45,54B | 4477D | 2241C |
| G125 | 0,09B | 47,57B | 6,256B | 0,262B | 45,81B | 4496D | 2224C |
| G002 | 0,19A | 47,56B | 6,410A | 0,672D | 45,44B | 4575C | 2211C |
| G003 | 0,07B | 48,42A | 6,318A | 0,174A | 45,00A | 4515D | 2201C |
| G012 | 0,09B | 48,83A | 6,384A | 0,208B | 44,47A | 4624B | 2200C |
| G113 | 0,08B | 48,13B | 6,222B | 0,222B | 45,33B | 4593B | 2188C |
| G120 | 0,13A | 47,24B | 6,268B | 0,364C | 45,98B | 4570C | 2181C |
| G088 | 0,07B | 48,65A | 6,358A | 0,166A | 44,74A | 4548C | 2159C |
| G001 | 0,12A | 47,66B | 6,378A | 0,394C | 45,44B | 4514D | 2083C |
| Média | 0,10 | 48,30 | 6,29 | 0,225 | 45,11 | 4578 | 2360 |
| Máx. | 0,20 | 49,42 | 6,41 | 0,672 | 45,98 | 4700 | 2598 |
| Mín. | 0,07 | 47,24 | 6,16 | 0,120 | 43,93 | 4478 | 2083 |
| CV% | 27,51 | 1,20 | 1,08 | 53,27 | 1,17 | 1,28 | 6,77 |

N:Teoremnitrogênio;C:Teoremcarbono;H:Teoremhidrogênio;S:Teoremxofre;O:Teoremoxigênio;PCS:PoderCaloríficoSuperior;PCSv:Podercaloríficosuperiorvolumétrico; Máx.: Valor máximo; Mín.: Valor Mínimo; CV(%):Coeficiente de Variação.

Materiais com maiores teores em carbono e hidrogênio elementar são mais interessantes do ponto de vista energético, uma vez que a energia estocada

nas ligações entre estes elementos é alta. Durante a combustão ocorre a quebra das ligações entre estes elementos e a energia é liberada na forma de calor.

Praticamente não houve variação para o poder calorífico superior, tal resultado pode estar ligado ao fato da baixa variação nos teores elementares. O poder calorífico volumétrico ou densidade energética apresentou variação mais elevada, isto ocorre devido a maior variação da densidade básica dos materiais, resultado semelhante corre nos materiais aos 54 meses.

Tabela 16 Classificação segundo o teste de comparação múltipla de Scott-Knott aos 5% de probabilidade para os teores elementares e PCS dos materiais aos 54 meses de idade

| Clones | N% | C% | H% | S% | O% | PCS | PCSv |
|--------|-------------|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------|
| | -----%----- | | | | | cal/g | cal/cm ³ |
| U060 | 0,08A | 48,13B | 6,432A | 0,068A | 45,28B | 4639A | 2891A |
| U083 | 0,09A | 49,45A | 6,288A | 0,074A | 44,09A | 4591A | 2819A |
| U034 | 0,10A | 48,94A | 6,296A | 0,302D | 44,35A | 4537A | 2734A |
| U073 | 0,07B | 47,99B | 6,164A | 0,088B | 45,68B | 4585A | 2678B |
| G008 | 0,09A | 48,94A | 6,312A | 0,232D | 44,41A | 4661A | 2626B |
| U028 | 0,06B | 49,82A | 6,300A | 0,068A | 43,74A | 4599A | 2582B |
| U108 | 0,07B | 47,65B | 6,194A | 0,240D | 45,83B | 4565A | 2564B |
| U133 | 0,07B | 48,42B | 6,284A | 0,128B | 45,09B | 4569A | 2561B |
| U063 | 0,09A | 49,31A | 6,282A | 0,178C | 44,13A | 4615A | 2545B |
| U260 | 0,09A | 49,34A | 6,358A | 0,120B | 44,08A | 4578A | 2543B |
| U030 | 0,08A | 49,88A | 6,444A | 0,034A | 43,55A | 4544A | 2528B |
| G094 | 0,09A | 49,49A | 6,380A | 0,218C | 43,81A | 4590A | 2469C |
| U102 | 0,11A | 49,68A | 6,322A | 0,188C | 43,69A | 4601A | 2460C |
| U271 | 0,11A | 49,22A | 6,192A | 0,076A | 44,40A | 4546A | 2428C |
| U026 | 0,09A | 49,45A | 6,276A | 0,084B | 44,09A | 4505A | 2415C |
| G127 | 0,09A | 49,81A | 6,336A | 0,046A | 43,71A | 4579A | 2411C |
| U058 | 0,07B | 50,26A | 6,434A | 0,060A | 43,12A | 4554A | 2391C |
| G006 | 0,09A | 49,22A | 6,386A | 0,266D | 44,03A | 4585A | 2373C |
| U127 | 0,09A | 49,40A | 6,358A | 0,066A | 44,07A | 4632A | 2368C |
| G114 | 0,09A | 49,16A | 6,342A | 0,254D | 44,14A | 4539A | 2329C |
| G118 | 0,12A | 48,84A | 6,282A | 0,242D | 44,52A | 4529A | 2289C |
| G122 | 0,08A | 50,30A | 6,416A | 0,018A | 43,17A | 4691A | 2278C |
| G022 | 0,09A | 49,37A | 6,30A | 0,044A | 44,18A | 4612A | 2277C |
| G084 | 0,07B | 49,71A | 6,324A | 0,056A | 43,83A | 4600A | 2222C |
| G023 | 0,09A | 49,69A | 6,372A | 0,058A | 43,78A | 4638A | 2181C |
| Média | 0,09 | 49,26 | 6,323 | 0,128 | 44,20 | 4587 | 2478 |
| Máx. | 0,12 | 50,30 | 6,444 | 0,302 | 45,84 | 4691 | 2891 |
| Mín. | 0,06 | 47,65 | 6,164 | 0,018 | 43,16 | 4505 | 2181 |
| CV% | 13,49 | 1,34 | 1,16 | 68,50 | 1,52 | 0,95 | 7,29 |

N: Teoremnitrogênio; C: Teoremcarbono; H: Teoremhidrogênio; S: Teoremxofre; O: Teore moxigênio; PCS: PoderCaloríficoSuperior; PCSv: Podercaloríficosuperiorvolumétrico; Máx.: Valor máximo; Mín.: Valor Mínimo; CV(%): Coeficiente de Variação.

Arantes (2009, p. 149) ao avaliar a madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade encontrou teores elementares semelhantes aos encontrados neste trabalho (C: 49,51 a 49,84%; N:

0,13 a 0,23%; O: 43,65 a 43,89% e H: 6,32 a 6,37%). De certa forma, os teores elementares da madeira praticamente não apresentam variabilidade entre as espécies nem entre gêneros (BRITO; BARRICHELO, 1979).

4.5 Correlações entre as variáveis avaliadas

A Tabela 17 apresenta as correlações observadas entre as características químicas, físicas e energéticas para os clones avaliados.

TABELA 17 Correlações existentes entre as variáveis avaliadas para os clones avaliados

| | DBMED | EXT | LIG_TOT | CIN | HOLO | N% | C% | H% | S% | O% | PCS | PCSv |
|---------|-------|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| DBMED | 1,00 | 0,46 | -0,36 | -0,21 | 0,17 | -0,26 | 0,06 | -0,20 | -0,28 | 0,00 | 0,14 | 0,99 |
| EXT | | 1,00 | -0,17 | -0,24 | -0,22 | -0,21 | 0,37 | -0,22 | -0,31 | -0,32 | 0,27 | 0,49 |
| LIG_TOT | | | 1,00 | 0,06 | -0,92 | 0,10 | -0,34 | 0,11 | 0,30 | 0,31 | -0,18 | -0,37 |
| CIN | | | | 1,00 | 0,02 | 0,12 | 0,07 | 0,23 | 0,05 | -0,10 | -0,14 | -0,22 |
| HOLO | | | | | 1,00 | -0,01 | 0,19 | -0,02 | -0,18 | -0,17 | 0,07 | 0,18 |
| N% | | | | | | 1,00 | -0,23 | 0,17 | 0,68 | 0,13 | -0,11 | -0,26 |
| C% | | | | | | | 1,00 | 0,37 | -0,60 | -0,99 | 0,23 | 0,09 |
| H% | | | | | | | | 1,00 | 0,04 | -0,48 | 0,05 | -0,19 |
| S% | | | | | | | | | 1,00 | 0,49 | -0,30 | -0,31 |
| O% | | | | | | | | | | 1,00 | -0,19 | -0,03 |
| PCS | | | | | | | | | | | 1,00 | 0,28 |
| PCSv | | | | | | | | | | | | 1,00 |

DB MED: Densidade básica média; EXT: Teor em extrativos totais; LIG TOT: Teor em lignina total; CIN: Teor em minerais; HOLO: Teor em holocelulose N%: Teor em nitrogênio; C%: Teor em carbono; H%: Teor em hidrogênio; S%: Teor em enxofre; O%: Teor em oxigênio; PCS: Poder Calorífico Superior; PCSv: Poder calorífico superior volumétrico.

Observou-se uma forte correlação negativa entre os teores em carbono e oxigênio elementar, o que era esperado. Entretanto, não foram evidenciadas correlações significativas entre o poder calorífico superior e os teores de carbono, oxigênio e hidrogênio elementar. Segundo Vale et al. (2000) o poder calorífico superior da madeira é função direta de sua composição elementar, sendo diretamente proporcional aos teores em carbono e hidrogênio e inversamente proporcional ao teor em oxigênio.

Vale et al. (2000) afirmam que o poder calorífico também é reflexo da proporção dos principais componentes químicos da madeira (lignina, extrativos totais, etc.). Não foram observadas correlações marcantes entre os principais componentes químicos da madeira e seu valor calórico neste estudo.

O poder calorífico superior volumétrico apresentou forte correlação com a densidade básica e fraca com o poder calorífico superior, este resultado é reflexo da baixa variabilidade do poder calorífico superior aliado a uma maior variabilidade em densidade básica média, o poder calorífico superior volumétrico é resultado da multiplicação entre estas duas propriedades.

5 CONCLUSÕES

Os resultados observados permitem concluir que:

A utilização dos aparelhos de avaliação não destrutiva Resistograph® e Pilodyn® se mostrou com mediana e baixa precisão respectivamente.

Os modelos ajustados para predição da densidade básica utilizando as variáveis não destrutivas foram considerados de baixa e moderada eficiência, porém devido às vantagens relacionadas ao curto período e baixos custos de avaliação, pode-se recomendar a sua utilização para uma seleção massal de materiais.

Os modelos ajustados para inferência sobre a densidade básica com parte das leituras do Resistograph® foram melhores comparados aos ajustes utilizando a leitura em sua totalidade.

Utilizando o Resistograph® a profundidade de perfuração de quatro centímetros foi a que gerou as amplitudes que melhor se correlacionaram com a densidade básica da madeira, recomendando assim perfurações não maiores que esta.

Os materiais avaliados apresentaram altos teores em lignina e densidade básica, além de baixos teores em minerais, características favoráveis ao uso energético.

Os clones de *E. urophylla* apresentaram maiores valores em densidade básica comparados aos de *E. grandis*.

Os clones avaliados praticamente não apresentaram variabilidade referente aos teores elementares e poder calorífico superior.

Dentre as correlações observadas destacam-se como as mais relevantes: Poder calorífico superior volumétrico e densidade básica, Teor de lignina total e holocelulose e Carbono e Oxigênio elementar.

Não foram evidenciadas fortes correlações entre o poder calorífico superior e os teores elementares.

Não foram observados fortes correlações entre o teor de lignina e extrativos com o poder calorífico superior.

REFERÊNCIAS

ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.** 2009. 149 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633:** carvão vegetal: determinação do poder calorífico: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983. 13 p.

_____. **NBR 11941:** madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Métodos de ensaio.** São Paulo, 1974. 8 p.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **Química da madeira.** Piracicaba: ESALQ, 1985. 125 p.

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

_____. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 52, p. 1-15, jun. 1979.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; FONSECA, S. Bracatinga: características químicas do carvão vegetal. **Brasil Madeira**, Curitiba, v. 3, n. 33, p. 6-8, set. 1979.

BUCUR, V. **Acoustics of wood.** New York: CRC, 1995. 132 p.

CUNHA, M. P. S. C. et al. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. **Anais...** São Carlos: IBRAMEM, 1989. v. 2, p. 93-120.

DINIZ, J. et al. Poder calorífico da casca de arroz, caroço de pêssego, serragem de eucalipto e de seus produtos de pirólise. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 25-32, mar./abr. 2004.

DOWNES, G. M. et al. **Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties**. Collingwood: CSIRO, 1997. 144 p.

FERREIRA, C. A.; FREITAS, M.; FERREIRA, M. Densidade básica da madeira de plantações comerciais de Eucaliptos, na região de Mogi Guaçu. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 18, p. 106-117, jun. 1979.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. (Ed.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley Interprice, 1971. p. 241-298.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GONÇALVES, F. G. **Avaliação da qualidade da madeira de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* para produção de sólidos**. 2006. 167 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2006.

LIMA, J. T. et al. Desempenho do resistograph na estimativa da densidade básica da madeira de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro: UNESP, 2006. 1 CD-ROM.

_____. Uso do resistografo para estimar a densidade básica e a resistência à perfuração da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 75, p. 85-93, set. 2007.

LOSCHI NETO, A. et al. Efeito das diferentes madeiras no isolamento acústico. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 4, p. 673-682, out./dez. 2008.

MCKENZIE, H. M. et al. Processing young plantation-grown *Eucalyptus nitens* for solid-wood products: 2., predicting product quality from tree, increment core, disc and 1-m billet properties. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 33, n. 1, p. 79-113, feb. 2003.

PÁDUA, F. A. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 99 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. de. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PETTERSEN, R. C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R. (Ed.). **The chemistry of solid wood**. Washington: American Chemical Society, 1984. p. 54-126.

PHILIPP, P.; ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. 964 p.

QUEIROZ, S. C. S. et al. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 901-909, dez. 2004.

RAYMOND, C. A.; MACDONALD, A. C. Where to soot your Pilodyn: whiting tree variation in basic density in plantations *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* in Tasmania. **New Forests**, Dordrecht, v. 15, n. 3, p. 205-221, June 1998.

REZENDE, M. A.; FERRAZ, E. S. B. Densidade anual da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 30, p. 37-41, ago. 1985.

RINN, F.; SCHWEINGRUBER, F. H.; SCHAR, E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. **Holzforschung**, Berlin, v. 50, n. 4, p. 303-311, Jan. 1996.

ROSADO, S. S.; BRUNE, A.; OLIVEIRA, L. M. Avaliação da densidade básica da madeira de árvores em pé. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 7, n. 2, p. 147-153, jun. 1983.

ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 14-19, jan. 1998.

ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC, 2005. 487 p.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Influência anatômica e química sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 24., 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1991. p. 23-35.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, dez. 2001.

_____. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial da amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, abr./jun. 2005.

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

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: V. N. Reinhold, 1991. 494 p.

VALE, A. T. et al. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill Ex- maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-88, jun. 2000.