



**THIAGO GOMES GONTIJO**

**ENERGIA ESPECÍFICA EM CORTES  
TRANSVERSAIS EM MADEIRA ROLIÇA DE  
*Eucalyptus* sp.**

**LAVRAS – MG**

**2012**

**THIAGO GOMES GONTIJO**

**ENERGIA ESPECÍFICA EM CORTES TRANSVERSAIS EM MADEIRA**  
**ROLIÇA DE *Eucalyptus* sp.**

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 Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

**LAVRAS - MG**

**2012**

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

Gontijo, Thiago Gomes.

Energia específica em cortes transversais em madeira roliça de  
*Eucalyptus* sp. / Thiago Gomes Gontijo. – Lavras : UFLA, 2012.  
61 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.  
Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva.  
Bibliografia.

1. Processamento mecânico. 2. Serra circular. 3. Número de  
dentes. 4. Velocidade de corte. 5. Velocidade de avanço. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.2028

**THIAGO GOMES GONTIJO**

**ENERGIA ESPECÍFICA EM CORTES TRANSVERSAIS EM MADEIRA**  
**ROLIÇA DE *Eucalyptus* sp.**

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 Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de fevereiro de 2012.

Dr. Alfredo Napoli	CIRAD
Dr. Antônio Carlos Néri	UFLA
Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein	UFLA
Dr. José Tarcísio Lima	UFLA

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2012**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar com o dom da vida, saúde e sabedoria.

Às pessoas mais importantes da minha vida, meus pais. Obrigado pela atenção, carinho, ensinamentos e todos os esforços possíveis e impossíveis realizados por vocês.

Aos meus melhores amigos, meus irmãos, Renata, Marcelo, Samuel e Ana. Vocês não fazem ideia do quanto são importantes.

Ao meu sobrinho Manuel por trazer tanta alegria para nossos vidas.

Aos meus tios e primos pelo incentivo e pela torcida, em especial a minha madrinha Maria Cristina.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e a V & M Florestal pelo financiamento de projetos, compra de equipamentos e concessão de bolsa de estudos.

Aos meus amigos de Carmo do Cajuru que sempre torceram pelo meu sucesso, em especial ao Leo Maçã, Lé, Iguana, Baiano, Zazá, Betinho, Carlitos, Buiú, Manga Rosa, Teté, Zulu, Ney e Henrique. A palavra amizade não teria o mesmo significado sem vocês.

Aos eternos amigos e companheiros da República Galo Doido. Obrigado por tudo, vocês sempre estarão em minhas lembranças.

Ao meu orientador José Reinaldo Moreira da Silva, pelos ensinamentos, suporte e apoio irrestrito durante a iniciação científica e o mestrado.

Aos demais professores do DCF/UFLA, em especial os professores da Ciência e Tecnologia da Madeira. Obrigado pela disposição e inspiração concedida desde o início da graduação até a conclusão desse mestrado.

Aos membros da banca examinadora, José Tarcísio Lima, Antônio Carlos Néri, Alfredo Napoli e Paulo Ricardo Gherardi Hein.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Florestais: Hernani, Carlos, Chica, Meire, Teresinha, Emílio e Claret.

À todos os amigos do grupo de pesquisa em ciência e tecnologia da madeira, muito obrigado pela amizade, companherismo e pelo apoio nas horas mais difíceis. Em especial Carol, Jonnis, Alessandra, Javan, Tati Arruda, Cassiana, Jeimmy, Renilson, Pedro, Thiago Campos, Lucas, Allan, Maíra, Sabrina, Tião, Raphael, Luana, Selma e Amanda.

Aos estudantes da iniciação científica - Carol, Lidy, Breno, Vinícius e Tayana. Obrigado pela amizade e pela ajuda durante a coleta dos dados.

"A coisa mais penosa do nosso tempo é que os tolos possuem convicção e os que possuem imaginação e raciocínio vivem cheios de dúvida e indecisão."

Raul Seixas

## RESUMO

Novas tecnologias empregadas no corte da madeira roliça de *Eucalyptus sp.* requerem conhecimento para a otimização do processo de carbonização contínua. A escolha da ferramenta e das velocidades de corte e de avanço influenciam na redução do tempo e no consumo de energia durante o processamento. Existe tendência em diminuir o consumo de energia específica de corte na medida em que aumenta a velocidade de avanço e diminui a velocidade de corte. Porém, quando a velocidade de avanço é demasiadamente alta e a velocidade de corte é excessivamente baixa a energia requerida é maior que a energia fornecida pelo motor. A escolha destes parâmetros devem tornar mais eficiente o processamento mecânico da madeira. O objetivo do trabalho foi estudar a influência das velocidades de corte e de avanço e do número de dentes das serras circulares no consumo de energia específica de corte da madeira. Utilizou-se um clone natural de *Eucalyptus urophylla* e um clone híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus urophylla*. Cortou-se 160 toretes de 250 cm de comprimento e diâmetro de 8 a 11 cm de cada clone da empresa V & M Florestal Ltda. Foram utilizadas quatro serras circulares de 400 mm de diâmetro e 20, 24, 36, e 48 dentes, quatro velocidades de avanço de 11, 14, 17, e 20 m\*min<sup>-1</sup> e cinco velocidades de corte de 36, 41, 46, 51 e 56 m\*s<sup>-1</sup>. Os tratamentos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-knott a 5% de significância. Maiores velocidades de corte e menores velocidades de avanço apresentaram maiores consumos de energia específica de corte. Não é recomendado utilizar velocidade de corte menor ou igual a 36 m\*s<sup>-1</sup>, pois o motor trabalha sobrecarregado. O clone de *E. urophylla* exigiu menor consumo de energia específica de corte. Para o clone *E. Camaldulensis* x *E. urophylla* recomenda-se serra de 48 dentes com velocidade de corte de 46 m\*s<sup>-1</sup> e para o clone de *E. urophylla* a serra de 36 dentes e velocidade de corte de 51m\*s<sup>-1</sup>, ambos em velocidade de avanço de 20 m\*min<sup>-1</sup>.

Palavras-chave: Processamento mecânico. Serra circular. Número de dentes. Velocidade de corte. Velocidade de avanço.

## ABSTRACT

New technologies used in cutting round wood of *Eucalyptus sp.* require knowledge to optimize the continuous carbonization process. The tool choice cutting speed and of advance influence on reducing the time and energy consumption during processing. There is a tendency of reduction in the specific cutting energy consumption in which increasing the advance speed and decreasing cutting speed. However, when advance speed is increased excessively and the cutting speed is over decreased, the required cutting energy becomes greater than the energy which the motor is able to provide. The choice of these parameters should make the most efficient mechanical processing of wood. The objective of this work was to study the influence of cutting and advance speed, and the teeth number of the circular saws in the specific cutting energy consumption in the mechanical processing of round wood. The clones used were a natural hybrid of *Eucalyptus urophylla* and an hybrid of *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus urophylla*. One hundred and sixty shortwood from 250 cm long and with 8 to 11cm of diameter each clone from V&M Forestry Ltda. Four circular saw of 400 mm of diameter and 20, 24, 36 and 48 teeth, four advance speed (11, 14, 17 and 20 m\*min<sup>-1</sup>) and five cutting speeds (36, 41, 46 51 and 56 m\*s<sup>-1</sup>). The treatments were submitted to variance analysis and means compared by Scott-Knott test at 5% significance level. Greater cutting speeds and lower advance speed showed higher specific cutting energy consumption, but it is not recommended to use cutting speed less than or equal to 36 m\*s<sup>-1</sup>, since in these conditions the motor worked overloaded. The clone of *E. urophylla* required lower specific cutting energy consumption. For the *E. Camaldulensis* x *E. urophylla* clone it is recommended to use the 48 teeth saw blade, with cutting speed of 46 m\*s<sup>-1</sup> and for the clone *E. urophylla* the 36-tooth saw blade and cutting speed of 51 m\*s<sup>-1</sup>, both in advance speed of 20 m\*min<sup>-1</sup>.

Keywords: Mechanical processing. Circular saw. Teeth number. Cutting speed. Advance speed.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema da amostragem para os ensaios de usinagem e para determinação da umidade da madeira .....	24
Figura 2	Serra circular de carrinho adaptada para realizar os ensaios de processamento mecânico de madeira roliça .....	26
Figura 3	Representação do comportamento do torque (%) durante o corte da madeira dos clones MN 463 e VM 01 .....	27
Figura 4	Consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da umidade média dos toretes, para as velocidades de avanço de 11, 14, 17 e 20 m*min <sup>-1</sup> .....	37
Figura 5	Consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da umidade média dos toretes, para as velocidades de corte de 36, 41, 46, 51 e 56 m*s <sup>-1</sup> .....	38
Figura 6	Consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da umidade média dos toretes, para as serras de 400 mm de diâmetro e 20, 24, 36 e 48 dentes alternos .....	38
Figura 7	Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 20 dentes .....	45
Figura 8	Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira dos clones VM 01 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 24 dentes .....	45
Figura 9	Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira dos clones MN 463 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 24 dentes .....	46

Figura 10	Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone MN 463 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 20 dentes.....	47
Figura 11	Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 36 dentes.....	48
Figura 12	Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone MN 463 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 36 dentes.....	50
Figura 13	Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 48 dentes.....	52
Figura 14	Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone MN 463 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 48 dentes.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Exemplo de uma base de dados com seleção das faixas de abrupta ascendência/descendência dos torques e faixas descartadas de torques reduzidos e aproximadamente constantes....	28
Tabela 2	Esquema dos tratamentos executados (sim) e excluídos (não) para os dois clones avaliados.....	32
Tabela 3	Consumo médio de energia específica de corte e seus respectivos coeficientes de variação para todas as velocidades de avanço avaliadas .....	34
Tabela 4	Consumo médio de energia específica de corte e seus respectivos coeficientes de variação para todas as velocidades de corte avaliadas .....	35
Tabela 5	Resumo da análise de variância para o consumo da energia específica de corte da madeira dos clones VM 01 e MN 463 de <i>Eucalyptus</i> sp. em função dos tratamentos submetidos e da interação .....	39
Tabela 6	Comparação múltipla das médias de consumo da energia específica de corte ( $J \cdot cm^{-3}$ ) para o clone VM 01 .....	41
Tabela 7	Comparação múltipla das médias de consumo da energia específica de corte ( $J \cdot cm^{-3}$ ) para o clone MN 463 .....	42

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
<b>2.1</b>	<i>Eucalyptus sp.</i> para produção de carvão vegetal.....	14
<b>2.2</b>	Fatores inerentes à matéria-prima .....	15
<b>2.2.1</b>	Umidade da madeira .....	16
<b>2.3</b>	Fatores inerentes ao processamento mecânico da madeira .....	17
<b>2.3.1</b>	Influência do número de dentes da ferramenta ( <i>z</i> ).....	19
<b>2.3.2</b>	Influência da velocidade de corte ( <i>V<sub>c</sub></i> ).....	20
<b>2.3.3</b>	Influência da velocidade de avanço ( <i>V<sub>f</sub></i> ).....	21
<b>2.4</b>	Energia específica de corte ( <i>E<sub>s</sub></i> ).....	22
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	24
<b>3.1</b>	Material vegetal .....	24
<b>3.2</b>	Processamento mecânico da madeira .....	25
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	31
<b>4.1</b>	Umidade da madeira .....	36
<b>4.2</b>	Comparação do consumo energético dos clones VM 01 e MN 463 ..	39
<b>4.3</b>	Consumo de energia específica do clone VM 01 .....	40
<b>4.4</b>	Consumo de energia específica do clone MN 463 .....	42
<b>4.5</b>	Consumo de energia versus parâmetros de corte .....	43
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	53
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	54
	<b>ANEXOS</b> .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

A carbonização é uma pirólise que consiste em promover a decomposição térmica da biomassa sob ação do calor, na presença de quantidades controladas de ar, gerando carvão vegetal, combustíveis líquidos e gasosos. Carbonização é o nome que recebe a pirólise quando o objetivo da operação é a produção de carvão vegetal.

A produção de carvão vegetal necessita de melhorias quanto aos aspectos tecnológicos, pois ainda é fabricado, em sua grande maioria, em fornos de baixo rendimento, alto custo e condições insalubres para os trabalhadores.

No Brasil, tem-se investido na produção contínua de carvão vegetal, fato que tende a reduzir o número de empregados em condições de subemprego e produzir carvão de melhor qualidade e com maior eficiência energética.

Com o processo de carbonização contínua é possível ter maior controle sobre o processo de carbonização. Assim, podem-se obter avanços em termos de maior eficiência no fechamento do balanço de massas, melhor homogeneidade do carvão vegetal, melhores rendimentos da carbonização e alta produtividade por unidade. Para tanto, deve-se investigar todas as etapas de produção do carvão vegetal para aperfeiçoar o processo como um todo.

No sistema contínuo de carbonização, é necessário processar a madeira roliça em toretes de aproximadamente 30 cm de comprimento. Esse procedimento homogeneiza a matéria-prima e facilita a sua locomoção durante a carbonização. Na planta de carbonização contínua da V & M Florestal, os toretes são processados por uma serra circular com velocidades de corte e de avanço fixas que não supre o abastecimento do forno de carbonização. Esse processamento trata-se do gargalo na produção contínua de carvão vegetal utilizado na V & M Florestal.

Para aprimorar o processo de corte da madeira é preciso conhecer os melhores parâmetros de processamento mecânico da madeira para proporcionar maior rendimento em madeira processada e menor consumo de energia. Então, torna-se necessário estudar a influência das velocidades de corte e de avanço, bem como o uso de diferentes números de dentes das serras circulares.

Estudar a influência das velocidades de corte e de avanço e do número de dentes das serras no consumo de energia específica de corte fornece subsídios às empresas produtoras de carvão vegetal para aprimorar a produção contínua de carvão vegetal. O presente trabalho teve como objetivos:

- a) estudar a influência das velocidades de corte e de avanço e do número de dentes das serras circulares no consumo de energia específica de corte da madeira roliça de clones de *Eucalyptus* sp.;
- b) comparar o consumo de energia específica dos diferentes materiais genéticos e
- c) indicar parâmetros de cortes transversais de madeira roliça com menor consumo de energia específica para cada material genético.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 *Eucalyptus sp.* para produção de carvão vegetal

O gênero *Eucalyptus* é representado por mais de 700 espécies, de ocorrência natural na Austrália, Indonésia, Timor e Ilhas adjacentes. Aproximadamente 50 espécies estão disseminadas por centenas de países com climas e solos bastante diferentes (MOURA; ZANCHETTA, 2011).

Para a economia florestal, a gama de empresa mais relevante no quesito consumo de carvão vegetal faz referência aos produtores independentes de ferro - gusa, os quais são fornecedores de matéria-prima para a indústria do aço. Em 2010, foram produzidos 11,6 milhões de m<sup>3</sup> de carvão vegetal a partir de florestas plantadas, dos quais 66,2% foram consumidos pelos “guseiros” independentes (ASSOCIACAO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2011).

Segundo a Abraf (2011) o Brasil possuía em 2010 aproximadamente 4.755.000 ha de florestas plantadas com o gênero *Eucalyptus*, este montante representa 68,2% de todas as plantações de espécies florestais do Brasil. Minas Gerais possuía aproximadamente 1.400.000 ha que representa quase 30% das plantações nacionais do gênero. Segundo os mesmos autores, o crescimento percentual da área plantada com *Eucalyptus* em Minas Gerais no ano de 2010 foi de 7,7%.

O Brasil apresentou, nas últimas décadas, uma invejável evolução na produtividade das florestas de *Eucalyptus*, passando de 15 m<sup>3</sup>/ha/ano na década de 1970 para, atualmente, uma média nacional de aproximadamente 50 m<sup>3</sup>/ha/ano (GOMIDE; FANTUZZI NETO; REGAZZI, 2010). Estudo de caracterização dos melhores clones de *Eucalyptus* cultivados no Brasil envolvendo as principais indústrias nacionais de celulose demonstrou que esses

plantios florestais apresentam os mais elevados níveis mundiais de incremento médio anual (GOMIDE et al., 2005).

O carvão vegetal possui uma posição de importância na economia brasileira, em especial para Minas Gerais, principal estado produtor e consumidor. Ocupa posição de destaque no setor siderúrgico, no qual contribui para a produção de ferro-gusa, aço e ferro-liga (TRUGILHO et al., 2001).

## **2.2 Fatores inerentes à matéria-prima**

A madeira é um material complexo e apresenta variabilidade anatômica, física, mecânica e química nos diferentes planos tangencial, radial e transversal. Essa variação ocorre entre espécies e até mesmo dentro de um mesmo indivíduo. Fatores genéticos, ambientais e suas interações são responsáveis por essas variações, influenciando na formação da parede celular e conseqüentemente na formação da madeira (ZOBEL; BUIJTENEN, 1989).

A madeira é um recurso natural renovável e possui vantagens competitivas em relação a outros materiais utilizados na indústria. Contudo, ela necessita ser bem trabalhada para que os resultados obtidos não transformem essas vantagens em desvantagens. É importante entender que para bem trabalhar a madeira, necessita-se conhecer suas propriedades, os parâmetros de processamento mecânico a serem utilizados e suas interações (SILVA et al., 2005).

Devido às diferenças nas propriedades da madeira é necessário conhecer os melhores parâmetros de processamento mecânico para possibilitar um processamento mecânico de qualidade e rendimento satisfatório. Conhecer e aprender a trabalhar as características da matéria-prima existente têm como objetivo aumentar o aproveitamento e melhorar a qualidade de seus produtos (SILVA et al., 2005).

Densidade, umidade e orientação das fibras são as principais características das madeiras que afetam as forças de corte. Essas forças variam ainda em função da geometria da ferramenta de corte e das condições de processamento mecânico (NÉRI; GONÇALVES; HERNANDEZ, 1999).

A qualidade de uma madeira está diretamente relacionada às propriedades anatômicas, físicas e químicas. A combinação destas propriedades irá definir sua melhor forma de utilização. Para avaliar sua qualidade, é importante definir o uso, identificar os fatores que afetam essa madeira, quantificá-los, além de avaliar seus efeitos na qualidade do material (SILVA et al., 2005).

### **2.2.1 Umidade da madeira**

A madeira é um material higroscópico, ou seja, tem a capacidade de trocar água com o ambiente. Ao adsorver água a madeira aumenta as suas dimensões e ao liberar água as dimensões diminuem (KOCH, 1964). Essa variação dimensional é responsável por problemas ocorridos na utilização da madeira em diversas finalidades, como tábuas para piso, fabricação de móveis e produção de painéis. Para o processo de corte da madeira a umidade é importante, pois a quantidade de água interfere na resistência mecânica da madeira e para cortá-la é necessário vencer essa resistência.

A umidade da madeira tem relação direta com a qualidade e eficiência do processamento mecânico (LIMA; DELLA LÚCIA; VITAL, 1986). Quando a madeira está com umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), há uma redução dos espaços submicroscópicos entre as microfibrilas formadoras da parede celular, aumentando a rigidez da mesma e com isso, aumentando a resistência mecânica (KOCH, 1964).

Stamm (1971) afirmou que quase todas as propriedades mecânicas da madeira têm seus valores aumentados com a secagem abaixo do ponto de saturação das fibras; segundo o autor, esse efeito pode ser atribuído à contração, pois ao se remover a água, as unidades estruturais aproximam-se provocando aumento significativo na quantidade de ligações de hidrogênio entre as unidades estruturais da madeira.

Néri (2003) mencionou que a água presente na madeira é um elemento que não oferece resistência ao corte, pelo contrário, é um elemento facilitador do corte. Deve-se ressaltar que isso ocorre em condições acima do ponto de saturação das fibras. Segundo o mesmo autor, a umidade afeta as propriedades mecânicas da madeira, e por conseguinte, as forças desenvolvidas no processo de usinagem.

Souza et al. (2011) estudaram a influência de alguns parâmetros de usinagem e da umidade da madeira na energia específica de corte. Os autores utilizaram toras recém abatidas e toras com 90 dias de secagem no campo. Para as toras recém abatidas, nas velocidades de avanço de 7 e 12 m\*min<sup>-1</sup> o consumo médio de energia específica de corte foi menor e para velocidade de avanço de 17 m\*min<sup>-1</sup> o consumo médio de energia específica de corte foi maior.

Estudar a umidade da madeira é indispensável, pois se trata de um parâmetro que afeta o comportamento do material, quanto à trabalhabilidade, estabilidade dimensional, resistência mecânica e durabilidade natural (SILVA; OLIVEIRA, 2003).

### **2.3 Fatores inerentes ao processamento mecânico da madeira**

Na produção de carvão vegetal em fornos tradicionais, o comprimento das peças de madeira é muito variável. Neste caso, são utilizadas motosserras ou máquinas florestais para processar a madeira. Já no processo de carbonização

contínua o comprimento é de aproximadamente 30 cm. Os toretes obtidos são processados em serras circulares (SOUZA et al., 2011).

O corte convencional é definido como sendo a ação de uma ferramenta sobre o material a ser cortado produzindo ou não partículas de tamanhos variados. Também pode ser definido como um processo mecânico de divisão de um corpo ao longo de uma linha predeterminada utilizando uma ferramenta de corte (PERSSON, 1987).

Segundo Mckenzie (1960), existem dois tipos básicos de corte, o ortogonal e o periférico. O corte ortogonal é definido como sendo a situação na qual o fio de corte da ferramenta é perpendicular à direção do movimento da peça de madeira. A superfície obtida é um plano paralelo à superfície original. O corte periférico é produzido pelo corte sucessivo das ferramentas (facas ou dentes) instaladas na periferia de um cabeçote. As ferramentas são colocadas de maneira a se obter, aproximadamente, o mesmo cilindro de corte. O corte ortogonal é, portanto, um caso especial de corte periférico com raio infinito. Um exemplo desse tipo de corte é aquele realizado pelas serras de fita. O corte ortogonal pode ser entendido pela notação de dois ângulos, em que o primeiro é o ângulo formado entre a aresta principal da ferramenta de corte e as fibras da madeira e o segundo o ângulo entre a direção de corte e as fibras da madeira, sendo definidos três tipos de corte  $90^\circ - 0^\circ$ ,  $90^\circ - 90^\circ$  e  $0^\circ - 90^\circ$ .

Segundo Bonduelle, Cruz e Silva (2002), o processamento mecânico da madeira pode ser expresso pela função 5M, sendo:

- a) Matéria-prima – relacionada a todas as propriedades da madeira e suas interações com o processo;
- b) Máquina – relacionada com os aspectos construtivos das máquinas incluindo os dispositivos de fixação, de condução e de exaustão de cavacos;

- c) Metodologia – engloba a escolha dos parâmetros de processamento mecânico, bem como a escolha das ferramentas mais adequadas para otimizar o processamento;
- d) Mão-de-obra – precisa ser qualificada e ter conhecimento sobre todos os componentes da função 5M para poder interferir, no momento certo, caso note alguma deficiência no processo e;
- e) Meio ambiente – considera-se que todas as fases de processamento devem evitar degradações do ambiente com pensamento de melhor aproveitamento da matéria-prima, minimizando os resíduos e ruídos.

O conhecimento da operação de corte é importante para que ocorra a utilização racional do equipamento. Assim, visa-se obter melhor aproveitamento da matéria-prima, baixo investimento, mínimo consumo energético, qualidade dos produtos e segurança dos operadores. Também, o conhecimento do tipo da máquina de corte das toras é importante, pois esta irá influenciar na escolha das serras circulares, de suas especificações e das velocidades de corte e de avanço, que são parâmetros fundamentais para um bom desempenho da máquina de corte (SOUZA et al., 2011).

### **2.3.1 Influência do número de dentes da ferramenta (z)**

É sabido que as serras circulares são ferramentas utilizadas no processamento mecânico da madeira. Elas são constituídas de um corpo circular e dentes em sua periferia. Os dentes realizam ataques sucessivos na madeira, retirando os cavacos. Sandvik (1999) afirmou que a escolha do tipo e número de dentes de uma ferramenta de corte pode ser afetada pelo tipo de acabamento ou quantidade de desgaste, espécie de madeira, tipo de cavaco produzido, potência de corte necessária, velocidade de corte e velocidade de avanço. Além destes,

deve-se considerar os seguintes fatores: capacidade de armazenamento de cavacos pela garganta, estabilidade lateral adequada e geometria cortante.

Os fabricantes de serras afirmam que o corte transversal requer uma ferramenta de corte com número de dentes maior que para o corte longitudinal. Reval Serras e Ferramentas para Madeira (2009) indicam, para serras circulares de 400 mm de diâmetro, 18 a 36 dentes para cortes longitudinais e 48 a 72 dentes para cortes transversais.

Souza et al. (2011) estudaram o efeito do número de dentes para dois clones de *Eucalyptus* sp. úmidos e secos. Os autores utilizaram serras de 400 mm de diâmetro e observaram que para as toras recém abatidas as serras circulares de 40 e 48 dentes apresentaram maiores consumos de energia específica de corte que a serra circular de 24 dentes. Em toras com 90 dias de secagem no campo, o consumo médio de energia específica de corte foi estatisticamente igual para as serras de 20 e 24 dentes e o maior consumo foi observado para a serra de 40 dentes.

### **2.3.2 Influência da velocidade de corte ( $V_c$ )**

A velocidade de corte é a relação entre o caminho percorrido por um dente em determinado intervalo de tempo. É apresentada em metros por segundo. De acordo com (CENTRO DE TECNOLOGIA DA MADEIRA E MOBILIÁRIO/SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL – CETMAN/SENAI, 1996) uma velocidade de corte ideal para processamento mecânico depende dos materiais constituintes da ferramenta de corte e do tipo de material a ser processado.

Segundo Serra (2006), para se obter o melhor resultado da ferramenta, um dos fatores mais importantes é a observação da correta velocidade de corte. De acordo com o autor as características dos materiais interferem na velocidade

de corte ideal que é bastante variável. Para serra de metal duro em cortes de madeiras e derivados a velocidade de corte deve estar situada entre 30 e 90  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Já Cetman/Senai (1996) afirmou que a velocidade de corte usada no processamento da madeira, dependendo da ferramenta e do material que será trabalhado, deve estar entre 30 a 100  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Souza et al. (2011) estudaram o efeito de alguns parâmetros de usinagem na energia específica de corte para madeira roliça de *Eucalyptus* sp.. Os autores observaram que maiores velocidades de corte apresentaram maiores consumos de energia específica, independentemente da umidade das toras. Altas velocidades de corte estão associadas a maiores valores de rotação que, conseqüentemente, elevaram a potência requerida ao corte. Os mesmos autores afirmaram que 46  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  foi a velocidade de corte que menos consumiu energia específica de corte para o processamento mecânico de madeira roliça de dois clones de *Eucalyptus* sp. em cortes transversais.

Segundo Silva et al. (2004) e Souza et al. (2011), deve haver um balanço entre velocidade de corte, velocidade de avanço e número de dentes da serra. Desta forma, o motor elétrico não estará com sobrecarga e conseqüentemente, não consumirá mais energia que a necessária ao corte da madeira.

### **2.3.3 Influência da velocidade de avanço (Vf)**

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

Souza et al. (2011) estudaram o consumo de energia específica de corte em serra circular, para madeira roliça de *Eucalyptus* sp., os autores observaram

que existe uma tendência de diminuir o consumo de energia específica de corte na medida em que se aumenta a da velocidade de avanço. Os mesmos autores afirmaram que  $17 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  foi a velocidade de avanço que menos consumiu energia específica de corte para o processamento mecânico de madeira roliça de dois clones de *Eucalyptus* sp. em cortes transversais.

Orlowski et al. (2009) quantificaram a energia específica de corte para madeira congelada e a temperatura ambiente e observaram que o aumento na velocidade de avanço provoca diminuição na energia específica de corte em todas as condições de temperatura estudadas. Já Palmqvist, Matz e Gustafsson-Stig (2005) avaliaram a influência da velocidade de avanço na espessura média do cavaco e nas forças de corte. Segundos os autores, quanto maior a velocidade de avanço, maior o comprimento médio dos cavacos e, conseqüentemente, maior força necessária para cortar a madeira. Somente a velocidade de avanço não pode ser utilizada como parâmetro para avaliar o consumo de energia para cortar a madeira, outros fatores como velocidade de corte, direção do corte, umidade da madeira e o número de dentes interferem no processo e devem ser avaliados juntamente.

#### **2.4 Energia específica de corte (Es)**

Rodrigues e Coelho (2007) afirmaram que a energia específica de corte pode ser entendida como uma relação entre a potência de corte e a taxa de remoção de material, ou seja, um parâmetro de equivalência entre a energia gasta para executar o corte e o volume de cavaco removido. A energia específica de corte, juntamente com a força específica, proporcionam a comparação e a avaliação da eficiência das ferramentas de corte (SOUZA et al., 2011).

Por meio da energia específica de corte pode-se também estimar a potência requerida em uma operação de usinagem de um dado material

(ERSOY; ATICI, 2004). Neste caso, deve-se considerar a eficiência do motor e efeitos da inércia e do atrito.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material vegetal

Os clones utilizados foram o MN 463 (híbrido natural de *Eucalyptus urophylla*) e o VM 01 (*Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus urophylla*). As árvores são provenientes de plantios comerciais da empresa V & M Florestal Ltda, localizados no município de Paraopeba/MG, com 7 anos de idade. Foram utilizadas 80 toretas, de cada clone, com 250 cm de comprimento e diâmetro de 8 a 11 cm. No Laboratório de Usinagem da Madeira do Departamento de Ciências Florestais (DCF/UFLA) uma das extremidades de cada toretta foi descartada, pois foi necessário utilizá-la como apoio na mesa da serra circular. Devido à maior velocidade de secagem no sentido axial da madeira, 50 cm da outra extremidade dos toretas também foram descartadas. O restante dos toretas foi utilizado nos ensaios de processamento mecânico. Durante o processamento mecânico foram retirados quatro discos ao longo do comprimento total dos toretas para determinação da umidade (Figura 1). Para determinar a umidade foram utilizadas as normas da NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997).

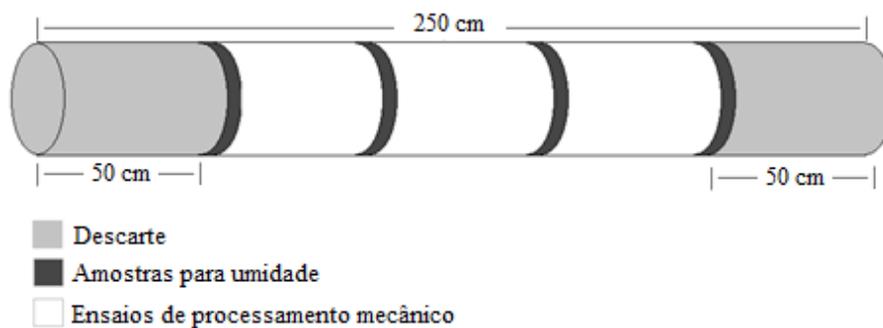


Figura 1 Esquema da amostragem para os ensaios de usinagem e para determinação da umidade da madeira

Para determinar a densidade dos clones foram selecionados ao acaso 20 discos de madeira de cada clone. Os discos permaneceram em câmara climática [ $T = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e  $\text{UR} = (60 \pm 5)\%$ ] do Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira (DCF/UFLA) até atingirem umidade de 12%. Os discos foram pesados com 12% de umidade e absolutamente secos. A balança utilizada tem precisão de 0,01g. O volume foi determinado pelo método de imersão. Para cálculo da densidade aparente foi utilizado a massa absolutamente seca e o volume a 12% de umidade, conforme NBR 7190 (ABNT, 1997). Os dados de densidade foram comparados por meio de Análise de Variância a 5% de significância.

### **3.2 Processamento mecânico da madeira**

Souza et al. (2011) estudaram a influência das velocidades de corte e de avanço no consumo de energia específica de corte para o processamento mecânico da madeira roliça dos mesmos clones, segundo os autores, a velocidade de avanço que consumiu menor quantidade de energia específica de corte foi a velocidade de  $17 \text{ m}^*\text{min}^{-1}$ , já para a variável velocidade de corte o menor consumo foi obtido com a velocidade de  $46 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$ . Foram utilizadas velocidades de avanço e de corte próximas aos melhores resultados descritos no trabalho de Souza et al. (2011). Foram utilizadas cinco velocidades de corte de  $36, 41, 46, 51$  e  $56 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$  e quatro velocidades de avanço de  $11, 14, 17$  e  $20 \text{ m}^*\text{min}^{-1}$ . Foram utilizadas quatro serras circulares de 400 mm de diâmetro e dentes alternos, com 20, 24, 36 e 48 dentes.

Os toretes foram processados em uma serra circular de carrinho. Na mesa da máquina foram instalados dois pistões pneumáticos para fixar os toretes e garantir a segurança do operador. Foi instalado um motor para realizar o avanço mecânico e dois inversores de frequência para controle e monitoramento

das velocidades de avanço e de corte, respectivamente. Os inversores de frequência são da marca WEG e o modelo é o CFW 08 (Figura 2).

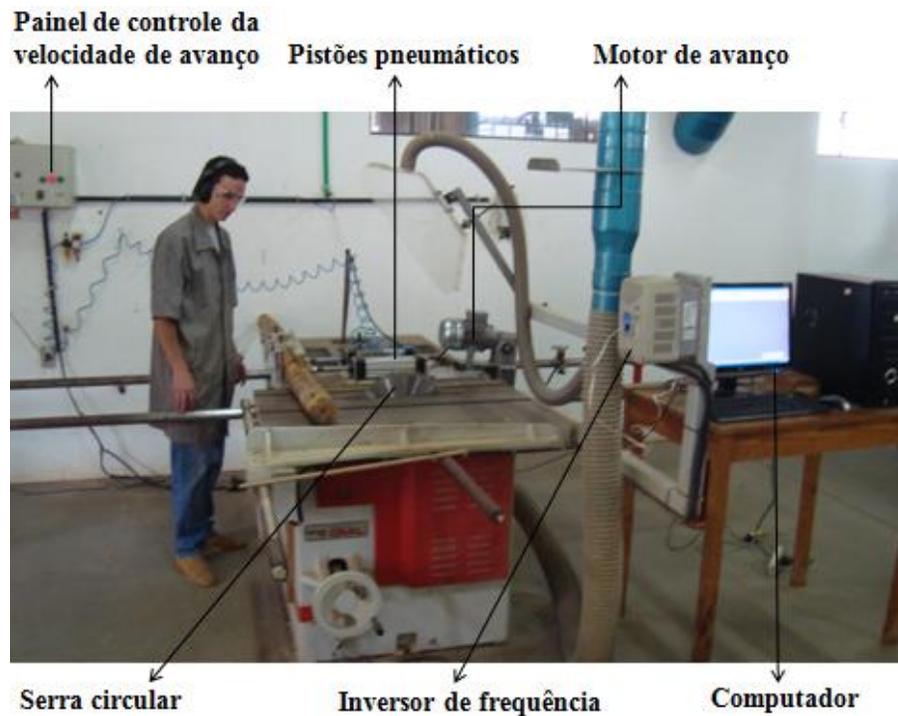


Figura 2 Serra circular de carrinho adaptada para realizar os ensaios de processamento mecânico de madeira roliça

Durante o processamento dos toretes, com o auxílio do inversor de frequência, foram coletados os dados de torque do motor (%), rotação do eixo porta ferramentas ( $\text{min}^{-1}$ ), corrente de saída do motor (Amperes) e tensão de saída do motor (Volts). O inversor de frequência monitorou todos estes parâmetros em tempo real e coletou os dados simultaneamente, num intervalo de 200 milissegundos.

Para a parametrização, comando e monitoramento dos parâmetros foi utilizado o *software* SuperDrive 9.1. Para a captura dos parâmetros de leitura do motor foi utilizada a função “Adquirir Parâmetro”, conforme trabalhos de Oliveira, Silva e Martins (2008) e Souza et al. (2011).

A comunicação entre o inversor de frequência e o microcomputador foi feita por meio de um módulo de interface serial RS-232 PC/Drive que permitiu a transferência dos dados captados do motor pelo inversor de frequência. Após a coleta dos dados pelo *software*, foram gerados gráficos em planilhas eletrônicas nos quais foi possível observar o comportamento dos parâmetros coletados durante o processamento das toras (Figura 3), conforme trabalhos de Oliveira, Silva e Martins (2008) e Souza et al. (2011).

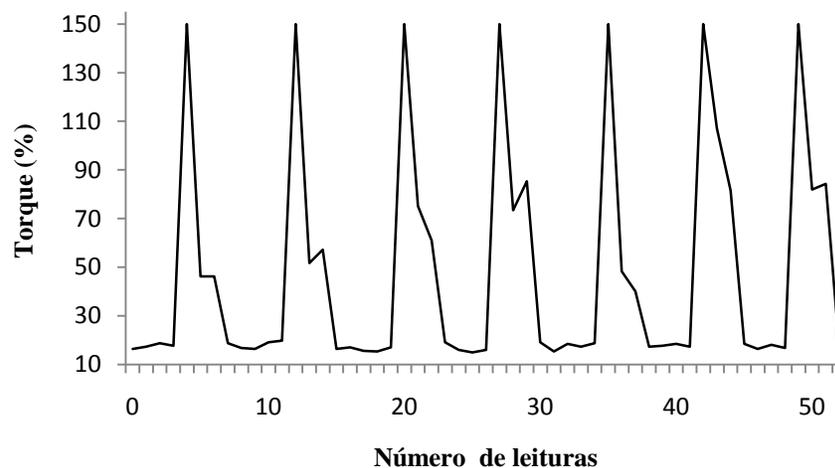


Figura 3 Representação do comportamento do torque (%) durante o corte da madeira dos clones MN 463 e VM 01

A captura dos dados pelo *software* de parametrização foi contínua, sem interrupções, mesmo quando a serra circular não estava processando a madeira. Os intervalos em que realmente ocorreram os cortes das toras foram

identificados e utilizados no cálculo da energia específica de corte. Selecionou-se as faixas de abrupta ascendência/descendência dos valores de torque, intercaladas por faixas de torques reduzidos e aproximadamente constantes. As faixas de torque reduzido e constante foram descartadas, pois estas faixas são referentes aos momentos em que o motor trabalhava sem processar a madeira (Tabela 1).

Tabela 1 Exemplo de uma base de dados com seleção das faixas de abrupta ascendência/descendência dos torques e faixas descartadas de torques reduzidos e aproximadamente constantes

Tempo	Rotação (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Torque (%)	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	} Ocioso Descartado
15:15:23	1718,40	7,89	105	19,2	
15:15:24	1717,80	7,92	105	18,1	
15:15:24	1719,00	7,97	105	21,9	
15:15:24	1719,00	7,88	105	18,1	} Processamento Selecionado
15:15:25	1719,00	12,09	101	150,0	
15:15:25	1717,80	34,27	114	150,0	
15:15:26	1718,40	10,14	108	80,9	
15:15:26	1719,60	9,10	103	55,5	} Ocioso Descartado
15:15:26	1718,40	10,11	103	63,4	
15:15:27	1719,00	7,87	105	21,6	
15:15:27	1719,60	7,93	105	18,1	
15:15:27	1718,40	7,96	105	20,9	} Processamento Selecionado
15:15:28	1718,40	7,99	105	21,2	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
15:15:47	1719,00	33,39	111	150,0	
15:15:47	1718,40	31,11	112	150,0	} Processamento Selecionado
15:15:48	1717,80	8,42	103	45,2	
15:15:48	1718,40	9,74	103	80,9	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

Os valores de torque obtidos não se encontravam na unidade padrão que é N\*m. Os valores obtidos correspondem a uma porcentagem do valor do torque nominal do motor. Estes valores foram convertidos para possibilitar os cálculos de energia específica de corte. Segundo Weg (2008), o torque nominal do motor foi dado pela Equação 1.

$$T_{nom} = 9,55 * \frac{P_{nom}}{n_{nom}} \quad (1)$$

Em que:

$T_{nom}$  = torque nominal do motor (N\*m).

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

$n_{nom}$  = rotação nominal do motor ( $\text{min}^{-1}$ ).

O motor utilizado possui uma potência nominal de 5.500 W e uma rotação nominal de  $3.500 \text{ min}^{-1}$ , assim o torque nominal do motor foi de  $15,01 \text{ N*m}$ . Segundo Weg (2008), o valor percentual do torque em N\*m, corresponde a uma fração do torque nominal de acordo com a Equação 2.

$$T_{mec} = T_{nom} * \frac{T}{100} \quad (2)$$

Em que:

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

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

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

Os cálculos do consumo da energia específica de corte foram realizados conforme o trabalho de Souza et al. (2011).

Quando se diminui a velocidade de corte e aumenta-se a velocidade de avanço espera-se que o consumo de energia para o processamento mecânico da madeira diminua. Porém, existe um limite tolerável. Para determinar esse limite foi preciso trabalhar com alta velocidade de avanço e baixa velocidade de corte. Alguns tratamentos que utilizaram alta velocidade de avanço e baixa velocidade de corte provocaram sobrecarga no motor da serra circular. Estes tratamentos foram excluídos, pois não foi possível processar a madeira.

Com a exclusão de alguns tratamentos perde-se a conectividade dos dados. Assim, não foi possível utilizar o esquema fatorial  $5 \times 4 \times 4 \times 2$  (velocidade de corte  $\times$  velocidade de avanço  $\times$  número de dentes  $\times$  clone). A exclusão destes tratamentos levaram ao desbalanceamento dos tratamentos e, conseqüentemente, a melhor opção de delineamento foi o inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial  $57 \times 2$  (velocidade de corte, velocidade de avanço e número de dentes, possíveis de serem executadas  $\times$  clone), com 30 repetições. Os tratamentos foram submetidos à análise de variância e foi realizado o teste de comparação de média de Skott-knott a 5% de significância.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Observou-se que existe uma tendência de diminuir o consumo de energia específica de corte na medida em que se aumenta a velocidade de avanço e diminui a velocidade de corte, porém há um limite tolerável. 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. Por não ser possível processar a madeira nessas condições, foram excluídos os tratamentos que sobrecarregavam o motor (Tabela 2). Observa-se que ao processar a madeira com altas velocidades de avanço e baixa velocidade de corte, principalmente com poucos dentes, o motor é requerido ao trabalho com sobrecarga. Nestes casos, o inversor de frequência percebe a sobrecarga e desliga o motor. Esse procedimento evita que o motor sofra danos irreversíveis (“queima”). Nessas condições, não é recomendada a realização do corte transversal da madeira roliça dos dois clones. Se o motor não estivesse acoplado ao inversor de frequência, provavelmente a madeira seria cortada, mas a vida útil do motor seria reduzida. Para realizar o processamento mecânico nessas condições é necessário utilizar um motor com maior potência.

Tabela 2 Esquema dos tratamentos executados (sim) e excluídos (não) para os dois clones avaliados

Velocidade de avanço ( $m \cdot \text{min}^{-1}$ )	Velocidade de corte ( $m \cdot s^{-1}$ )				
	36	41	46	51	56
20 dentes					
11	sim	sim	sim	sim	sim
14	não	não	sim	sim	sim
17	não	não	não	sim	sim
20	não	não	não	sim	sim
24 dentes					
11	sim	sim	sim	sim	sim
14	não	sim	sim	sim	sim
17	não	não	não	sim	sim
20	não	não	não	sim	sim
36 dentes					
11	sim	sim	sim	sim	sim
14	não	sim	sim	sim	sim
17	não	não	sim	sim	sim
20	não	não	sim	sim	sim
48 dentes					
11	sim	sim	sim	sim	sim
14	sim	sim	sim	sim	sim
17	não	sim	sim	sim	sim
20	não	não	sim	sim	sim

Observa-se na Tabela 2 que utilizando a velocidade de corte de  $36 m \cdot s^{-1}$  foi possível processar a madeira somente na velocidade de avanço de  $11 m \cdot \text{min}^{-1}$ . No processamento mecânico de madeira roliça dos dois clones não é recomendada a utilização de velocidades de corte menor ou igual a  $36 m \cdot s^{-1}$ . Também pode ser observado que na medida em que se aumenta o número de dentes da serra circular pode-se processar a madeira com menores velocidades de cortes.

O consumo médio de energia específica de corte foi de  $118,2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$ . O tratamento que apresentou menor consumo médio de energia específica de corte ( $80,1 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) foi o tratamento com o clone MN 463, serra de 400 mm de diâmetro e 24 dentes, velocidade de corte de  $46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e velocidade de avanço de  $14 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Já o tratamento que apresentou maior consumo médio de energia específica ( $176,0 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) foi o tratamento com o clone VM 01, serra de 400 mm de diâmetro e 48 dentes, velocidade de corte de  $56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e velocidade de avanço de  $11 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Observa-se que o tratamento que apresentou menor consumo de energia foi aproximadamente duas vezes menor que o tratamento que obteve o maior consumo de energia específica, isto confirma a possibilidade real de diminuir o consumo de energia específica quando se realiza alterações nas velocidades de corte e de avanço e no número de dentes das serras circulares.

Observa-se que o pior tratamento foi o que utilizou a serra com maior número de dentes, maior velocidade de corte e menor velocidade de avanço. A associação de alta velocidade de corte à baixa velocidade de avanço e ao maior número de dentes faz com que os dentes da serra passem várias vezes no mesmo local para retirar pouca quantidade de cavacos, conseqüentemente, o consumo de energia específica aumenta.

É importante ressaltar que todas as recomendações de número de dentes das serras são relativas ao diâmetro das serras (400 mm) que foram utilizados nos ensaios de processamento mecânico. Essas recomendações podem ser extrapoladas para serras com diferentes diâmetros, desde que o passo do dente (distância entre um dente e o dente seguinte) não se altere. Contudo, é importante realizar medições para outros diâmetros.

Na Tabela 3, encontra-se a variação do consumo de energia em função da variação da velocidade de avanço. Observa-se que a velocidade de  $11 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  apresentou maior consumo de energia específica de corte, sendo a velocidade

que permitiu processamento em menor número de combinações dos parâmetros analisados.

Tabela 3 Consumo médio de energia específica de corte e seus respectivos coeficientes de variação para todas as velocidades de avanço avaliadas

Velocidade de avanço ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	Consumo médio de energia específica de corte ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Coefficiente de variação (%)
11	131,55	14
14	108,18	19
17	99,87	18
20	102,61	18

Observa-se também (Tabela 3) uma tendência de diminuir o consumo de energia específica de corte na medida em que se aumenta a velocidade de avanço até  $17 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . A redução no consumo de energia específica em função do aumento da velocidade de avanço também foi observada em usinagem de metais, descrita no trabalho de Diniz et al. (2000) e para usinagem de madeira, descrita no trabalho de Souza et al. (2011). Segundo esses autores, durante o processamento da madeira, parte do material removido é direcionada entre a superfície de folga da ferramenta e a superfície obtida. Esse fato gera o fluxo lateral de cavaco. Quando a magnitude desse fluxo é pequena ocorre maior atrito entre a ferramenta de corte e, conseqüentemente, provoca o aumento no consumo de energia específica de corte.

Palmqvist, Matz e Gustafsson-Stig (2005) afirmaram que maiores velocidades de corte provocam aumento na espessura média dos cavacos e, conseqüentemente, maior é a força necessária para cortar a madeira. Assim, o aumento médio no consumo de energia específica de  $17 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  para  $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  (Tabela 3) pode ter sido causado pelo aumento na espessura do cavaco,

que provoca aumento na força necessária para realizar o corte e portanto, aumento no consumo de energia.

Para a variável velocidade de corte observou-se uma tendência de diminuir o consumo de energia específica de corte na medida em que se diminuiu a velocidade de corte de 56 até 46  $\text{m}^*\text{s}^{-1}$  (Tabela 4). Souza et al. (2011) estudaram a influência das velocidades de corte de 46, 58 e 70  $\text{m}^*\text{s}^{-1}$  e observaram a mesma tendência de diminuir o consumo de energia específica na medida em que se diminuía a velocidade de corte. Segundo os autores, maiores velocidades de corte estão associadas a maiores valores de rotação, conseqüentemente, maior é a potência requerida para o corte.

Tabela 4 Consumo médio de energia específica de corte e seus respectivos coeficientes de variação para todas as velocidades de corte avaliadas

Velocidade de corte ( $\text{m}^*\text{s}^{-1}$ )	Consumo médio de energia específica de corte ( $\text{J}^*\text{cm}^{-3}$ )	Coefficiente de variação (%)
36	113,06	13
41	115,51	16
46	108,19	19
51	112,07	22
56	119,11	22

Já para as velocidades de corte de 36 e 41  $\text{m}^*\text{s}^{-1}$  o consumo médio de energia específica foi maior que nas velocidades de corte de 46 e 51  $\text{m}^*\text{s}^{-1}$  (Tabela 4). Os maiores consumos de energia específica nas menores velocidades de corte também podem ter sido causados pelo aumento na espessura média dos cavacos, que provoca aumento na força necessária para realizar o corte e, conseqüentemente, aumento no consumo de energia.

#### 4.1 Umidade da madeira

A Tabela 1A (Anexos) apresenta os valores médios de umidade na base seca (%) de cada torete que foi utilizado nos ensaios de processamento mecânico. Os toretes do clone VM 01 apresentaram umidade média de 16,1% com coeficiente de variação de 16,8%, os valores médios de umidade variaram de 12,5% até 22,5%. Já os toretes do clone MN 463 apresentaram umidade média de 15,8% com coeficiente de variação de 14,1%, os valores médios de umidade dos toretes variaram de 12,3% até 27,1%.

Nas Figuras 4, 5 e 6, pode-se observar que a umidade média dos toretes não influenciou no consumo de energia específica de corte para o clone VM 01. A mesma tendência foi observada para o clone MN 463 e pode ser observada nos anexos 2A, 3A, e 4A. Na Figura 4, pode-se observar que para a velocidade de avanço de  $11 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  os valores de energia específica de corte de 120 a  $160 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$  são igualmente obtidos para as umidades de 12,5 até 21,5%. Para as velocidades de avanço de 14, 17 e  $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  observa-se que os valores de energia específica de corte de 95 a  $130 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$  são igualmente obtidos para as umidades de 12,5 até 19,0 % (Figura 4). Já para as variáveis velocidades de corte (Figura 5) e número de dentes das serras (Figura 6) observa-se que os valores de energia específica de corte entre 95 e  $155 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$  foram igualmente obtidos para as umidades de 12 a 20%.

O aumento do consumo de energia de corte é proporcional à redução da umidade da madeira (LIMA; DELLA LÚCIA; VITAL, 1986; NÉRI; GONÇALVES; HERNANDEZ, 1999). Contudo, os valores médios de umidade dos toretes não demonstraram relação com o consumo de energia específica de corte. A ocorrência desse fato pode ser explicada pelo gradiente de umidade formado durante a secagem, no momento do corte, os dentes trabalham cortando diferentes regiões da madeira com umidades variáveis. É desejável realizar

ensaios de processamento mecânico da madeira com ponderação da energia específica consumida em função do volume madeira cortada em diferentes umidades. Para tanto, é necessário utilizar taxa maior de aquisição de dados que a taxa que o inversor de frequência utilizado possui (um ponto a cada 200 milissegundos) e, ou realizar ensaios de processamento mecânico em cortes longitudinais. Pois, como a taxa de aquisição dos dados foi de um ponto a cada 200 milissegundos, o diâmetro máximo dos toretes foi de 11 cm e a velocidade de avanço variou de 11 até 20  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . A quantidade de pontos coletados foi muito baixa para possibilitar a ponderação do consumo de energia específica de corte em função do volume madeira cortada nas diferentes umidades.

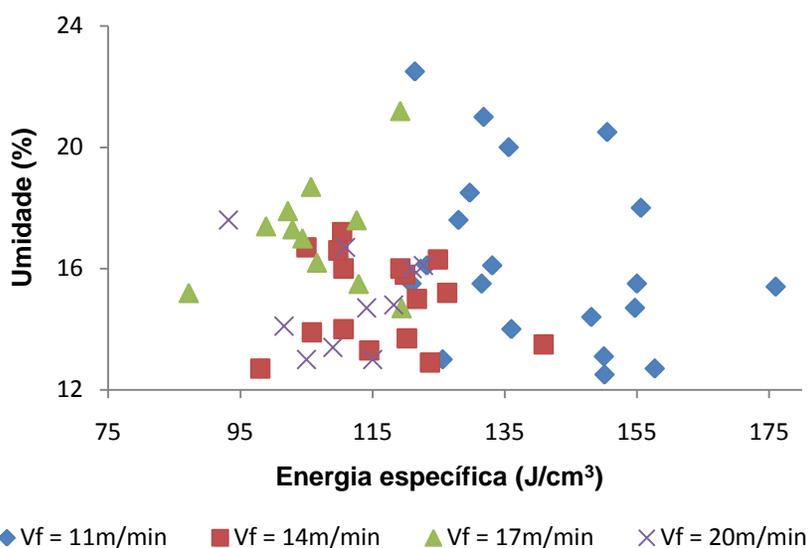


Figura 4 Consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de *Eucalyptus* sp. em função da umidade média dos toretes, para as velocidades de avanço de 11, 14, 17 e 20  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

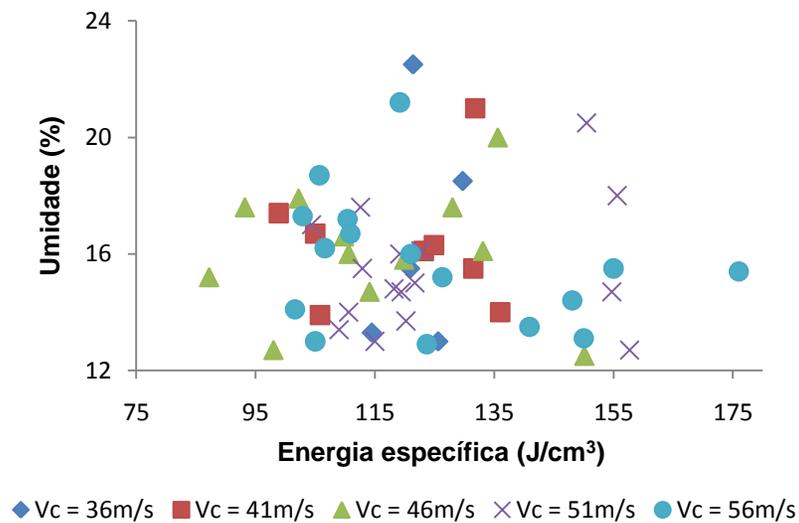


Figura 5 Consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de *Eucalyptus* sp. em função da umidade média dos toretes, para as velocidades de corte de 36, 41, 46, 51 e 56  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

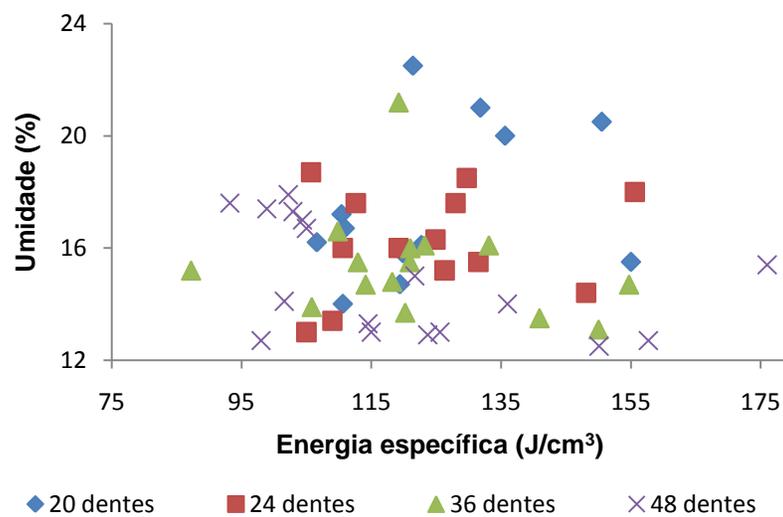


Figura 6 Consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de *Eucalyptus* sp. em função da umidade média dos toretes, para as serras de 400 mm de diâmetro e 20, 24, 36 e 48 dentes alternos

#### 4.2 Comparação do consumo energético dos clones VM 01 e MN 463

A Tabela 5 apresenta o resumo da análise de variância para o consumo de energia específica de corte da madeira dos clones VM 01 e MN 463. Observa-se que os efeitos principais (efeito das combinações de velocidade de corte (Vc), velocidade de avanço (Vf) e número de dentes (z) e o efeito dos clones) e sua interação foram significativos. O desdobramento da interação entre os tratamentos e o clone foi executado pela comparação múltipla, a 5% de significância, pelo teste de Scott-knott.

Tabela 5 Resumo da análise de variância para o consumo da energia específica de corte da madeira dos clones VM 01 e MN 463 de *Eucalyptus* sp. em função dos tratamentos submetidos e da interação

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Quadrado Médio
Combinações de Vf, Vc e z	56	0,01883*
Clone	1	0,04356*
Clone*Combinações de Vf, Vc e z	56	0,00332*
Erro	3306	0,00021
Total corrigido	3419	

\* significativo a 5% de significância

Vf = velocidade de corte, Vc = velocidade de avanço e z = número de dentes da serra circular

Considerando a diferença de energia específica de corte dos dois clones, torna-se necessária a indicação da densidade desses dois materiais genéticos. Assim, a 12% de umidade, o clone MN 463 e o VM 01 apresentaram densidades médias de 0,557 e 0,652 g\*cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Houve diferença estatística para a variável densidade, a 5% de significância. Souza et al. (2011) encontraram valores, respectivamente, de 0,514 e de 0,574 g\*cm<sup>-3</sup> para os mesmos clones. Fatores como a idade das árvores, os tratamentos silviculturais e o

sítio podem ter influenciado na densidade da madeira dos clones. Contudo, não se pode afirmar que a diferença encontrada seja significativa estatisticamente.

Pela análise de variância do consumo de energia específica de corte observa-se que houve diferença estatística a 5% de significância para os clones MN 463 e VM 01. O clone MN 463 apresentou menor consumo de energia específica de corte em relação ao clone VM 01, cujas médias de energia específica foram de 114,9 e 122,1 J\*cm<sup>-3</sup> respectivamente. Devido à menor densidade do clone MN 463 este resultado era esperado. Segundo Néri (1998), a força de corte em geral aumenta com o aumento da densidade da madeira. Gonçalves (2000) afirmou que os esforços de corte em madeiras muito densas pode chegar a ser cinco vezes maior, quando comparado às madeiras macias.

Souza et al. (2011) obtiveram resultado inverso de consumo de energia para os mesmos clones. No trabalho realizado pelos autores, o clone MN 463 apresentou maior consumo de energia que o clone VM 01, porém os clones apresentaram igualdade estatística para a variável densidade. Mas, conforme já mencionado anteriormente, não se pode afirmar que exista diferença estatística entre os dados de Souza et al. (2011) e os dados obtidos neste trabalho para a separação dos clones pelos valores da densidade.

### **4.3 Consumo de energia específica do clone VM 01**

A Tabela 6 apresenta o resultado do teste de Scott-knott a 5% de significância, para as interações de velocidade de avanço, velocidade de corte e número de dentes que foram avaliados para o clone VM 01. Observa-se o destaque de dois conjuntos de velocidade de corte, velocidade de avanço e número de dentes. A serra de 36 dentes com velocidade de corte de 46 m\*s<sup>-1</sup> e velocidade de avanço de 17 m\*min<sup>-1</sup> apresentou média de consumo de energia específica de corte de 87,2 J\*cm<sup>-3</sup>. Já a serra de 48 dentes com velocidade de

corte de  $46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e velocidade de avanço de  $20 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  apresentou média de energia específica de corte de  $93,2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Esses foram os menores valores de energia específica de corte. Recomenda-se utilizar velocidade de avanço de  $20 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  com velocidade de corte de  $46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e serra com 48 dentes, que promoverá uma maior produtividade.

Tabela 6 Comparação múltipla das médias de consumo da energia específica de corte ( $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) para o clone VM 01

Velocidade de avanço ( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	Consumo médio de energia específica ( $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$ )				
	Velocidade de corte ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )				
20 dentes	36	41	46	51	56
11	121,4 e	131,8 g	135,6 g	150,5 h	155,0 i
14			119,9 e	110,6 d	110,4 d
17				119,4 e	106,6 c
20				122,7 f	110,9 d
24 dentes					
11	129,7 f	131,5 g	128,0 f	155,6 i	148,1 h
14		124,9 f	110,6 d	119,2 e	126,3 f
17				112,6 d	105,7 c
20				109,0 d	105,0 c
36 dentes					
11	120,9 e	123,2 f	133,1 g	154,7 i	150,0 h
14		105,8 c	109,8 d	120,2 e	140,9 g
17			87,2 a	112,9 d	119,2 e
20			114,1 e	118,2 e	121,0 e
48 dentes					
11	125,6 f	136,0 g	150,1 h	157,7 i	176,0 j
14	114,5 e	105,0 c	98,0 b	121,7 e	123,7 f
17		98,9 b	102,2 c	104,4 c	102,9 c
20			93,2 a	115,0 e	101,6 c

Médias seguidas da mesma letra e, ou mesmo tom de cinza, não diferem entre si, pelo teste de Scott-knott, a 5% de significância.

#### 4.4 Consumo de energia específica do clone MN 463

A Tabela 7 apresenta o resultado do teste de Scott-knott a 5% de significância, para as interações de velocidade de avanço, velocidade de corte e número de dentes que foram avaliados para o clone MN 463. Observa-se que se destacaram seis conjuntos de velocidade de corte, velocidade de avanço e número de dentes. A serra de 24 dentes e a velocidade de avanço de 14 m\*min<sup>-1</sup> estiveram presente em três dos seis melhores tratamentos. Já para característica velocidade de corte destacaram-se as velocidades de 46 e 51 m\*s<sup>-1</sup>. Para aumentar a produtividade em madeira processada recomenda-se utilizar a velocidade de avanço de 20 m\*min<sup>-1</sup>, com a serra de 36 dentes e velocidade de corte de 51 m\*s<sup>-1</sup>.

Tabela 7 Comparação múltipla das médias de consumo da energia específica de corte (J\*cm<sup>-3</sup>) para o clone MN 463

Velocidade de avanço (m*min <sup>-1</sup> )	Consumo médio de energia específica (J*cm <sup>-3</sup> )				
	Velocidade de corte (m*s <sup>-1</sup> )				
20 dentes	36	41	46	51	56
11	115,9 d	126,5 e	133,4 f	136,3 f	158,5 h
14			111,3 d	96,1 b	106,6 c
17				96,1 b	123,2 e
20				99,4 b	125,1 e
24 dentes					
11	123,0 e	137,1 f	130,0 e	126,1 e	115,7 d
14		105,6 c	80,1 a	85,6 a	109,9 c
17				105,7 c	87,5 a
20				92,0 b	103,0 c

“Tabela 7, conclusão”

Velocidade de avanço (m*min <sup>-1</sup> )	Consumo médio de energia específica (J*cm <sup>-3</sup> )				
	Velocidade de corte (m*s <sup>-1</sup> )				
36 dentes					
11	117,7 d	124,4 e	138,2 f	142,1 f	161,7 h
14		141,6 f	106,6 c	103,3 c	121,4 e
17			100,7 b	94,1 b	117,1 d
20			104,0 c	86,1 a	113,3 d
48 dentes					
11	118,9 d	128,5 e	117,4 d	156,9 h	156,0 h
14	89,5 a	104,7 c	116,4 d	115,8 d	148,6 g
17		98,9 b	89,6 a	92,9 b	110,1 c
20			94,3 b	101,4 b	107,5 c

Médias seguidas da mesma letra e, ou mesmo tom de cinza, não diferem entre si, pelo teste de Scott-knott, a 5% de significância.

Observa-se que, independente dos clones, os tratamentos que utilizaram velocidade de avanço de 11 m\*s<sup>-1</sup> foram os que mais consumiram energia específica de corte (Tabelas 6 e 7). Souza et al. (2011) trabalharam com velocidades de avanço de 7, 12 e 17 m\*min<sup>-1</sup> para o processamento de madeira roliça dos clones VM 01 e MN 463 e também encontraram valores superiores de consumo de energia específica nas menores velocidades de avanço. Velocidade de avanço menor ou igual a 11 m\*min<sup>-1</sup> não é recomendada, pois o consumo de energia específica de corte no processamento mecânico de madeira roliça foi alto.

#### 4.5 Consumo de energia versus parâmetros de corte

De modo geral observa-se uma tendência de diminuir o consumo de energia específica na medida em que se aumenta a velocidade de avanço para todas as serras avaliadas. Para velocidades de avanços muito altas, o consumo de

energia aumentou a ponto de provocar sobrecarga no motor da serra circular. Como mencionado anteriormente, quando se trabalha com baixa velocidade de avanço e alta velocidade de corte os dentes passam várias vezes no mesmo local para retirar pequena quantidade de material, conseqüentemente, o consumo de energia específica aumenta. Porém, quando se trabalha com baixa velocidade de corte e alta velocidade de avanço a energia requerida para o corte é maior que a energia que o motor é capaz de fornecer, sem que ocorram danos ao mesmo.

Observa-se que para o clone VM 01, com as serras de 20 e 24 dentes e nas velocidades de corte de  $51 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  o consumo de energia específica diminuiu na medida em que se aumentou a velocidade de avanço até  $17 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , já para a velocidade de avanço de  $20 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  o consumo de energia específica de corte aumentou (Figuras 7 e 8). Para o clone MN 463, com serra de 24 dentes e velocidade de corte de  $56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  foi observada a mesma tendência (Figura 9). Recomenda-se realizar novos ensaios de processamento mecânico utilizando os dois clones, com velocidade de corte de  $51 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , serras de 20 e 24 dentes e velocidades de avanço entre  $17$  e  $20 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , pois entre  $17$  e  $20 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  deve existir uma velocidade de avanço que otimiza o consumo de energia específica para o processamento mecânico da madeira roliça do clone VM 01, com as serras de 20 e 24 dentes nas velocidades de corte de  $51$  e  $56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

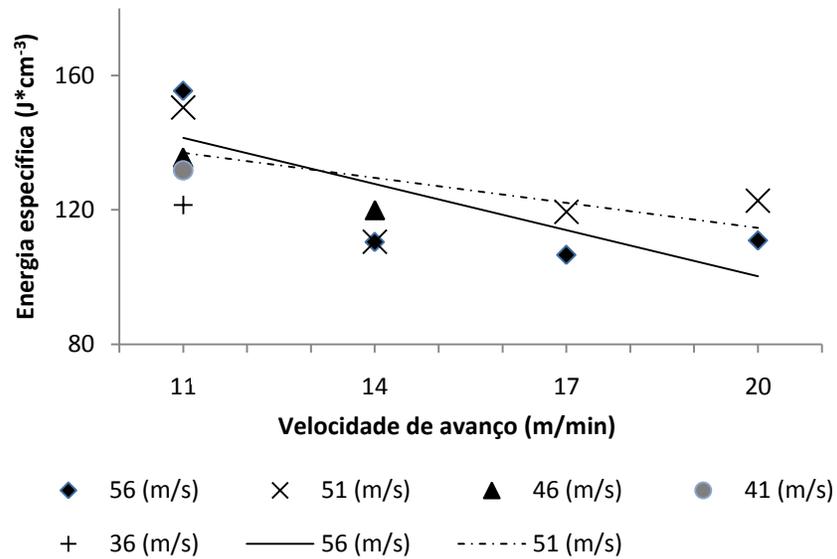


Figura 7 Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de *Eucalyptus* sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 20 dentes

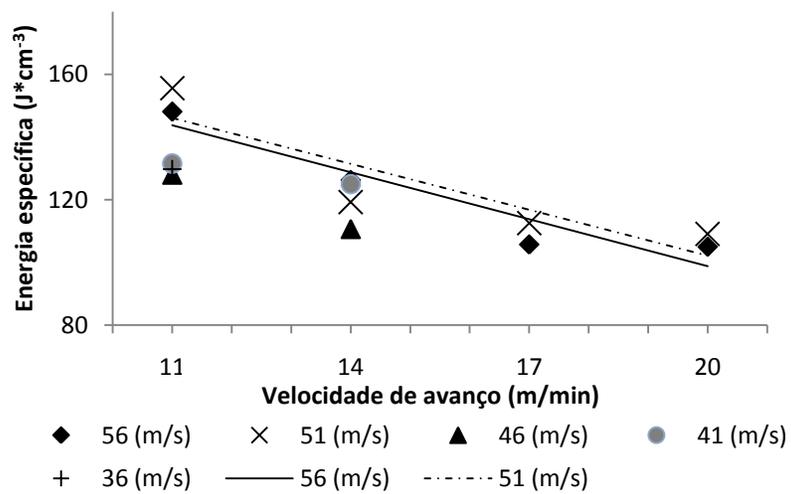


Figura 8 Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira dos clones VM 01 de *Eucalyptus* sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 24 dentes

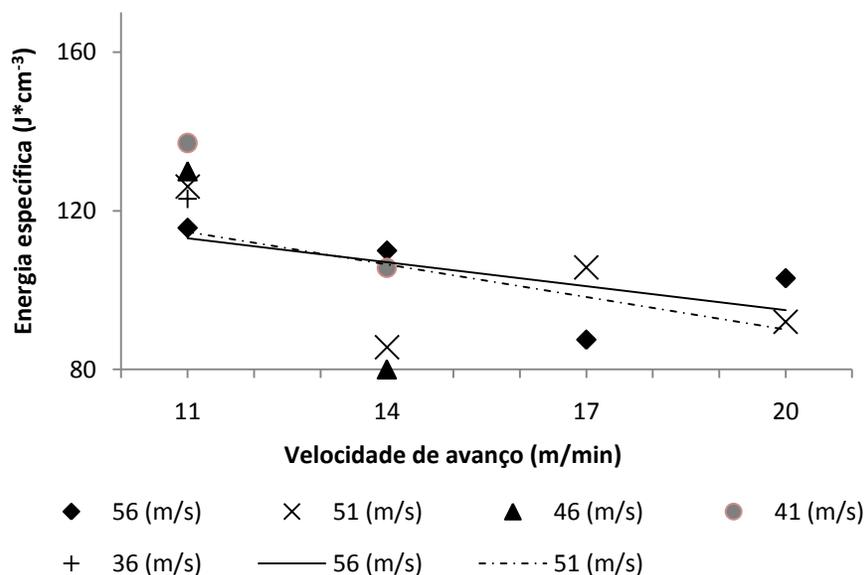


Figura 9 Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira dos clones MN 463 de *Eucalyptus* sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 24 dentes

Para o clone MN 463, com serra de 20 dentes e velocidade de avanço de  $11 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  pode-se observar que as velocidades de corte de  $46$ ,  $51$  e  $56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  foram as que mais consumiram energia específica de corte. Quando se trabalhou com velocidade de avanço de  $14 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  observou-se uma queda no consumo de energia específica para as velocidades de avanço de  $46$ ,  $51$  e  $56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Já para a velocidade de avanço de  $17 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  o consumo aumentou para as velocidades de corte de  $51$  e  $56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e provocou sobrecarga quando o processamento mecânico foi executado com velocidade de corte de  $46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Possivelmente entre  $14$  e  $17 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  existe uma velocidade de avanço que minimiza o consumo de energia específica de corte para o processamento mecânico da madeira roliça do clone MN 463, com serra de 24 dentes, nas velocidades de corte de  $46$ ,  $51$  e  $56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Figura 10). Recomenda-se realizar ensaios de processamento mecânico utilizando madeira do clone MN 463 com velocidades

de corte de 46, 51 e 56  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , serra de 20 dentes e velocidades de avanço entre 14 e 17  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Principalmente com as velocidades de corte de 46 e 51  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , pois as interações com a serra de 24 dentes, velocidade de avanço de 14  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  e velocidades de corte de 46 e 51  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  foram interações que estiveram entre os melhores resultados, segundo o teste de Skott-knott a 5% de significância (Tabela 7).

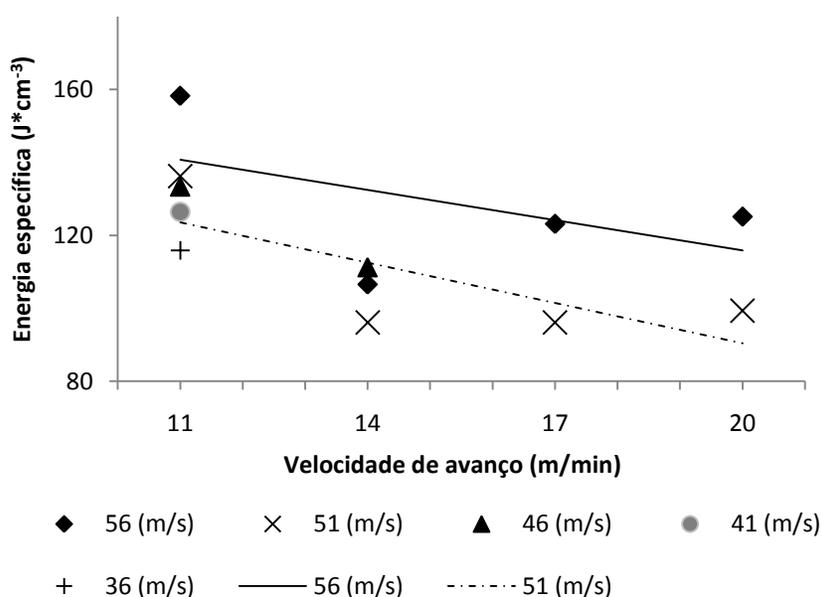


Figura 10 Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone MN 463 de *Eucalyptus* sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 20 dentes

Para o clone VM 01, com serra de 36 dentes os maiores consumos de energia específica foram nas velocidades de corte de 51 e 56  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  e os menores foram nas velocidades de corte de 36, 41 e 46  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Porém nas maiores velocidades de corte (56, 51 e 46  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) há uma tendência de diminuir o consumo de energia específica na medida em que se aumenta a velocidade de

corde. Já para as menores velocidades de corte (36 e 41  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), devido à sobrecarga no motor, não foi possível realizar os ensaios de processamento mecânico nas maiores velocidades de avanço (Figura 11).

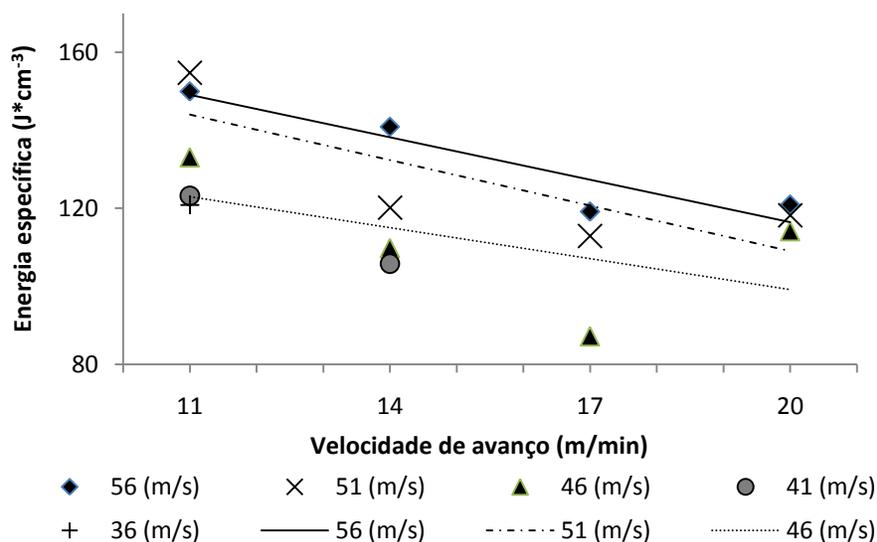


Figura 11 Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de *Eucalyptus* sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 36 dentes

Para o clone VM 01, com serra de 36 dentes e velocidades de corte de 46, 51, e 56  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  pode-se observar que há uma tendência de diminuir o consumo de energia específica na medida em que se aumentou a velocidade de avanço até 17  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Já com velocidade de avanço de 20  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  houve um acréscimo no consumo de energia específica de corte (Figura 11). Considerando que entre 17 e 20  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  deve existir uma velocidade de avanço que otimiza o consumo de energia específica de corte para o processamento mecânico da madeira roliça do clone VM 01, com serra de 36 dentes nas velocidades de corte de 46, 51 e 56  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  é recomendado que se realize novos ensaios de

processamento mecânico com velocidades de avanço de 17 até 20  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ , serra de 36 dentes, madeira roliça do clone VM 01 e velocidades de corte de 46, 51 e 56  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Observa-se na Tabela 6 que a interação com serra de 36 dentes, velocidade de corte de 46  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  e velocidade de avanço de 17  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  foi um dos tratamentos que obteve menor consumo de energia específica de corte, segundo o teste de Skott-knott a 5% de significância.

Para o clone MN 463, com serra de 36 dentes e velocidade de avanço de 11  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  o consumo de energia específica foi crescente na medida em que se aumentava a velocidade de corte. Como mencionado anteriormente, a associação de alta velocidade de corte, baixa velocidade de avanço e maior número provocam o aumento no consumo de energia específica para o processamento mecânica da madeira. Já para as velocidades de avanço de 14, 17 e 20  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  o consumo de energia específica foi menor com velocidade de corte de 51  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Figura12).

Observa-se que para as velocidades de corte de 56, 51  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  há uma tendência de diminuir o consumo de energia específica na medida em que se aumenta a velocidade de avanço. Já para velocidade de corte de 46  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  esta tendência foi observada somente até a velocidade de avanço de 17  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ , observou-se um aumento no consumo de energia específica de corte da velocidade de avanço de 17  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  para a velocidade de avanço de 20  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ . É possível que entre 17 e 20  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  exista uma velocidade de avanço que torne o processamento mecânico da madeira roliça do clone MN 463, com serra de 36 dentes e velocidade de corte de 46  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  mais eficiente (Figura 12). Recomenda-se realizar ensaios de processamento mecânico com velocidades de avanço entre 17 e 20  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ , madeira roliça do clone MN 463, serra com 400 mm de diâmetro e 36 dentes e velocidade de corte de 46  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Já para as velocidades de corte de 51 e 56  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  recomenda-se realizar ensaios de usinagem com velocidades de avanço superiores a 20  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ , pois nessas

condições o consumo foi decrescente da velocidade de avanço de 11 até 20  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

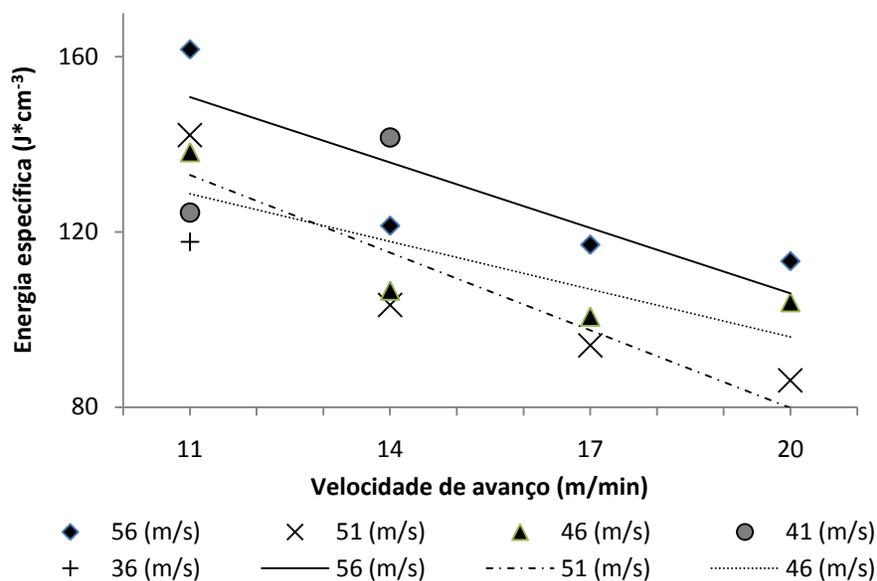


Figura 12 Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone MN 463 de *Eucalyptus* sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 36 dentes

Nas Figuras 13 e 14 observa-se que na velocidade de avanço de  $11 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  o consumo de energia foi menor para as velocidades de corte de 46, 41 e  $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Na velocidade de avanço de  $14 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  observa-se que o consumo de energia específica diminuiu para todas as velocidades de corte avaliadas. Na velocidade de avanço de  $17 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  o consumo de energia foi menor para as velocidades de corte de 56, 51 e  $46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e devido à sobrecarga no motor, não foi possível processar a madeira com velocidade de corte de  $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Provavelmente entre  $14$  e  $17 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  existe uma velocidade de avanço que otimiza o consumo de energia específica para processar madeira roliça dos

clones VM 01 e MN 463 com serra de 48 dentes e velocidade de corte de  $36 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$ . Recomenda-se realizar ensaios de usinagem com velocidades de avanço entre  $14$  e  $17 \text{ m}^*\text{min}^{-1}$ , madeira roliça dos clones VM 01 e MN 463, serra de 48 dentes e velocidade de corte de  $36 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$ . Já para a velocidade de avanço de  $20 \text{ m}^*\text{min}^{-1}$  a tendência não foi a mesma para os dois clones.

Para o clone VM 01, observa-se que o consumo manteve-se para velocidade de corte de  $56 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$ , aumentou para a velocidade de corte de  $51 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$ , foi menor para a velocidade de corte de  $46 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$  e provocou sobrecarga no motor da serra para a velocidade de corte de  $41 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$ . Possivelmente a velocidade de avanço que otimiza o processamento de madeira roliça do clone VM 01 com serra de 48 dentes e velocidades de corte de  $41$  e  $51 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$  está entre  $17$  e  $20 \text{ m}^*\text{min}^{-1}$  (Figura 13). Recomenda-se realizar ensaios de usinagem com velocidades de avanço entre  $17$  e  $20 \text{ m}^*\text{min}^{-1}$ , madeira roliça do clone VM 01, serra de 48 dentes e velocidades de corte de  $41$  e  $51 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$ . Já para o clone MN 463 observa-se que o consumo manteve-se para velocidade de corte de  $56 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$ , aumentou para as velocidades de corte de  $51$  e  $46 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$  e provocou sobrecarga no motor para a velocidade de corte de  $41 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$  (Figura 14). Provavelmente a velocidade de avanço que consome menos energia específica de corte para o processamento de madeira roliça do clone MN 463 com serra de 48 dentes e velocidades de corte de  $41$ ,  $46$ ,  $51 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$  está entre  $17$  e  $20 \text{ m}^*\text{min}^{-1}$ . Recomenda-se realizar ensaios de usinagem com velocidades de avanço entre  $17$  e  $20 \text{ m}^*\text{min}^{-1}$ , madeira roliça do clone MN 463, serra de 48 dentes e velocidades de corte de  $41$ ,  $46$  e  $51 \text{ m}^*\text{s}^{-1}$ .

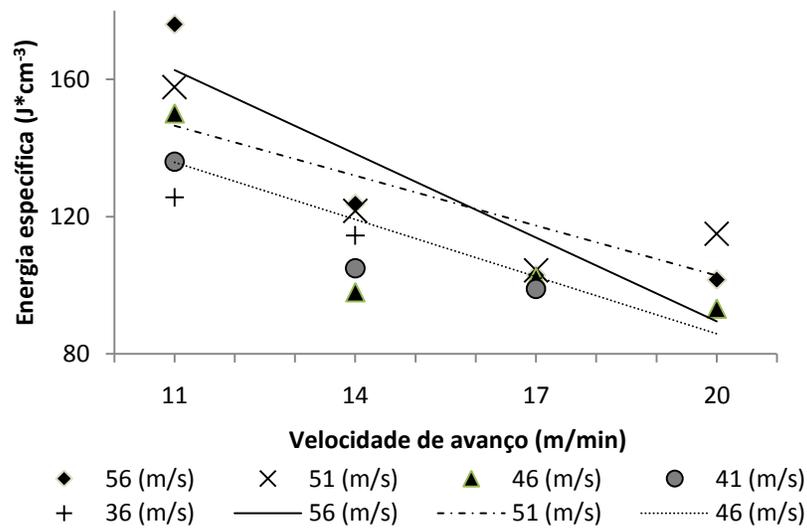


Figura 13 Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone VM 01 de *Eucalyptus* sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 48 dentes

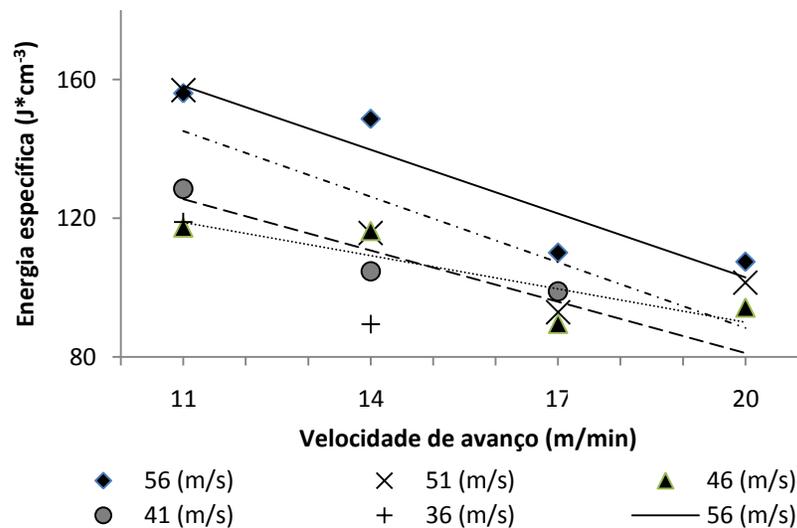


Figura 14 Tendência do consumo de energia específica de corte da madeira do clone MN 463 de *Eucalyptus* sp. em função da velocidade de avanço, para serra circular de 48 dentes

## 5 CONCLUSÕES

- a) o clone de *Eucalyptus urophylla* apresentou menor consumo de energia específica de corte em relação ao clone de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus urophylla*;
- b) para o clone de *Eucalyptus urophylla* recomenda-se utilizar a velocidade de avanço de  $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  com a serra de 36 dentes e com velocidade de corte de  $51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- c) para o clone de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus urophylla* recomenda-se utilizar a serra de 48 dentes, velocidade de corte de  $46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e velocidade de avanço de  $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;
- d) Maiores velocidades de corte e menores velocidades de avanço apresentaram maiores consumos de energia específica de corte;
- e) não é recomendado utilizar velocidade de corte menor ou igual a  $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , para ambos os clones;
- f) não é recomendado utilizar velocidade de avanço menor ou igual a  $11 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  para o processamento mecânico de madeira roliça para ambos os clones;
- g) o tratamento que obteve maior consumo de energia específica de corte foi a serra com 48 dentes, velocidade de corte de  $56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  e velocidade de avanço de  $11 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , para o clone *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus urophylla*.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190. **Projetos de estrutura de madeiras**. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico 2011**. Brasilia, 2011. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/>>. Acesso em: 24 nov. 2011.

BONDUELLE, A.; CRUZ, S. R.; SILVA, J. R. M. **Processo mecânico da madeira**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2002. 26 p. (Notas de aula).

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.

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

GOMIDE, J. L. et al. Caracterização tecnológica para produção de celulose da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 129-137, 2005.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 339-344, Mar./Apr. 2010.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. Bauru: Document Center Xerox, 2000.

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

LIMA, J. T.; DELLA LÚCIA, R. M.; VITAL, B. R. Influência do teor de umidade nas propriedades da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 10, n. 1, p. 27-43, jan./mar. 1986.

MOURA, L. C.; ZANCHETTA, D. Gestão, sustentabilidade e enriquecimento da flora nativa em floresta plantada de eucalipto. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 7., 2011, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CNEG, 2011. 1 CD ROM.

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

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

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-EBRAMEM, 11., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: Unochapecó, 2008. 1 CD ROM.

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.; MATZ, L.; GUSTAFSSON-STIG, L. Cutting-forces when up-milling in beech. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, v. 39, n. 8, p. 674-684, Nov. 2005.

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

REVAL SERRAS E FERRAMENTAS PARA MADEIRA. **Formatos de dentes e aplicações**. Caxias do Sul, 2009. Disponível em: <<http://www.revalserras.com.br/>>. Acesso em: 25 nov. 2009.

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**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 3, p. 279-283, July/Sept. 2007.

SANDVIK, S. **The handbook**: production use and maintenance of wood band saw blades. Sandviken: Sandvik Steel, 1999.

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: 22 Nov. 2011.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, Viçosa, MG. v. 27, n. 2, p. 482-490. Mar./Apr. 2003.

SILVA, J. R. M. et al. Interação da luz laser para a avaliação da textura de madeiras nativas e de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 167-175, 2005.

SOUZA, E. M. et al. Specific cutting energy consumption in a circular saw for Eucalyptus stands VM 01 and MN 463. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 109-115, Jan./Mar. 2011.

STAMM, A. J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald, 1971. 459 p.

TRUGILHO, P. F. Et al. Avaliação de clones de Eucalyptus para produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, abr./jun. 2001.

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. **Wood variation**: its causes and control. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 361 p.

## ANEXOS

## ANEXO A – TABELAS

Anexo 1A Quadro da umidade média na base seca (%) dos toretes dos clones de *Eucalyptus* sp. MN 463 e VM 01 para cada tratamento utilizados nos ensaios de processamento mecânico

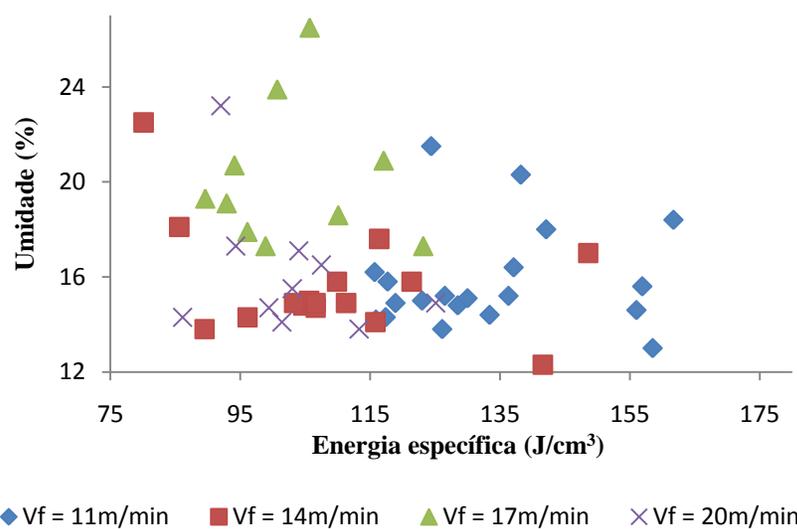
Velocidade de avanço (m*min <sup>-1</sup> )	Velocidade de corte (m*s <sup>-1</sup> )	Número de dentes	Umidade média dos toretes na base seca (%)	
			MN 463	VM 01
11	36	20	14,2	22,5
11	36	24	15,0	18,5
11	36	36	15,8	15,5
11	36	48	14,9	13,0
11	41	20	15,2	21,0
11	41	24	16,4	15,5
11	41	36	21,5	16,1
11	41	48	14,8	14,0
11	46	20	14,4	20,0
11	46	24	15,1	17,6
11	46	36	20,3	16,1
11	46	48	14,3	12,5
11	51	20	15,2	20,5
11	51	24	13,8	18,0
11	51	36	18,0	14,7
11	51	48	15,6	12,7
11	56	20	13,0	15,5
11	56	24	16,2	14,4
11	56	36	18,4	13,1
11	56	48	14,6	15,4

## “ANEXO 1A,Continuação”

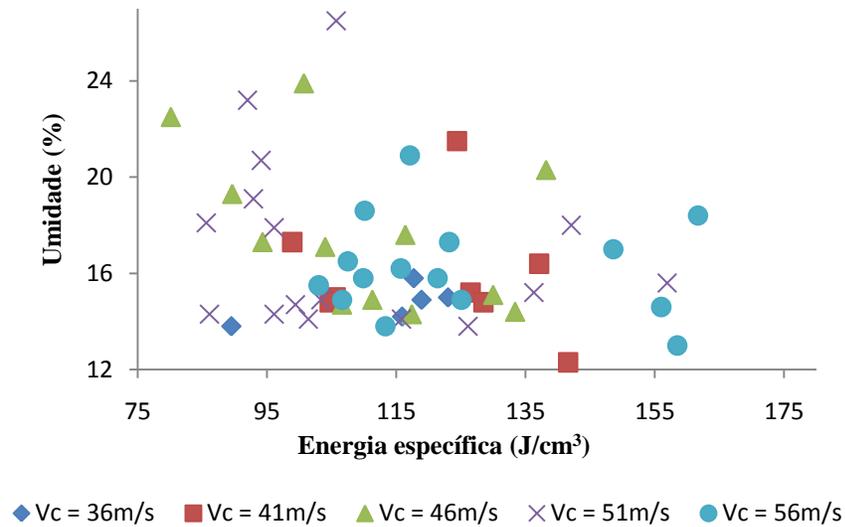
Velocidade de avanço (m*min <sup>-1</sup> )	Velocidade de corte (m*s <sup>-1</sup> )	Número de dentes	Umidade média na base seca (%)	
			MN 463	VM 01
14	36	48	13,8	13,3
14	41	24	15,0	16,3
14	41	36	12,3	13,9
14	41	48	14,8	16,7
14	46	20	14,9	15,8
14	46	24	22,5	16,0
14	46	36	14,7	16,6
14	46	48	17,6	12,7
14	51	20	14,3	14,0
14	51	24	18,1	16,0
14	51	36	14,9	13,7
14	51	48	14,1	15,0
14	56	20	14,9	17,2
14	56	24	15,8	15,2
14	56	36	15,8	13,5
14	56	48	17,0	12,9
17	41	48	17,3	17,4
17	46	36	23,9	15,2
17	46	48	19,3	17,9
17	51	20	17,9	14,7
17	51	24	26,5	17,6
17	51	36	20,7	15,5
17	51	48	19,1	17,0
17	56	20	17,3	16,2
17	56	24	27,1	18,7
17	56	36	20,9	21,2
17	56	48	18,6	17,3

## “ANEXO 1A, Conclusão”

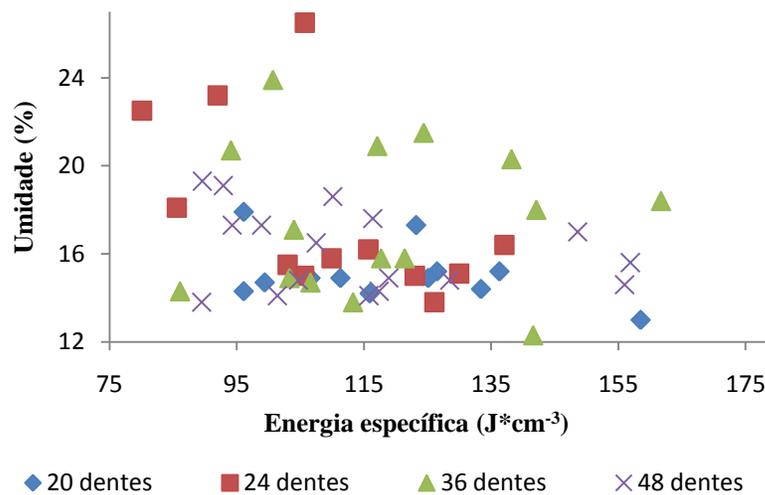
Velocidade de avanço ( $\text{m}^*\text{min}^{-1}$ )	Velocidade de corte ( $\text{m}^*\text{s}^{-1}$ )	Número de dentes	Umidade média na base seca (%)	
			MN 463	VM 01
20	46	36	17,1	14,7
20	46	48	17,3	17,6
20	51	20	14,7	16,1
20	51	24	23,2	13,4
20	51	36	14,3	14,8
20	51	48	14,1	13,0
20	56	20	14,9	16,7
20	56	24	15,5	13,0
20	56	36	13,8	16,0
20	56	48	16,5	14,1



ANEXO 2A Consumo de energia específica de corte da madeira do clone MN 463 de *Eucalyptus* sp. em função da umidade média dos toretes, para as velocidades de avanço de 11, 14, 17 e 20  $\text{m}^*\text{min}^{-1}$



ANEXO 3A Consumo de energia específica de corte da madeira do clone MN 463 de *Eucalyptus* sp. em função da umidade média dos toretes, para as velocidades de corte de 36, 41, 46, 51 e 56 m\*s<sup>-1</sup>



ANEXO 4A Consumo de energia específica de corte da madeira do clone MN 463 de *Eucalyptus* sp. em função da umidade média dos toretes, para as serras de 400 mm de diâmetro e 20, 24, 36 e 48 dentes alternos