



LUIZ EDUARDO DE LIMA MELO

**INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA ANATÔMICA
NO CONSUMO DE ENERGIA ESPECÍFICA DE
CORTE DA MADEIRA DE *Eucalyptus* e *Corymbia***

LAVRAS - MG

2013

LUIZ EDUARDO DE LIMA MELO

**INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA ANATÔMICA NO CONSUMO DE
ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE DA MADEIRA DE
*Eucalyptus e Corymbia***

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 a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

LAVRAS - MG

2013

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

Melo, Luiz Eduardo de Lima.

Influência da estrutura anatômica no consumo de energia
específica de corte da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* / Luiz
Eduardo de Lima Melo. – Lavras : UFLA, 2013.

93 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Energia da biomassa. 2. Corte transversal e longitudinal. 3.
Anatomia vegetal. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.1

LUIZ EDUARDO DE LIMA MELO

**INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA ANATÔMICA NO CONSUMO DE
ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE DA MADEIRA DE
*Eucalyptus e Corymbia***

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 a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 22 de abril de 2013.

| | |
|---------------------------------|-------|
| Dr. Alfredo Napoli | CIRAD |
| Dr. Paulo Fernando Trugilho | UFLA |
| Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein | UFMG |
| Dr. Antônio Carlos Néri | UFLA |

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Orientador

LAVRAS – MG

2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao que considero como superior, ao que explica o que por muitas vezes consideramos inexplicável a “Deus”, mas não o “deus” diferencial que é pregado por cada religião (pois nessas instituições eu nada creio), mas sim ao Deus em comum que não se faz presente por nem uma instituição nem tão pouco intermediador palpável;

A meus pais, Letícia Lima e Luiz Elias. Ao meu pai (meu ídolo) Luiz Elias por ser o modelo de homem de caráter ao qual quero me tornar um dia. Meu pai é simplesmente o cara! Devo tudo e mais um pouco a sua capacidade de educar com destreza e principalmente a ser um incentivador de meus estudos por ser ele próprio um pesquisador nato, formado e pós-graduado na vida. A minha mãe Letícia Lima por simplesmente ser mulher, pois isso já é muita coisa, mas também por se apresentar sempre como ponto de equilíbrio da nossa família e também por me confortar e me ouvir como ninguém mais no mundo consegue;

Agradeço também à Neide, minha segunda mãe, por estar sempre ao meu lado e por cuidar tão bem dos meus pais sem pedir nada em troca, e por ser também uma grande amiga;

Aos meus irmãos, por sempre que possível estarem presente aconselhando-me em minha jornada de vida (pois deles conselhos bons não são vendidos, mas sim dados de coração aberto);

Aos meus amigos de hoje e de ontem, todos tiveram direta ou indiretamente participação nesse trabalho. Entretanto, merece um agradecimento especial Adones Sales, por ter sido nessa etapa de minha vida um irmão, chato, resmungão, inteligentíssimo, mas acima de tudo AMIGO no verdadeiro sentido da palavra, valeu “Ads”;

A minha namorada e futura esposa, Cilene Souza (minha preta), por estar comigo na alegria, na tristeza, na saúde, na pobreza e nos momentos de conquista também, a essa grande mulher, o meu muito obrigado!

Ao Professor José Reinaldo Moreira da Silva quem me orientou nesse trabalho e durante todo o mestrado e quem aprendi admirar como pessoa e profissional. Também aos professores; José Tarcísio Lima, Paulo Fernando Trugilho e Alfredo Napoli, pela orientação, apoio e incentivo.

À UFLA, V&M florestal e CIRAD, pela concessão de bolsa de estudos e fornecimento do material de trabalho.

Constante de Murphy:

A matéria será danificada na proporção direta do seu valor

Interpretação:

Seu sucesso ou vitória será diretamente proporcional ao seu esforço

RESUMO

Pouco se sabe a respeito da influência das propriedades anatômica do lenho sobre as forças envolvidas no processamento mecânico da madeira. O corte da madeira é um problema para as indústrias de base florestal. Com esse trabalho, objetivou-se verificar a influência da estrutura anatômica no consumo da energia específica de corte das madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia*. Os materiais genéticos utilizados foram híbridos naturais de *Eucalyptus urophylla* (MN463 e VM04) e *Corymbia citriodora* Hill & Johnson. Os híbridos foram provenientes de plantios comerciais da V&M Florestal. Já a espécie foi proveniente de plantios seminais da Cenibra S.A. Foram utilizados os pranchões centrais de nove toras de 3 m de comprimento destinados aos ensaios da energia específica de corte longitudinal (90°-0°) e transversal (0°-90°). Foram retirados discos da região basal das toras para as análises anatômicas e densidade básica. Os parâmetros de processamento foram fixados com velocidade de avanço de 17 m.min⁻¹, velocidade de corte de 46 m.s⁻¹, rotação do eixo porta ferramenta de 2200 min⁻¹, serra circular de 400 mm de diâmetro e com 24 dentes “WZ”. Observou-se que os valores de consumo da energia específica de corte foram três vezes maiores no corte longitudinal que no corte transversal. Não foram verificadas diferenças estatísticas no consumo da energia específica de corte entre os materiais genéticos analisados, em ambos os cortes. Observaram-se correlações significativas entre o consumo da energia específica de corte e a densidade básica da madeira, o comprimento e largura dos raios, os diâmetros do lume, espessura da parede, fração parede e coeficiente de rigidez das fibras e a fração parede total do lenho.

Palavras-chave: Energia da biomassa. Corte transversal e longitudinal. Anatomia vegetal.

ABSTRACT

Little is known about the influence of the anatomic properties of wood on the forces involved in the mechanical processing of wood. Wood cutting is an issue for forest based industries. This work aimed at verifying the influence of the anatomic structure on specific energy consumption of *Eucalyptus* and *Corymbia* wood cutting. The genetic materials used were natural *Eucalyptus urophylla* (MN463 and VM04) and *Corymbia citriodora* Hill & Johnson hybrids. The hybrids were derived from commercial plantations of the V&M Forestry. The specie derived from Cenibra S.A. seminal plantations. We used central beams of nine 3 m length logs destined for the specific energy trials of longitudinal (90°-0°) and transversal (0°-90°) cuts. We removed discs from the base of the logs for anatomic and basic density analyses. The processing parameters were fixed with an advance speed of 17 m.min⁻¹, cut speed of 46m.s⁻¹, rotation of the tool holder spindle of 2200 min⁻¹, using a circular saw of 400 mm of diameter with 24 “WZ” teeth. We observed that the specific cutting energy consumption values were three times higher on the longitudinal cut than on the transversal cut. No statistical differences were verified for specific cutting energy consumption between the analyzed genetic materials, in both cuts. We verified significant correlations between the specific cutting energy consumption and the basic density of the wood, length and width of the spokes, the diameters of the lumen, thickness of the wall, wall fraction and rigidity coefficient of the fibers and the total wall fraction of the wood.

Keywords: Biomass energy. Transversal and longitudinal cuts. Plant anatomy.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----------|--|----|
| Figura 1 | Representação das famílias principais de corte ortogonal da madeira | 20 |
| Figura 2 | Corte longitudinal (90° - 0°) de 5 mm espessura, realizado com a mesma espessura do dente da serra (circulo tracejado) | 36 |
| Figura 3 | Corte transversal (0° - 90°) de 5 mm espessura, realizado com a mesma espessura do dente da serra | 37 |
| Figura 4 | Micrografias transversais do hibrido MN463 | 74 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | | |
|------------|--|----|
| Gráfico 1 | Perfil do torque do motor gerado no corte longitudinal (90°-0°), com a estabilização dos valores em 150% (patamar) e a simulação do sinal pela estimativa matemática (linha tracejada).. | 39 |
| Gráfico 2 | Comparação das médias dos parâmetros anatômicos entre os materiais genéticos | 50 |
| Gráfico 3 | Variação radial do diâmetro dos vasos | 52 |
| Gráfico 4 | Variação radial do comprimento dos elementos de vaso | 53 |
| Gráfico 5 | Variação radial do comprimento dos raios | 53 |
| Gráfico 6 | Variação radial da frequência de vasos por mm ² | 54 |
| Gráfico 7 | Variação radial da largura dos raios | 55 |
| Gráfico 8 | Variação radial do comprimento das fibras | 56 |
| Gráfico 9 | Variação radial da largura das fibras | 56 |
| Gráfico 10 | Variação radial espessura da parede das fibras | 57 |
| Gráfico 11 | Variação radial da fração parede das fibras | 58 |
| Gráfico 12 | Variação radial da fração parede total do lenho | 58 |
| Gráfico 13 | Variação radial diâmetro do lume das fibras..... | 59 |
| Gráfico 14 | Variação radial do coeficiente de rigidez das fibras..... | 59 |
| Gráfico 15 | Influência do material genético na densidade básica da madeira.. | 61 |
| Gráfico 16 | Influência do material genético no consumo da máxima energia específica de corte | 62 |
| Gráfico 17 | Variação radial da máxima energia especifica de corte longitudinal dos materiais genéticos analisados..... | 63 |
| Gráfico 18 | Perfil da variação radial da densidade básica | 64 |
| Gráfico 19 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a densidade básica, para o híbrido MN463 | 66 |

| | | |
|------------|---|----|
| Gráfico 20 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com o comprimento dos raios, para o híbrido MN463 | 66 |
| Gráfico 21 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com o diâmetro do lume das fibras, para o híbrido MN463 | 67 |
| Gráfico 22 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a fração parede das fibras, para o híbrido MN463 | 67 |
| Gráfico 23 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com o coeficiente de rigidez das fibras, para o híbrido MN463 ... | 68 |
| Gráfico 24 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a fração parede total do lenho, para o híbrido MN463..... | 68 |
| Gráfico 25 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com o comprimento dos raios, para o híbrido VM04..... | 69 |
| Gráfico 26 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a largura dos raios, para o híbrido VM04..... | 70 |
| Gráfico 27 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a espessura da parede das fibras, para o híbrido VM04 | 70 |
| Gráfico 28 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a densidade básica, para o híbrido VM04 | 71 |
| Gráfico 29 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a fração parede das fibras, para o híbrido VM04..... | 71 |
| Gráfico 30 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com o coeficiente de rigidez das fibras, para o híbrido VM04 | 72 |
| Gráfico 31 | Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a fração parede total do lenho, para o híbrido VM04 | 72 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | Relação dos materiais e descrição da área de coleta | 31 |
| Tabela 2 | Diâmetros e altura comercial média das árvores avaliadas de <i>Eucalyptus</i> e <i>Corymbia</i> | 32 |
| Tabela 3 | Exemplo dos valores de torque selecionados (sublinhado) de abrupta ascendência e descendência do início e do final do corte da madeira, respectivamente | 40 |
| Tabela 4 | Resumo da Análise de variância para frequência dos vasos (Fv), diâmetro dos vasos (Dv), comprimento dos elementos de vaso (Cv), comprimento dos raios (Cr), largura dos raios (Lr), comprimento das fibras (Cf), largura da fibra (Lf), diâmetro do lume das fibras (DLf), espessura da parede das fibras (Ep), fração parede das fibras (FPf), coeficiente de rigidez das fibras (CRf) e fração parede total do lenho (FPT) | 48 |
| Tabela 5 | Resumo da Análise de variância efetuada para a máxima energia específica do corte longitudinal ($E_{s_{max}} 90^{\circ}-0^{\circ}$) e densidade básica (Db) | 61 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 16 |
| 2.1 | Variabilidade anatômica do lenho | 16 |
| 2.2 | Processamento mecânico da madeira | 19 |
| 2.3 | Fatores de processamento mecânico da madeira | 21 |
| 2.3.1 | Velocidade de corte (Vc) | 22 |
| 2.3.2 | Velocidade de avanço (Vf) | 23 |
| 2.3.3 | Energia específica de corte (Es) | 25 |
| 2.4 | Características da madeira que influenciam no corte | 26 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 31 |
| 3.1 | Material biológico | 31 |
| 3.2 | Desdobro das toras | 32 |
| 3.3 | Caracterização anatômica da madeira | 32 |
| 3.4 | Densidade básica e umidade | 34 |
| 3.5 | Processamento mecânico do material | 35 |
| 3.5.1 | Coleta de dados | 37 |
| 3.6 | Análise estatística | 43 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 44 |
| 4.1 | Variabilidade anatômica do material analisado | 44 |
| 4.2 | Variabilidade anatômica entre os materiais genéticos | 49 |
| 4.3 | Variabilidade anatômica radial dos materiais genéticos | 52 |
| 4.4 | Variabilidade da energia específica de corte e da densidade básica | 59 |
| 4.4.1 | Variabilidade radial do consumo da energia específica de corte e da densidade básica | 63 |
| 4.5 | Correlação entre a estrutura anatômica do lenho e a densidade básica da madeira com a máxima energia específica de corte | 64 |
| 5 | CONCLUSÕES | 77 |
| | REFERÊNCIAS | 79 |
| | ANEXOS | 88 |

1 INTRODUÇÃO

Por ser a madeira um material de origem biológica, de extrema variabilidade e com propriedades específicas as quais refletem a complexidade de sua ultraestrutura e estrutura celular, sua usinagem foge aos padrões convencionais aplicados a outros materiais, sendo seu corte um fenômeno mais complexo e passivo de uma análise mais aprofundada. Esse fato explica o porquê do processamento mecânico do lenho ainda ser um gargalo dentro das diversas etapas de desdobro e beneficiamento da madeira, pois ainda hoje não se compreende com exatidão quais as características da madeira que de fato influenciam sua usinagem.

O conhecimento insuficiente sobre a matéria prima processada pode acarretar no uso inadequado de maquinário e de ferramentas de cortes no processamento da madeira. Dessa forma, conhecer as propriedades da madeira é importante, entretanto entender a magnitude da influência dessas propriedades sobre o processamento desse material ainda é a grande problemática do setor industrial madeireiro.

A energia específica de corte é uma das grandezas físicas provenientes da fenomenologia da usinagem de maior relevância para a indústria madeireira, pois a partir do monitoramento de seu consumo, podem-se alcançar substanciais ganhos na produtividade da empresa.

Considerando a existência da variabilidade e heterogeneidade da madeira, pode-se supor sua influência na trabalhabilidade dessa madeira com diferentes ferramentas. Assim, a variação na estrutura anatômica, na densidade e na resistência do tronco interferirá significativamente no consumo da energia específica de corte.

O fato de a resistência da madeira estar diretamente relacionada à sua composição celular e que o corte é um fenômeno baseado na tensão de ruptura

no qual a madeira é submetida a uma série esforços mecânicos, torna-se fundamental a compreensão da influência dos diferentes tipos de tecidos sobre os esforços envolvidos no processo de corte da madeira.

Deve-se salientar ainda, que se a variação de tecidos no lenho influenciarem as forças envolvidas no processo de corte, elas terão influência também no consumo da energia necessária ao corte. O conhecimento da interação entre essas variáveis se torna informação importante, tendo em vista os ganhos que se podem ter com a otimização do processo de usinagem.

Pelo exposto, este trabalho foi conduzido tendo como objetivos:

- a) estudar a influência da estrutura anatômica da madeira no consumo da energia específica de corte transversal (0° - 90°) e longitudinal (90° - 0°) das madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia*;
- b) verificar a variabilidade da estrutura anatômica e densidade básica do lenho, bem como do consumo da energia específica de corte entre os materiais genéticos e no sentido medula-casca do fuste;
- c) comparar o consumo da energia específica de corte transversal (0° - 90°) e longitudinal (90° - 0°) entre os materiais genéticos analisados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Variabilidade anatômica do lenho

Pesquisas voltadas ao estudo da estrutura anatômica do lenho de espécies provenientes tanto de floresta plantada como também de ocorrência natural em mata nativa, têm auxiliado cada vez mais na solução de questões relacionadas à xilogenese, taxonomia, ecologia e no entendimento do comportamento da madeira frente a sua utilização como material. No que se refere especificamente a aspectos relacionados ao uso da madeira como matéria-prima, tais estudos são importantes na predição da sua qualidade para determinada finalidade (ISHIGURI et al., 2009).

A madeira é originada de um sistema biológico e apresenta uma organização estrutural complexa, formada por elementos xilemáticos que apresentam variabilidade na sua ultraestrutura, composição química, bem como em suas propriedades físicas e mecânicas; entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e mesmo entre diferentes partes da mesma árvore, seja no sentido axial ou radial do fuste. Fang et al. (2009) e Trugilho, Lima e Mendes (1996) ressaltam que as variações que ocorrem na composição química, física e anatômica da madeira são grandes entre espécies, entretanto dentro da mesma espécie, ocorrem principalmente em função da idade, de fatores genéticos e também ambientais.

Segundo Burger e Richter (1991), Esau (1974) e Rossi, Morin e Deslauriers (2012), embora habitualmente considerado como um todo, o xilema é o resultado de um complexo processo de divisão, crescimento e maturação de um conjunto de células, sendo que a base desse processo de xilogenese é o cambium vascular, que se divide incessantemente produzindo novas células que

irão desempenhar funções de transporte de líquido, transformação, condução e armazenamento de nutrientes, bem como reforço mecânico do lenho.

A variabilidade, geralmente encontrada em diferentes pontos do lenho, dentro de uma mesma árvore, deve-se, provavelmente, às periódicas mudanças sofridas por esse câmbio vascular ativo, em decorrência de seu amadurecimento e também por modificações impostas pelas condições ambientais (OLIVEIRA; SILVA, 2003; TSUCHIYA; FURUKAWA, 2009a, 2009b). Dessa forma, três períodos de desenvolvimento do câmbio são reconhecidos: 1º - período de juvenildade, caracterizado principalmente pelo menor diâmetro e comprimento celular, maior frequência de elementos de vasos por mm² e fibras de paredes celulares mais finas, 2º - período de maturidade ou fase adulta, fase em que ocorre um típico nível de organização estrutural, em que há maior estabilidade nas atividades fisiológicas, que conseqüentemente influencia a atividade do câmbio vascular refletindo assim na estrutura anatômica da madeira, a qual apresenta comumente células de maiores dimensões capaz de suprir as necessidades de crescimento da árvore, 3º - período de senescência pode ser observado em árvores de idade muito avançada, ocorre redução biológica do crescimento, como resultado da diminuição das atividades fisiológicas (BHAT; PRIYA; RUGMINI, 2001; MALLAN, 1995; TSOUMIS, 1968; ZOBEL; TALBERT, 1984).

Nesse contexto, Fan, Cao e Becker (2009) e Tsuchiya e Furukawa (2008) ressaltam que estudos que avaliam a variação radial e axial no tronco, além de possibilitarem um entendimento da arquitetura adotada pelas diferentes espécies para tornar eficiente e seguro o transporte de água se demonstram de extrema importância comercial, pois a partir dos resultados é possível prever a matéria-prima mais indicada comercialmente para uma determinada aplicação. Entretanto, é importante que se ressalte que essa variação das propriedades da madeira no sentido medula-câmbio e base-ápice se apresentam em maiores ou

menores magnitudes, dependendo da espécie, idade, grupo sucessional e fatores ambientais (WOODCOCK; SHIER, 2002).

Para a utilização da madeira como matéria-prima, o estudo da variabilidade de suas propriedades, principalmente aquela observado da medula em direção a casca, é de fundamental relevância principalmente nas etapas de desdobro e secagem. Segundo Silva (2002), a otimização (neologismo) no aproveitamento da madeira serrada ocorrerá com o conhecimento dessas variações existentes, bem como com a sua interação com as diferentes operações de usinagem. Este aspecto permitirá então, estratificar as árvores para fins específicos. Silva, Lima e Trugilho (2007) acrescentam que no desdobramento da madeira para geração de tábuas, por exemplo, dependendo da localização no interior da árvore na qual estas forem obtidas, pode-se direcioná-las para formar componentes específicos de móveis de acordo com suas características particulares e baseando-se nas operações de usinagem necessárias para sua confecção. Cruz (2000) indicou que, para fins de madeira serrada, é interessante material de características mais homogêneas, evitando assim o uso de madeira juvenil, por essa porção apresentar uma maior magnitude de variação, notadamente marcada por mudanças abruptas na composição celular.

O estudo das correlações entre a anatomia e as propriedades da madeira, bem como com suas diversas formas de uso é de fundamental importância para o entendimento da madeira como matéria-prima e, permite também, potencializar sua utilização em determinada atividade. Segundo Walker et al. (1993), diversas propriedades da madeira decorrem da estrutura anatômica e da orientação das microfibrilas de celulose principalmente nas paredes das fibras.

Silva (2002), estudando as correlações existentes entre a estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus grandis* com a qualidade das operações de usinagem, observou que a presença de células parenquimáticas tende a reduzir a possibilidade de pré-clivagem, pois reduzem as dimensões dos cavacos

formados, enquanto que a presença das fibras e vasos tem efeito inverso, facilitando a pré-clivagem e reduzindo a qualidade da superfície usinada.

Fujiwara (1992) e Fujiwara et al. (1991), ao estudarem 50 espécies de madeiras japonesas, encontraram forte correlação entre a espessura da parede das fibras, volume e frequência dos raios, com a densidade, sendo que em madeira mais densas, as fibras apresentam paredes mais espessas e os raios ocorrem com menor frequência e volume.

Garcia et al. (2010), estudando a influência das características das fibras na resistência ao cisalhamento da madeira de *Caesalpinia echinata*, verificaram que a resistência ao cisalhamento foi negativamente correlacionada com lume das fibras e positivamente com a espessura da parede. O lume representa espaço vazio na madeira e contribui para o escorregamento das fibras. Fibras de parede espessa possui maior quantidade de material o que aumenta a resistência ao escorregamento das células e a ruptura de suas paredes e consequentemente estão associadas com maiores valores de resistência ao cisalhamento.

2.2 Processamento mecânico da madeira

Para Silva et al. (2005) usinar a madeira não se restringe simplesmente ao ato de cortá-la, mas sim, processá-la por meio de uma ferramenta de corte, visando-se obter um produto de qualidade, com as dimensões desejadas, sendo no entanto o mais exato e econômico quanto possível e mantendo-se a segurança do operador.

Persson (1987) define o corte convencional como sendo o processo mecânico de divisão de um corpo ao longo de uma linha pré-estabelecida. Nessa atividade é utilizada uma ferramenta de corte. Em muitos casos, o material pode ser dividido em partes diferentes, gerando novas superfícies. Néri (1998) acrescenta que o corte convencional pode ser definido ainda, como sendo a ação

da ferramenta sobre o material a ser cortado, produzindo partículas de tamanhos variados, envolvendo esforços mecânicos que são superados pelas tensões de ruptura desse material.

Existem dois tipos básicos de corte na madeira, o ortogonal e o periférico. No corte ortogonal o fio de corte da ferramenta é perpendicular à direção de movimento da peça de madeira e pode ser entendido pela notação definida por McKenzie (1960), utilizando dois números. O primeiro número é o ângulo entre a aresta de corte da ferramenta e o eixo axial das fibras da madeira. O segundo número é o ângulo entre a direção de corte e o eixo axial das fibras da madeira. Assim são definidos três tipos de corte 90° - 0° , 90° - 90° e 0° - 90° (Figura 1). Um exemplo desse corte é o tipo de corte realizado pelas serras de fita. Já no corte periférico a ferramenta de corte é instalada em um cabeçote rotativo, a fim de se obter um mesmo cilindro de corte. As operações de aplainamento, fresamento e torneamento são exemplos de corte periféricos, mas são situações de trabalhos bem próximas de um corte ortogonal. Para Néri (1998) o corte ortogonal é, portanto, um caso especial de corte periférico com raio infinito.

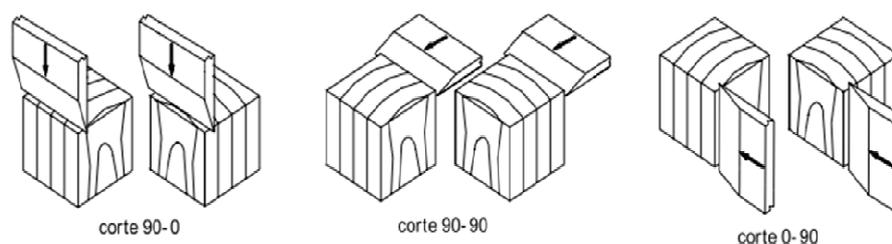


Figura 1 Representação das famílias principais de corte ortogonal da madeira
Fonte: (HOADLEY, 1980).

É importante que se ressalte, que tanto no corte ortogonal como no corte periférico, para que se consiga separar o cavaco da peça de madeira, é necessário primeiro provocar a ruptura estrutural entre o fio da ferramenta de corte e a peça de madeira. Partindo-se do princípio que a resistência da madeira varia de acordo com a orientação das fibras, pode-se inferir que as forças de corte e a qualidade da superfície serão diretamente afetadas pela direção de corte (NÉRI, 1998).

2.3 Fatores de processamento mecânico da madeira

Segundo Néri (2003), apesar de grandes avanços terem sido alcançados em relação à caracterização físico e mecânica das madeiras brasileiras, dentre os quais pode ser citada a elaboração da Norma de Projetos de Estruturas de Madeiras (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997), a área de usinagem de madeiras, no Brasil, ainda é carente de conhecimentos básicos. O autor ressalta ainda que a eficiência do corte poderia ser melhorada, se no processamento da madeira fossem consideradas as especificidades da espécie processada e os parâmetros de corte (força de corte; ângulo de saída; ângulo de folga; ângulo de cunha; espessura de corte; orientação das fibras em relação ao corte; afiação da ferramenta de corte; atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta e vibração lateral) os quais, afetam diretamente o custo da operação, o rendimento de madeira serrada e a qualidade do produto final.

Bonduelle, Cruz e Silva (2002) explicam que o processamento mecânico da madeira pode ser expresso pela função 5M, sendo Matéria prima, Maquinas, Metodologia, Mão-de-obra e Meio.

2.3.1 Velocidade de corte (Vc)

A velocidade de corte corresponde à velocidade periférica da ferramenta (Equação 1).

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{60} \quad (1)$$

Em que:

Vc = velocidade de corte (m.s⁻¹);

D = diâmetro da ferramenta (m);

n = rotação (min⁻¹ = rpm).

Na usinagem de madeira ela é expressa em (m.s⁻¹), a velocidade de corte ideal para a usinagem é dependente dos materiais que compõem a ferramenta utilizada no corte, bem como do tipo de matéria-prima a ser processada. Para que se consiga o melhor desempenho de uma dada ferramenta de corte, um dos fatores mais importantes a serem considerados é a observação da correta velocidade de corte, no caso do processamento da madeira a velocidade de corte ideal é bastante variável principalmente por ser diretamente dependente de características intrínsecas do material (SERRA..., 2006).

Foyster (1953) e Lapin (1954), citados por Kollmann e Cotê Júnior (1968) indicam velocidades de corte entre 66 a 74 m.s⁻¹ para serras circulares em cortes de madeiras densas e cortes transversais, respectivamente.

Segundo Reval Serras e Ferramentas para Madeira (2009), serras circulares com diâmetro de 400 mm, devem ser usadas com velocidades de corte entre 60 a 80 m.s⁻¹ e 55 a 70 m.s⁻¹, para madeiras menos ou mais densas, respectivamente. De acordo com Centro de Tecnologia da Madeira e Mobiliário - CETMAN; Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI, 1966) a

velocidade de corte usada no processamento da madeira, depende da ferramenta e do material que será trabalhado, e deve estar entre 30 a 100 m.s⁻¹.

Meyer (1926 citado por KOLLMANN; COTÊ, 1968) observou menor eficiência da energia específica de corte da madeira, como elevados valores de velocidade de corte, em serras circulares. Ao estudar o efeito de alguns parâmetros de usinagem na energia específica de corte para a madeira roliça de *Eucalyptus* sp., Souza et al. (2011) observaram que altas velocidades de corte estavam associadas a maiores valores de frequência de rotação, que levava conseqüentemente a maiores consumos de energia específica, independente da umidade das toras, esses resultados foram confirmados, por Gontijo (2012) ao analisar a energia específica em cortes transversais com a madeira roliça de *Eucalyptus* sp. Palmqvist, Lenner e Gustafsson (2005) explicam que maiores velocidade de corte provocam aumento na espessura média dos cavacos e, conseqüentemente, maior é a força necessária para cortar a madeira.

2.3.2 Velocidade de avanço (Vf)

A velocidade de avanço é representada pelo deslocamento da peça de madeira em direção à ferramenta cortante durante um determinado intervalo de tempo que o corte foi executado e é dada em metros por minutos. Vale ressaltar que em certas máquinas a velocidade de avanço é obtida pela movimentação da ferramenta de corte juntamente com seu eixo e cabeçote, nesse caso a peça de madeira permanece estática.

Azzola (1954 citado por KOLLMANN; COTÊ JÚNIOR, 1968), em estudos a cerca da energia específica de corte em serra circular, observou que o aumento da velocidade de avanço reduzia o consumo de energia específica de corte.

Gontijo (2012) e Souza et al. (2011) estudando o consumo de energia específica de corte, para madeira de *Eucalyptus* sp., observaram que existe tendência de diminuir o consumo de energia específica de corte na medida em que se aumenta a velocidade de avanço. Segundo Souza et al. (2011), $17 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ foi a velocidade de avanço que menos consumiu energia específica de corte durante o processamento mecânico da madeira roliça de dois clones de *Eucalyptus* sp. em cortes transversais. O mesmo resultado foi também descrito por Gontijo (2012) em estudo semelhante, entretanto esse último autor alerta que, há um limite tolerável para a diminuição da energia específica de corte por meio do aumento da velocidade de avanço, pois quando se aumenta demasiadamente a velocidade de avanço e se diminui excessivamente a velocidade de corte a energia requerida ao corte, é maior que a energia que o motor é capaz de fornecer, sem trabalhar sobrecarregado.

Em estudos sobre a energia específica de corte para madeira congelada e a temperatura ambiente, Orłowski et al. (2009) observaram que o aumento na velocidade de avanço provoca diminuição na energia específica de corte em todas as condições de temperatura estudadas.

Palmqvist, Lenner e Gustafsson (2005) avaliando a influência da velocidade de avanço na espessura média do cavaco e nas forças de corte verificaram que quanto maior a velocidade de avanço maior o comprimento médio dos cavacos e conseqüentemente maior a força de necessária para cortar a madeira.

Para Gontijo (2012) somente a velocidade de avanço não pode ser utilizada como parâmetro para avaliar o consumo de energia para cortar a madeira. Fatores como velocidade de corte, direção do corte, número de dentes da ferramenta de corte, características inerentes ao material processado, tais como, densidade, propriedade mecânicas, umidade e estrutura anatômica; são

todos fatores que podem influenciar o processo e por isso também devem ser avaliadas conjuntamente.

2.3.3 Energia específica de corte (Es)

Para a fenomenologia da usinagem, a energia específica de corte é uma das grandezas físicas mais importantes, sem esquecer-se de outros importantes parâmetros como força de corte, temperatura de corte, tempo de usinagem, desgaste da ferramenta, entre outras (GORCZYCA, 1987; RODRIGUES; COELHO, 2007). A partir do monitoramento das forças envolvidas no processo de usinagem é possível se calcular a energia específica de corte.

Alguns autores se dispõem a explicar esse parâmetro de usinagem. Segundo Lubkin (1957 citado por KOLLMANN; COTÊ JUNIOR, 1968), a energia específica de corte pode ser definida como a relação entre o consumo de energia líquida de corte e o volume de material removido. Para King e Hahn (1986) a energia específica de corte, é a taxa de remoção do material, ou seja, um parâmetro de equivalência entre a energia gasta para executar o corte e o volume de cavaco removido. Para Shaw (1984) a energia específica de corte pode ser entendida como uma quantidade intensiva que caracteriza a resistência oferecida ao corte por um dado material, assim como a tensão de tração e a dureza caracterizam a resistência a deformação plástica.

Segundo Rodrigues e Coelho (2007), a energia específica de corte pode representar muito bem o fenômeno de corte, uma vez que é normalizada e mais sensível a pouca profundidade do corte. Segundo Salmon (1992), a energia específica de corte tem uma relação direta com os resultados da usinagem. Ersoy e Atici (2004) explicaram que elevados valores de energia específica geram elevadas taxas de transferência de calor e grandes tensões residuais na peça, estas podem convergir para uma pobre integridade superficial do produto,

enquanto valores de energia específica baixos resultam em menores danos à peça, indicando qualidade e eficiência da ferramenta de corte.

Por meio do estudo da energia específica de corte, acrescido da força específica, pode-se ter a comparação e a avaliação da eficiência das ferramentas de corte, e ainda estimar a potência requerida em uma operação de usinagem de um dado material. Para isso deve-se considerar também a eficiência do motor e efeitos da inércia e do atrito (ERSOY; ATICI, 2004; SOUZA et al., 2011).

Em estudos relativos à usinagem de metais, Melo et al. (2003) observaram que a energia consumida no corte é essencialmente convertida em calor e, além disso, a transferência não é igualitária, em que o cavaco recebe 90% do total, já a peça usinada e a ferramenta cortante recebem 5%, cada uma. Nesse contexto, Souza et al. (2011) alertam que estudos semelhantes devem ser feitos para usinagem de madeira, uma vez que são escassos, mesmo sendo essa uma matéria-prima usada para diversas finalidades no Brasil e no mundo.

2.4 Características da madeira que influenciam no corte

Atualmente o melhor conhecimento do comportamento da madeira durante a usinagem é uma das grandes necessidades ligadas ao processamento dentro de indústrias madeireiras, principalmente por razões econômicas e produtivas. Máquinas e ferramentas fabricadas para o processamento da madeira, bem como seus utilizadores, necessitam de informações confiáveis sobre os principais fatores que influenciam o corte da madeira e, sobretudo a magnitude da força necessária para separar um cavaco, ou seja, a força de corte e suas variações em diferentes casos (EYMA; MEAUSOONE; MARTIN, 2004).

Segundo Kopac e Sali (2003), em comparação com os metais utilizados em engenharia mecânica, a madeira é um material muito mais anisotrópico e não-homogêneo. No corte da madeira os pedidos de precisão dimensional são

mais baixos do que em comparação ao corte do metal, porém muitos outros problemas que não estão presentes no corte de metais são evidenciados no corte da madeira, principalmente em virtude da estrutura altamente complicada e sensível desse material. Dessa forma, pode-se dizer que a escolha da tecnologia indevida ao corte tem consequências muito piores para a madeira que no metal.

Segundo Eyma, Meausoone e Martin (2004), as forças de corte são diretamente influenciadas pela característica anisotrópica da madeira. Os autores ressaltam ainda que no processamento da madeira utilizam-se parâmetros de corte específicos. Na indústria do metal a velocidade de corte encontrada é de 25 a 35 m.min⁻¹, usando ferramentas de aço rápido superiores e o avanço por dente é de 0,1 a 0,2 mm. Já na indústria da madeira estes parâmetros são observados de 35 a 45 m.s⁻¹ e 0,6 a 1,2 mm por dente, respectivamente. Para os mesmos autores o estudo das forças de corte envolvidas no processo de usinagem é importante para estimar o comportamento da madeira e da qualidade da superfície obtida após a usinagem ou para se trabalhar a madeira de acordo com a capacidade do maquinário e da ferramenta ou para obter condições de corte otimizadas.

Costes et al. (2004) explicam, no entanto, que sendo a madeira um material anisotrópico apresenta um desafio significativo para modelação da influência da direção da grã, bem como de alterações nas propriedades do material ao longo da direção do corte e, embora seja possível prever a direção da falha da madeira maciça, é difícil prever a magnitude de variação da força de corte devido às variações imprevisíveis nas propriedades do material.

Néri, Gonçalves e Hernandez (1999) e Néri, Raquel e Hernandez (2000) estudando a força de corte ortogonal 90°-90° e 90°-0° em *Corymbia citriodora*, *E. saligna* e *E. grandis* observaram que a força de corte paralela aumenta com o aumento da densidade da madeira. Os autores explicam que este efeito é dependente do ângulo de ataque utilizado. Gonçalves (2000) afirmou que os

esforços de corte em madeiras muito densas pode chegar a ser cinco vezes maior, quando comparado às madeiras macias.

Para Eyma, Meausoone e Martin (2004) existem basicamente três fatores que influenciam os resultados de força de corte em madeiras: fatores ligados a usinagem (profundidade de corte, a taxa de fuso etc.), o parâmetro umidade e principalmente o fator espécie de madeira usinada. Para os autores, nesse caso, o fator densidade da madeira é consideravelmente importante, no entanto, pouco se sabe sobre sua influência real dessa propriedade no corte da madeira.

Na literatura é relatado também que corte de madeiras secas requer maiores esforços de corte e conseqüentemente consomem mais energia específica (NÉRI; GONÇALVES; HERNANDEZ, 1999). Segundo Koch (1964) quando a madeira é seca abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), ocorre redução dos espaços submicroscópicos e conseqüente aproximação entre as microfibrilas formadoras da parede celular, o que leva ao aumento da rigidez da mesma e com isso, aumenta-se também a resistência mecânica de modo exponencial.

Vários autores reportam que a densidade da madeira apresenta influência significativa nos esforços que são requeridos ao seu corte (FISCHER, 1999; MCKENZIE; CVITKOVIC; RINGLER, 1999). Entretanto, Chardin (1958) e Koch (1964) ressaltam que essa correlação existe, porém este esforço não é o suficiente para caracterizar precisamente a influência da espécie de madeira na força de corte durante a usinagem.

Eyma, Meausoone e Martin (2004) estudando a influência da densidade e de algumas propriedades mecânicas de 14 espécies exóticas, sobre o esforço de corte necessário a fresagem periférica no sentido longitudinal, observaram correlação de ($r^2 = 0,54$) da densidade com força de corte, de ($r^2 = 0,60$) da dureza (Monnin) com a força de corte, de ($r^2 = 0,60$) para módulo de elasticidade

na compressão e de ($r^2 = 0,59$) para módulo de elasticidade no cisalhamento. Os autores explicam que a relação de cada uma das propriedades avaliadas com as respectivas forças de corte para as espécies estudadas, são complementares no entendimento dos diversos fatores que podem ter influência sobre a força de corte.

Pelo fato da madeira ser um material de origem biológico e estruturalmente complexo, o estudo dos diversos fatores que influenciam seu corte, não é algo simples. A presença de depósitos de minerais abrasivos nas células, teor de resina, porosidade, dimensões das fibras, orientação da grã, presença de nós etc. São todas características relacionadas à composição anatômica da madeira, que têm grande influência na qualidade da superfície, na eficiência dos processos de transformação, bem como nos esforços envolvidos no processo de corte da madeira (KOCH, 1964; KOLLMANN; COTÊ JÚNIOR, 1984; PANSHIN; ZEEUW, 1980; SILVA et al., 2005).

Moura, Cool e Hernandez (2010) avaliando o efeito do corte oblíquo e faceamento sobre a estrutura anatômica das espécies, *Acer saccharum* Marsh., *Quercus rubra* L. e *Pinus strobus* L. observaram que o dano celular foi consideravelmente maior no faceamento que em corte oblíquo, e que esse dano foi manifestado na forma de distorção lateral, flexão e ruptura dos tecidos, os danos celulares superficiais apresentaram padrões semelhantes para todas as espécies estudadas, porém a gravidade desse dano, foi bastante variável em função da espécie e das condições de corte. Os autores explicaram ainda que quando ocorria “deslocamento das células” em virtude de um dos processos de usinagem utilizado, era provável que este acontecesse na lamela média ou próximo a ela sem, no entanto rasgar a parede celular. Para Fruhmann et al. (2003) e Thuvander e Berlund (2000) “divisão celular” ou “descamação celular” são termos também usados para descrever esse processo.

A celulose fornece resistência e rigidez à célula, mas seu percentual é baixo na lamela média, além disso, deve-se ressaltar que a orientação das fibras de celulose na lamela média e na parede primária é irregular, o que desfavorece o processo de descamação celular durante o corte (MOURA; COOL; HERNANDEZ, 2010; THUVANDER; BERLUND, 2000).

Gonçalves e Néri (2005) ressaltam que a variabilidade na morfologia das células no lenho de uma mesma árvore, notadamente evidenciados pela presença de madeira juvenil e adulta, são variáveis que devem ser consideradas no estudo da força de corte, pois provavelmente terão influência nos diversos processos de usinagem. Os mesmos autores avaliando a força de corte ortogonal em lenho juvenil e adulto de *Pinus taeda*, observaram que a força paralela foi em média 33,4% superior para a madeira da zona adulta para o corte 90°-0°, e 12% superior para o corte 90°-90°, os resultados foram atribuídos a diferenças anatômicas entre a madeira juvenil e adulta.

Moura, Cool e Hernandez (2010) observaram que em comparação com *Acer saccharum* Marsh. e *Quercus rubra* L., a fibrilação (pacotes de microfibrilas arrancadas da parede celular durante o corte da madeira) foi visivelmente mais grave em *Pinus strobus* L., devido às suas paredes celulares mais finas e menos resistentes, principalmente nas regiões do lenho inicial. Já a descamação celular foi mais frequentemente descrita nas espécies que apresentaram paredes celulares mais espessas, devido a sua maior rigidez, o que resulta em elevada resistência a ruptura (FRUHMANN et al., 2003; KEUNECKE; STANZL-TSCHEGG; NIEMZ, 2007).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material biológico

Foram analisados três materiais genéticos, sendo *Corymbia citriodora* Hill & Johnson, espécie proveniente de plantio seminal da empresa Cenibra S.A. e dois híbridos naturais de *Eucalyptus urophylla*, MN463 e VM04, ambos provenientes de plantios comerciais da empresa V&M florestal Ltda (Tabela 1).

Tabela 1 Relação dos materiais e descrição da área de coleta

| Material genético | Coordenadas geográficas | Clima - Köppen |
|-------------------------------------|--|-------------------------------|
| MN463 - <i>Eucalyptus urophylla</i> | 19° 16' 54" S 44° 24' 32" W | Tropical, com estação seca |
| VM04 - <i>Eucalyptus urophylla</i> | Altitude: 761 m | |
| <i>Corymbia citriodora</i> | 19° 28' 8" S 42° 32' 12" W Altitude: 231 m | Tropical, com estação seca |

Foram amostradas 9 árvores, sendo 3 por material genético, que no momento do abate apresentavam 7 anos de idade. As características dendrométricas das árvores selecionadas encontram-se apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 Diâmetros e altura comercial média das árvores avaliadas de *Eucalyptus* e *Corymbia*

| Material genético | Diâmetro (cm) | | | Altura comercial (m) |
|-------------------------------------|---------------|-------|------|----------------------|
| | Base | Meio | Topo | |
| MN463 - <i>Eucalyptus urophylla</i> | 20,34 | 14,23 | 4,60 | 30,45 |
| VM04 - <i>Eucalyptus urophylla</i> | 19,45 | 13,34 | 4,70 | 29,45 |
| <i>Corymbia citriodora</i> | 17,88 | 12,56 | 4,30 | 22,65 |

De cada árvore foi retirada apenas uma tora de 3,0 m de comprimento, com diâmetro médio de 9,5 cm e que se localizava entre 4,3 e 7,3 m do solo.

Na região basal de cada tora foram retirados dois discos. O primeiro com 3 cm de espessura foi utilizado para a determinação da densidade básica e o segundo, com 1 cm de espessura, para caracterização anatômica do material.

3.2 Desdobro das toras

Todas as toras foram desdobradas na Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira (DCF/UFLA). Retirou-se um pranchão central de 3 m de comprimento e 5 cm de espessura, em cada tora para realização dos ensaios de energia específica de corte. Esses pranchões centrais foram cortados ao meio, ao longo de seu comprimento, de maneira que cada porção foi utilizada na realização dos ensaios de energia específica de corte longitudinal (90°-0°) e transversal (0°-90°), respectivamente.

3.3 Caracterização anatômica da madeira

Os discos destinados as análises anatômicas do lenho foram processados no Laboratório de Usinagem da Madeira (DCF/UFLA). Destes discos foram obtidas baguetas com secção de 1,5 x 1,5 cm e comprimento igual ao raio, ou seja, no sentido medula-casca. Das baguetas obtidas foram retirados cubos com arestas de 1,5 cm, da medula para a casca. O híbrido VM04 apresentou cinco posições radiais, o híbrido MN463 apresentou sete posições radiais e a espécie *Corymbia citriodora* apresentou seis posições radiais. Todas as análises anatômicas foram realizadas no Laboratório de Anatomia da Madeira (DCF/UFLA).

Para a descrição microscópica do lenho utilizou-se a metodologia descrita pela International Association of Wood Anatomists - IAWA (1989). Na coloração e na montagem das lâminas histológicas foi utilizada a técnica de Johansen (1940) e para o preparo do material macerado foi utilizado o método descrito por Franklin (1945).

Foram realizadas 30 mensurações para cada parâmetro anatômico avaliado. Nos cortes histológicos foram quantificados os elementos de vaso quanto ao número/mm² e ao seu diâmetro, em µm, e os raios quanto à altura e largura, em µm. Já no material macerado foram quantificados os elementos de vaso, quanto ao comprimento (µm), as fibras quanto ao comprimento, largura total e diâmetro do lume, em µm. A partir desses dados, foram calculados a espessura da parede, fração parede e coeficiente de rigidez das fibras, conforme as Equações 2, 3 e 4, respectivamente.

$$E_p = \frac{L_g \cdot D_l}{2} \quad (2)$$

$$F_p = \frac{2e}{L_g} \times 100 \quad (3)$$

$$C_r = \frac{D_l}{L_g} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

C = comprimento, em μm ;

E_p = espessura da parede, em μm ;

DI = diâmetro do lume, em μm ;

L_g = largura da fibra, em μm ;

F_p = fração parede da fibra, em %;

C_r = coeficiente de rigidez, em %.

Objetivando-se estimar a porção de parede celular disponível por mm^2 , desenvolveu-se uma fórmula matemática (Equação 5), baseada nos valores de frequência e diâmetro médio de vasos e fração parede das fibras e desconsiderando a porção de células parenquimatosas no lenho. A porção de parede disponível no lenho foi estimada em percentual.

$$FPT = \left[1 - \left(F_v \times \frac{\pi D_v^2}{4} \right) \right] \times F_p \quad (5)$$

Em que:

FPT = fração parede total do lenho, em %

F_v = número de vasos por mm^2 ;

D_v = diâmetro médio dos elementos de vaso, em mm;

F_p = fração parede das fibras, em %.

3.4 Densidade básica e umidade

Os discos destinados a determinação da densidade básica do lenho foram processados no Laboratório de Usinagem da Madeira (DCF/UFLA). Desses

discos obtiveram baguetas com secção 2,0 x 3,0 cm e comprimento igual ao raio. Das baguetas obtidas foram produzidos corpos de prova devidamente orientados nas direcções, radial, tangencial e axial, retirados de 1,5 em 1,5 cm, no sentido medula-casca. Esses corpos de prova possuíam dimensão aproximada de 2,0 x 1,5 x 3,0 cm, sendo a ultima dimensão no sentido das fibras. A determinação da densidade básica foi realizada segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997).

Para a determinação da umidade utilizou-se a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Para tanto, foram retirados corpos de prova simultaneamente aos ensaios de energia específica de corte, de forma aleatória, ao longo de toda a extensão do corte.

3.5 Processamento mecânico do material

Para se obter o consumo da energia específica no corte longitudinal (90° - 0°) e transversal (0° - 90°) o material foi processado com serra circular de carrinho de 7,5 CV. A espessura dos cortes foi definida em 5 mm, considerada igual a espessura dos dentes da serra utilizada (Figura 2). Essa definição foi estabelecida para reduzir os efeitos das tensões internas da madeira.

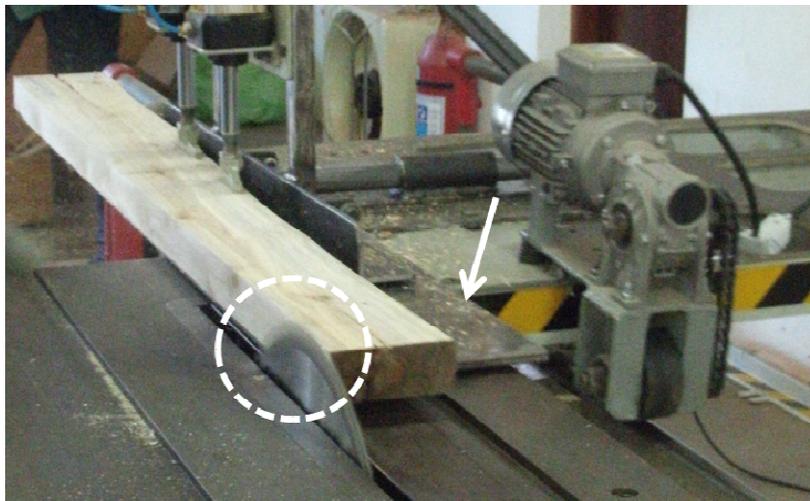


Figura 2 Corte longitudinal (90° - 0°) de 5 mm espessura, realizado com a mesma espessura do dente da serra (circulo tracejado)

Nota: Mesa adaptada para obtenção da energia específica no corte longitudinal (seta).

Para a obtenção da energia específica de corte longitudinal, no sentido medula-casca, em pontos específicos do lenho (a cada 5 mm) adaptou-se uma mesa à serra circular de carrinho (Figura 2). O sistema desenvolvido permitiu a fixação dos pranchões sobre a mesa, tornando a operação segura e também permitiu obter velocidades de avanço e de corte controladas.

Devido às características intrínsecas do corte transversal (Figura 3) em que a serra circular, em um único corte, processa a madeira em toda sua variação da medula para a casca, não foi possível obter as médias da energia específica de corte para as diferentes regiões do lenho. Semelhante ao corte longitudinal, o corte transversal também foi executado com 5 mm, igual a espessura dos dentes da serra utilizada.



Figura 3 Corte transversal (0° - 90°) de 5 mm espessura, realizado com a mesma espessura do dente da serra

Os parâmetros de processamento da madeira foram padronizados conforme trabalhos de Gontijo (2012) e Souza et al. (2011). Para tanto, se baseou no menor consumo da energia específica de corte, para a madeira de *Eucalyptus* spp, obtido pelos referidos autores. Assim, foi utilizada velocidade de avanço de 17 m.min^{-1} , velocidade de corte de 46 m.s^{-1} , rotação do eixo porta ferramenta de 2200 min^{-1} e serra circular nova (sem desgaste do dente) de 400 mm de diâmetro, com 24 dentes tipo alterno (WZ) e de espessura de 5 mm.

3.5.1 Coleta de dados

Os parâmetros, rotação do eixo porta ferramentas (min^{-1}), tensão de saída do motor (Volts), corrente de saída do motor (Amperes), torque do motor (% do torque maximal do sensor), foram monitorados em tempo real por um inversor de frequência WEG, modelo CFW 08, equipado com interface de comunicação serial (KSD CFW08), software Super Driver[®] e microcomputador. A comunicação entre o inversor de frequência e o microcomputador foi feita por meio do módulo de interface serial RS-232 PC/Drive, essa interface permitiu a transmissão dos dados durante o processamento, cuja parametrização e monitoramento foram realizadas pelo *software SuperDrive*. Todos os parâmetros selecionados foram coletados simultaneamente, em intervalo de tempo de 200 milissegundos (BRAGA, 2011; OLIVEIRA; SILVA; MARTINS, 2008). Posteriormente, foram geradas tabelas que permitiram observar o comportamento dos parâmetros coletados durante processamento mecânico da madeira, nos diferentes cortes.

Pelo fato do inversor de frequência não captar valores superiores a 150% do torque nominal do motor da máquina, que representa a saturação do sinal, foi realizada uma simulação do sinal completo (Gráfico 1). Observa-se que um sinal triangular pode ser constituído a partir de dois lados retos, de inclinação calculada e uma base horizontal. Considerou-se que a ponta do triângulo estima o percentual extrapolado do máximo torque nominal do motor. Utilizou-se função polinomial do 1º grau, $y = ax + b$. Em que, a é o coeficiente angular e b o coeficiente linear. Este último representa o ponto em que a reta corta o eixo y .

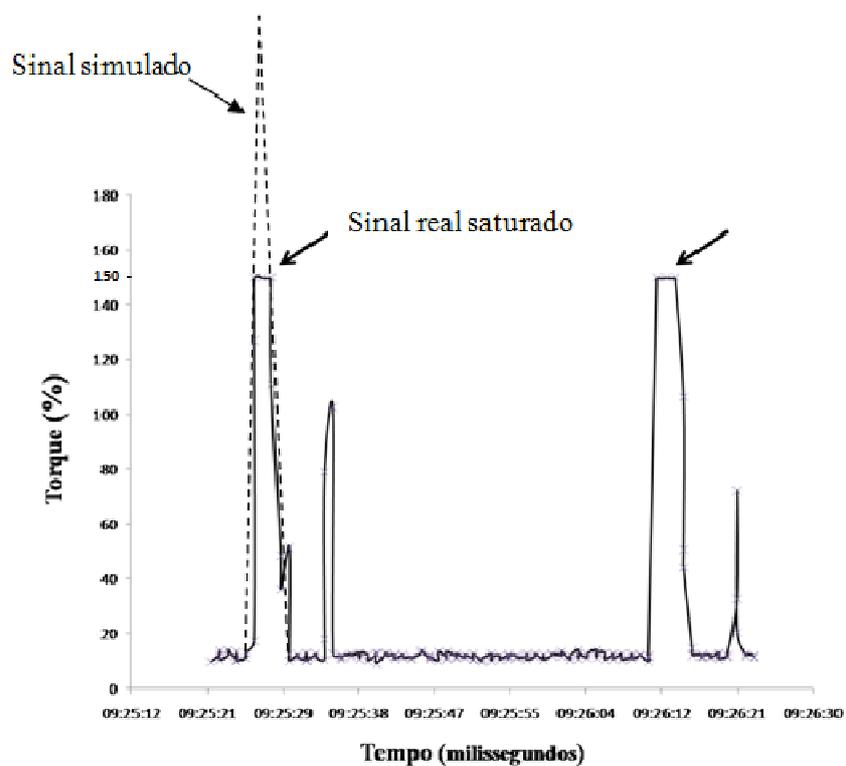


Gráfico 1 Perfil do torque do motor gerado no corte longitudinal (90° - 0°), com a estabilização dos valores em 150% (patamar) e a simulação do sinal pela estimativa matemática (linha tracejada)

Observa-se no Gráfico 1 que o pico é formado a partir da intersecção de duas retas, uma da direita e outra da esquerda, evidenciando o ponto máximo do torque. Para estimar o valor máximo dessa intersecção utilizou-se a Equação 6. Vale ressaltar que os valores calculados para a energia específica de corte, a partir do valor estimado de torque máximo, não correspondem à energia específica de corte real da madeiras processadas e sim apenas uma estimativa extrapolada.

$$a^D \cdot x + b^D = a^E \cdot x + b^E \quad (6)$$

Em que:

$ax^D + b^D$ = equação da reta da direita;

$ax^E + b^E$ = equação da reta da esquerda.

Dessa forma para o cálculo dos coeficientes a^D e a^E (Equação 6) que representam as inclinações das retas do triângulo, selecionou-se sempre o menor e o maior valor de abrupta ascendência e descendência, para cada reta. Esses representam a faixa de torque em que ocorria efetivamente o corte da madeira (Tabela 3).

Os valores utilizados na Equação 6 são os mesmos fornecidos pelo inversor de frequência, que se apresentam em percentagem do valor do torque nominal do motor. Desta forma, os valores estimados (Equação 6) para o máximo torque do motor também são expressos em percentuais, não se apresentando em N*m. Assim, vê-se a necessidade de conversão desses dados para possibilitar os cálculos de energia específica de corte. Segundo WEG (2008), o torque nominal do motor pode ser obtido conforme Equação 7.

Tabela 3 Exemplo dos valores de torque selecionados (sublinhado) de abrupta ascendência e descendência do início e do final do corte da madeira, respectivamente

| Tempo | Rotação (rpm) | Corrente (A) | Tensão (V) | Torque (%) | |
|----------|---------------|--------------|------------|--------------|---------------------------------|
| 08:18:25 | 3457 | 7,75 | 206 | 17,8 | Ocioso |
| 08:18:25 | 3456 | 7,84 | 206 | 16,8 | |
| 08:18:25 | 3456 | 7,68 | 206 | 17,1 | Descartado |
| 08:18:26 | 3456 | 7,90 | 206 | 19,2 | |
| 08:18:26 | 3456 | 7,78 | 206 | <u>14,7</u> | Dados coletados durante o corte |
| 08:18:32 | 3456 | 14,44 | 207 | <u>150,0</u> | |
| 08:18:33 | 3457 | 16,74 | 206 | 150,0 | Selecionado |
| 08:18:33 | 3455 | 17,36 | 206 | 150,0 | |
| 08:18:34 | 3455 | 18,83 | 207 | 150,0 | Selecionado |
| 08:18:34 | 3456 | 18,77 | 207 | 150,0 | |
| 08:18:35 | 3456 | 23,01 | 207 | 150,0 | Selecionado |
| 08:18:35 | 3456 | 23,01 | 207 | 150,0 | |
| 08:18:36 | 3456 | 26,12 | 207 | <u>150,0</u> | Selecionado |
| 08:18:37 | 3456 | 26,12 | 207 | 40,1 | |
| 08:18:37 | 3456 | 26,12 | 207 | 77,1 | Selecionado |
| 08:18:38 | 3455 | 7,82 | 206 | <u>13,7</u> | |
| 08:18:38 | 3455 | 7,74 | 206 | 16,1 | Ocioso |
| 08:18:39 | 3454 | 7,83 | 206 | 15,7 | |
| 08:18:39 | 3455 | 7,71 | 206 | 15,4 | Descartado |
| 08:18:39 | 3455 | 7,88 | 206 | 16,4 | |

$$T_{nom} = 9,55 * \frac{P_{nom}}{N_{nom}} \quad (7)$$

Em que:

T_{nom} = torque nominal do motor (N*m);

P_{nom} = potência nominal do motor (Watts);

N_{nom} = rotação nominal do motor (rpm).

O motor utilizado no experimento possui potência nominal de 5.500 W e rotação nominal de 3.500 min⁻¹. Assim, o torque nominal do motor foi de 15,01

N*m. Contudo, o valor percentual do torque, em N*m, corresponde a uma fração do torque nominal, conforme descrito na Equação 8 (WEG, 2008).

$$T_{mec} = T_{nom} * \frac{T}{100} \quad (8)$$

Em que:

T_{mec} = torque mecânico do motor (N*m);

T_{nom} = torque nominal do motor (Watts);

T = valores de torques obtidos no monitoramento (%).

Os valores obtidos a partir da função representativa do máximo torque do motor, em %, foram convertidos para torque mecânico, em N*m. Assim esses novos valores puderam ser aplicados nos cálculos da máxima energia específica de corte, segundo as Equações 9, 10 e 11.

$$Potência = \frac{T_{mec} * n * 0,0014 * 736}{1000} \quad (9)$$

$$E = \left(\frac{Potência * C}{V_f} \right) * 60 \quad (10)$$

$$Es = \frac{E}{c * e * K} \quad (11)$$

Em que:

Potência = potência de corte (kW);

T_{mec} = torque mecânico do motor (kgf*m);

n = rotação (rpm).

E = energia (kj);

C = comprimento do corte (m);

V_f = velocidade de avanço (m.min⁻¹)

Es = energia específica (kJ.cm⁻³);

c = comprimento da peça no sentido do corte (cm);

e = espessura da peça (cm);

K = espessura do dente da ferramenta (cm).

3.6 Análise estatística

Na avaliação das características da madeira foram realizadas análises de variância (ANAVA) considerando-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC). Os fatores analisados foram o material genético e a posição radial. Para a comparação múltiplas das médias utilizou-se o Teste de média Scott-Knott, a 5% de significância.

De forma preliminar às análises de variância foi realizado o teste de homogeneidade de variância de Bartlett, a 5% de significância, para todas as características da madeira. Nas variáveis analisadas não foram observados desvios em relação a esse pressuposto da ANAVA, validando assim os resultados estatísticos encontrados.

Foram realizadas também análises de regressão e dos desvios para avaliar as relações funcionais entre a estrutura anatômica mensurada do lenho ou a densidade básica com energia específica de corte transversal (0°-90°) e longitudinal (90°-0°).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variabilidade anatômica do material analisado

Os valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação para os parâmetros anatômicos avaliados dos híbridos naturais de *Eucalyptus urophylla* (MN463 e VM04) e da espécie *Corymbia citriodora*, encontram-se na Tabela 1A (Anexos).

De forma geral os resultados das análises anatômicas, a partir dos cortes histológicos e material macerado, observaram -se que:

O híbrido MN463 apresentou poros/elementos de vaso, com variação de 5-**13**-27 poros por mm²; diâmetro com variação de 36-**93**-160 µm e comprimento com variação de 123-**347**-689 µm. Raios/parênquima radial, comprimento com variação de 104-**239**-476 µm; largura com variação de 5-**16**-27 µm. Fibras, comprimento com variação de 484-**875**-1321 µm; largura com variação de 9-**18**-33 µm; diâmetro do lume com variação de 3-**10**-22 µm; espessura da parede com variação de 1-**4**-8 µm; fração parede com variação de 19-**42**-77 %; coeficiente de rigidez com variação de 23-**57**-81. Fração parede total do lenho com variação de 16-**38**-74 %.

O híbrido VM04 apresentou poros/elementos de vaso, com variação de 1-**11**-23 poros por mm²; diâmetro com variação de 55-**115**-167 µm e comprimento com variação de 128-**387**-804 µm. Raios/parênquima radial, comprimento com variação de 91-**213**-394 µm; largura com variação de 5-**12**-24 µm. Fibras, comprimento com variação de 415-**886**-1632 µm; largura com variação de 7-**16**-27 µm; diâmetro do lume com variação de 3-**9**-18 µm; espessura da parede com variação de 2-**3**-7 µm; fração parede com variação de

20-**43**-78 %; coeficiente de rigidez com variação de 21-**57**-80. Fração parede total do lenho com variação de 18-**38**-72 %.

A espécie *Corymbia citriodora* apresentou poros/elementos de vaso, com variação de 2-**8**-18 poros por mm²; diâmetro com variação de 44-**102**-154 µm e comprimento com variação de 105-**289**-606 µm. Raios/parênquima radial, comprimento com variação de 82-**182**-366 µm; largura com variação de 5-**15**-29 µm. Fibras, comprimento com variação de 411-**878**-1492 µm; largura com variação de 8-**14**-24 µm; diâmetro do lume com variação de 2-**6**-18 µm; espessura da parede com variação de 2-**4**-7 µm; fração parede com variação de 27-**56**-85%; coeficiente de rigidez com variação de 15-**43**-79. Fração parede total do lenho com variação de 19-**53**-81%.

Por meio da análise de variância pode ser observado que, com exceção do comprimento das fibras, o efeito do material genético analisado foi significativo, a 5% de significância pelo Teste F, para todos os parâmetros anatômicos avaliados (Tabela 4).

O efeito da posição radial de amostragem foi significativo para a frequência dos vasos, o diâmetro e o comprimento dos elementos de vasos, o comprimento dos raios e das fibras e a largura e a espessura da parede das fibras. Já a largura dos raios, diâmetro do lume, fração parede, coeficiente de rigidez das fibras e fração parede total da madeira apresentaram efeito não significativo (Tabela 4).

Com relação ao efeito da interação entre materiais genéticos analisados e posição radial de amostragem, observa-se que somente foi significativo para os parâmetros anatômicos diâmetro dos vasos, comprimento dos elementos de vaso e comprimento de raios (Tabela 4). Dessa forma, avaliou-se o efeito da posição radial dentro dos materiais genéticos para verificar os seus padrões de variação radial.

Tabela 4 Resumo da Análise de variância para frequência dos vasos (Fv), diâmetro dos vasos (Dv), comprimento dos elementos de vaso (Cv), comprimento dos raios (Cr), largura dos raios (Lr), comprimento das fibras (Cf), largura da fibra (Lf), diâmetro do lume das fibras (DLf), espessura da parede das fibras (Ep), fração parede das fibras (FPf), coeficiente de rigidez das fibras (CRf) e fração parede total do lenho (FPT)

| Causa da Variação | Gl | Quadrado Médio | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----|--------------------------|----------|----------|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------|---------------------|
| | | Elementos de vaso | | | Parênquima radial | | Dimensões das fibras | | | | | FPT | |
| | | Fv n°/mm ² | Dv µm | Cv µm | Cr µm | Lr µm | Cf µm | Lf µm | DLf µm | Ep µm | FPf % | CRf | FPT % |
| M | 2 | 145** | 2114** | 40600** | 14920** | 64** | 514 ^{ns} | 65** | 85** | 1,4** | 1099** | 1099** | 0,1** |
| P | 6 | 43** | 751** | 17782** | 1020** | 2 ^{ns} | 10900** | 12** | 6 ^{ns} | 0,6** | 58 ^{ns} | 58 ^{ns} | 0,005 ^{ns} |
| M x P | 11 | 3 ^{ns} | 223** | 5326** | 775** | 2 ^{ns} | 16124 ^{ns} | 8 ^{ns} | 5 ^{ns} | 0,07 ^{ns} | 2 ^{ns} | 2 ^{ns} | 8 ^{ns} |
| Erro | 34 | 98,3 | 62,8 | 1891 | 358,9 | 3,3 | 8678 | 1,7 | 3,7 | 0,1 | 52,4 | 52,4 | 0,004 |
| CVe (%) | - | 15 | 7 | 12 | 8 | 12 | 10 | 8 | 20 | 10 | 15 | 13 | 15 |

** significativo a 5% de significância pelo Teste F; n.s = não significativo a 5% de significância pelo Teste F; M = material genético; P = posição radial de amostragem; CVe = coeficiente de variação experimental.

4.2 Variabilidade anatômica entre os materiais genéticos

O híbrido MN463 apresentou, em média, os maiores valores de frequência de vasos por mm², de comprimento e largura dos raios, de diâmetro do lume e de coeficiente de rigidez das fibras. Entretanto, em média, apresentou menores valores de diâmetro dos vasos, de comprimento dos elementos de vaso e de fração parede das fibras (Gráfico 2).

O híbrido VM04 apresentou, em média, os maiores valores de diâmetro dos vasos, de comprimento dos elementos de vaso e de comprimento e largura das fibras. Já os menores valores apresentados foram para a largura dos raios, a espessura da parede das fibras e a fração total de parede do lenho (Gráficos 2).

A espécie *Corymbia citriodora* apresentou, em média, os maiores valores de espessura e fração parede das fibras e de fração total de parede do lenho. Esse material genético apresentou, em média, os menores valores de comprimento dos vasos e dos raios, da largura, diâmetro do lume e coeficiente de rigidez das fibras (Gráficos 2).

Para o comprimento das fibras não foram observadas diferenças significativas entre os três materiais genéticos analisados.

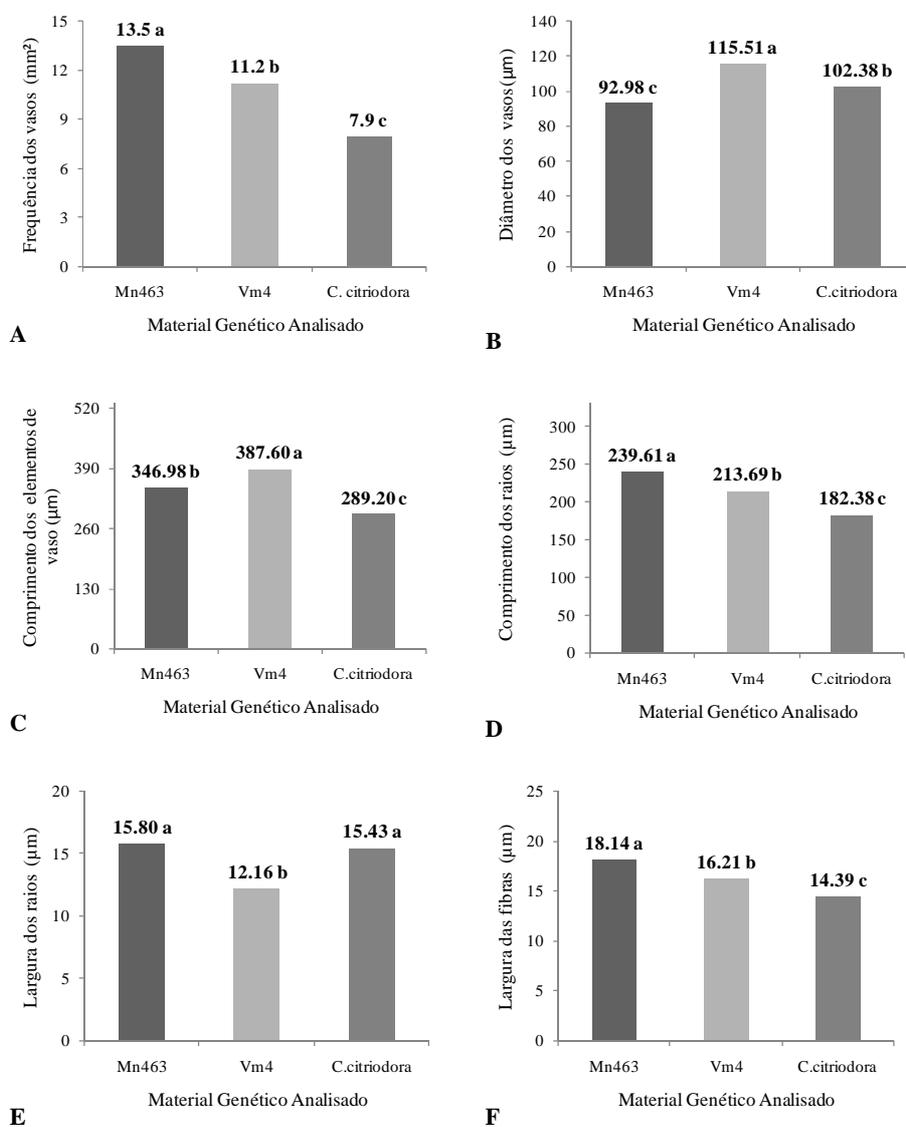
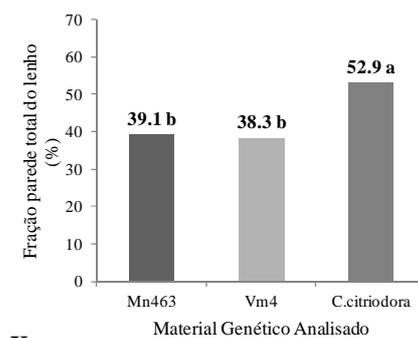
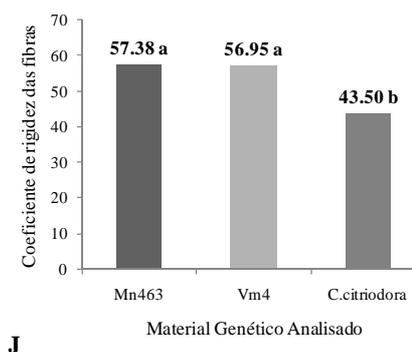
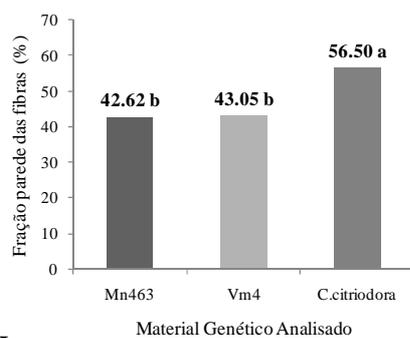
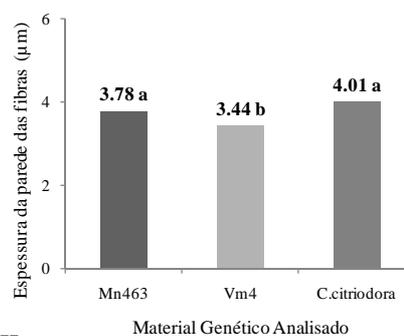
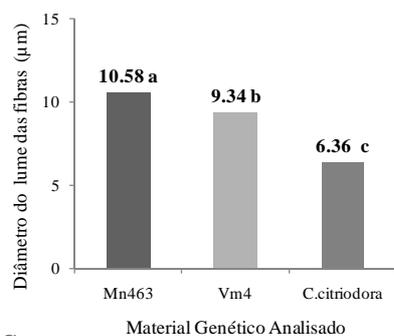


Gráfico 2 Comparação das médias dos parâmetros anatômicos entre os materiais genéticos

(...continua...)

“Gráfico 2, conclusão”



Nota: Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo Teste de Scott-Knott, a 5% de significância.

4.3 Variabilidade anatômica radial dos materiais genéticos

O desdobramento da Análise de variância para a posição radial de amostragem dos parâmetros anatômicos encontra-se listados nas Tabelas 2A, 3A e 4A (anexos). Observa-se que modelo de variação medula-casca para esses parâmetros anatômicos encontram-se em conformidade com a literatura.

Para o diâmetro dos vasos no híbrido VM04, observou-se um padrão de variação crescente no sentido medula-casca e no híbrido MN463 os valores se mostraram crescente até 7 cm da medula (70% da dimensão entre a medula e a casca) diminuindo nas duas últimas posições amostradas. Já para espécie *Corymbia citriodora* não foram observadas diferenças significativas entre as posições radiais (Gráfico 3).

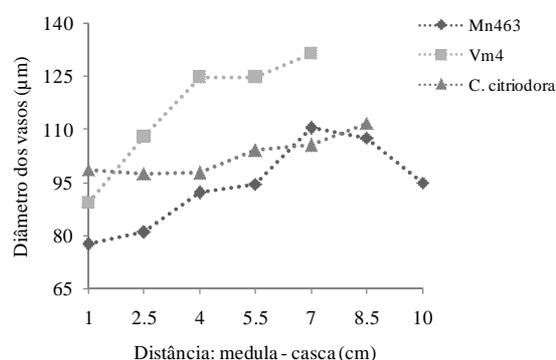


Gráfico 3 Variação radial do diâmetro dos vasos

Para o comprimento dos elementos de vaso, ambos os híbridos apresentaram um padrão de variação crescente no sentido medula-casca. Entretanto a espécie *Corymbia citriodora* não apresentou diferenças significativas entre as posições radiais (Gráfico 4).

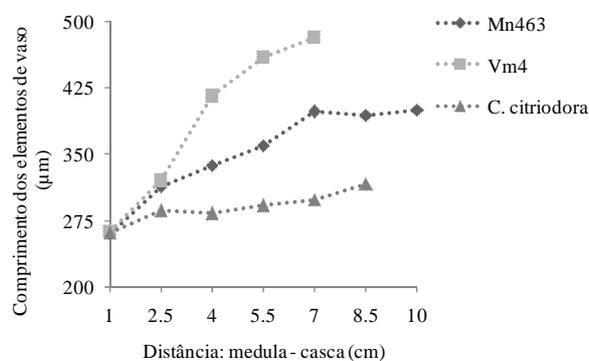


Gráfico 4 Variação radial do comprimento dos elementos de vaso

Para o comprimento dos raios, ambos os híbridos, apresentaram um aumento significativo no sentido medula-casca, já a espécie *C. citriodora* não apresentou diferenças significativas entre as posições radiais (Gráfico 5).

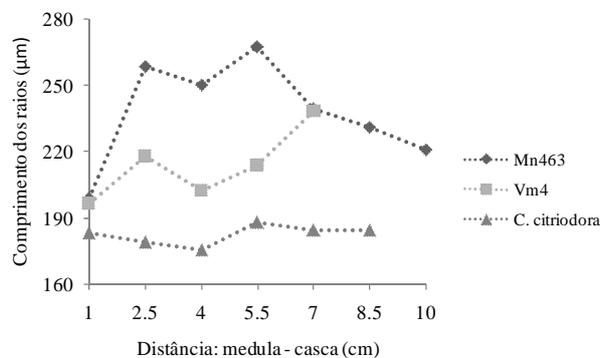


Gráfico 5 Variação radial do comprimento dos raios

Observou-se diminuição da frequência de vasos por mm^2 , no sentido da medula para a casca, para todos os materiais genéticos analisados. Deve-se frisar que a variação decrescente desses valores foi mais acentuada para os híbridos, MN463 e VM04 (Gráfico 6). Ramírez et al. (2009) estudando a variação radial

de alguns parâmetros anatômicos, na direção medula-casca da madeira de *Eucalyptus globulus*, no Chile, também observaram diminuição da frequência dos vasos. Para Davison (1972) a redução na frequência dos vasos no sentido medula-câmbio é resultado da diferença anatômica. Essa diferença é principalmente de caráter quantitativo entre o lenho juvenil e o adulto. No lenho juvenil, a frequência de vasos é mais elevada, principalmente pelo fato do ritmo de crescimento mais acentuado desse período.

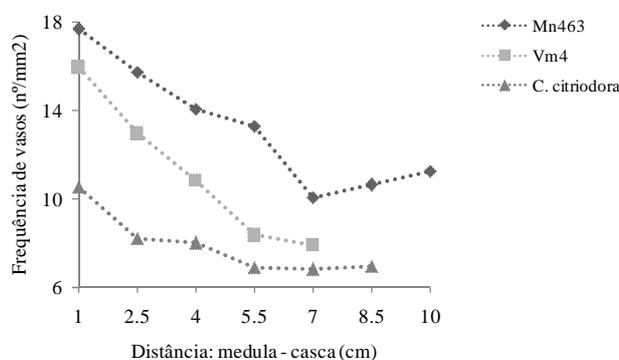


Gráfico 6 Variação radial da frequência de vasos por mm²

São escassos os estudos que abordam a variação da dimensão das células dos raios ao longo do sentido medula-casca. Para a largura dos raios observou-se maior homogeneidade dos valores médios entre as posições radiais, em todos os materiais genéticos analisados (Gráfico 7) e não foi detectada diferença significativa para essa característica. Zanon et al. (2009), trabalhando com *Liquidambar styraciflua* e Santos et al. (2011), trabalhando com *Astronium graveolens*, também observaram variação não significativa na dimensão dos raios no sentido medula-casca.

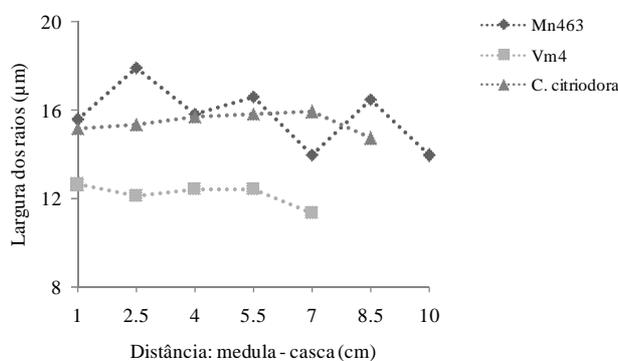


Gráfico 7 Variação radial da largura dos raios

O comprimento das fibras apresentou variação no sentido medula-casca, em que foi observada tendência de aumento de seus valores médios. Semelhantemente ao ocorrido para a frequência dos vasos, a espécie *Corymbia citriodora* apresentou menor variabilidade dos valores médios, se comparados com os híbridos MN463 e VM04 (Gráfico 8).

A literatura está repleta de trabalhos científicos direcionados ao estudo da biometria das fibras, particularmente das madeiras do gênero *Eucalyptus* sp. Segundo Davidson (1972), para este gênero, as dimensões das fibras podem explicar aproximadamente 76,5 das propriedades da madeira que possuem variações no sentido medula-casca, fato que ressalta a grande relevância de estudo desta célula. Como exemplos, para o comprimento das fibras observa-se, para várias espécies de *Eucalyptus* sp., aumento dessa característica com aumento da idade do cambium vascular (JORGE; QUILHO; PEREIRA, 2000; MALAN; HOON, 1992; MIRANDA; ALMEIDA; PEREIRA, 2001; MIRANDA; PEREIRA, 2002; MIRANDA; TOME; PEREIRA, 2003; WILKES, 1988). Para Quilhó, Miranda e Pereira (2006) e Veenin et al. (2005) nas espécies de reflorestamento é comum observar aumento no comprimento das fibras a medida que a árvore cresce em diâmetro.

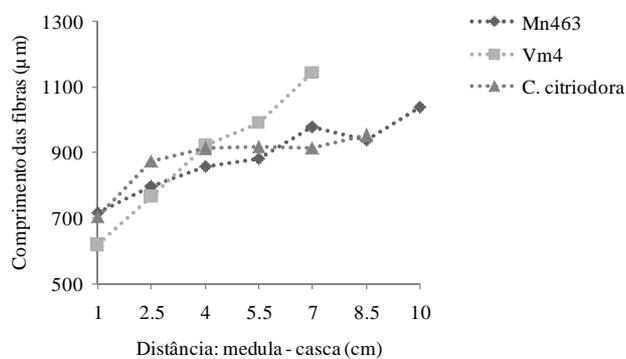


Gráfico 8 Variação radial do comprimento das fibras

A largura das fibras apresentou tendência de aumento dos valores médios no sentido medula-casca, para todos os materiais genéticos. Também, foi observada variação menos pronunciada em *Corymbia citriodora* (Gráfico 9).

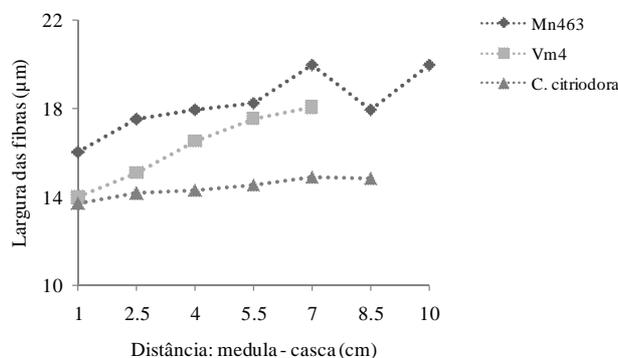


Gráfico 9 Variação radial da largura das fibras

Para a espessura da parede (Gráfico 10), a fração parede das fibras (Gráfico 11), a fração total de parede no lenho (Gráfico 12), o diâmetro do lume (Gráfico 13) e o coeficiente de rigidez das fibras (Gráfico 14) foram observadas

variações não significativas, pelo Teste de Scott-Knott, a 5% de significância, para nenhum dos materiais genéticos analisados.

O aumento do diâmetro das fibras e da espessura da parede no sentido medula-casca foi descrito por Grzeskowiak, Turner e Megown (2000) para dois clones de *E. grandis* x *E. urophylla* e em um clone de *E. grandis* x *E. camaldulensis*; Quilhó, Miranda e Pereira (2006) obtiveram o mesmo resultado para um híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*. Bamber (1985) e Tsuchiya e Furukawa (2008) frisaram ainda que, estudos que avaliem as dimensões das fibras são importantes para segregar o lenho juvenil do adulto, bem como para explicar certas características tecnológicas da madeira no sentido radial.

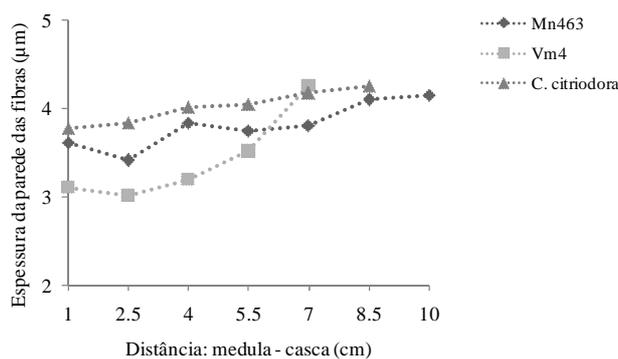


Gráfico 10 Variação radial espessura da parede das fibras

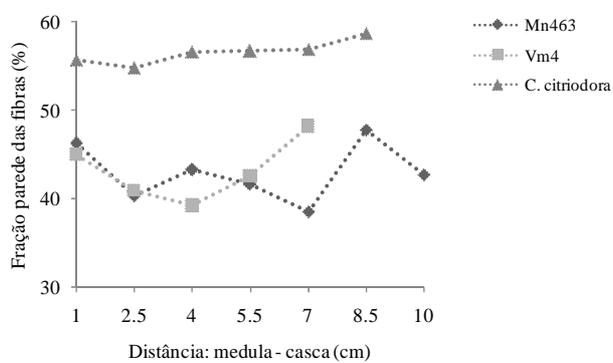


Gráfico 11 Variação radial da fração parede das fibras

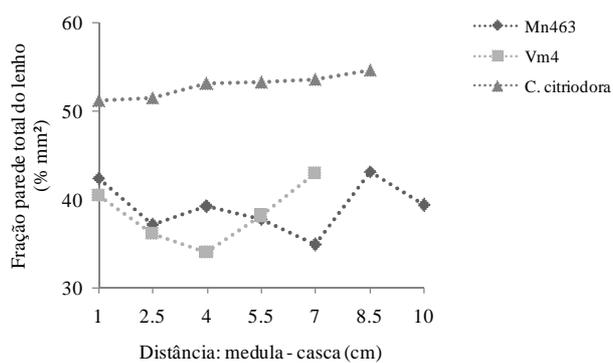


Gráfico 12 Variação radial da fração parede total do lenho

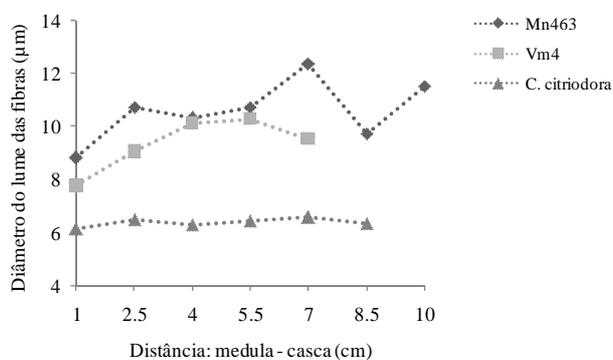


Gráfico 13 Variação radial diâmetro do lume das fibras

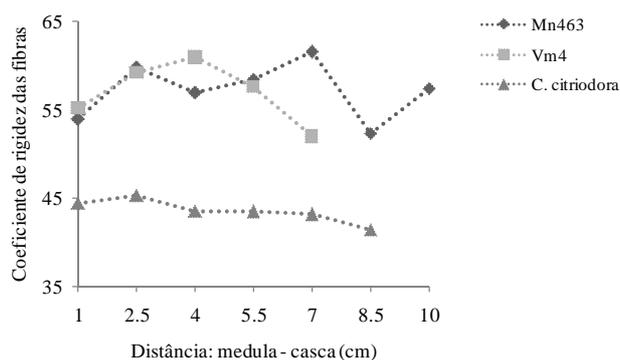


Gráfico 14 Variação radial do coeficiente de rigidez das fibras

4.4 Variabilidade da energia específica de corte e da densidade básica

A Tabela 5A (anexo) apresenta os valores estimados médios, mínimos, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação para a energia específica, densidade básica e umidade dos híbridos naturais de *Eucalyptus urophylla* (MN463 e VM04) e da espécie *Corymbia citriodora*.

De forma geral os valores obtidos para consumo da energia específica de corte, longitudinal e transversal, da densidade básica e também da umidade demonstraram que para:

O híbrido MN463 apresentou consumo de energia específica no corte transversal (0° - 90°) com variação de 0,078-**0,087**-0,096 Kj.cm^{-3} ; no corte longitudinal (90° - 0°) apresentou variação de 0,118-**0,250**-0,510 Kj.cm^{-3} . Para a densidade básica a variação foi de 0,38-**0,48**-0,57 g.cm^{-3} . Para a umidade a variação foi de 0,49 -**0,57**-0,68.

O híbrido VM04 apresentou consumo de energia específica no corte transversal (0° - 90°) com variação de 0,082-**0,085**-0,085 Kj.cm^{-3} ; no corte longitudinal (90° - 0°) apresentou variação de 0,143-**0,240**-0,487 Kj.cm^{-3} . Para a densidade básica a variação foi de 0,42-**0,47**-0,54 g.cm^{-3} . Para a umidade a variação foi de 0,24 -**0,31**-0,31.

A espécie *Corymbia citriodora* apresentou consumo de energia específica no corte transversal (0° - 90°) com variação de 0,086-**0,091**-0,096 Kj.cm^{-3} ; no corte longitudinal (90° - 0°) apresentou variação de 0,107-**0,220**-0,384 Kj.cm^{-3} . Para a densidade básica a variação foi de 0,41-**0,56**-0,72 g.cm^{-3} . Para a umidade a variação foi de 0,27 -**0,32**-0,36.

O resumo da Análise de variância demonstrou que para a energia específica de corte longitudinal (90° - 0°) o efeito do material genético, das posições radiais amostradas e da interação foram não significativos, pelo Teste F, a 5% de significância (Tabela 5). Já para a densidade básica observaram-se diferenças significativas entre os materiais genéticos e entre as posições radiais, não havendo interação significativa entre estes fatores (Tabela 5). O material genético *Corymbia citriodora* foi que apresentou, estatisticamente, maior densidade básica, em comparação aos dois híbridos MN463 e VM04 (Gráfico 15).

Tabela 5 Resumo da Análise de variância efetuada para a máxima energia específica do corte longitudinal ($E_{s_{\max}} 90^{\circ}-0^{\circ}$) e densidade básica (Db)

| Causa da Variação | GL | Quadrado Médio | |
|--------------------|----|---|-----------------------------|
| | | $E_{s_{\max}} 90^{\circ}-0^{\circ}$ (Kj.cm ⁻³) | Db (g/cm ⁻³) |
| Material (M) | 2 | 0,001 ^{ns} | 2114,5 ^{**} |
| Posição radial (P) | 6 | 0,007 ^{ns} | 751,5 ^{**} |
| M x P | 11 | 0,006 ^{ns} | 223,1 ^{ns} |
| Erro | 34 | 0,007 | 62,8 |
| CVe (%) | - | 15,600 | 7,7 |

** significativo a 5% de significância pelo Teste F; n.s = não significativo a 5% de significância pelo Teste F; CVe = coeficiente de variação experimental

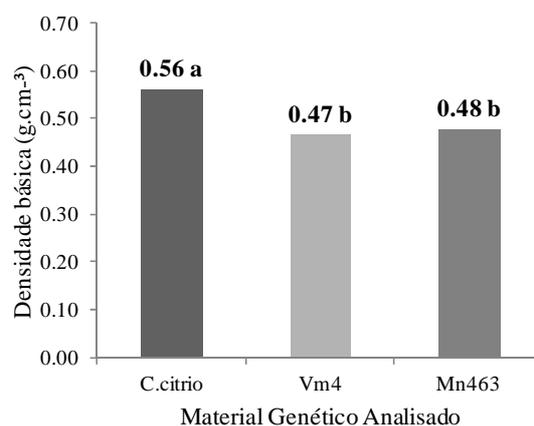


Gráfico 15 Influência do material genético na densidade básica da madeira

Nota: Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo Teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Os valores médios observados para a energia específica do corte longitudinal foram cerca de três vezes maior que os valores observados no corte transversal (Gráfico 16). Estes dados são corroborados por Woodson (1979), que afirmou que as forças no corte $0^{\circ}-90^{\circ}$ são geralmente menores que aquelas desenvolvidas no corte $90^{\circ}-0^{\circ}$.

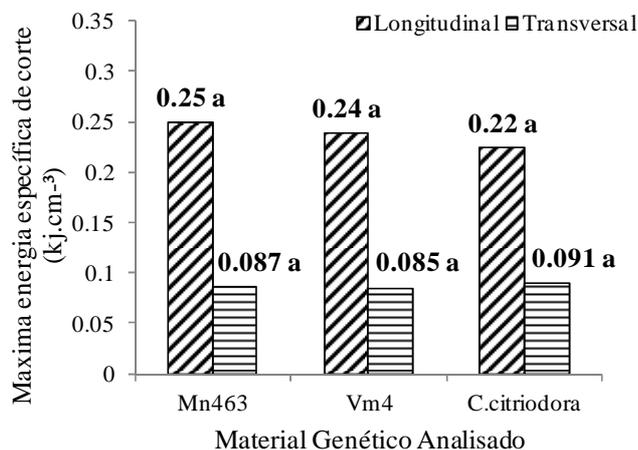


Gráfico 16 Influência do material genético no consumo da máxima energia específica de corte

Nota: Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo Teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Souza et al. (2011) estudando a influência de parâmetros de usinagem no consumo de energia específica de corte transversal obtiveram maior valor de consumo de energia específica de corte de 0,052 KJ.cm⁻³, processando madeira roliça do híbrido de *Eucalyptus urophylla* (MN463), que se trata de mesmo material genético utilizado nessa pesquisa. Contudo, o valor aqui encontrado foi de 0,087 KJ.cm⁻³, também para o corte 0°-90°, representando um acréscimo de 67%. Deve-se considerar que os primeiros autores trabalharam com velocidade corte de 70 m.s⁻¹ e nesse trabalho utilizou-se velocidade de corte de 46 m.s⁻¹.

4.4.1 Variabilidade radial do consumo da energia específica de corte e da densidade básica

Observou-se oscilação dos valores médios da energia específica de corte entre as posições radiais amostradas, para todos os materiais genéticos analisados. A maior variabilidade ocorreu para a espécie *Corymbia citriodora* e no híbrido MN463. No híbrido VM04, os valores médios tenderam a aumentar no sentido medula-casca, porém com queda a 4 cm da medula (Gráfico 17). Gonçalves e Néri (2005) avaliando a força de corte ortogonal em lenho juvenil e adulto de *Pinus taeda*, observaram que a força longitudinal (90° - 0°) foi em média 33,4% superior para a madeira da zona adulta e 12% superior para o corte 90° - 90° , na mesma região adulta. Esses resultados foram atribuídos às diferenças anatômicas entre a madeira juvenil e adulta.

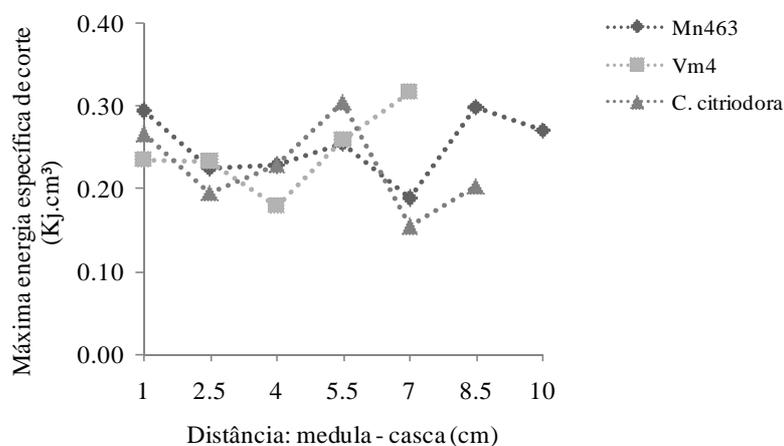


Gráfico 17 Variação radial da máxima energia específica de corte longitudinal dos materiais genéticos analisados

O padrão de variação radial (Gráfico 18) observado para a densidade básica está de acordo com o prescrito em literatura, para espécies provenientes

de floresta plantada, que é crescente no sentido da medula para a casca (BALLARIN; PALMA, 2003; LOPES et al., 2011; OLIVEIRA; SILVA; MARTINS, 2007; PANSHIN; ZEEUW, 1980). O estudo da densidade acrescido dos dados obtidos da estrutura anatômica do lenho dos materiais genéticos analisados indicou que, aos 7 anos de idade, essas madeiras ainda encontram-se no período de juvenilidade do lenho.

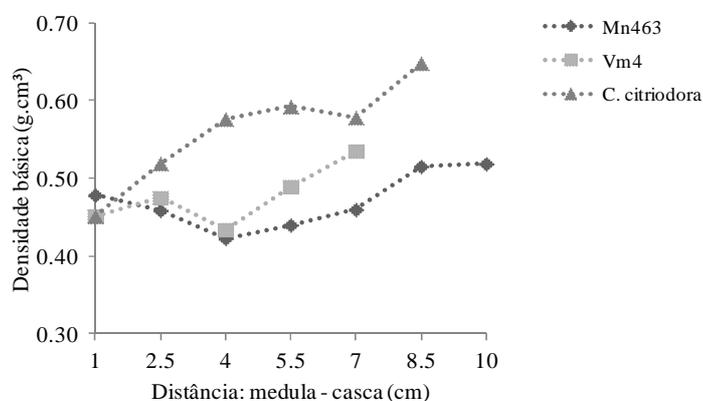


Gráfico 18 Perfil da variação radial da densidade básica

4.5 Correlação entre a estrutura anatômica do lenho e a densidade básica da madeira com a máxima energia específica de corte

As estatísticas inerentes aos modelos ajustados dos valores relativos do consumo da máxima energia específica no corte transversal (0° - 90°) e longitudinal (90° - 0°) para os parâmetros anatômicos ou densidade básica encontram-se apresentados nas Tabelas 6A, 7A, 8A e 9A (Anexos).

Pode-se observar (Tabela 6A – Anexo) que no corte transversal, para todos os materiais genéticos analisados, as relações funcionais obtidas apresentaram pequena precisão. Esse fato pode estar relacionado a forma como

os dados foram processados. Conforme já mencionado anteriormente, no corte transversal não é possível obter os valores da energia específica de corte nas diferentes posições radiais ao longo da variação medula-casca. Assim, os valores médios usados na interação não são específicos para cada material genético dentro de cada posição. A pequena variação dos valores médios das estruturas anatômicas no sentido medula-casca para as árvores de *Corymbia citriodora* quando comparados com os híbridos MN463 e VM04 pode ter anulado as possíveis correlações existentes entre a estrutura anatômica com o consumo da energia específica de corte.

Diferentemente, no corte longitudinal procedeu-se a correlação entre o consumo da energia específica de corte com a anatomia e densidade básica para cada material genético separadamente. Verificou-se para o híbrido MN463 que o coeficiente de determinação dos modelos ajustados para as variáveis, densidade básica, comprimento dos raios e diâmetro do lume das fibras foi de 0,38; 0,30 e 0,55, respectivamente. Esses valores são considerados baixo (Gráficos 19 e 20) e moderado (Gráfico 21). Para os parâmetros fração parede das fibras, coeficiente de rigidez das fibras e fração parede total do lenho, os coeficientes de determinação foram de 0,81; 0,81 e 0,85, respectivamente. Todos esses coeficientes foram considerados alto (Gráficos 22 a 24). Para os demais parâmetros anatômicos avaliados as relações funcionais foram muito baixas ou até mesmo nulas.

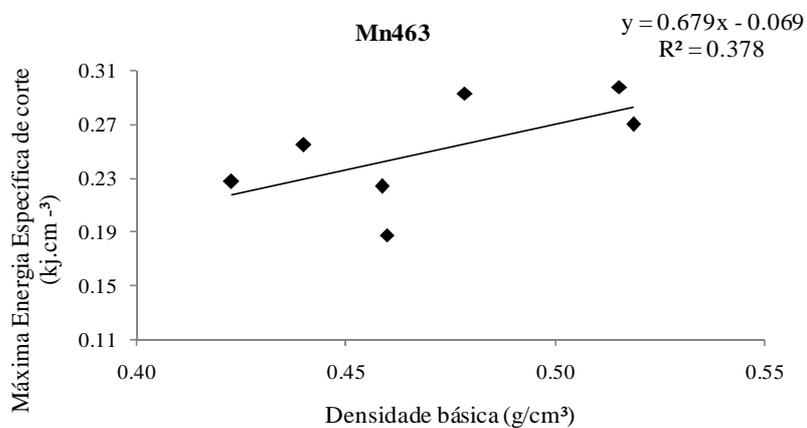


Gráfico 19 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a densidade básica, para o híbrido MN463

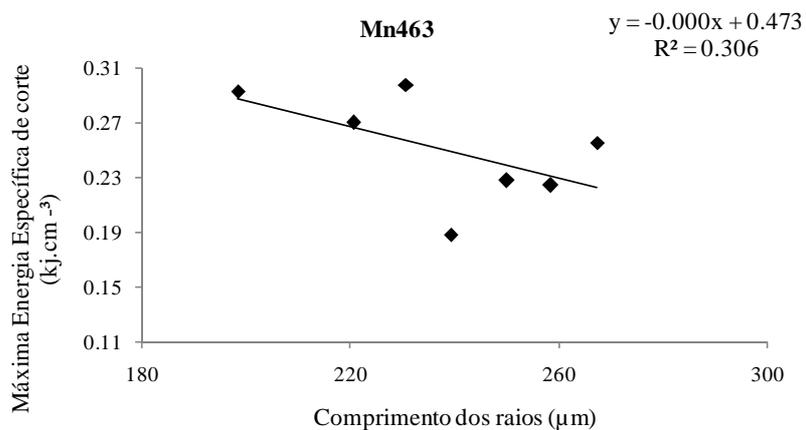


Gráfico 20 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com o comprimento dos raios, para o híbrido MN463

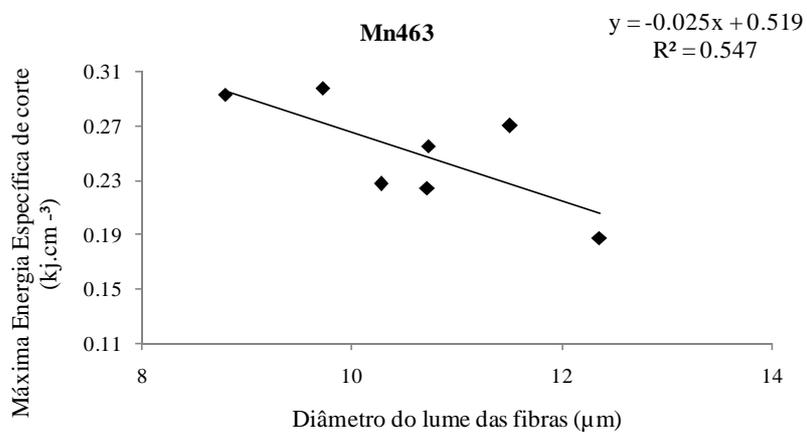


Gráfico 21 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com o diâmetro do lume das fibras, para o híbrido MN463

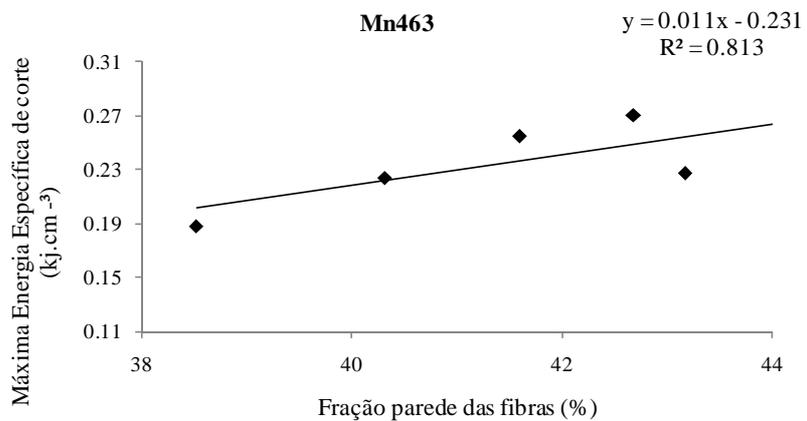


Gráfico 22 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a fração parede das fibras, para o híbrido MN463

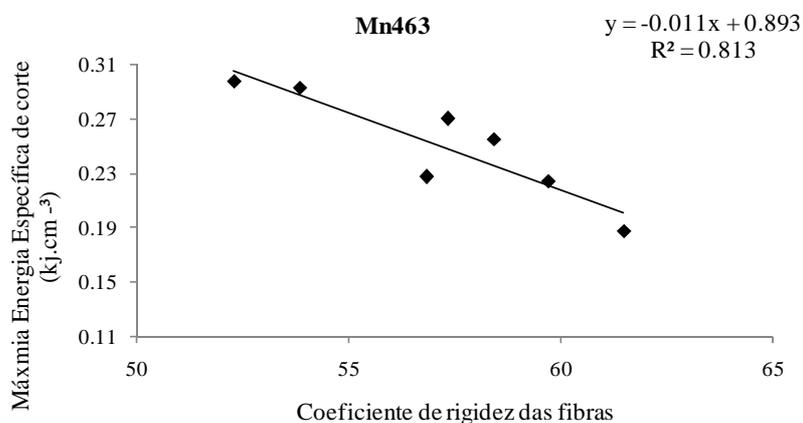


Gráfico 23 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com o coeficiente de rigidez das fibras, para o híbrido MN463

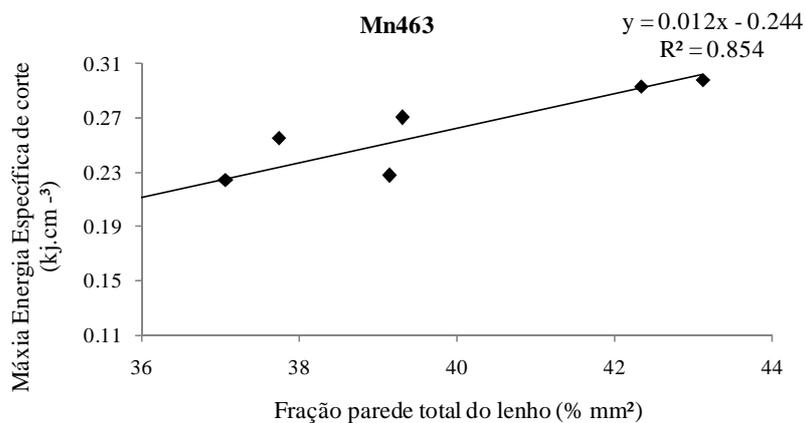


Gráfico 24 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a fração parede total do lenho, para o híbrido MN463

Para o híbrido VM04 também se observou correlações significativas com a energia específica de corte. Os coeficientes de determinação dos modelos ajustados para a variável comprimento dos raios (Gráfico 25), largura dos raios (Gráfico 26) e espessura da parede das fibras (Gráfico 27) foram de 0,68; 0,58 e

0,69, respectivamente. Todos esses valores foram considerados moderados. Já os coeficientes de determinação considerados satisfatórios foram para as variáveis densidades básicas (Gráfico 28), fração parede das fibras (Gráfico 29), coeficiente de rigidez das fibras (Gráfico 30) e fração parede total do lenho (Gráfico 31), os quais foram de, respectivamente, 0,93; 0,79; 0,79 e 0,78. Observa-se neste híbrido que, diferentemente do MN463, a densidade básica também foi considerada satisfatória.

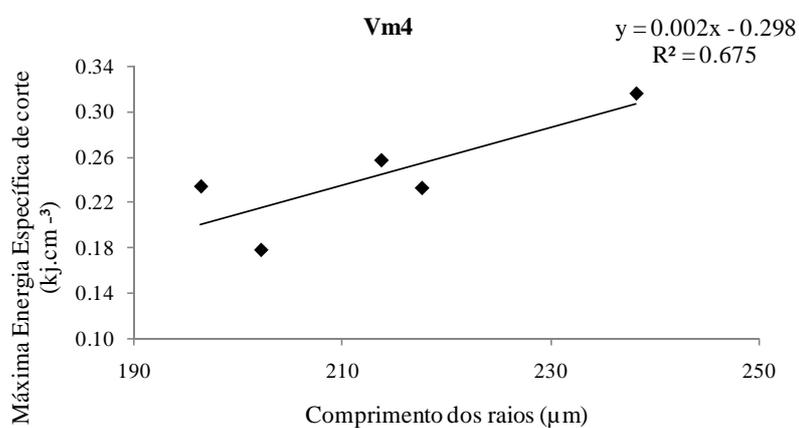


Gráfico 25 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com o comprimento dos raios, para o híbrido VM04.

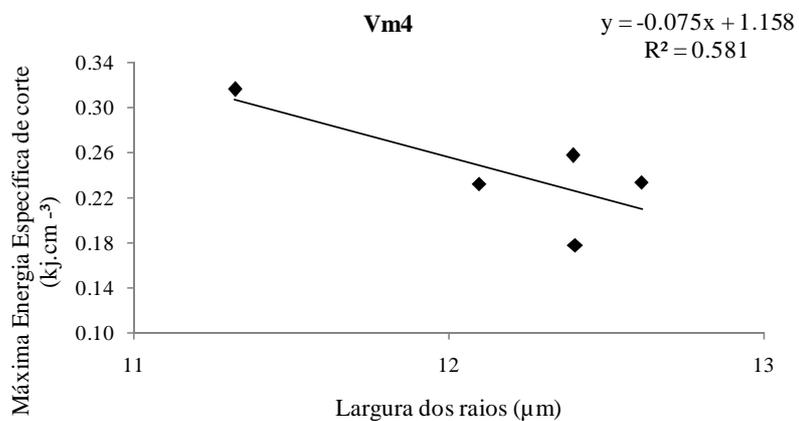


Gráfico 26 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a largura dos raios, para o híbrido VM04

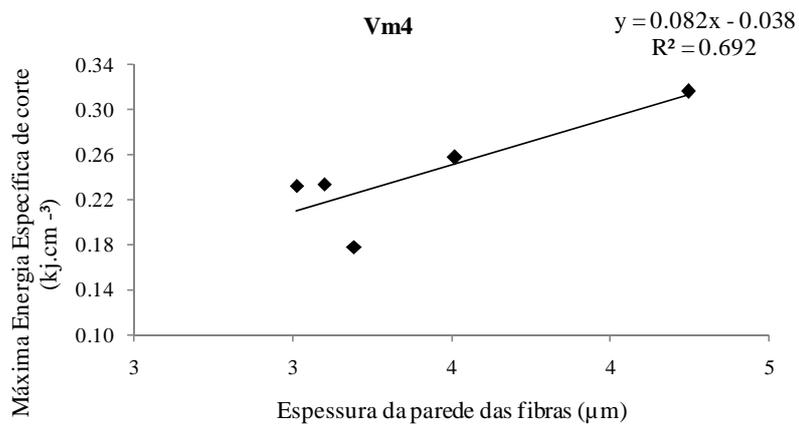


Gráfico 27 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a espessura da parede das fibras, para o híbrido VM04

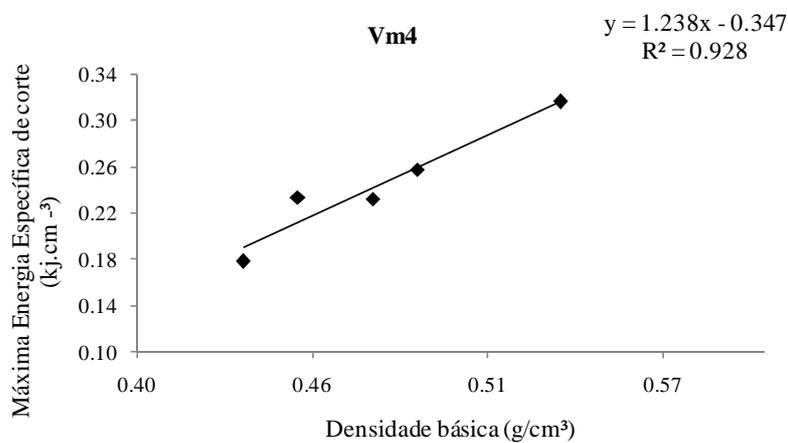


Gráfico 28 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a densidade básica, para o híbrido VM04

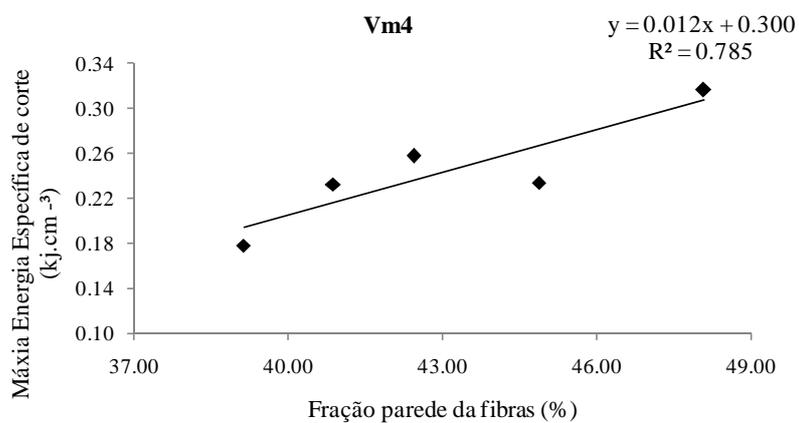


Gráfico 29 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a fração parede das fibras, para o híbrido VM04

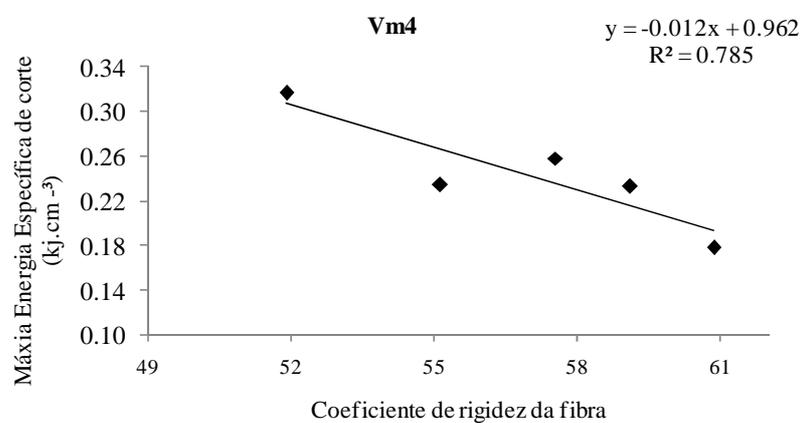


Gráfico 30 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com o coeficiente de rigidez das fibras, para o híbrido VM04

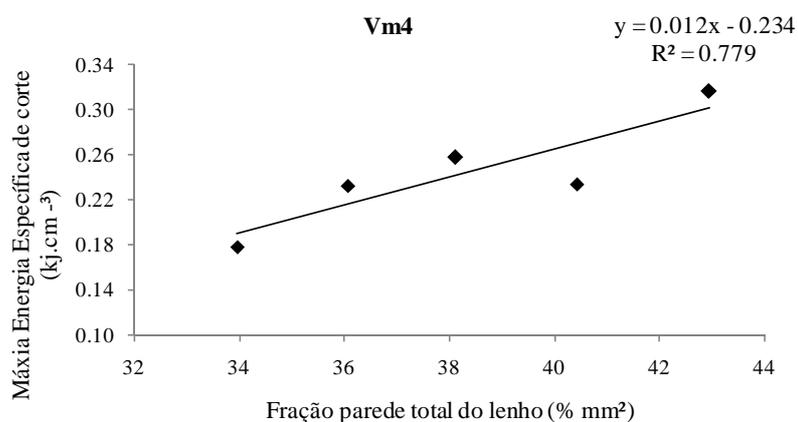


Gráfico 31 Relação funcional entre a máxima energia específica de corte com a fração parede total do lenho, para o híbrido VM04

Para a espécie *Corymbia citriodora* não foram observadas correlações significativas para nenhuma das variáveis analisadas. As baixas correlações encontradas com a estrutura anatômica do lenho podem ser devidas que essas características apresentaram uniformidade de seus dados ao longo da variação

radial. Para a densidade básica, devido à variação oscilante dos valores da energia específica de corte no sentido de análise, também não foi observada a correlação significativa.

Para o híbrido MN463, a densidade apresentou com a energia específica de corte correlação positiva, porém baixa ($R^2=0,38$). Já no híbrido VM04 esta característica mostrou correlação satisfatória, positiva e alta ($R^2=0,93$). Fischer (1999) e McKenzie et al. (1999) descreveram uma correlação linear positiva e muito boa entre a densidade e força de corte nas espécies analisadas. Entretanto, Chardin (1958) e Koch (1964) concluíram que esta correlação de fato existe, mas que, em virtude da grande heterogeneidade da madeira, somente a densidade não é fator suficiente para prever com exatidão as forças envolvidas no seu processo de corte. Assim, para o híbrido VM04 a densidade apresentou-se importante na predição do consumo da energia específica de corte.

Eyma, Meausoone e Martin (2001) analisando a influência dos lenhos inicial e tardio e da densidade na força de corte ($90^\circ-0^\circ$) da madeira de *Pinus sylvestris*, observaram correlação moderada da força de corte com a densidade ($R^2=0,41$). Observa-se que o valor encontrado foi semelhante ao detectado nesse trabalho, para o híbrido MN463. Os citados autores explicaram que a heterogeneidade do material lenhoso, notadamente representada por diferenças celulares entre o lenho inicial e tardio pode ser responsável por essa baixa correlação. Acredita-se que os picos de alto consumo de energia específica de corte observados no MN463 estejam relacionados com a delimitação de fibras de paredes mais espessas, a baixa frequência e o menor diâmetro dos vasos, no lenho tardio (Figura 4), que configuram maior proporção de parede celular a ser cortada, bem como densidades mais elevadas nesses lenhos.

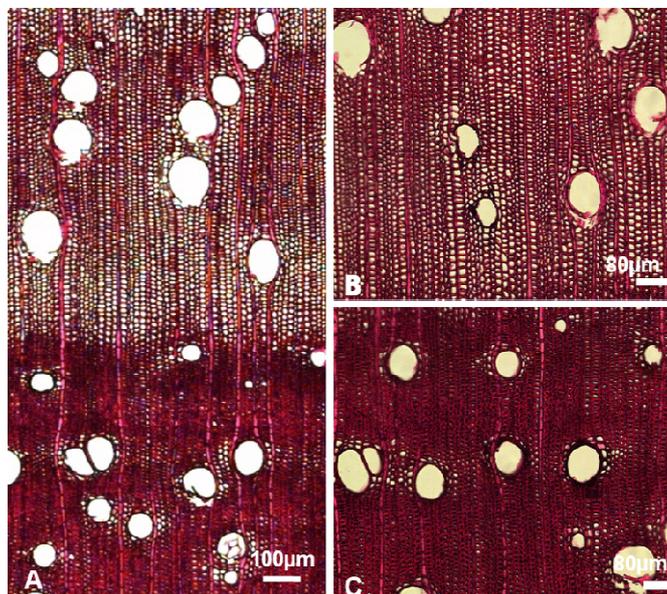


Figura 4 Micrografias transversais do híbrido MN463

Nota: A= delimitação da camada de crescimento; B= lenho inicial, com fibras de paredes mais finas e maiores lumens; C= lenho tardio com fibras mais espessas e menores lumens.

O híbrido MN463 apresentou baixa correlação negativa entre o comprimento dos raios e o consumo da energia específica de corte. Já no híbrido VM04, para a mesma característica, foi observada moderada correlação positiva. Esperava-se que pela característica morfológica dos raios, que possuem pequena fração parede (lumens grandes para paredes finas), a correlação se presente deveria ser considerada muito baixa e negativa, devido à proporção relativa no lenho, ou seja, quanto maior a altura dos raios menor seria o consumo da energia específica de corte.

Para a largura dos raios observou correlação significativa apenas para o híbrido VM04. Ela foi negativamente correlacionada com consumo da energia

específica de corte, pois quanto mais largos os raios se apresentaram no sentido medula-casca menor foi o consumo da energia específica de corte ($R^2= 0,58$).

Para o diâmetro do lume das fibras, observou-se correlação moderada ($R^2= 0,56$) somente para o híbrido MN463, que quanto maior o lume das fibras menor o consumo de energia específica de corte. Lumes maiores representam maior porção de espaços vazios e menor porção de parede celular disponível para ser cortada.

No híbrido VM04, a espessura da parede das fibras se mostrou positivamente correlacionada com o consumo da energia específica de corte, com coeficiente de determinação considerado alto ($R^2= 0,69$).

Para os parâmetros fração parede das fibras, coeficiente de rigidez das fibras e fração parede total do lenho, obteve-se relações funcionais mais precisas e altos coeficientes de determinação. Os parâmetros fração parede das fibras e fração parede total do lenho apresentaram altas correlações positivas com o consumo da energia específica de corte para ambos os híbridos MN463 e VM04. Os resultados demonstraram que de forma geral quanto maior é o percentual de parede celular maior será torque exigido do motor para cortar a madeira e conseqüentemente maior será o consumo da energia específica de corte, corroborado por Kivimaa (1950). Gonçalves e Néri (2005) avaliando a força de corte ortogonal, tipo $90^\circ-0^\circ$, em lenho juvenil e adulto de *Pinus taeda*, observaram que a força de corte foi em média 33,4% superior para a madeira da zona adulta. Esses autores atribuíram os resultados a diferenças anatômicas entre a madeira juvenil e adulta.

O coeficiente de rigidez das fibras se mostrou alto e negativamente correlacionado com a energia específica de corte (MN463 $\rightarrow R^2=0,81$ e VM04 $\rightarrow R^2=0,79$). Observou-se que quanto mais altos são os valores de coeficiente de rigidez das fibras menor será o consumo de energia específica de corte da madeira. Quanto mais flácidas eram as fibras menor foi o consumo da

energia específica de corte. Fruhmann et al. (2003) e Keunecke, Stanzl-Tschegg e Niemz (2007) informaram que quanto mais flácida é a fibra menor será sua resistência a ruptura.

5 CONCLUSÕES

- a) Foi observada interação estatisticamente significativa entre material genético e posição radial de amostragem somente para os parâmetros anatômicos: comprimento dos elementos de vaso, diâmetro dos vasos e altura dos raios;
- b) Entre as posições radiais de amostragem foi observada diferença estatística significativa para: frequência de vasos, diâmetro dos vasos, comprimento dos elementos de vasos, comprimento dos raios, comprimento, largura e espessura da parede das fibras;
- c) O único parâmetro anatômico que não diferiu entre os materiais genéticos analisados foi o comprimento das fibras;
- d) Os maiores valores de consumo de energia específica de corte foram observados no corte longitudinal (90° - 0°) comparativamente ao corte transversal (0° - 90°), com relação de três vezes;
- e) Para o corte longitudinal (90° - 0°) não foi observada interação estatisticamente significativa entre material genético e posição radial de amostragem;
- f) Para a densidade básica não foi observada interação estatisticamente significativa entre material genético e posição radial de amostragem, entretanto diferenças foram observadas entre os materiais genéticos analisados;
- g) Não foram observadas, no corte 0° - 90° , correlações significativas entre o consumo da energia específica com a estrutura anatômica da madeira e a densidade básica;
- h) Para corte 90° - 0° correlações significativas foram encontradas para o híbrido MN463, com a densidade básica, o comprimento dos raios, o

diâmetro do lume, a fração parede, o coeficiente de rigidez das fibras e a fração parede total do lenho;

- i) Para o híbrido VM04, correlações significativas foram encontradas com a densidade, o comprimento e a largura dos raios, a espessura da parede, a fração parede, o coeficiente de rigidez das fibras e a fração parede total do lenho;
- j) Para a espécie *Corymbia citriodora* não foram observadas correlações significativas com nenhuma das variáveis analisadas;
- k) A fração parede, o coeficiente de rigidez das fibras e a fração parede total do lenho mostraram-se como parâmetros anatômicos capaz de prever o consumo da energia específica de corte, o tipo 90°-0°.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- _____. **NBR 7190**: projetos de estrutura de madeiras. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência de madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 371-380, maio/jun. 2003.
- BAMBER, R. K. The wood anatomy of eucalypts and papermaking. **Appita**, Victoria, v. 38, n. 3, p. 210-216, 1985.
- BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterisation of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**, New York, v. 34, n. 6, p. 517-532, Feb. 2001.
- BONDUELLE, A.; CRUZ, S. R.; SILVA, J. R. M. **Processo mecânico da madeira**. Curitiba: UFPR, 2002. 26 p.
- BRAGA, P. P. **Qualidade na usinagem e no acabamento da madeira de *Coffea arabica***. 2011. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.
- CENTRO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA E MOBILIÁRIO; SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Fundamentos teóricos da afiação e manutenção de ferramentas para a indústria madeireira e moveleira**. São José dos Pinhais, 1996. 73 p.
- CHARDIN, A. Utilisation du pendule dynamométrique dans les recherches sur le sciage des bois. **Revue Bois et Forêt des Tropiques**, Paris, v. 58, p. 49-61, mars/avr. 1958.

COSTES, J. P. et al. Orthogonal cutting mechanics of maple: modeling a solid wood-cutting process. **Journal of Wood Science**, London, v. 50, n. 1, p. 28-34, 2004.

CRUZ, C. R. da. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus* para a utilização na indústria madeireira**. 2000. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

DAVIDSON, J. **Variation, association and inheritance of morphological and wood characters in a improvement programe for *Eucalyptus deglupta***. 1972. 263 f. Thesis (Ph.D. in Processing of Forest Products) - Australian National University, Canberra, 1972.

ERSOY, A.; ATICI, U. Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks. **Diamond and Related Materials**, New York, v. 13, n. 1, p. 22-37, Jan. 2004.

ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. São Paulo: E. Blucher, 1974. 284 p.

EYMA, F.; MEAUSOONE, P. J.; MARTIN, P. Influence of the ransitional zone of wood species on cutting forces in the router cutting process (90-0). **Holz Als Roh-Und Werkstoff**, Berlin, v. 59, n. 6, p. 489-490, Dec. 2001.

_____. Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process. **Journal of Materials Processing Technology**, Norwell, v. 148, n. 2, p. 220-225, May 2004.

FAN, Z. X.; CAO, K. F.; BECKER, P. Axial and radial variations in xylem anatomy of angiosperm and conifer trees in yunnan, China. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 30, n. 1, p. 1-13, 2009.

FANG, K. Y. et al. Variation of radial growth patterns in trees along three altitudinal transects in north central China. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 30, n. 4, p. 443-457, 2009.

FISCHER, R. Wood cutting simulation: a program to experiment without a machine. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 14., 1999, Finland. **Proceedings...** Finland: Fields Institute, 1999. p. 553-562.

FRANKLIN, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood: resin composites, and a new macerating method for wood. **Nature**, London, v. 155, p. 51, 1945.

FRUHMANN, K. et al. Mode I fracture behaviour on the growth ring scale and cellular level of spruce (*Picea abies* L. Karst.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) loaded in the TR crack propagation system. **Holzforschung**, Berlin, v. 57, n. 6, p. 653-660, 2003.

FUJIWARA, S. Anatomy and properties of Japanese hardwoods: II., variation of dimensions of ray cells and their relation to basic density. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 13, n. 4, p. 397-402, 1992.

FUJIWARA, S. et al. Anatomy and properties of Japanese hardwood: I., variation of fibre dimension and tissue proportion and their relation to basic density. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 12, n. 4, p. 419-424, 1991.

GARCIA, R. et al. Correlações entre características das fibras, densidade aparente, velocidade de propagação do som e resistência ao cisalhamento na madeira de *Caesalpinia echinata* (pau-brasil). **Instituto Florestal**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 115-120, 2010.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. Bauru: USC, 2000. 242 p.

GONÇALVES, R.; NERI, A. C. Orthogonal cutting forces in juvenile and mature *Pinus taeda* wood. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p. 310-318, July/Aug. 2005.

GONTIJO, T. G. **Energia específica em cortes transversais em madeira roliça de *Eucalyptus* sp.** 2012. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

GORCZYCA, F. E. **Application of metal cutting theory**. New York: Industrial, 1987. 298 p.

GRZESKOWIAK, V.; TURNER, P.; MEGOWN, R. A. The use of densitometry and image analysis techniques to predict pulp strength properties in *Eucalyptus* plantations. In: TAPPSA CONFERENCE "AFRICAN PAPER WEEK 2000 AND BEYOND", 1., 2000, Durban. **Proceedings...** Durban: TAPPSA, 2000. 1 CD-ROM.

HOADLEY, R. B. **Understanding wood: a craftsman's guide to wood technology**. Southport: The Taunton Press, 1980. 256 p.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. List of microscope features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, p. 234-332, 1989.

ISHIGURI, F. et al. Radial variation of anatomical characteristics in *paraserianthes falcata* planted in Indonesia. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 30, n. 3, p. 343-352, 2009.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill, 1940. 523 p.

JORGE, F.; QUILHO, T.; PEREIRA, H. Variability of fibre length in wood and bark in *Eucalyptus globulus*. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 21, n. 1, p. 41-48, 2000.

KEUNECKE, D.; STANZL-TSCHEGG, S.; NIEMZ, P. Fracture characterisation of yew (*Taxus baccata* L.) and spruce (*Picea abies* L. Karst.) in the radial-tangential and tangential-radial crack propagation system by a micro wedge splitting test. **Holzforschung**, Berlin, v. 61, n. 5, p. 582-588, 2007.

KING, R. I.; HAHN, R. S. Principles of grinding. In: _____. **Handbook of modern grinding technology**. New York: Chapman and Hall, 1986. p. 30-71.

KIVIMAA, E. **Cutting force in wood Helsinki**. Helsinki: Valtioneuvoston Kirjapaino, 1950. 103 p.

KOCH, P. **Wood machining processes**. New York: Ronald, 1964. 530 p.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTE JÚNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer-Verlag, 1984. v. 1, 604 p.

KOPAC, J.; SALI, S. Wood: an important material in manufacturing technology. **Journal of Materials Processing Technology**, Norwell, v. 133, n. 1/2, p. 134-142, Feb. 2003.

LOPES, C. S. D. et al. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 315-322, 2011.

MALLAN, F. A. *Eucalyptus* improvement for lumer production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE

EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1., 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPEF/IPT, 1995. p. 1-19.

MALAN, F. S.; HOON, M. Effect of initial spacing and thinning on some wood properties of *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, Johannesburg, n. 163, p. 13-20, 1992.

MCKENZIE, W. M. Fundamental aspects of the wood cutting process. **Forest Products Journal**, Madison, v. 10, n. 9, p. 447-456, 1960.

MCKENZIE, W. M.; CVITKOVIC, P. K. R.; RINGLER, M. Towards a model predicting cutting forces and surface quality in routing layered boards. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 14., 1999, Finland. **Proceedings...** Finland: Fields Institute, 1999. p. 489-497.

MELO, A. C. A. et al. Estudo da variação da temperatura de corte no fresamento frontal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2., 2003, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2003. 1 CD-ROM.

MIRANDA, I.; ALMEIDA, M. H.; PEREIRA, H. Provenance and site variation of wood density in *Eucalyptus globulus* Labill, at harvest age and its relation to a non-destructive early assessment. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 149, n. 1/3, p. 235-240, Aug. 2001.

MIRANDA, I.; PEREIRA, H. Variation of pulpwood quality with provenances and site in *Eucalyptus globulus*. **Annals of Forest Science**, Lawrence, v. 59, n. 3, p. 283-291, Apr. 2002.

MIRANDA, I.; TOME, M.; PEREIRA, H. The influence of spacing on wood properties for *Eucalyptus globulus* Labill pulpwood. **Appita Journal**, Victoria, v. 56, n. 2, p. 140-144, Mar. 2003.

MOURA, L. F. de; COOL, J.; HERNANDEZ, R. E. Anatomical evaluation of wood surfaces produced by oblique cutting and face milling. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 31, n. 1, p. 77-88, 2010.

NÉRI, A. C. **Medidas de forças de corte na madeira de eucalipto**. 1998. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

_____. **Parâmetros de corte na usinagem de madeiras de reflorestamento.** 2003. 141 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

NÉRI, A. C.; GONÇALVES, R.; HERNANDEZ, R. E. Forças de corte ortogonal 90-0 em três espécies de madeira de eucalipto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Jaboticabal, v. 3, n. 2, p. 239-244, 1999.

NÉRI, A. C.; RAQUEL, G.; HERNANDEZ, R. E. Força de corte ortogonal 90-90° em três espécies de madeira de Eucalipto do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Jaboticabal, v. 4, n. 2, p. 275-280, 2000.

OLIVEIRA, G. M. V.; SILVA, J. R. M.; MARTINS, M. Medição de ângulos básicos de corte em serras de disco de processamento da madeira e derivados. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: UNOCHAPECÓ, 2008. 1 CD-ROM.

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

ORLOWSKI, K. et al. Sawing frozen wood with narrow kerf saws: energy and quality effects. **Forest Products Journal**, Madison, v. 59, n. 3, p. 79-83, Mar. 2009.

PALMQVIST, J.; LENNER, M.; GUSTAFSSON, S. I. Cutting-forces when up-milling in beech. **Wood Science and Technology**, New York, v. 39, n. 8, p. 674-684, Nov. 2005.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. de. **Textbook of wood technology: structure, identification, properties and uses of the commercial woods of the United States and Canada.** 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1964. 643 p.

PERSSON, S. **Mechanics of cutting plant material.** Saint Joseph: American Society of Agriculture Engineers, 1987. 288 p.

QUILHO, T.; MIRANDA, I.; PEREIRA, H. Within-tree variation in wood fibre biometry and basic density of the urograndis eucalypt hybrid (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). **IWA Journal**, Utrecht, v. 27, n. 3, p. 243-254, 2006.

RAMIREZ, M. et al. Wood anatomy and biometric parameters variation of *Eucalyptus globulus* clones. **Wood Science and Technology**, New York, v. 43, n. 1/2, p. 131-141, Feb. 2009.

REVAL SERRAS E FERRAMENTAS PARA MADEIRA. **Formatos de dentes e aplicações**. Caxias do Sul, 2009. Disponível em: <<http://www.revalserras.com.br/>>. Acesso em: 15 maio 2012.

RODRIGUES, A. R.; COELHO, R. T. Influence of the tool edge geometry on specific cutting energy at high-speed cutting. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 279-283, July/Sept. 2007.

ROSSI, S.; MORIN, H.; DESLAURIERS, A. Causes and correlations in cambium phenology: towards an integrated framework of xylogenesis. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 63, n. 5, p. 2117-2126, Mar. 2012.

SALMON, S. C. Fundamentals of grinding. In: _____. **Modern grinding process technology**. New York: McGraw-Hill, 1992. p. 89-101.

SANTOS, C. M. et al. A densidade básica e características anatômicas variam radialmente da madeira de *Astronium graveolens* Jacq. (Anacardiaceae). **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 23, n. 2, p. 191-201, 2011.

SERRA circular calçada com metal duro para madeiras. **Floresta**, Curitiba, v. 3, n. 3, p. 1-14, ago. 2006. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/floresta/article/view/5726/4166>>. Acesso em: 11 jun. 2012.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. New York: Oxford Science, 1984. 594 p.

SILVA, J. R. M. **Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden Curitiba**. 2002. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, J. R. M. et al. Influência da morfologia das fibras na usinabilidade da Madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 479-487, maio/jun. 2005.

SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F. Wood workability of *Eucalyptus grandis* in different region from pith to bark. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 25-31, jan./mar. 2007.

SOUZA, E. M. et al. Specific cutting energy consumption in a circular saw for *Eucalyptus* stands vm01 and mn463. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 109-115, jan./mar. 2011.

THUVANDER, F.; BERGLUND, L. A. In situ observations of fracture mechanisms for radial cracks in wood. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 35, n. 24, p. 6277-6283, Dec. 2000.

TOMAZELLO FILHO, M. **Formação e anatomia da madeira**: exercícios práticos. Piracicaba: ESALQ/USP, 2002. 76 p. Apostila.

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, jan./maio 1996.

TSOUMIS, G. **Wood as raw material**. Oxford: Pergamon, 1968. 288 p.

TSUCHIYA, R.; FURUKAWA, I. Radial variation in the size of axial elements in relation to stem increment in *Quercus serrata*. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 30, n. 1, p. 15-26, 2009a.

_____. Radial variation of vessel lumen diameter in relation to stem increment in 30 hardwood species. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 30, n. 3, p. 331-342, 2009b.

_____. The relationship between radial variation of wood fiber length, vessel lumen diameter and the stage of diameter growth in *Castanea crenata*. **Mokuzai Gakkaishi**, Tokyo, v. 54, n. 3, p. 116-122, 2008.

VEENIN, T. et al. Radial variations of anatomical characteristics and specific gravity in *Eucalyptus camaldulensis* clones. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 26, n. 3, p. 353-361, 2005.

WALKER, J. C. F. et al. **Primary wood processing**: principles and practice. London: Chapman & Hall, 1993. 595 p.

WEG. **Inversores de frequência**: CFW-08. Florianópolis, 2008. Disponível em: <<http://www.weg.net/files/products/4-2183.pdf>>. Acesso em: 9 jun. 2012.

WILKES, J. Variations in wood anatomy within species of *Eucalyptus*. **IAWA Bulletin**, Utrecht, v. 9, n. 1, p. 13-23, 1988.

WOODCOCK, D. W.; SHIER, A. D. Wood specific gravity and its radial variations: the many ways to make a tree. **Trees: Structure and Function**, Berlin, v. 16, n. 6, p. 437-443, Aug. 2002.

WOODSON, G. E. **Tool forces and chip types in orthogonal cutting of southern hardwoods**. Washington: USDA, 1979. 77 p. (Research Paper SO-146).

ZANON, B. R. et al. Variação de algumas propriedades físicas e anatômicas da madeira de *Liquidambar styraciflua* L. (sweet gum) em função da posição radial na tora em diferentes classes de diâmetro. **Instituto Florestal, Série Registros**, São Paulo, n. 40, p. 69-74, 2009.

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

ANEXOS

ANEXO A – TABELAS

ANEXO 1A Valores médios, mínimo, máximo, desvio padrão (Dvpad) e coeficiente de variação (Cv%) .

| *Mg | Ed | Fv n°/mm ² | Dv µm | Cv µm | Cr µm | Lr µm | Cf µm | Lf µm | DLf µm | EpF µm | FPf % | CRf (....) | FPT (%) |
|----------------------|--------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|---------------|------------|
| Mn 463 | Mínimo | 5 | 36,3 | 123,1 | 104,6 | 5,3 | 484,4 | 9,16 | 2,8 | 1,4 | 19 | 23,2 | 16,4 |
| | Máximo | 27 | 160,5 | 689,7 | 476,2 | 27,2 | 1321,3 | 33,6 | 22,5 | 7,7 | 76,8 | 80,9 | 74,0 |
| | Média | 13,5 | 92,9 | 346,9 | 239,6 | 15,8 | 875,5 | 18,1 | 10,6 | 3,8 | 42,6 | 57,4 | 38,7 |
| | Dvpad | 4,2 | 20,0 | 98,9 | 65,2 | 3,9 | 156,4 | 3,4 | 3,2 | 0,8 | 9,8 | 9,8 | 8,9 |
| | Cv% | 31 | 20 | 29 | 20 | 20 | 18 | 19 | 31 | 21 | 20 | 17 | 23 |
| Vm4 | Mínimo | 1 | 54,8 | 128,4 | 90,9 | 5,3 | 415,4 | 7,4 | 2,6 | 1,7 | 20 | 21,5 | 18,4 |
| | Máximo | 23 | 167,8 | 804,7 | 394,5 | 24,2 | 1632,3 | 27,3 | 18,0 | 7,1 | 78,5 | 80 | 71,6 |
| | Média | 11,1 | 115,5 | 387,60 | 213,7 | 12,16 | 886,2 | 16,2 | 9,3 | 3,4 | 43,0 | 56,9 | 38,2 |
| | Dvpad | 3,7 | 21,2 | 128,20 | 51,5 | 3,14 | 220,4 | 3,2 | 2,7 | 0,8 | 8,9 | 8,9 | 8,3 |
| | Cv% | 33 | 18 | 33 | 24 | 26 | 25 | 20 | 29 | 23 | 21 | 16 | 22 |
| <i>C. citriodora</i> | Mínimo | 2 | 44,1 | 105,34 | 82, | 5,35 | 410,9 | 8,4 | 1,9 | 2,3 | 20,9 | 14,8 | 19,4 |
| | Máximo | 18 | 153,8 | 605,91 | 366,6 | 29,41 | 1492,2 | 24,3 | 18,0 | 6,8 | 85,2 | 79,0 | 80,9 |
| | Média | 7,9 | 102,4 | 289,20 | 182,4 | 15,43 | 878,8 | 14,4 | 6,4 | 4,0 | 56,5 | 43,5 | 53,2 |
| | Dvpad | 2,7 | 19,7 | 83,01 | 45,9 | 4,40 | 184,6 | 2,3 | 2,4 | 0,8 | 11,6 | 11,6 | 11,4 |
| | Cv% | 34 | 19 | 29 | 25 | 29 | 21 | 16 | 37 | 21 | 21 | 27 | 21 |

* Material genético (Mg), Estatística descritiva (Ed), Frequência dos vasos (Fv), diâmetro dos vasos (Dv), comprimento dos elementos de vaso (Cv), altura dos raios (Cr), largura dos raios (Lr), comprimento das fibras (Cf), diâmetro do lume das fibras (DLf), espessura da parede das fibras (EPf), coeficiente de rigidez das fibras (CRf) e fração parede total do lenho (FPT).

ANEXO 2A Análise do desdobramento das posições radiais para cada parâmetro anatômico avaliado dentro do híbrido de *Eucalyptus urophylla* (Mn 463).

| *Mg | Pr | Fv n°/mm ₂ | Dv µm | Cv µm | Cr µm | Lr µm | Cf µm | Lf µm | DLf µm | Epf µm | FPf % | CRf | FPT (%) |
|--------|----|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|-------------|------------|
| MN 463 | 1 | 17,6 a | 77,4 c | 259,1 b | 198,4 b | 15,5 a | 716,2 b | 16,0 b | 8,79 a | 3,6 a | 46,1 a | 45,7 a | 53,8 a |
| | 2 | 15,7 a | 80,7 c | 313,2 b | 258,4 a | 17,8 a | 796,1 b | 17,5 b | 10,72 a | 3,4 a | 40,3 a | 46,4 a | 59,6 a |
| | 3 | 14,0 b | 91,9 b | 337,4 b | 250,1 a | 15,7 a | 856,5 b | 17,9 b | 10,28 a | 3,8 a | 43,1 a | 48,5 a | 56,8 a |
| | 4 | 13,2 b | 94,3 b | 359,3 a | 267,4 a | 16,5 a | 880,4 b | 18,2 b | 10,72 a | 3,7 a | 41,5 a | 49,4 a | 58,4 a |
| | 5 | 10,0 c | 110,2 a | 397,6 a | 239,4 a | 13,9 a | 977,2 a | 19,95 a | 12,35 a | 3,8 a | 38,5 a | 50,3 a | 61,4 a |
| | 6 | 10,6 c | 107,4 a | 394,1 a | 230,7 b | 16,4 a | 936,9 a | 17,91a | 9,72 a | 4,1 a | 47,7 a | 54,4 a | 52,2 a |
| | 7 | 11,2 c | 94,6 b | 399,7 a | 220,6 b | 13,9 a | 1038,1 a | 19,95 a | 11,50 a | 4,1 a | 42,6 a | 52,9 a | 57,3 a |

* Material genético (Mg), Posição radial (Pr), Frequência dos vasos (Fv), diâmetro dos vasos (Dv), comprimento dos elementos de vaso (Cv), altura dos raios (Cr), largura dos raios (Lr), comprimento das fibras (Cf), diâmetro do lume das fibras (DLf), espessura da parede das fibras (EPf), coeficiente de rigidez das fibras (CRf) e fração parede total do lenho (FPT). Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de significância.

ANEXO 3A Análise do desdobramento das posições radiais para cada parâmetro anatômico avaliado dentro do híbrido de *Eucalyptus urophylla* (Vm 4).

| *Mg | Pr | Fv n°/mm ² | Dv µm | Cv µm | Cr µm | Lr µm | Cf µm | Lf µm | DLf µm | Epf µm | FPf % | CRf | FPT (%) |
|------|----|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|-------------|------------|
| Vm 4 | 1 | 15,9 a | 89,0 c | 262,5 b | 196,4 a | 12,6 a | 617,2 c | 13,9 b | 7,7 a | 3,1 a | 44,8 a | 45,4 a | 55,1 a |
| | 2 | 12,9 b | 107,7 b | 319,9 b | 217,6 a | 12,0 a | 763,3 c | 15,0 b | 9,0 a | 3,0 a | 40,8 a | 52,1 a | 59,1 a |
| | 3 | 10,8 c | 124,6 a | 415,2 a | 202,2 a | 12,4 a | 919,2 b | 16,4 b | 10,1a | 3,2 a | 39,1 a | 57,2 a | 60,8 a |
| | 4 | 8,3 c | 124,6 a | 458,9 a | 213,7 a | 12,3 a | 989,1 b | 17,5 a | 10,2 a | 3,5 a | 42,4 a | 57,9 a | 57,5 a |
| | 5 | 7,9 c | 131,3 a | 481,4 a | 238,2 a | 11,3 a | 1142 a | 18,0 a | 9,5 a | 4,2 a | 48,0 a | 66,2 a | 51,9 a |

* Material genético (Mg), Posição radial (Pr), Frequência dos vasos (Fv), diâmetro dos vasos (Dv), comprimento dos elementos de vaso (Cv), altura dos raios (Cr), largura dos raios (Lr), comprimento das fibras (Cf), diâmetro do lume das fibras (DLf), espessura da parede das fibras (EPf), coeficiente de rigidez das fibras (CRf) e fração parede total do lenho (FPT). Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de significância.

ANEXO 4A Análise do desdobramento das posições radiais para cada parâmetro anatômico avaliado dentro da espécie *C. citriodora*.

| *Mg | Pr | Fv n°/mm ² | Dv µm | Cv µm | Cr µm | Lr µm | Cf µm | Lf µm | DLf µm | Epf µm | FPf % | CRf | FPT (%) |
|----------------------|----|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|-------------|------------|
| <i>C. citriodora</i> | 1 | 10,5 a | 98,6 a | 261,2 a | 183,1 a | 15 a | 705 b | 13,6 a | 6,1 a | 3,7 b | 55,5 a | 52,4 a | 44,4 a |
| | 2 | 8,2 a | 97,3 a | 285,7 a | 178,9 a | 15 a | 873 a | 14,1 a | 6,4 a | 3,8 b | 54,7 a | 62,9 a | 45,2 a |
| | 3 | 7,9 a | 97,5 a | 282,6 a | 175,4 a | 15 a | 911 a | 14,2 a | 6,2 a | 4,0 b | 56,5 a | 65,3 a | 43,4 a |
| | 4 | 6,8 a | 103,9 a | 291,4 a | 187,9 a | 15 a | 918 a | 14,5 a | 6,4 a | 4,0 b | 56,6 a | 64,9 a | 43,4 a |
| | 5 | 6,7 a | 105,4 a | 297,8 a | 184,5 a | 15 a | 913 a | 14,9 a | 6,5 a | 4,1 b | 56,8 a | 62,8 a | 43,1 a |
| | 6 | 6,9 a | 111,6 a | 316,3 a | 184,4 a | 14 a | 951 a | 14,8 a | 6,3 a | 4,2 a | 58,6 a | 65,8 a | 41,3 a |

* Material genético (Mg), Posição radial (Pr), Frequência dos vasos (Fv), diâmetro dos vasos (Dv), comprimento dos elementos de vaso (Cv), altura dos raios (Cr), largura dos raios (Lr), comprimento das fibras (Cf), diâmetro do lume das fibras (DLf), espessura da parede das fibras (EPf), coeficiente de rigidez das fibras (CRf) e fração parede total do lenho (FPT). Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna diferem entre si pelo Teste de Scott-Knott a 5% de significância.

ANEXO 5A Valores médios, mínimo, máximo, desvio padrão (Dvpad) e coeficiente de variação (Cv%) da máxima energia específica do corte longitudinal (max Es 90°-0°) e transversal (max ES 0°-90°), densidade básica (Db) e umidade (U).

| Material genético | Estatística descritiva | max Es 90°-0° (Kj.cm ⁻³) | max Es 0°-90° (Kj.cm ⁻³) | Db (g.cm ⁻³) | U (%) |
|----------------------|------------------------|---|---|-----------------------------|----------|
| Mn 463 | Mínimo | 0,118 | 0,078 | 0,380 | 0,496 |
| | Máximo | 0,510 | 0,096 | 0,570 | 0,685 |
| | Média | 0,250 | 0,087 | 0,470 | 0,573 |
| | Dvpad | 0,096 | 0,009 | 0,050 | 0,099 |
| | Cv% | 38 | 10 | 10 | 17 |
| Vm4 | Mínimo | 0,143 | 0,082 | 0,428 | 0,245 |
| | Máximo | 0,487 | 0,085 | 0,545 | 0,310 |
| | Média | 0,240 | 0,085 | 0,477 | 0,310 |
| | Dvpad | 0,086 | 0,004 | 0,038 | 0,074 |
| | Cv% | 35 | 4 | 8 | 23 |
| <i>C. citriodora</i> | Mínimo | 0,107 | 0,086 | 0,419 | 0,274 |
| | Máximo | 0,384 | 0,096 | 0,721 | 0,360 |
| | Média | 0,220 | 0,091 | 0,561 | 0,324 |
| | Dvpad | 0,076 | 0,005 | 0,090 | 0,045 |
| | Cv% | 34 | 5 | 16 | 13 |

ANEXO 6A Estatísticas inerentes aos ajustes entre a variável energia específica do corte longitudinal (0°-90°) e os parâmetros anatômicos mensurados e densidade bá

| Modelo | Coeficientes | |
|--|--------------|-------------|
| | β_0 | β_1 |
| Es max= β_1 .UBS+ β_0 + ϵ | | 0,086406 * |
| Es max= β_1 .Db+ β_0 + ϵ | | 0,06179 * |
| Es max= β_1 .Fv+ β_0 + ϵ | | 0,0994489 * |
| Es max= β_1 .Dv+ β_0 + ϵ | | 0,1008127 * |
| Es max= β_1 .Cv+ β_0 + ϵ | | 0,08961 * |
| Es max= β_1 .Cr+ β_0 + ϵ | | 0,09896 * |
| Es max= β_1 .Lr+ β_0 + ϵ | | 0,08298 * |
| Es max= β_1 .Cf+ β_0 + ϵ | | 0,02953 ns |
| Es max= β_1 .Lf+ β_0 + ϵ | | 0,102066 * |
| Es max= β_1 .DLf+ β_0 + ϵ | | 0,095494 * |
| Es max= β_1 .EPf+ β_0 + ϵ | | 0,067786 * |
| Es max= β_1 .FPf+ β_0 + ϵ | | 0,0763871 * |
| Es max= β_1 .CRf+ β_0 + ϵ | | 0,1011534 * |
| Es max= β_1 .FPT+ β_0 + ϵ | | 0,07643 * |

*Db: densidade básica; UBS: umidade base seca; Fv: frequência dos vasos; Cv: comprimento dos elementos de vaso; Dv: diâmetro dos vasos; Ar: altura dos raios; Lr: largura dos raios; Cf: comprimento dos raios; Lf: largura dos raios; DLf: largura dos raios calculada; EPf: desvio padrão residual; FPf: teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; CRf: teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; ens: Valor não significativo a 5%

ANEXO 7A Estatísticas inerentes aos ajustes entre a variável energia específica do corte longitudinal (90°-0°) e os parâmetros anatômicos mensurados e densidade básica

| Modelo | Coeficientes | |
|--|--------------|------------|
| | β_0 | β_1 |
| $Es = \beta_1.DB + \beta_0 + \varepsilon$ | -0,06908 ns | 0,6790 |
| $Es = \beta_1.FV + \beta_0 + \varepsilon$ | 0,211464 ns | 0,002966 |
| $Es = \beta_1.DV + \beta_0 + \varepsilon$ | 0,3209145 ns | -0,0007484 |
| $Es = \beta_1.CV + \beta_0 + \varepsilon$ | 0,3035487 ns | -0,000150 |
| $Es = \beta_1.CR + \beta_0 + \varepsilon$ | 0,4733426 ns | -0,000931 |
| $Es = \beta_1.LR + \beta_0 + \varepsilon$ | 0,190140 ns | 0,003847 |
| $Es = \beta_1.CF + \beta_0 + \varepsilon$ | 3,063e-01 ns | -6,276e-05 |
| $Es = \beta_1.LF + \beta_0 + \varepsilon$ | 0,50135 ns | -0,01376 |
| $Es = \beta_1.DLF + \beta_0 + \varepsilon$ | 0,51994 ns | -0,0252 |
| $Es = \beta_1.EPF + \beta_0 + \varepsilon$ | 0,04160 ns | 0,05495 |
| $Es = \beta_1.FPF + \beta_0 + \varepsilon$ | -0,231731 ns | 0,01121 |
| $Es = \beta_1.CRF + \beta_0 + \varepsilon$ | 0,893435* | -0,01121 |
| $Es = \beta_1.FPT + \beta_0 + \varepsilon$ | -0,24449* | 1,2671 |

Db: densidade básica; Fv: frequência dos vasos; Cv: comprimento dos elementos de vaso; Dv: diâmetro dos vasos; Ar: altura dos raios; Lr: largura dos raios; Cf: comprimento das fibras; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; ns: Valor não significativo a 5% de significância; e: Valor padrão residual

ANEXO 8A Estatísticas inerentes aos ajustes entre a variável energia específica do corte longitudinal (90°-0°) e os parâmetros anatômicos mensurados e densidade básica

| Modelo | Coeficientes | |
|---|--------------|--------------|
| | β_0 | β_1 |
| $Es = \beta_1.DB + \beta_0 + \epsilon$ | -0,34687* | 1,23808* |
| $Es = \beta_1.FV + \beta_0 + \epsilon$ | 0,324101ns | -0,007184 ns |
| $Es = \beta_1.DV + \beta_0 + \epsilon$ | 0,1439603 ns | 0,0008636 ns |
| $Es = \beta_1.CV + \beta_0 + \epsilon$ | 0,1556749 ns | 0,0002272 ns |
| $Es = \beta_1.CR + \beta_0 + \epsilon$ | -0,298139 ns | 0,002536* |
| $Es = \beta_1.LR + \beta_0 + \epsilon$ | 1,15818 ns | -0,07517* |
| $Es = \beta_1.CF + \beta_0 + \epsilon$ | 0,1266693 ns | 0,0001321ns |
| $Es = \beta_1.LF + \beta_0 + \epsilon$ | 0,01132 ns | 0,01434 ns |
| $Es = \beta_1.DLF + \beta_0 + \epsilon$ | 0,257143 ns | -0,001439ns |
| $Es = \beta_1.EPF + \beta_0 + \epsilon$ | -0,03859 ns | 0,08271* |
| $Es = \beta_1.FPF + \beta_0 + \epsilon$ | -0,300040 ns | 0,012619* |
| $Es = \beta_1.CRF + \beta_0 + \epsilon$ | 0,961827 * | -0,012619* |
| $Es = \beta_1.FPT + \beta_0 + \epsilon$ | -0,2341ns | 1,2475* |

Db: densidade básica; Fv: frequência dos vasos; Cv: comprimento dos elementos de vaso; Dv: diâmetro dos vasos; Ar: altura dos raios; Lr: largura dos raios; Cf: comprimento das fibras; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; ns: Valor não significativo a 5% de significância; e: Valor significativo a 5% de significância

ANEXO 9A Estatísticas inerentes aos ajustes entre a variável energia específica do corte longitudinal (90°-0°) e os parâmetros anatômicos mensurados e densidade bá

| Modelo | Coeficientes | |
|--------------------------------------|--------------|---------------|
| | β_0 | β_1 |
| $Es=\beta_1.DB+\beta_0+\varepsilon$ | 0,3168 ns | -0,1637 ns |
| $Es=\beta_1.FV+\beta_0+\varepsilon$ | 0,13471ns | 0,01144ns |
| $Es=\beta_1.DV+\beta_0+\varepsilon$ | 0,425489 ns | -0,001958 ns |
| $Es=\beta_1.CV+\beta_0+\varepsilon$ | 0,587671ns | -0,001254 ns |
| $Es=\beta_1.CR+\beta_0+\varepsilon$ | -0,425884ns | 0,003568 ns |
| $Es=\beta_1.LR+\beta_0+\varepsilon$ | 0,149603 ns | 0,004885 ns |
| $Es=\beta_1.CF+\beta_0+\varepsilon$ | 0,3949421ns | -0,0001934 ns |
| $Es=\beta_1.LF+\beta_0+\varepsilon$ | 1,00788 ns | -0,05441ns |
| $Es=\beta_1.DLF+\beta_0+\varepsilon$ | 1,4308 ns | -0,1895 ns |
| $Es=\beta_1.EPF+\beta_0+\varepsilon$ | 0,6512 ns | -0,1062 ns |
| $Es=\beta_1.FPF+\beta_0+\varepsilon$ | 0,560628 ns | -0,005941ns |
| $Es=\beta_1.CRF+\beta_0+\varepsilon$ | 0,378750 ns | -0,002465 ns |
| $Es=\beta_1.FPT+\beta_0+\varepsilon$ | 0,6783ns | -0,8577 ns |

Db: densidade básica; Fv: frequência dos vasos; Cv: comprimento dos elementos de vaso; Dv: diâmetro dos vaso; Ar: altura dos raios; Lr: largura dos raios; Cf: comprimento das fibra; W: Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ: Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; ens: Valor não significativo a 5% de significância; e: Val