



**ELDER MARCOS DA SILVA**

**FRESAMENTO COM COMANDO NUMÉRICO  
COMPUTADORIZADO EM MADEIRAS DE  
*Corymbia* E DE *Eucalyptus*: ANÁLISE DO  
CONSUMO DE ENERGIA**

**LAVRAS - MG**

**2016**

**ELDER MARCOS DA SILVA**

**FRESAMENTO COM COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO  
EM MADEIRAS DE *Corymbia* E DE *Eucalyptus*: ANÁLISE DO  
CONSUMO DE ENERGIA**

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.

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva  
Orientador

Prof. Dr. Antônio Carlos Néri  
Coorientador

**LAVRAS - MG  
2016**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Elder Marcos da.

Fresamento com comando numérico computadorizado em madeiras de *Corymbia* e de *Eucalyptus*: análise do consumo de energia / Elder Marcos da Silva. – Lavras: UFLA, 2016.

68 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico) – Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Processamento mecânico. 2. Potência de corte. 3. Otimização de processo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

**ELDER MARCOS DA SILVA**

**FRESAMENTO COM COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO  
EM MADEIRAS DE *Corymbia* E DE *Eucalyptus*: ANÁLISE DO  
CONSUMO DE ENERGIA**

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 15 de março de 2016.

Prof. Dr. Eduardo Bento Pereira	UFSJ
Prof. Dr. Danton Diego Ferreira	UFLA
Prof. Ph. D. José Tarcísio Lima	UFLA

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2016**

*À minha esposa Paula e família*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e ao Divino Pai Eterno, pelas inúmeras bênçãos recebidas.

Ao meu orientador Prof. José Reinaldo, pela paciência, orientação, trabalho e a amizade formada nesses anos. Aos Professores Eduardo Bento, Danton Ferreira, José Tarcísio e Antônio Néri, por participarem da banca de avaliação deste trabalho.

A Prof<sup>ª</sup> Sílvia Ferreira pela disponibilidade e interesse em colaborar nesta pesquisa desde o primeiro contato e pelo seu bom humor sempre contagiante.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela amizade e colaboração no meu aprendizado. Aos técnicos do laboratório, de usinagem da madeira, Heber Macedo e de Elétrica, Maurício Ferreira.

Aos meus pais, Antônio e Terezinha, pelo exemplo de dedicação, e a minha irmã, Eliana, pelos incentivos.

Ao meu amor Paula, pelo companheirismo, paciência e compreensão nos momentos difíceis assim como nas alegrias.

Aos colegas de trabalho, pela amizade e grande ajuda prestada ao longo dessa fase.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelos recursos que permitiram aquisição de equipamentos.

Ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira e a todos aqueles que me deram apoio e não foram citados aqui.

## RESUMO

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas para se conhecer melhores condições de processamento mecânico da madeira em relação ao custo e à qualidade do produto final. O aprimoramento de tecnologias que visa ao controle das forças de corte tornou-se busca incessante dentro da indústria. Além disso, no Brasil, existem propostas para melhor aproveitamento de madeiras de florestas plantadas, principalmente de *Eucalyptus* para a utilização em produtos de maior valor agregado, como móveis e esquadrias. Para estabelecer adequadas velocidades de avanço e de corte que possibilitem reduzir o consumo de energia, objetivou-se, neste trabalho medir e analisar a potência de corte em madeiras de *Corymbia* e de *Eucalyptus* de diferentes densidades, durante seu fresamento. Utilizou-se madeiras de *Corymbia citriodora*, *C. maculata*, *Eucalyptus deglupta*, *E. pilularis* e *E. microcorys*, com densidades aparentes entre  $0,425 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  e  $1,085 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , provenientes do plantio experimental da Universidade Federal de Lavras. Foram confeccionados corpos de prova que foram usinados na fresadora periférica com comando numérico computadorizado (Laboratório de Usinagem da Madeira - DCF/UFLA). As fresagens foram realizadas em paralelo, perpendicular e  $45^\circ$  em relação à grã. Também foi realizada a fresagem circular. Para a leitura das potências de cortes, foi utilizado o analisador da qualidade da energia. Os resultados mostraram aumento do consumo de potência com o aumento da velocidade de avanço e de corte e também com o aumento da densidade. O corte no sentido perpendicular às fibras apresentou maior consumo de potência, comparado ao corte paralelo. Observou-se, em média, diminuição de 12% no consumo de potência ativa, quando se alterou a velocidade de corte de  $3,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para  $7,54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , com velocidades de avanço de  $1,39 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Independentemente das espécies analisadas, menores velocidades de avanço, associadas a maiores velocidades de corte apresentaram menores consumos de potência ativa.

**Palavras-chave:** Processamento mecânico. Potência de corte. Otimização de processo.

## ABSTRACT

Researches have been developed to determine better conditions for the mechanical processing of wood in relation to the cost and quality of the final product. Technology improvement aiming at controlling the cutting forces has become an incessant search within the industry. In addition, in Brazil, there are proposals for the better use of woods from planted forests, especially of *Eucalyptus*, for use on products of higher added value, such as furniture and frames. To establish the adequate feeding and cutting speed that allow the reduction of energy intake, we measured and analyzed the cutting power of *Corymbia* and *Eucalyptus* woods of different densities, during its hobbing. The woods used were *Corymbia citriodora*, *C. maculate*, *Eucalyptus deglupta*, *E. pilularis* and *E. microcorys*, with apparent densities of  $0.425 \text{ g cm}^{-3}$  and  $1.085 \text{ g cm}^{-3}$ , from an experimental plantation. Samples were manufactured and machined in milling machine with computerized numeric command. The millings were carried out at parallel, perpendicular and  $45^\circ$  in relation to the grain. The circular milling was also performed. For the readings of the cutting power, we used the energy quality analyzer. The results showed an increase in power intake with the increase of feeding and cutting speed, as well as with the increase in density. The cut in the direction perpendicular to the fibers presented higher power intake when compared to the parallel cut. In average, we verified a decrease of 12% of active power intake when altering the cutting speed from  $3.77 \text{ m s}^{-1}$  to  $7.54 \text{ m s}^{-1}$ , with feeding speed of  $1.39 \text{ m min}^{-1}$ . Regardless of the analyzed species, lower feeding speeds, associated to higher cutting speeds presented lower active power intake.

**Keywords:** Mechanical processing. Cutting power. Process optimization.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	11
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	13
<b>3.1</b>	<b>Os gêneros <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i></b> .....	13
<b>3.2</b>	<b>Usinagem da madeira</b> .....	17
<b>3.3</b>	<b>Parâmetros de usinagem</b> .....	22
<b>3.3.1</b>	<b>Velocidade de corte (Vc)</b> .....	22
<b>3.3.2</b>	<b>Velocidade de avanço (Vf)</b> .....	23
<b>3.4</b>	<b>Comando Numérico Computacional</b> .....	25
<b>3.5</b>	<b>Esforços de corte</b> .....	27
<b>3.6</b>	<b>Relação da potência aparente, potência ativa e potência reativa</b> ..	29
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	35
<b>4.1</b>	<b>Preparação dos corpos de prova</b> .....	35
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de fresamento periférico com CNC</b> .....	36
<b>4.3</b>	<b>Determinação das propriedades da madeira</b> .....	40
<b>4.4</b>	<b>Análise estatística dos dados</b> .....	41
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	43
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	59
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	61
	<b>ANEXO A - TABELAS</b> .....	67

## 1 INTRODUÇÃO

A usinagem da madeira determina de forma direta a qualidade do produto final no setor moveleiro. Essa usinagem pode ser otimizada, por meio de tecnologias que controlam de forma precisa as velocidades de avanço e de corte ao longo do processo de usinagem. No entanto, a indústria brasileira de beneficiamento da madeira encontra-se carente de tecnologias que melhorem e impulsionem sua produção para competir no mercado global.

Tendo em vista a redução do consumo de energia, o aprimoramento de tecnologias que visam ao controle da força de corte, tornou-se uma busca incessante dentro da indústria. Além disso, no Brasil, existem pesquisas que objetivam melhor aproveitamento de madeiras de florestas plantadas, principalmente de *Corymbia* e de *Eucalyptus* para a utilização em produtos de maior valor agregado, como móveis e esquadrias.

Os grandes problemas enfrentados pela indústria madeireira são: i) como diminuir os custos com a energia utilizada no processamento e ii) evitar as paradas da produção em função de exceder o limite da potência nominal dos motores das máquinas. Para analisar o consumo de energia, é necessário realizar sua medição com controle rigoroso das características, principalmente as velocidades de avanço e de corte. Nesse sentido, o comando numérico computacional (CNC) se apresenta como tecnologia capaz de promover condições de corte controladas, permitindo semelhantes condições associadas à variação de algumas características intrínsecas e assim ter as respostas em cada situação em função da variação desejada.

Ao se utilizar adequadas velocidades de avanço e de corte em madeiras de diferentes densidades, os ganhos da indústria estão na redução do consumo de energia e das paradas não programadas, bem como na melhoria da qualidade do produto final.



## **2 OBJETIVO**

Conduziu-se, este trabalho, com o objetivo de medir e analisar a potência de corte em madeiras de *Corymbia* e de *Eucalyptus*, de diferentes densidades, no fresamento periférico, com diferentes velocidades de avanço e de corte.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Os gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus*

*Corymbia* é um gênero botânico pertencente à família Myrtaceae, que inclui os chamados eucaliptos-de-jardim. Inclui, aproximadamente, 113 espécies de árvores que, até meados da década de 1990, eram classificadas dentro do gênero *Eucalyptus*. Estudos moleculares mostraram que estão mais próximas do gênero *Angophora* e, por isso, optou-se pela criação desse gênero. Esses três gêneros possuem características muito semelhantes e podem ser designados, vulgarmente, por eucaliptos (HILL; JOHNSON, 1995).

O *Eucalyptus* é originário da Austrália, com exceção de duas espécies: *Eucalyptus urophylla* e *E. deglupta*, originários da Indonésia. Estima-se que cerca de 25,6 milhões de hectares de florestas plantadas sejam de eucalipto, totalizando 60% dessas florestas no mundo (MORA; GARCIA, 2000). Segundo dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013), em 2012, a plantação de *Eucalyptus* no Brasil contava com área de 5,10 milhões hectares, já, em 2014, segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2015), esse valor passou para 5,56 milhões de hectares. Os estados com maior concentração de plantios florestais foram Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Bahia e Mato Grosso do Sul.

O *Eucalyptus* é um gênero pertencente à família Myrtaceae, possuindo cerca de 500 espécies e subespécies do gênero. É possível que esse número não seja mais o mesmo, pois espécies que eram consideradas *Eucalyptus* foram reclassificadas como gênero *Corymbia*. Geralmente, florestas podem alcançar alturas entre 30 a 50 metros e árvores menores podem atingir alturas entre 10 a 25 metros em florestas abertas (PRYOR, 1985; PRYOR; JOHNSON, 1971). A vantagem do *Eucalyptus* é possuir grande diversidade de espécies e rápido crescimento, além das espécies serem adaptadas a diversos climas e solos.

No Brasil, a introdução do gênero de *Eucalyptus* ocorreu no século XIX, com indivíduos plantados no Jardim Botânico, do Rio de Janeiro, por volta do ano de 1825. Seu plantio era destinado a ornamentação e como quebra-ventos (PEREIRA et al., 2000). Segundo Schumacher, Calil e Vogel (2005), 75 espécies do gênero *Eucalyptus* já haviam sido plantadas no Brasil por Navarro de Andrade até 1911. Ao todo foram introduzidas 144 espécies em todo o Brasil por Navarro de Andrade, porém, atualmente, apenas algumas destas têm sido utilizadas em plantios comerciais. O Brasil é reconhecido como o principal país com plantações do gênero *Eucalyptus*, além de alto conhecimento científico e tecnológico dentro dessa cultura.

As finalidades da madeira do gênero *Eucalyptus* são muitas, o manejo e o tempo de cultivo vão ser fatores determinantes ao produto final. Quando a cultura do eucalipto é de ciclo curto, a madeira se destina para os setores de papel e celulose, carvão, lenha, palhetes e caixotaria. E nas culturas com ciclo mais longo a madeira tem destino para a indústria moveleira, construção civil entre outras utilizações.

O *Corymbia citriodora* possui distribuição natural em Queensland. De acordo com Vitti e Brito (1999), a ocorrência delas na região pode se dar tanto no norte da Austrália, com latitudes entre 16°75' e 20°50' S, quanto na região sul, cujas latitudes estão entre 22°75' e 26°00' S. A região sul possui clima subtropical com altitudes de 70 a 700 m e a região norte com clima semiárido com altitudes entre 450 a 1000 m. A precipitação varia de 650 a 1600 mm com predomínio no verão, com fim de inverno e primavera secos. A temperatura média das máximas do mês mais quente está entre 30° e 32°C e a temperatura mínima do mês mais frio está entre 9° e 12°C. Essa espécie é tolerante a muitos solos, sendo encontrada em terrenos pedregosos pobres, podzólicos de origem laterítica. No Brasil, os plantios têm sido bem disseminados, no entanto no estado de São Paulo ela tem apresentado susceptibilidade à geadas. Em solos

com deficiência nutricional podem ocorrer bifurcações no indivíduo, segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1988).

A madeira do *C. citriodora* é de alta qualidade, podendo atingir uma densidade de  $0,99 \text{ g/cm}^3$ . Suas utilizações são: madeira serrada, postes, mourões, carvão, estruturas, caixotaria, dormentes, lenha, extração da casca para produção de taninos e produção de óleos essenciais a partir das folhas, de acordo com o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF, 2015).

A espécie *E. microcorys* tem origem na Austrália, nas regiões norte de New South Wales e sul de Queensland, com latitudes entre  $25^\circ$  e  $32,5^\circ\text{S}$ , cujas altitudes estão entre o nível do mar até 800 m. As chuvas são concentradas no verão, podendo apresentar um período seco de três meses, com temperaturas médias máximas e mínimas de  $32^\circ\text{C}$  e  $5^\circ\text{C}$ , respectivamente (GOES, 1960). Pode ocorrer em solos de textura média e se desenvolver bem em solos argilosos de origem vulcânica. A madeira possui grande resistência e durabilidade e apresenta densidade alta que varia de  $0,900$  a  $1,110 \text{ g*cm}^{-3}$ . Possui alta qualidade para laminação, produção de móveis, construção civil, postes, caixotaria, moirões e escoras e ainda possui alto rendimento na serraria (EMBRAPA, 1988).

*Eucalyptus deglupta* é uma espécie que se desenvolve bem nas regiões ensolaradas com solos de boa drenagem e úmidos. Proveniente do sul das Filipinas, Indonésia e Nova Guiné. Pode crescer três metros em um ano, mas em condições ideais, o que levou essa espécie a ser designada para celulose. O *E. deglupta* tem preferência por solos arenosos e profundos de fertilidade média e também em solos de cinza vulcânica e solos de arenito. A altitude das regiões de ocorrência natural da espécie é a partir do nível do mar até 1800 m. O clima ideal para o seu desenvolvimento tem precipitação em torno de 2000 a 5000 mm, com umidade relativa entre 70 a 80%. Em altitudes acima de 300 m a

temperatura média mensal varia entre 13 a 27<sup>o</sup> C, e em altitudes mais baixas a temperatura máxima mensal varia entre 24 a 33<sup>o</sup>C.

A madeira do *E. deglupta* possui cerne de cor avermelhada e o alburno de cor branca a um rosa claro. A densidade da madeira de florestas mais antigas está entre 0,45 a 0,65 g\*cm<sup>-3</sup> e florestas mais novas de 0,35 a 0,40 g\*cm<sup>-3</sup>. A destinação da madeira pode ser para fabricação de moveis, molduras, casas, edifícios e barcos. Essa espécie é também utilizada para ornamentação, devido as cores da sua casca e seu rápido crescimento, fornecendo sombra.

Segundo Hall, Johnston e Chippendale (1975), a espécie *Eucalyptus pilularis* tem origem na Austrália, percorrendo toda costa do Território de New South Wales, chegando ao sul o território de Victória até a altura da Ilha de Fraser. O clima de New South Wales se caracteriza por ser subtropical não ocorrendo geadas ao longo do ano, a região sul possui clima temperado com tendência de ter cinco ou seis geadas. A precipitação anual do local está entre 900 a 1500 mm. A espécie pode ocorrer em altitudes do nível do mar até 300 m. O *E. pilularis* se desenvolve bem em solos pobres e arenosos, apesar de ocorrer naturalmente em solos profundos e argilosos. Esses autores ainda afirmaram que *E. pilularis* tem grande importância econômica por possuir madeira dura, sendo usada para serraria, construções civis e como postes e dormentes. De acordo com Pereira et al. (2000), a sua densidade básica é de 0,617 g\*cm<sup>-3</sup>.

O *Corymbia maculata* é proveniente da Austrália, com latitude que varia de 25° e 30°S e altitude de 0 a 950 m. O clima dessa região caracteriza-se por ser temperado úmido a subtropical subúmido. A região apresenta uma precipitação média anual entre 750 a 1750 mm, tem distribuição uniforme no sul e concentrada no verão ao norte. As temperaturas médias das máximas do mês mais quente está entre 25° e 30°C, e a média das mínimas do mês mais frio está entre 1° e 8°C. A espécie pode ter ocorrência em vários tipos de solos, com preferência a solos de origem arenítica, úmidos, com boa drenagem e textura

moderada a pesada. A madeira do *C. maculata* possui boa estabilidade dimensional, boa trabalhabilidade e densidade superior a  $850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Assim, a madeira dessa espécie é utilizada para laminação, marcenaria, construções, postes, moirões e caixotaria (EMBRAPA, 1988).

### **3.2 Usinagem da madeira**

O conhecimento acerca da trabalhabilidade da madeira é de grande importância para seu melhor aproveitamento. A madeira, material heterogêneo, possui singularidades a cada espécie e, desse modo, é importante conhecer seu comportamento durante seu processo de usinagem (KOCH, 1964).

Segundo Silva (2002), a otimização dos processos de usinagem da madeira resulta em grandes vantagens, como a diminuição do custo energético demandado pelas máquinas operatrizes, maior aproveitamento da madeira, aumento da vida útil das ferramentas e da produtividade, levando a redução dos custos de usinagem e do produto final.

Koch (1964) afirmou que são vários os fatores que interferem sobre as forças e a potência de corte nas diferentes operações de corte da madeira, influenciando no desempenho de corte das ferramentas; fatores associados à madeira, como umidade, densidade e direção das fibras, e fatores associados ao processamento, como espessura e profundidade do corte, velocidade de avanço, velocidade de corte, além da geometria da ferramenta.

Para melhor compreensão do comportamento da madeira frente aos diferentes processos de corte, um dos parâmetros fundamentais é a força de corte requerida durante o processo. A força de corte tem grande importância na escolha da geometria da ferramenta e no correto dimensionamento da potência requerida das máquinas da serraria. A força de corte requerida está diretamente relacionada com a qualidade da superfície que será usinada (KOCH, 1964).

Segundo Bonduelle, Cruz e Silva (2002), a usinagem da madeira poderá ser expressa pela função 5M, sendo:

- a) Matéria-prima - relacionada com todas as propriedades intrínsecas da madeira e suas interações com o processo);
- b) Máquina - relacionado com os aspectos construtivos das máquinas, incluindo os dispositivos de fixação, de condução e de exaustão de cavacos que visam à melhoria da operação de usinagem;
- c) Metodologia - engloba toda a definição dos parâmetros de usinagem a serem utilizados, bem como escolha das ferramentas mais adequadas para otimizar o processamento;
- d) Mão de obra - considera o treinamento dos operadores executores das tarefas de usinagem que devem ter conhecimentos de todos os itens anteriores, para poder interferir, no momento certo, caso note alguma deficiência no processo;
- 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.

Por apresentar anisotropia, a madeira possui variações de suas propriedades anatômicas, físicas, mecânicas e químicas em função do eixo de orientação, seja axial, radial ou tangencial. Essa característica também determina seu comportamento no processamento mecânico. Logo, a madeira pode ser usinada ou processada em diferentes planos e em diferentes maneiras, que variam em função da direção e sentido de ataque da ferramenta de corte em relação às fibras (LEITZ -LEXICON, 2011).

A densidade da madeira é a característica física que é mais utilizada para definir a correlação com o esforço de corte. Ela é consequência da estrutura anatômica e química da espécie. Segundo literaturas pertinentes, a densidade apresenta correlações fortes (positivas ou negativas) com os processamentos da madeira. O aumento da densidade pode estar associado com o aumento dos esforços de usinagem da madeira, com a redução da vida útil da ferramenta de corte e com o aumento do ruído produzido durante o processamento mecânico da madeira (SILVA, 2002).

A umidade da madeira e a direção em que o corte é executado em relação às fibras influenciam diretamente no esforço de corte. A abrasividade influencia no desgaste prematuro dos gumes. A anisotropia e heterogeneidade da madeira, defeitos como presença de nós e grande distinção nos lenhos tardio e inicial também influenciam no processamento (BONDUELLE; CRUZ; SILVA, 2002).

Segundo Silva et al. (2005), é necessário conhecer a estrutura da madeira e os parâmetros de usinagem, para entender as relações que proporcionam os bons resultados em qualidade.

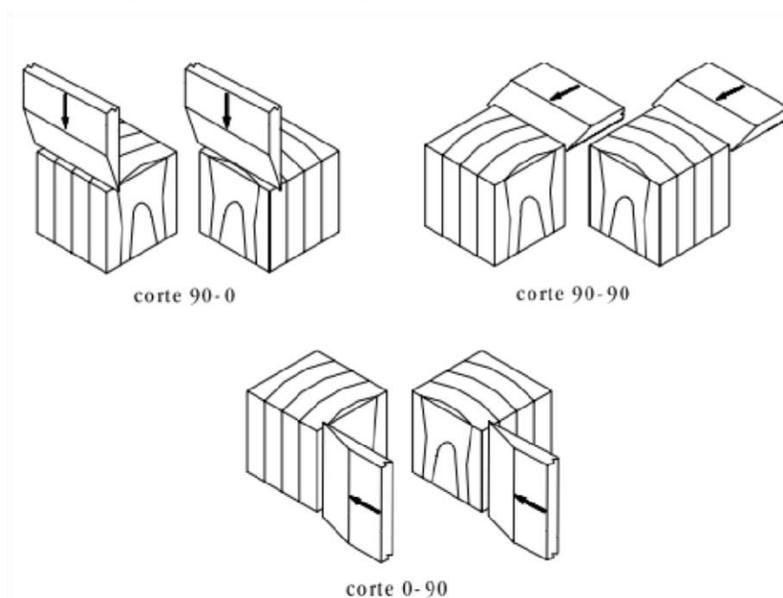
É em função da estrutura ordenada da madeira, atribuída à disposição das fibras, dos elementos de vaso e do parênquima radial, que as propriedades físicas e mecânicas variam, segundo a direção considerada (GONÇALVES, 2000).

Fibras com paredes mais espessas apresentam melhores aspectos de corte, não sendo amassadas ou parcialmente cortadas. Além disso, após o corte, a superfície processada mecanicamente apresenta orifícios menores pela presença de lumes com dimensões reduzidas (SILVA et al., 2005).

Os sistemas de corte ortogonal representados na Figura 1 são definidos pela notação de McKenzie (1960). O primeiro número representa o ângulo entre o gume de corte e o eixo axial da madeira. O segundo número fornece o ângulo

entre o avanço de corte e o eixo axial da madeira. Existem três famílias principais relativas ao corte:  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , todas padronizadas por diversos autores (KOCH, 1964).

Figura 1 - Representação das três famílias de corte.

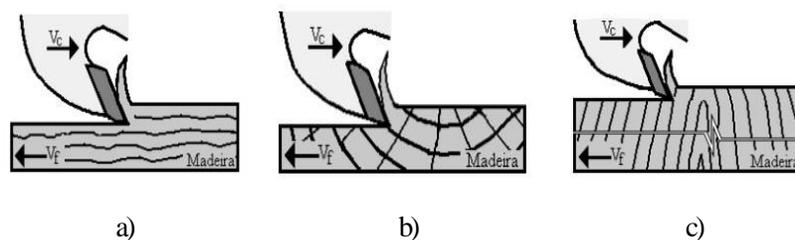


Fonte: McKenzie (1960)

De acordo com Néri, Gonçalves e Hernandez (1999), as famílias de cortes ortogonais podem ser associadas aos cortes periféricos, contudo, nesses casos o ponto de ataque do gume muda a todo instante. Assim, o corte  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$  pode ser associado aos processos de corte realizados nas desempenadeiras, nas desgrossadeiras e nas serras circulares em cortes paralelos às fibras. O corte  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$  pode ser associado aos processos realizados nas serras circulares em cortes transversais às fibras. O desdobro de toras em serras de fita (engenho) é típico caso da família de corte  $90^{\circ}$ - $90^{\circ}$ .

Diferentes técnicas para realizar o corte na madeira em função da variação dos ângulos de corte, de acordo com a direção do movimento de corte e de avanço adotados, estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2 - Aspecto ilustrativo das técnicas de se cortar madeira, em que a) corte longitudinal  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$ , b) corte transversal  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , c) corte no topo da madeira  $90^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ,  $V_c$  = velocidade de corte da serra circular e  $V_f$  = velocidade de avanço da madeira.

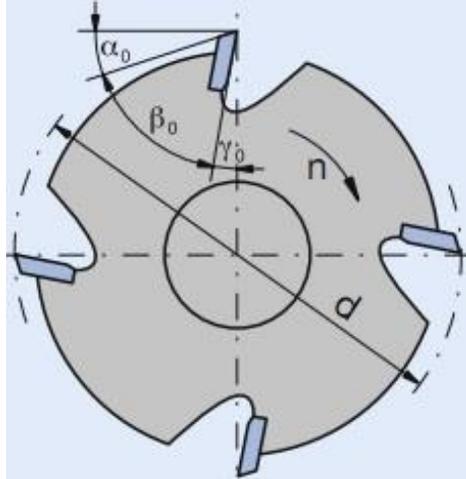


Fonte: Adaptado de Leitz-Lexicon (2011).

Segundo Koch (1964), existem parâmetros relativos ao corte que se relacionam com o processamento mecânico da madeira, tais como, 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 de corte e a vibração lateral.

Os ângulos principais (FIGURA 3) que influenciam as forças de corte são o ângulo livre ou de folga ( $\alpha_0$ ), o ângulo de cunha ( $\beta_0$ ) e o ângulo de ataque ( $\gamma_0$ ). O estudo desses ângulos é necessário para compreender o comportamento da madeira nos diferentes processos de corte, seja na escolha da geometria da ferramenta, seja no dimensionamento da potência requerida das máquinas para usinagem e, por conseguinte, na qualidade da superfície usinada (NÉRI, 2003).

Figura 3 - Principais ângulos da ferramenta de corte.



Fonte: Leitz-Lexicon (2011).

O processamento mecânico da madeira utiliza como premissa a força necessária para romper o material. Sua densidade possui influência direta na magnitude das forças envolvidas no processo, considerando que a densidade da madeira está intimamente associada à sua resistência mecânica (NÉRI, 2003).

### 3.3 Parâmetros de usinagem

Outro parâmetro utilizado para esta pesquisa foi o de usinagem que, por sua vez, se subdivide em: velocidade de corte e velocidade de avanço.

#### 3.3.1 Velocidade de corte ( $V_c$ )

A velocidade de corte é a relação entre o caminho percorrido por um dente em determinado intervalo de tempo, em metros por segundo (Equação 1).

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

Em que:

$V_c$  = velocidade de corte ( $m \cdot s^{-1}$ );

$D$  = diâmetro da ferramenta de corte (m);

$n$  = rotação do eixo porta ferramenta ( $min^{-1}$ ).

Ao estudar o efeito de 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 apresentaram maiores consumos de energia específica de corte. Esses resultados foram confirmados por Gontijo (2012), ao analisar a energia específica em cortes transversais em madeira roliça de *Eucalyptus* sp.

A fresagem superior em madeira de “Beech” apresentou - se na espessura média dos cavacos com a redução das velocidades de corte e, conseqüentemente, maior é a “força”, potência ativa, necessária para cortar a madeira (PALMQVIST; LENNER; GUSTAFSSON, 2005).

### 3.3.2 Velocidade de avanço (Vf)

A velocidade de avanço é representada pelo deslocamento da peça de madeira em direção à ferramenta de corte, durante intervalo de tempo que o corte foi executado, em metros por minuto (Equação 2).

$$Vf = \frac{Du}{t} \quad (2)$$

Em que:

$Vf$  = velocidade de avanço da peça ( $m \cdot min^{-1}$ )

$Du$  = deslocamento de usinagem (m)

$t$  = tempo necessário para executar o deslocamento de usinagem (min)

Em algumas máquinas, como no caso da fresadora periférica acoplada ao comando numérico computacional, a velocidade de avanço é obtida pela movimentação do conjunto que compõe a ferramenta de corte em relação à peça usinada.

Gontijo (2012), Melo et al. (2015) 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, quando se aumenta a velocidade de avanço. O consumo de energia específica de corte foi medido pela captura dos dados de variação de torque, corrente e tensão do motor, que é controlado pelo inversor de frequência. Segundo Souza et al. (2011), o menor consumo de energia específica de corte foi observado com a velocidade de avanço de  $17 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , para o corte transversal da madeira roliça de dois clones de *Eucalyptus* sp. Resultado reforçado em estudo de Gontijo (2012) que avaliou a influência das velocidades de corte, velocidades de avanço e do número de dentes das serras circulares no consumo de energia específica de corte da madeira. Entretanto, esse 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.

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). A energia específica de corte é definida como a relação entre o consumo de energia líquida de corte e o volume de material removido (LUBKIN, 1957 citado por KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

Segundo Braga et al. (2014), o ajuste das velocidades de avanço e de corte dependem do tipo de madeira, umidade, profundidade do corte, altura do

desbaste, potência disponível ou torque. À medida que se diminui a velocidade de avanço, mantendo-se os parâmetros de corte constantes, há tendência de melhoria da superfície usinada. Durante operações de usinagem da madeira de *Eucalyptus* sp. no fresamento periférico, a qualidade de superfície se apresentou melhor quando utilizaram velocidades de avanço de 3 e 6 m\*min<sup>-1</sup> com rotação de 4600 rpm no eixo porta-ferramenta (SILVA; BRAGA; MARTINS, 2008).

### **3.4 Comando Numérico Computacional**

O controle da máquina que executa o processamento de diversos tipos de materiais a partir do eixo porta ferramentas, movendo-se nas três direções dos eixos X; Y; Z é denominado de Comando Numérico Computacional (CNC). Ele possibilita a execução de diversos tipos de processamento com precisão e facilidade nas repetições.

Conhecer as relações entre os eixos X; Y; Z, instruções de movimento programáveis e os pontos de referência da máquina-ferramenta com CNC são fundamentais para seu eficiente funcionamento. Enquanto os nomes de eixo podem variar de máquina para máquina, eles são sempre nomeados por endereço de letras. Os mais comuns são X, Y e Z ou U, V e W para eixos lineares e os eixos rotativos são tipicamente denominados de A, B e C (WOOD, 2001a).

O CNC usa pontos precisos para a partida ou referência ao longo de cada eixo. Esse ponto é referido em uma variedade de formas: posição zero de retorno, grade posição zero ou posição inicial. Qualquer que seja a nomenclatura utilizada, a posição de referência é necessária para que o controle seja preciso. Controles CNC que utilizam um ponto de referência para cada eixo, exigem que a ferramenta de corte seja movida manualmente para o seu ponto de referência, como parte do procedimento inicial. Quando esse processo for concluído, o controle estará em sincronia com a posição do CNC (WOOD, 2001b).

Como definição, pode-se dizer que o CNC é um equipamento eletrônico capaz de receber informações pela entrada própria de dados. Compila essas informações e as transmite em forma de comando à máquina-ferramenta de modo que esta, somente com supervisão do operador, realize as operações na sequência programada de acordo com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI, 2006).

O CNC é composto de a) unidade de assimilação de informações, recebidas por meio de leitoras de fitas; b) entrada manual de dados, como microcomputadores e outros instrumentos menos usuais; c) unidade calculadora, em que as informações recebidas são processadas e retransmitidas às unidades motoras da máquina-ferramenta; d) circuito que integra a máquina-ferramenta ao CNC, denominado de interface, o qual será programado, de acordo com as características mecânicas da máquina-ferramenta (SENAI, 2006).

Na indústria de mobiliário moderno, centros de trabalho CNC são amplamente utilizados, especialmente quando a alta qualidade do produto e flexibilidade do processo de fabricação são esperados. Embora existam muitos sistemas de manufatura avançada, assistida por computador para os produtores de móveis, alguns parâmetros tecnológicos de usinagem, como as taxas de alimentação, ainda são estabelecidos de forma arbitrária. Na fabricação de móveis sofisticados de madeira maciça tem-se usado “baixas” taxas de alimentação para garantir alta qualidade e ter a certeza de manter as operações dentro dos limites das máquinas e ferramentas. Essas práticas nem sempre são racionais, em decorrência de tempos de processamento elevados e, conseqüentemente, elevados custos de fabricação. Portanto, existe a necessidade de controle de otimização que permita a redução dos tempos de processamento sob condições técnicas adequadas (GAWRONSKI, 2013).

Segundo Iskra e Hernández (2012), o monitoramento e controle dos processos industriais atuais devem ser mais flexíveis, executados,

automaticamente, sem erros para garantir elevada qualidade do produto final. Os CNCs controlam e monitoram as máquinas-ferramentas, garantindo fabricar elementos com forma desejada e alta precisão dimensional. Pesquisa e desenvolvimento dos sistemas de controle contínuo devem ser realizados para desenvolver métodos que serão capazes de controlar não só as características quantitativas e dimensionais, mas também as características qualitativas dos produtos fabricados. Para monitorar e controlar processos de usinagem, uma série de sensores podem ser utilizados, dependendo dos fenômenos a serem monitorados e as aplicações técnicas dos sensores. Existem grandezas físicas e elétricas que podem ser medidas, direta e indiretamente, de forma contínua e/ou de forma intermitente, em processo ou pós-processo produtivo de usinagem. Todo processo deve ser cuidadosamente avaliado para determinar quais grandezas devem ser medidas e quais sensores devem ser usados.

O principal objetivo do monitoramento e controle de processo é otimizar a velocidade de produção e reduzir o tempo de inatividade. Um sistema eficaz de monitoramento do processo produtivo deve alertar o operador e desligar a máquina quando há alguma condição prejudicial ocorrendo ou prestes a ocorrer. Técnicas de monitoramento e controle de processos também podem ser utilizadas para fazer ajustes no processamento da máquina, mantendo a qualidade do produto, com velocidades de produção aceitáveis. Exemplos disso são os pequenos ajustes nos parâmetros do processo, como velocidade de alimentação e velocidade de corte, para manter níveis aceitáveis de qualidade de superfície. Também quando a ferramenta de corte torna-se desgastada ou quando os níveis de qualidade da peça atingirem limites mínimos aceitáveis (JACKSON; LEMASTER; LU, 2000).

### **3.5 Esforços de corte**

A relação entre a potência de corte e a taxa de remoção de material é entendida como energia específica de corte, ou seja, um parâmetro de equivalência entre a energia gasta para executar o corte e o volume de cavaco removido (RODRIGUES; COELHO, 2007).

A energia específica é uma das grandezas físicas importantes da usinagem (GORCZYCA, 1987). Variáveis como força, tempo comprimento do corte, desgaste da ferramenta, temperatura de corte, influenciam diretamente no processo de usinagem (GORCZYCA, 1987; RODRIGUES; COELHO, 2007).

Segundo Ersoy e Atici (2004), a partir da energia específica de corte pode-se estimar a potência requerida em uma operação de usinagem de dado material. Entretanto, deve-se considerar a eficiência do motor, o fator de potência, a inércia e o atrito. Alguns pesquisadores adotam variáveis constantes para tentar compensar as variações de velocidade de corte e de avanço, além da profundidade de usinagem e o desgaste da ferramenta em operação.

Realizando estudos do consumo de energia específica de corte em serra circular, Azzola (1954) citado por Kollmann e Côté (1968) observaram que com o aumento da velocidade de avanço o consumo da energia específica de corte tende a diminuir. Contudo, Souza (2009) ressalta que estudos semelhantes devem ser realizados para usinagem da madeira, por esta ser uma matéria-prima muito usada no Brasil. Com o objetivo de otimizar a relação entre velocidade de avanço e velocidade de corte, para que o motor elétrico trabalhe dentro da faixa para o qual foi projetado, impedindo assim que ele sofra sobrecarga e consuma mais energia que a realmente necessária para a execução do corte.

Segundo Gonçalves (2000), Varanda et al. (2010) e Varasquim et al. (2012) os valores de força e potência de corte podem ser medidos por instrumentação dos processos de usinagem, o que normalmente não ocorre nas operações de corte durante o processamento. Assim, esses valores necessitam ser medidos experimentalmente, a fim de se determinar a propriedade de resistência

ao corte de cada espécie de madeira, para condições pré-estabelecidas de umidade, direcionamento das fibras e geometria da ferramenta.

Gonçalves (2000) denomina como pressão específica de corte, o fator que está relacionado à propriedade de resistência ao corte da madeira. A determinação da pressão específica de corte é de grande importância, pois possibilita o cálculo da força principal de corte e da potência de corte necessárias em processos de usinagem da madeira para determinada taxa de remoção de cavaco. Isso significa que, quando se conhecem os valores da pressão específica de corte, pode-se otimizar o processo de usinagem da madeira com a utilização do máximo rendimento que o equipamento pode oferecer ou ainda, pode-se projetar equipamentos que ofereçam, com segurança, a potência exigida para a operação a que se destinam.

A energia de corte é influenciada diretamente pelas características anatômicas da madeira: quantidade de parede celular, densidade, umidade, defeitos, nós, inclinação da grã, medula, empenamentos, rachaduras, tensões de crescimento, além de diferenciações do lenho: cerne e alburno, madeira juvenil e madeira adulta (KOCH, 1964).

### **3.6 Relação da potência aparente, potência ativa e potência reativa**

Segundo Koch (1964), a energia de corte pode ser medida em Kilowatts (kW) e relaciona a potência ativa medida durante o processamento com a quantidade de material removido.

Determinados equipamentos, tais como: motores elétricos, fornos a arco, transformadores, necessitam, para sua operação, de uma certa quantidade de potência reativa, que pode ser suprida por diversas fontes ligadas ao sistema elétrico, tais como: geradores, motores síncronos ou capacitores, funcionando individual ou simultaneamente (MAMEDE FILHO, 2010).

A maioria das cargas das unidades consumidoras consome energia reativa indutiva, como motores, transformadores, reatores de lâmpadas de descarga, fornos de indução. Cargas indutivas necessitam de campo eletromagnético para o seu funcionamento, por isso, sua operação requer potência ativa e potência reativa. A potência ativa é a que efetivamente realiza trabalho, gerando calor, luz movimento. A potência reativa é necessária apenas para criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas. Enquanto a potência ativa é sempre consumida na execução de trabalho, a potência reativa além de não produzir trabalho, circula entre a carga e fonte de alimentação, ocupando um espaço no sistema elétrico que poderia ser utilizado para fornecer energia ativa. Por esse motivo, as normatizações indicam cada vez mais fatores de potência mais próximos de 1. Entende-se por fator de potência a razão entre a potência ativa e a potência aparente. Ele indica a eficiência do uso da energia. O triângulo retângulo (FIGURA 4) é usado para representar as relações entre kW, kVAr e kVA.

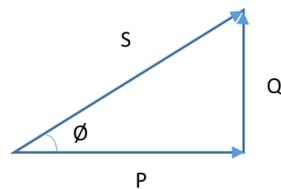


Figura 4 Relação entre potências aparente (S), ativa (P) e reativa (Q);

A potência ativa (P) é a potência que realiza trabalho de fato, sua unidade é o watt (W), representada na Equação 3. A potência reativa (Q) é a potência consumida por reatâncias (indutivas ou capacitivas) no armazenamento de energia, magnética ou elétrica, para o necessário funcionamento do sistema elétrico. Sua unidade é o volt-ampere reativo (VAr). A potência aparente (S) é a potência total fornecida pela fonte e sua unidade é o volt-ampere (VA).

$$P = V * I * \cos \phi \quad (3)$$

Em que:

*P*: Potência ativa (W)

*V*: tensão (V)

*I*: corrente (A)

Cos  $\phi$ : fator de potência

A outra ideia da característica do trabalho de corte é a medição da energia elétrica consumida pelo motor principal das máquinas ao cortar (FURUKAWA; TSUTSUMOTO; BANSHOYAK, 2003). A vantagem de tal método é a aplicação em condições industriais. Os principais inconvenientes são a falta de precisão da medição do trabalho de corte, decorrente da pequena quantidade de energia usada para cortar, em comparação com o total da potência consumida e a influência significativa das perdas de transmissão de energia (eficiência do sistema).

De acordo com Eyma, Meausoone e Martin (2003), que estudaram as forças de corte com uso de um CNC router, equipado com sensores piezelétricos - o sensor piezoelétrico pode converter a força exercida sobre ele por compressão, impacto de aceleração, ou vibração em sinal elétrico, cuja força é proporcional à intensidade da força e pêndulo labormeter para estimar as forças de corte envolvidas durante o fresamento periférico.

Segundo Monteiro (2011), é importante ressaltar que, em vários trabalhos sobre consumo de energia, apenas a energia aparente (kWh) é considerada, como o realizado por Brand et al. (2002). Esse fato deve-se aos trabalhos considerarem as medições obtidas em medidores de energia comuns, instalados nas indústrias, desconsiderando a energia reativa consumida. Apesar

do consumo de energia reativa (kVArh), a energia ativa é a mais importante quando consideramos a energia que efetivamente é transformada em trabalho.

A potência é uma grandeza física, em relação ao sistema elétrico, que relaciona a energia e o tempo (Equação 4). Um watt representa que o sistema ou aparelho elétrico ou eletrônico transforma a cada segundo um joule de energia. O kilowatt-hora (kWh) é a unidade de energia que pode ser calculada com a potência consumida pelo aparelho elétrico em função do tempo de seu funcionamento (Equação 5).

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (4)$$

$$\Delta E (j) = P (W) \times \Delta t (S) \quad (5)$$

Em que:

$P$  = Potência (watt)

$\Delta E$  = Taxa de variação da energia (joule)

$\Delta t$  = Taxa de variação do tempo (segundo)

$\Delta E$  = Taxa de variação da energia (joule)

Na Equação 6, pode ser visualizado o vínculo da taxa de variação da energia, em joule, para o sistema internacional de unidades.

$$\Delta E (KWh) = P (KW) \times \Delta t (h) \quad (6)$$

Em que:

$\Delta E$  = Taxa de variação da energia (Kilowatt-hora)

$P$  = Potência (Kilowatt)

$\Delta t$  = Taxa de variação do tempo (hora)

O método de medição da potência ativa em watt do analisador de energia 435-II da FLUKE calcula o valor médio da potência instantânea durante o período de 10 a 12 ciclos para cada fase. A potência ativa total é a soma direta da potência nas três fases, para os circuitos trifásicos. Para todos os componentes de frequência, a potência ativa é calculada diretamente com base nas capturas dos pares de entrada, de corrente e de tensão (FLUKE, 2012).

A energia em KWh pode ser convertida em Joules, sendo que 1kWh é igual a  $3,6 \times 10^6$  Joules, ou seja, essas unidades de energia são correspondentes. Na Equação 7, representa-se o valor da energia, em joules, a partir da potência requerida por certa quantidade de material a ser processada na velocidade de avanço pré-estabelecida (KOCH, 1964).

$$E = \left( \frac{\text{Potência} \times C}{Vf} \right) \times 60 \quad (7)$$

Em que:

$E$  = Energia (J)

$Potência$  = Potência de corte (W)

$C$  = comprimento do corte (m)

$Vf$  = velocidade de avanço ( $m \cdot \text{min}^{-1}$ )

A energia específica de corte possui relação direta com a quantidade de material a ser removido durante o corte e está representada na Equação 8 (KOCH, 1964).

$$Es = \frac{E}{c \times l \times h} \quad (8)$$

Em que:

$E_s$  = Energia específica ( $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$ )

$c$  = comprimento do corte (cm)

$l$  = largura do corte (cm)

$h$  = altura do corte (cm)

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Preparação dos corpos de prova

Foram utilizadas madeiras de *Eucalyptus deglupta*, *Corymbia maculata*, *Eucalyptus pilularis*, *Eucalyptus microcorys* e *Corymbia citriodora*, com 37 anos de idade, provenientes do plantio experimental do Projeto de Desenvolvimento e Pesquisa Florestal (PRODEPEF) implantado no *campus* da UFLA. Suas densidades básicas médias são de 0,498 g\*cm<sup>-3</sup>; 0,603 g\*cm<sup>-3</sup>, 0,747 g\*cm<sup>-3</sup>, 0,772 g\*cm<sup>-3</sup> e 0,906 g\*cm<sup>-3</sup>, respectivamente (LIMA, 2014)

Para os ensaios, foram confeccionados 18 corpos de prova para cada espécie com dimensões de 24 x 12 x 2 cm (C x L x E, respectivamente).

Antes do processamento mecânico, os corpos de prova foram encaminhados à câmara climática do Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira (DCF/UFLA), com temperatura e com umidade relativa controladas [T = (20±2)<sup>0</sup>C e UR = (65±5) %], com o objetivo de padronizar a umidade dos corpos de prova em 12%.

Foram utilizadas duas velocidades de avanço e três velocidades de corte, totalizando seis tratamentos, com três corpos de prova (TABELA 1).

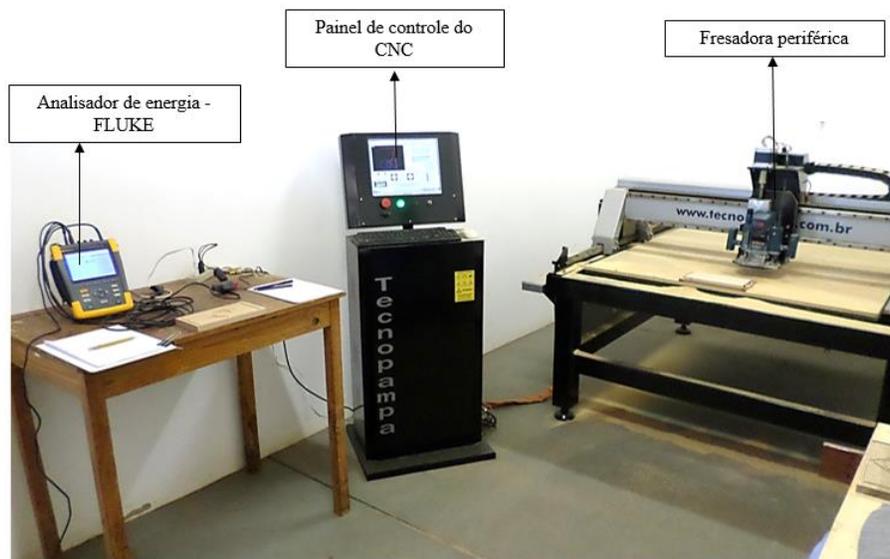
Tabela 1 - Descrição dos tratamentos em função dos diferentes parâmetros de processamento para o ensaio na fresadora periférica com CNC, para todas as espécies.

Tratamento	Velocidades de	
	Avanço (Vf), em m*min <sup>-1</sup>	Corte (Vc), em m*s <sup>-1</sup>
1	0,70	3,77
2		5,35
3		7,54
4	1,39	3,77
5		5,35
6		7,54

## 4.2 Ensaios de fresamento periférico com CNC

A bancada de ensaios foi composta por uma fresadora periférica (Tecnopampa, modelo ROUTER), com CNC e por um analisador de energia, Fluke, Power Quality Analyzer, modelo 435 II, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Bancada de ensaios.

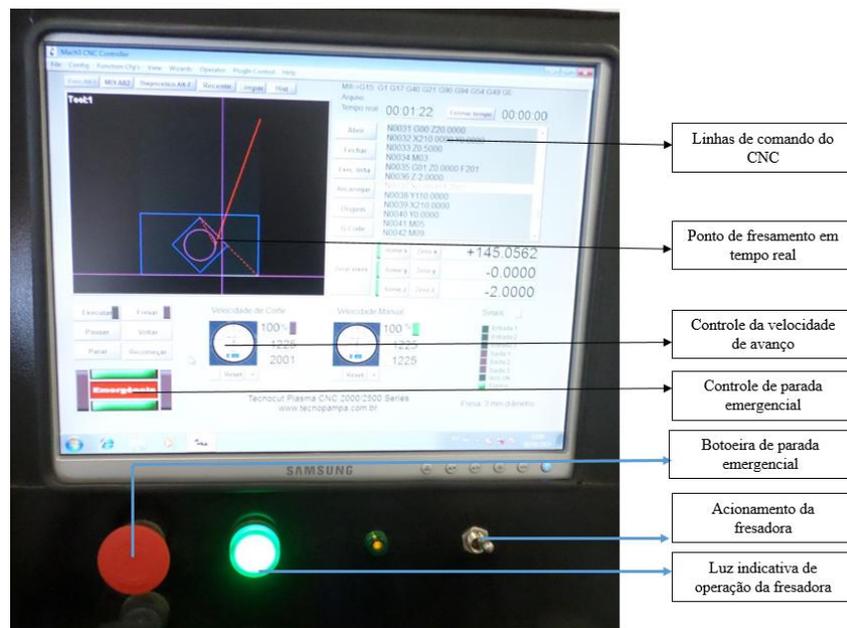


Fonte: Arquivo do pesquisador

No controle do CNC foram utilizados três softwares. O primeiro foi o *AutoCAD*® (CAD - Computer Aided Design), que foi usado para a execução do desenho definido. O segundo se trata do *SheetCam* (2.1/2D CAM), que foi utilizado para a transformação do desenho do CAD (DXF) para a linguagem de máquina. Por último, utilizou-se o *Mach 3 CNC Controller* – Tecnocut Plasma CNC 2000/2500 Séries, para a interpretação da linguagem de máquina e controle de movimentação das mesas.

Na Figura 6, está apresentado o software *Mach 3 CNC Controller* em execução. Nele são apresentadas as linhas de comando do CNC, o ponto de fresamento em tempo real, o controle de velocidade de avanço e o controle de parada emergencial do software. Também são apresentadas a chave de acionamento da fresadora, a luz indicativa de operação da fresadora e a botoeira de parada emergencial do painel de comando.

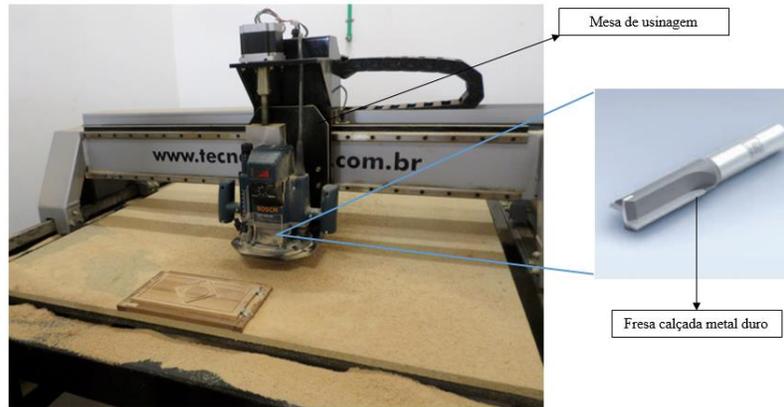
Figura 6 - Painel de controle do CNC apresentando a interface do Software Mach 3 CNC Controller.



Fonte: Arquivo do pesquisador.

Para a execução dos cortes, foi utilizada a mesa de usinagem e a fresa reta calçada com *widea*. A fresa possui 6 mm de diâmetro e 1/4" *Straight - carbide tipped*, fixada e centralizada na fresadora periférica (FIGURA 7).

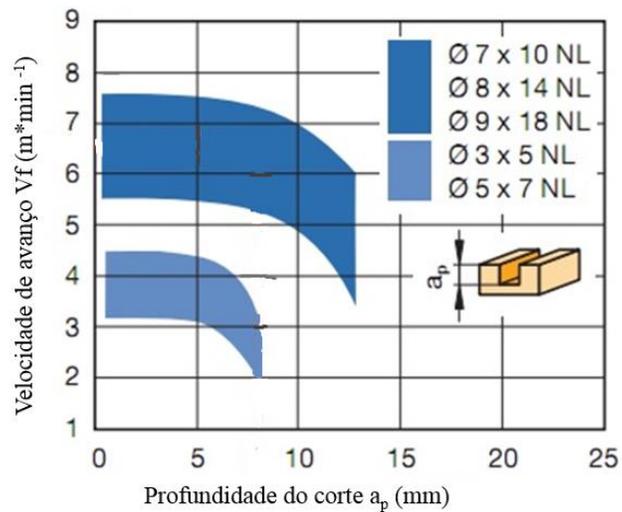
Figura 7 - Mesa de usinagem e fresa reta calçada com widea de 6 mm.



Fonte: Arquivo do pesquisador.

As velocidades de avanço e de corte foram definidas considerando as curvas do gráfico (FIGURA 8) de indicação de operação da fresa (LEITZ-LEXICON, 2011).

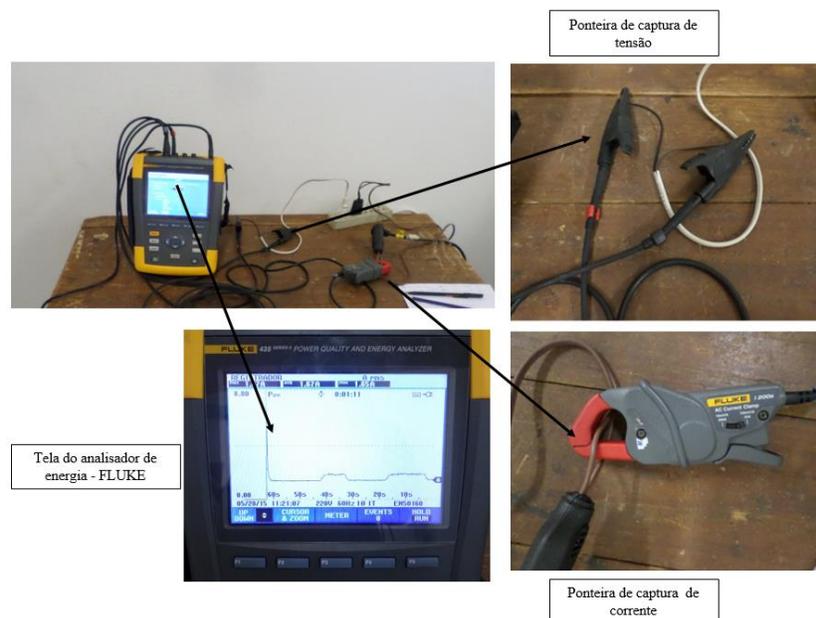
Figura 8 - Gráfico para dimensionamento da velocidade de avanço em função da profundidade de corte e diâmetro da fresa.



Fonte: Leitz-Lexicon (2011).

Na operação de análise da energia, por meio do Fluke 435 II, foram utilizadas duas ponteiros. A primeira para captura de tensão em Volts (V) e outra para a captura da corrente elétrica em amperes (A). Ambas interligam o analisador de energia à entrada de carga da máquina-ferramenta. Na tela do analisador de energia, são apresentadas as leituras da potência ativa, da corrente e da tensão. Todos foram gravados no registrador, tipo *datalogger* (FIGURA 9).

Figura 9 - Analisador de energia Fluke, modelo 435 II.

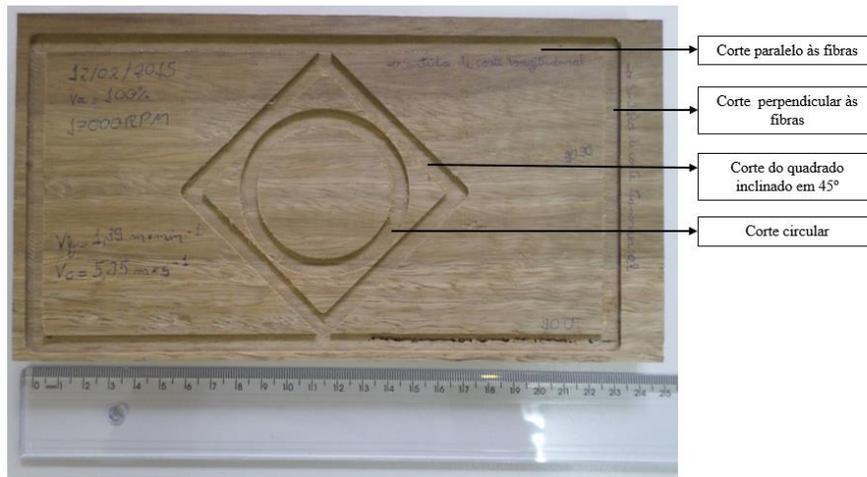


Fonte: Arquivo do pesquisador.

Para a análise da potência de corte, foram selecionadas quatro possibilidades de direção de corte (FIGURA 10). O primeiro foi representado pelo corte paralelo às fibras. O segundo abrangeu o corte perpendicular às fibras; o terceiro corte foi um quadrado, com inclinação de 45° em relação às fibras. Por último, executou-se um corte circular, em que o sentido de fresamento, em relação às fibras, modificava-se a todo instante. Os cortes realizados pela

fresadora periférica com CNC foram de 3 mm de profundidade e 6 mm de largura, assemelhando às famílias de corte 90°- 0° e 90°- 90°.

Figura 10 - Corpo de prova logo após o processamento realizado nas diferentes direções.



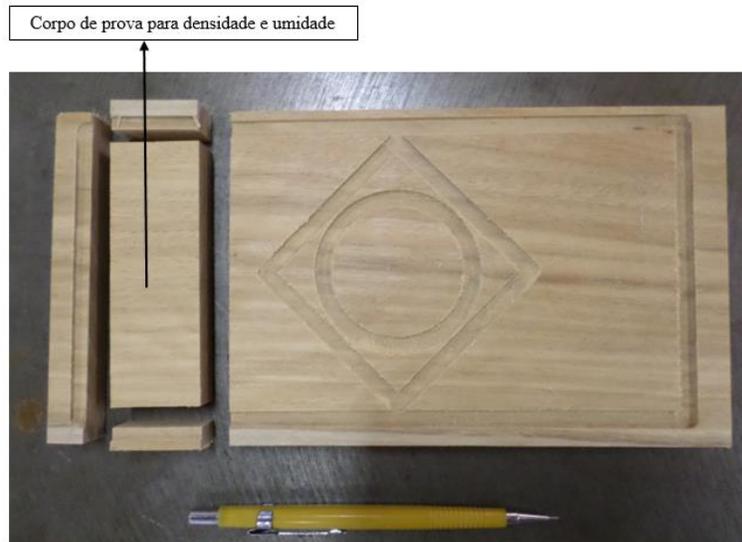
Fonte: Arquivo do pesquisador.

A energia específica de corte foi determinada pela relação entre a energia e volume de material removido durante o processamento (Equação 8). Para tanto, a energia foi calculada utilizando as Equações 6 e 7 e o volume removido foi determinado em função do perfil de corte da fresa reta, de 6 mm de largura e com 3 mm de profundidade de corte.

### 4.3 Determinação das propriedades da madeira

As propriedades físicas de densidade aparente e umidade da madeira foram determinadas de acordo com as normas NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997) e NBR 9656 (ABNT, 1986), respectivamente. Os corpos de prova foram seccionados de acordo com a Figura 11.

Figura 11 - Amostragem para a caracterização física da madeira processada.



Fonte: Arquivo do pesquisador.

#### 4.4 Análise estatística dos dados

A análise estatística foi realizada utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC) a 5% de significância, disposto em esquema fatorial com três fatores (5 madeiras, 2 velocidades de avanço e 3 velocidades de corte), totalizando 6 tratamentos com 3 repetições.

Os dados de potência ativa de corte foram submetidos à análise de variância e, posteriormente, ao teste Tukey a 5% de significância para a comparação das médias. Após a análise de variância, foi realizada a análise de regressão múltipla.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, encontram-se os valores de densidade aparente e das médias das potências de corte, nos diferentes cortes, para os corpos de prova das espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia*, usinados na fresadora periférica controlada pelo CNC.

Tabela 2 - Valores médios das densidades aparentes e das potências de corte para os corpos de prova, usinados das madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia*.

Madeiras	Corpo de prova	Densidade aparente (g*cm <sup>-3</sup> )	Potência (W)			
			Círculo	Quadrado inclinado	Paralelo	Perpendicular
<i>E. deglupta</i>	1	0,427	144,88	149,91	156,27	157,50
	2	0,562	149,86	154,97	158,79	159,04
	3	0,560	151,55	157,29	159,39	163,14
<i>C. maculata</i>	1	0,917	163,12	167,98	176,07	177,75
	2	0,925	167,52	172,36	173,84	174,04
	3	1,025	174,56	176,36	174,98	195,55
<i>E. pilularis</i>	1	0,990	158,84	164,52	169,01	179,37
	2	0,986	157,09	163,50	163,30	171,44
	3	0,986	157,31	162,91	162,72	169,48
<i>E. microcorys</i>	1	1,010	162,74	167,83	172,17	176,94
	2	0,904	163,01	168,93	174,26	175,65
	3	0,999	168,69	172,97	176,25	181,46
<i>C. citriodora</i>	1	1,068	170,04	173,69	177,85	182,47
	2	1,082	170,64	175,75	177,68	183,56
	3	1,064	175,47	178,81	177,26	182,62

Os valores médios de densidades das madeiras variaram de 0,427 até 1,082 g\*cm<sup>-3</sup>, com média geral de 0,900 g\*cm<sup>-3</sup>. Para as potências de corte,

observa-se que o valor mínimo foi de 144,88 W, com média de 168,72 W e máximo de 195,55 W.

Aumento dos valores médios para a potência de corte não foram acompanhados de forma proporcional aos aumentos nas médias das densidades das diferentes madeiras (TABELA 2). Por exemplo, de forma geral, para todos os tipos de cortes, a madeira de *C. citriodora* que possui densidade de 107% superior ao *E. deglupta*, apresentou aumento no valor de sua potência de corte de apenas 14%.

Ainda com relação a potência de corte, a espécie de *C. citriodora*, que é a mais densa, foi a que apresentou maior consumo para o fresamento nos cortes do quadrado inclinado, do círculo e dos cortes paralelos e perpendiculares. Contudo, no corte perpendicular, o corpo de prova 3, da madeira de *C. maculata* apresentou maior valor de potência de corte, mesmo não tendo sido o corpo de prova de maior densidade.

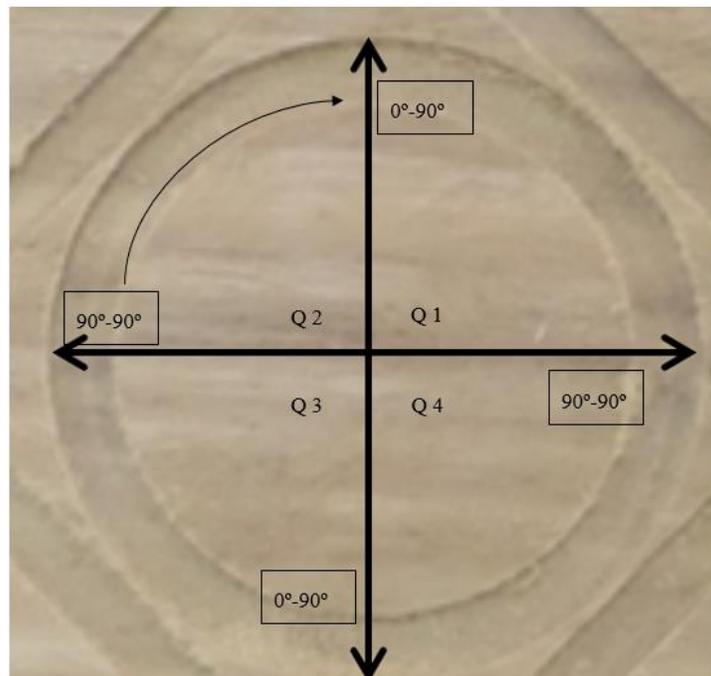
Tomando como referência o corte perpendicular, observou-se que este foi o que necessitou de maior potência para realizar o fresamento em todos os corpos de prova das diferentes espécies utilizadas. Possivelmente, isso está relacionado ao tipo de corte utilizado, que encontra maior porcentagem de parede celular das fibras, responsável pela resistência da madeira.

Para todas as madeiras estudadas, o corte em forma de quadrado inclinado, em 45°, teve seus resultados de potência de corte entre os valores apresentados pelos corte em forma de círculo ou dos cortes paralelo e perpendicular.

O corte circular foi o que consumiu, em média, menor potência de corte em relação aos demais processamentos. Isso pode estar associado ao fato de que, nesse modelo de corte, ocorre, a todo o instante, mudança de direção do ataque da ferramenta em relação às fibras. Observa-se, na Figura 12, que o corte inicia-se 90°-90° e tende a 0°-90° nos quadrantes ímpares e nos quadrantes pares ocorre

o inverso. Essa alteração da família de corte é que é responsável pela variação da potência de corte. A família  $90^{\circ}\text{-}90^{\circ}$  é, certamente, aquela que requer maior potência para a realização do corte e que esta somente é observada entre os quadrantes 1 e 4 e entre 2 e 3, isto é, presente apenas nas tangentes do círculo na interseção com o eixo horizontal.

Figura 12 - Esquema da mudança da família de corte no processamento em forma de círculo.



Nas Figuras 13, 14, 15 e 16, podem ser observados os comportamentos das potências de corte no fresamento do círculo, do quadrado inclinado e dos cortes paralelos e perpendiculares, respectivamente, em função das densidades aparentes das madeiras de *Corymbia* e *Eucalyptus*. As relações observadas apresentaram-se de formas diretas, em que o aumento da densidade aparente ocasionou aumento da potência de corte necessária para realizar o fresamento

com CNC. Esse comportamento foi semelhante em todos os tipos de corte avaliados.

Figura 13 - Representação gráfica do comportamento da potência de corte necessária para o fresamento em forma de círculo em função da densidade aparente das madeiras de *Corymbia* e de *Eucalyptus*.

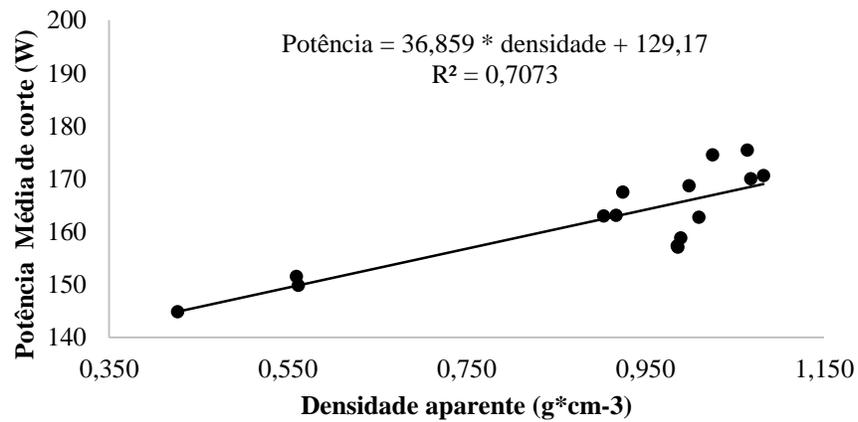


Figura 14 - Representação gráfica do comportamento da potência de corte necessária para o fresamento em forma de quadrado inclinado 45°, em função da densidade aparente das madeiras de *Corymbia* e de *Eucalyptus*.

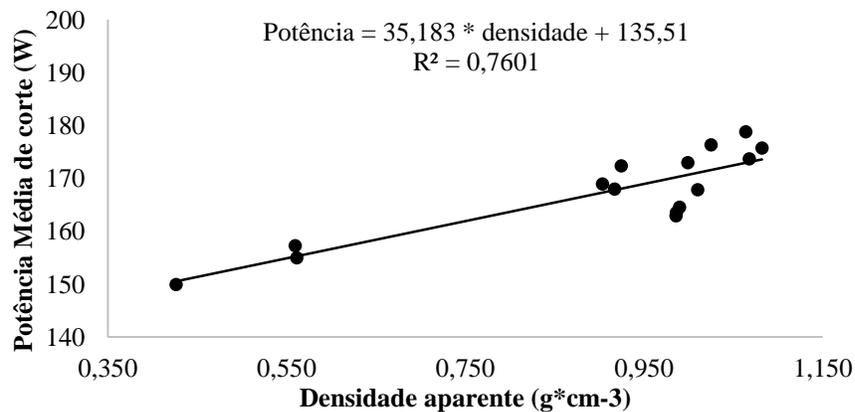


Figura 15 - Representação gráfica do comportamento da potência de corte necessária para o fresamento paralelo, em função da densidade aparente das madeiras de *Corymbia* e de *Eucalyptus*.

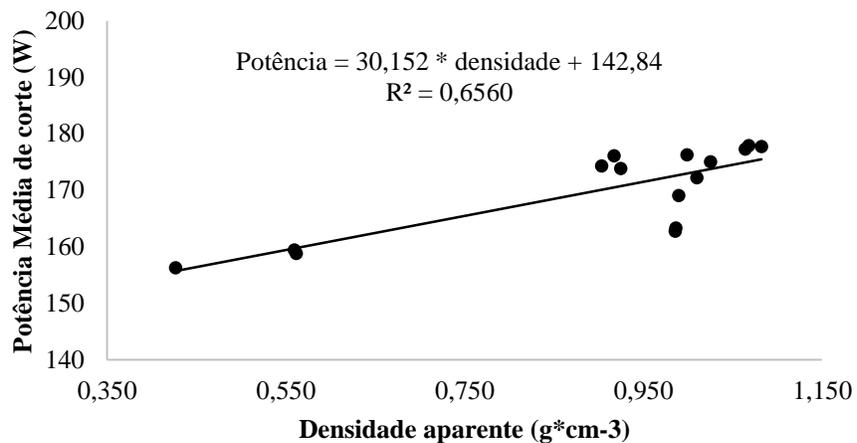
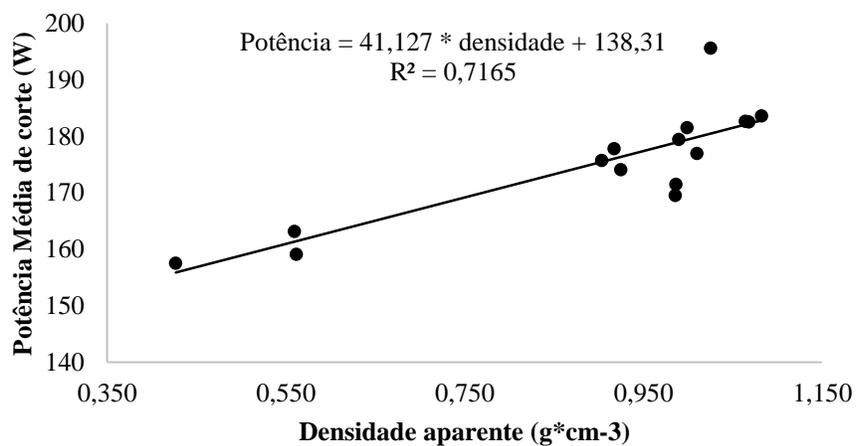


Figura 16 - Representação gráfica do comportamento da potência de corte necessária para o fresamento perpendicular, em função da densidade aparente das madeiras de *Corymbia* e de *Eucalyptus*.



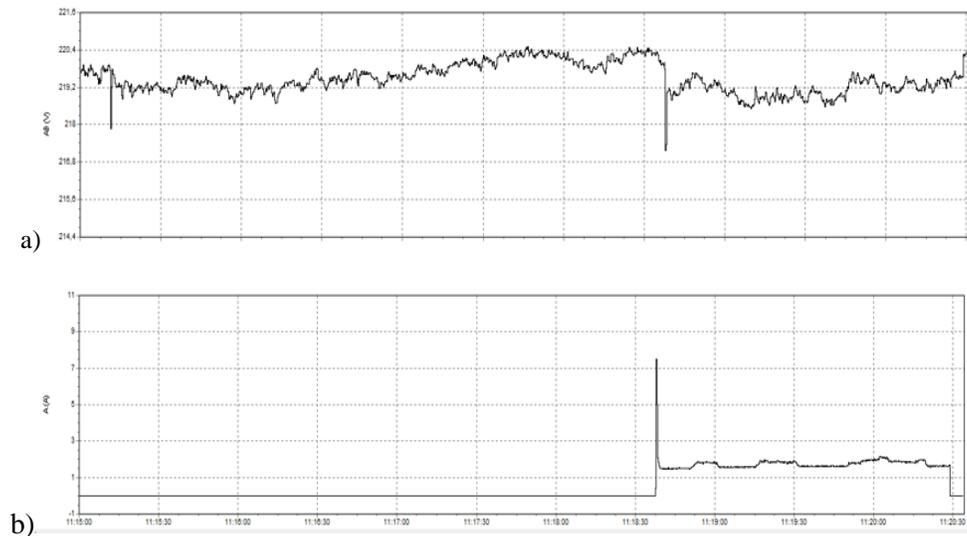
Foi observado (ANEXO A – TABELAS 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4) que ocorreu diferença estatística significativa a 5% de significância para todas as regressões realizadas. Os valores dos coeficientes de determinação ajustados (R<sup>2</sup>) indicaram

que os modelos representam satisfatoriamente o comportamento dos dados. Os valores encontrados foram maiores que 0,7000; exceto para o corte paralelo, que obteve  $R^2$  de 0,6560, indicando bom ajuste dos dados às equações obtidas. Os valores médios da análise de regressão encontram-se no Anexo A.

Levando em consideração o coeficiente angular das equações obtidas, a potência necessária para realizar o corte perpendicular foi a mais influenciada pela densidade aparente da madeira. Isso pode indicar que menor amplitude de variação da densidade aparente apresenta aumento maior da potência em comparação aos outros tipos de corte realizados.

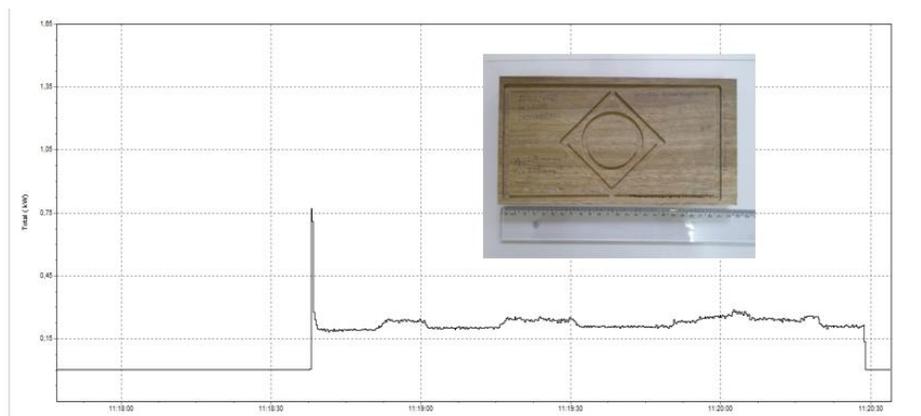
As séries temporais da tensão e da corrente, durante a fresagem, com CNC, dos corpos de prova podem ser observadas na Figura 17. Elas representam os dados gerados pelo analisador de energia “Fluke” e que permitem a determinação da potência de corte.

Figura 17 - Séries temporais de parâmetros elétricos do motor durante o processamento mecânico da madeira. Em que a) série temporal da tensão e b) série temporal da corrente.



Na Figura 18, pode ser observada a potência média aparente apresentada pelo analisador de energia “Fluke” durante o fresamento, com CNC, dos corpos de prova.

Figura 18 - Perfil de potência ativa durante o fresamento, com CNC, da madeira de *C. citriodora*.



No retângulo vermelho presente na Figura 19, destaca-se a leitura da potência ativa durante o corte paralelo, com CNC, da madeira de *C. citriodora*, em função do tempo. Semelhantemente, no retângulo azul, pode ser observada a potência ativa durante o corte perpendicular. Observa-se que o processamento paralelo requer menor potência que o corte perpendicular.

Figura 19 - Leituras de potência ativa durante a usinagem da madeira de *C. citriodora* com velocidade de avanço de  $1,39\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  e velocidade de corte de  $5,35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , em destaque a usinagem do corte paralelo (vermelho) e perpendicular (azul), em função do tempo.



Na Figura 20, encontra-se o perfil da potência de corte do *Eucalyptus deglupta* com velocidade de avanço de  $0,7\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  e com velocidade de corte de  $5,35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nos retângulos vermelho e azul, encontram-se destacados os cortes paralelo e perpendicular, respectivamente. Pode-se observar que não foram encontradas diferenças nos valores das potências entre esses dois cortes. Esse fato também foi observado para a maior velocidade de corte, de  $7,54\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Contudo, na análise da Figura 21, observa-se a diferença entre os cortes paralelo e perpendicular, porém executados com velocidade de avanço de  $1,39\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  e com velocidade de corte de  $3,77\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Assim, a não diferença entre as potências nos diferentes cortes pode estar associado a baixa densidade aparente ( $0,487\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) da madeira processada.

Figura 20 - Leituras de potência ativa durante a usinagem da madeira de *Eucalyptus deglupta* com velocidade de avanço de  $1,39 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  e de corte de  $5,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , durante a usinagem do quadrado inclinado, corte paralelo e perpendicular, em função do tempo.

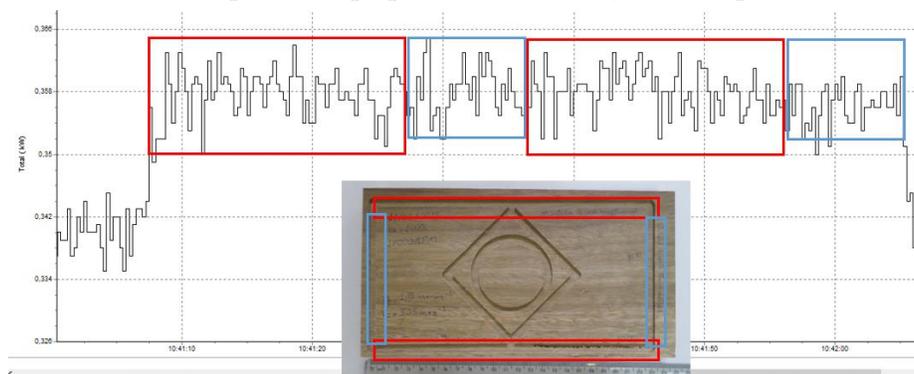


Figura 21 - Leituras de potência ativa durante a usinagem da madeira de *Eucalyptus deglupta* com velocidade de avanço de  $1,39 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  e de corte de  $3,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , durante a usinagem do quadrado inclinado, corte paralelo e perpendicular, em função do tempo.



O efeito da variação da densidade aparente da madeira, para diferentes cortes, na variação da potência é citada na literatura pertinente. Contudo, não é observada a quantificação dessa interferência. Na Tabela 3, encontra-se a variação percentual do consumo da potencia ativa em diferentes padrões de velocidade de avanço e de corte, para diferentes cortes em diferentes madeiras.

Pode-se observar que existe tendência de aumento da potencia ativa com o aumento da velocidade de corte de 3,77 para 5,35 e para 7,54 m\*s-1. No intervalo, inicialmente observou maior aumento da potencia ativa. Para os cortes em forma de círculo, de quadrado inclinado e no corte paralelo, observa-se redução da potencia ativa para a velocidade de corte de 7,54 m\*s<sup>-1</sup>. Isso pode ser explicado pela diminuição da espessura do cavaco gerado durante o corte.

Por outro lado, quando aumentamos a velocidade de avanço de 0,7 para 1,39 m\*min<sup>-1</sup>, ou seja 98%, utilizando as mesmas velocidades de corte, ocorre estabilização na potência consumida no corte do quadrado inclinado, queda no corte em círculo e no corte paralelo seguido de aumento de 3,52% no corte do perpendicular.

Tabela 3 - Variação do consumo de potência ativa para as variações de velocidade de avanço e corte em percentual.

Velocidades		Variação da potência em percentual			
Vf (m*min <sup>-1</sup> )	Vc (m*s <sup>-1</sup> )	Círculo	Quadrado inclinado	Paralelo	Perpendicular
0,70	3,77	17,37	15,86	13,81	15,85
		13,87	13,41	11,90	15,42
		15,78	13,86	11,21	11,94
	Médias	15,67	14,32	12,31	13,68
0,70	5,35	8,80	8,33	11,13	15,96
		9,27	8,16	8,12	12,76
		6,11	4,51	7,04	10,70
	Médias	8,06	7,00	8,76	13,14
0,70	7,54	-0,81	6,43	5,95	6,94
		8,30	7,87	8,05	9,81
		6,88	6,28	5,49	6,43
	Médias	4,79	6,86	6,50	7,73
1,39	3,77	26,74	23,39	23,44	29,11
		21,78	19,48	21,53	22,36
		23,52	20,88	18,60	24,76
	Médias	24,02	21,25	21,19	25,41
1,39	5,35	18,22	15,19	16,24	22,20
		15,86	12,91	11,80	18,15
		12,56	9,70	9,91	12,89
	Médias	15,55	12,60	12,65	17,75
1,39	7,54	-1,29	-1,04	-0,37	2,19
		-0,91	-0,85	-1,72	2,31
		1,83	2,04	0,36	6,05
	Médias	-0,12	0,05	-0,58	3,52

A influência da variação velocidade de corte de 3,77; 5,35 e 7,54 m\*s<sup>-1</sup>, na variação da potência ativa requerida para o corte, na velocidade de avanço de 0,7 m\*min<sup>-1</sup>, estão, respectivamente, representadas nas Figuras 22, 23 e 24. Considerando a variação entre as densidades da madeira de *E. deglupta* e de *Corymbia citriodora*, de 116,48%, as potências consumidas apresentam aumento cada vez menor à medida que se aumenta a velocidade de corte. Aumento de 42% na velocidade de corte (de 3,77 para 5,35 m\*s<sup>-1</sup>) corresponderam à variação de 8,06% na potência requerida para o corte do círculo, 7,00% para o

corte do quadrado inclinado, 8,76% para o corte paralelo e 13,14% para o corte perpendicular.

Figura 22 - Variação da potência de corte em percentual para a usinagem com parâmetros de corte velocidade de avanço de  $0,70 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  e velocidade de corte de  $3,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em função do tipo de corte.

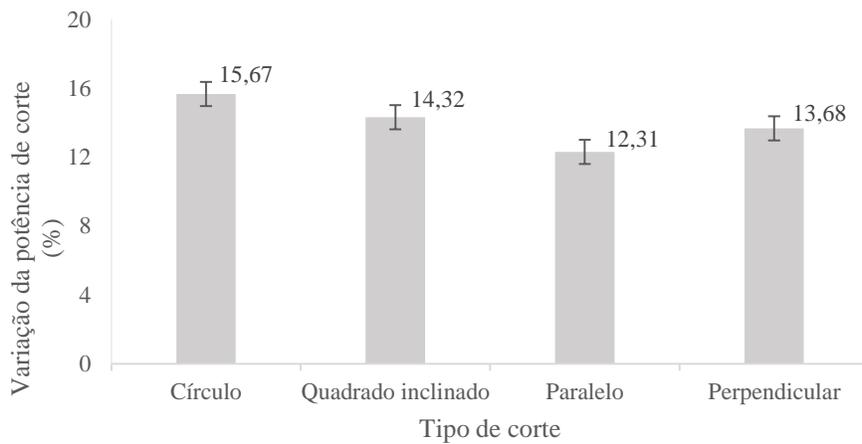


Figura 23 - Variação da potência de corte em percentual para a usinagem com parâmetros de corte velocidade de avanço de  $0,70 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  e velocidade de corte de  $5,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em função do tipo de corte.

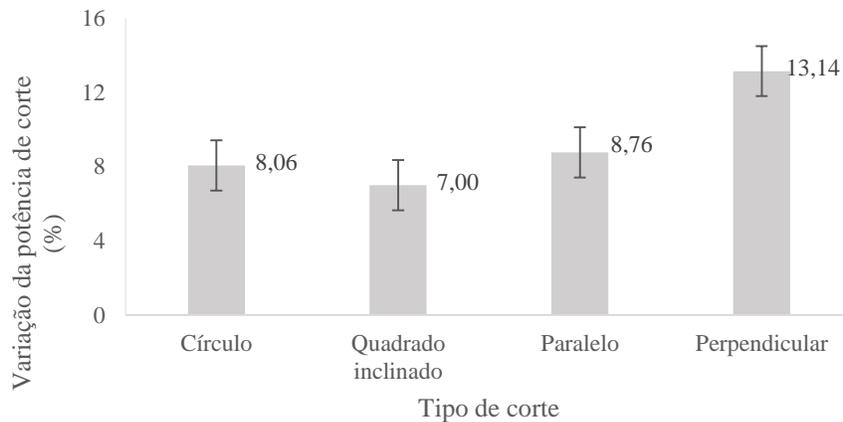
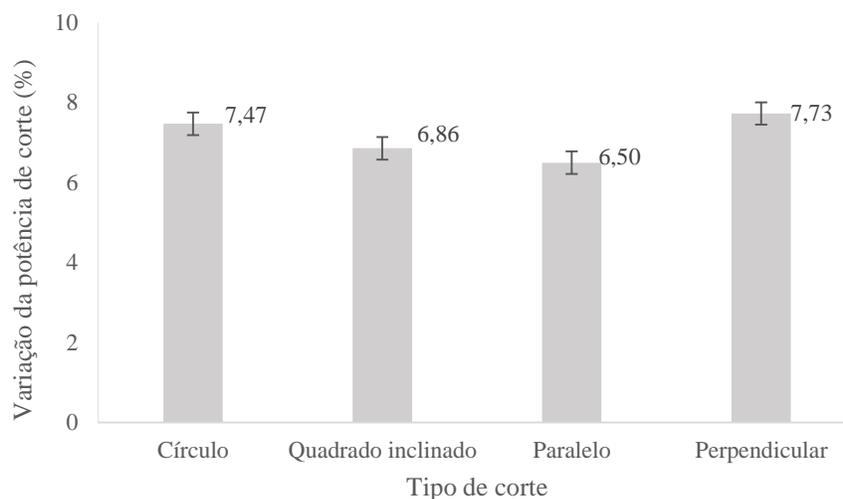


Figura 24 - Variação da potência de corte em percentual para a usinagem com parâmetros de corte velocidade de avanço de  $0,70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  e velocidade de corte de  $7,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  em função do tipo de corte.



Nas Figuras 24, 26 e 27 estão apresentadas as influências do aumento da velocidade de avanço em 98% (de  $0,70$  para  $1,39 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ) e de 100% na velocidade de corte (de  $3,77$  para  $7,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Com esses parâmetros de corte a potência requerida para o corte sofreu diminuição gradativa, chegando a  $-0,12\%$  no corte do círculo,  $0,05\%$  no corte do quadrado inclinado,  $-0,58\%$  no corte paralelo e  $3,52\%$  no corte perpendicular. Esses dados corroboram com os dados dos estudos de Koch (1964), Kollmann e Cotê (1968) e MacKenzie (1960), em que o aumento da densidade tem correlação direta com o aumento da potência de corte, até o ponto em que o aumento das velocidades dos parâmetros de corte geram diminuição da potência requerida ao corte.

A energia específica de corte tem seu estudo fundamentado em materiais uniformes, como o ferro e aço. Já, na madeira, que é sabidamente heterogênea, o estudo da potência instantânea consumida ponto a ponto tem uma relevante importância para entender as relações entre usinagem e consumo de energia.

Figura 25 - Variação da potência de corte em percentual para a usinagem com parâmetros de corte velocidade de avanço de  $1,39 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  e velocidade de corte de  $3,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  em função do tipo de corte.

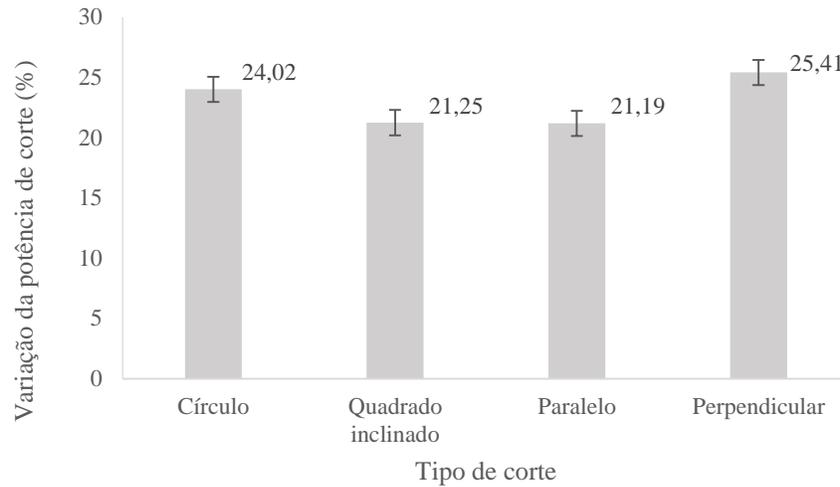


Figura 26 - Variação da potência de corte em percentual para a usinagem com parâmetros de corte velocidade de avanço de  $1,39 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  e velocidade de corte de  $5,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  em função do tipo de corte.

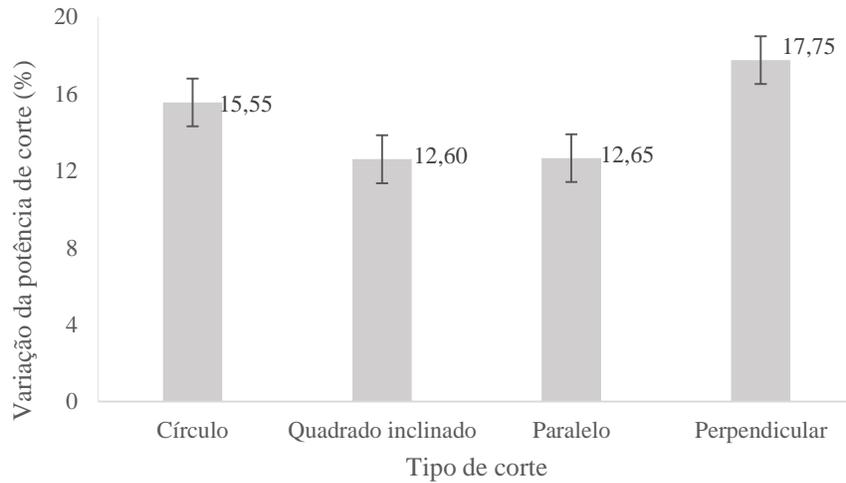
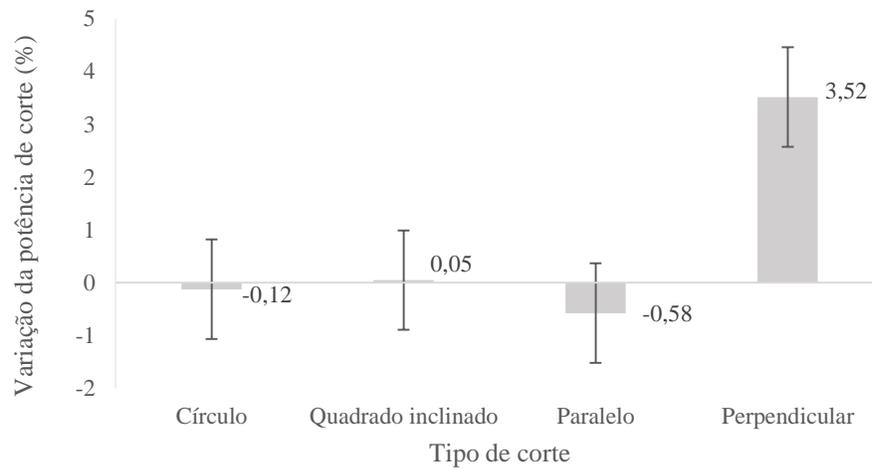


Figura 27 - Variação da potência de corte em percentual para a usinagem com parâmetros de corte velocidade de avanço de  $1,39 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  e velocidade de corte de  $7,54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  em função do tipo de corte.





## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

- a) A velocidade de avanço de  $1,39 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  combinada com a velocidade de corte de  $7,54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  apresentou diminuição em média de 12% de consumo de potência ativa quando comparada à velocidade de corte de  $3,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  com velocidades de avanço de  $1,39 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;
- b) Independentemente das espécies analisadas, menores velocidades de avanço, associadas a maiores velocidades de corte apresentaram menores consumos de potência ativa;
- c) Os cortes realizados na madeira da espécie *Eucalyptus deglupta* apresentaram os menores valores de consumo de energia específica de corte;
- d) O corte perpendicular apresentou maior potência ativa;
- e) Houve variação da potência ativa de corte em função dos tipos de corte e da combinação da velocidade de avanço e de corte;
- f) O fresamento na direção perpendicular às fibras na madeira de *C. maculata*, com velocidade de corte de  $3,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e velocidade de avanço de  $0,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  apresentou maior consumo de potência;
- g) O fresamento com velocidade de corte de  $7,54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e velocidade de avanço de  $1,49 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  apresentou menor aumento percentual de potência ativa, para todas as densidades e cortes executados;
- h) Sugere-se a utilização de controle dinâmico das velocidades de avanço e de corte, em tempo real de processamento, para manter a potência constante nos diferentes padrões de corte;



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-9656**: determinação de umidade por secagem em estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 123 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico ABRAF 2013**, ano base 2012. Brasília: Semear, 2013. 142 p. Disponível em: <[www.abraflor.org.br/estatisticas.asp](http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp)>. Acesso: 01 jan. 2015.

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

BRAGA, P. P. C. et al. Qualidade da superfície de madeira de *Coffea arábica*. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 21-28, jan./mar. 2014.

BRAND, M. A. et al. Balanço e rendimento energéticos de uma indústria integrada de base florestal. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 45-53, jan./dez. 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Zoneamento Ecológico para plantios florestais no Estado de Santa Catarina**. Curitiba: Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, 1988. 100 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.

EYMA, F.; MEAUSOONE, P. J.; MARTIN, P. Two originals methods to calculate precisely cutting forces involved during routing (90-0). In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 16., 2003, Matsue. **Proceedings**... Matsue: [s.n.], 2003.

FLUKE. **Manual do usuário. Analisadores de qualidade de potência e energia Trifásicos Fluke 434-II/435-II/437-II**. União Europeia: Fluke Corporation, 2012. 180 p.

FURUKAWA, H.; TSUTSUMOTO, T.; BANSHOYAK, K. Cutting performance of edge-sharpened diamond-coated milling tools. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 16., 2003, Matsue. **Proceedings**... Matsue: [s.n.], 2003.

GAWRONSKI, T. Optimization of CNC routing operations of wooden furniture parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 67, n. 9, p. 2259-2267, Aug. 2013.

GOES, E. *Eucalyptus microcorys* F. v. M. **Os eucalyptus em Portugal: identificação e monografia de 90 espécies: volume 1**. Lisboa: Secretaria de Estado da Agricultura, 1960. 298 p.

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

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.

HALL, N.; JOHNSTON, R. D.; CHIPPENDALE, G. M. **Forest trees Australia**. Canberra: Australian Department of Agriculture Forestry and Timber Bureau, 1975. 334 p.

HILL, K. D.; JOHNSON, L. Systematic studies in the eucalypts. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). **Telopea**, Sydney, v. 6, n. 2/3, p. 185-504, Dez. 1995.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Indústria Brasileira de Árvores, ano base 2014**. Brasília: Studio 113, 2015. 80 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/cief/especies/citriodora.asp>>. Acesso: 21 jul. 2015.

ISKRA, P.; HERNÁNDEZ, R. E. Toward a process monitoring of CNC wood router. Sensor selection and surface roughness prediction. **Wood Science Technology**, Berlin, v. 46, n. 1, p.115-128, Jan. 2012.

JACKSON S.; LEMASTER R. L.; LU, L. The use of process monitoring techniques on a CNC wood router. Part 1. Sensor selection. **Forest Products Journal**, Peachtree Corners, v. 50, n. 7/8, p. 31-42, July 2000.

KOCH, P. **Wood machining process**. New York: Ronald Press Company, 1964. 530 p.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology**: volume 1. New York: Springer-Verlag, 1968. 604 p.

LEITZ -LEXICON. **Unterschneidheim**. Oberkochen: Leitz Gmbh, 2011. 856 p. Disponível em: <<http://www.leitztooling.com/downloads/leitz-lexicon-v6.pdf>>. Acesso: 01 nov. 2015.

LIMA, J. T. **Potencial tecnológico para uso múltiplo da madeira de quinze espécies de *Eucalyptus* com 35 anos de idade**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2014. 138 p. (Relatório Técnico CNPq Processo 483293/2009-1).

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro: Editora 8, 2010. 792 p.

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

MELO, L. E. L. et al. Influence of anatomy and basic density on specific cutting force for wood from *Corymbia citriodora* Hill & Johnson. **Forest Systems**, Madrid, v. 24, n. 3, p. e036, Dec. 2015.

MONTEIRO, T. C. **Balço energético do processamento mecânico de toras de *Eucalyptus***. 2011. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: SBS, 2000. 112 p.

NÉRI, A. C. **Parâmetros de corte na usinagem de madeiras de reflorestamento**. 2003. 154 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**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 239-244, maio/ago. 1999.

PALMQVIST, J.; LENER, 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.

PEREIRA, J. C. C. et al. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Floresta, 2000. 113 p. (Documentos, n. 38).

PRYOR, L. D. *Eucalyptus*. In: HAVEY, A. (Ed.). **CRC handbook of flowering**: volume 2. Boca Raton: Franklin Book, 1985. p. 476-482.

PRYOR, L. D.; JOHNSON, L. A. S. **A classification of *Eucalyptus***. Canberra: Australian National University, 1971. 102 p.

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, jul./set. 2007.

SCHUMACHER, M. V.; CALIL, F. N.; VOGEL, H. L. M. **Silvicultura aplicada**. Santa Maria: Editora da UFSM, 2005. 120 p.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **CNC básico torno**. São Leopoldo: SENAI-RS, 2006. 155 p.

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

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

SILVA, J. R. M.; BRAGA, P. P. C.; MARTINS, M. Identificação de parâmetros de rugosidade para qualificação de pisos de *Eucalyptus grandis*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: EBRAMEN, 2008. 1 CD ROM.

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.

SOUZA, E. M. **Influência dos parâmetros de usinagem da madeira de *Eucalyptus* sp. no consumo de energia específica de corte em serra circular.** 2009. 50 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

VARANDA, L. D. et al. A influência das variáveis do lixamento tubular na qualidade de peças de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 23-32, 2010. Suplemento.

VARASQUIM, F. M. F. A. et al. Influência da velocidade de corte, granulometria da lixa e pressão no lixamento de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 18, N. 2, p. 231-237, abr./jun. 2012.

VITTI, A. M. S.; BRITO, J. O. Avaliação do rendimento e do teor de citronela do óleo essencial de procedências e raças locais de *Eucalyptus citriodora*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 145-154, dez. 1999.

WOOD, T. **CNC machining 101, part I.** Troy: DNP Média, 2001a. 80 p.

WOOD, T. **CNC machining 101, part II.** Troy: DNP Média, 2001b. 72 p.



## ANEXO A - TABELAS

1.1. Análise de variância para potência ativa, em watts, para os processamentos em diferentes madeiras para o corte em formato de círculo.

	GL	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	820,7101	820,7101	31,4075	8,5638E-05
Resíduo	13	339,7037	26,1311		
Total	14	1160,4138			

Resumo dos parâmetros da análise de regressão para potência ativa, em watts, para os processamentos em diferentes madeiras para o corte em formato de círculo.

	Estatística de regressão
R múltiplo	0,840985392
R-Quadrado	0,707256429
R-quadrado ajustado	0,684737693
Erro padrão	5,111854033
Observações	15

1.2. Análise de variância para potência ativa, em watts, para os processamentos em diferentes madeiras para o corte em formato de quadrado.

	GL	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	747,7664	747,7664	41,1785	2,2814E-05
Resíduo	13	236,0690	18,1592		
Total	14	983,8354			

Resumo dos parâmetros da análise de regressão para potência ativa, em watts, para os processamentos em diferentes madeiras para o corte em formato de quadrado.

	Estatística de regressão
R múltiplo	0,871809829
R-Quadrado	0,760052377
R-quadrado ajustado	0,741594868
Erro padrão	4,2613555
Observações	15

1.3. Análise de variância para potência ativa, em watts, para os processamentos em diferentes madeiras para o corte em formato paralelo.

	GL	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	549,2205	549,2205	24,7897	0,0003
Resíduo	13	288,0178	22,1552		
Total	14	837,2383			

Resumo dos parâmetros da análise de regressão para potência ativa, em watts, para os processamentos em diferentes madeiras para o corte em formato paralelo.

	Estatística de regressão
R múltiplo	0,809932474
R-Quadrado	0,655990612
R-quadrado ajustado	0,629528351
Erro padrão	4,706932963
Observações	15

1.4. Análise de variância para potência ativa, em watts, para os processamentos em diferentes madeiras para o corte em formato perpendicular.

	GL	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	1021,7932	1021,793	32,8593	6,9104E-05
Resíduo	13	404,2488	31,0961		
Total	14	1426,0420			

Resumo dos parâmetros da análise de regressão para potência ativa, em watts, para os processamentos em diferentes madeiras para o corte em formato perpendicular.

	Estatística de regressão
R múltiplo	0,846477369
R-Quadrado	0,716523936
R-quadrado ajustado	0,694718084
Erro padrão	5,576384013
Observações	15