



TAIANE OLIVEIRA GUEDES

**CONSUMO DE ENERGIA ESPECÍFICA DE
CORTE EM MADEIRAS DE DIFERENTES
DENSIDADES EM DISTINTAS UMIDADES**

**LAVRAS – MG
2016**

TAIANE OLIVEIRA GUEDES

**CONSUMO DE ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE EM MADEIRAS
DE DIFERENTES DENSIDADES EM DISTINTAS UMIDADES**

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

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Orientador

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
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).**

Guedes, Taiane Oliveira.

Consumo de energia específica de corte em madeiras de
diferentes densidades em distintas umidades / Taiane Oliveira
Guedes. – Lavras : UFLA, 2016.

83 p. : il.

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

Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva.

Bibliografia.

1. Processamento mecânico da madeira. 2. Potência ativa. 3.
Analisador de energia. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

TAIANE OLIVEIRA GUEDES

**CONSUMO DE ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE EM MADEIRAS
DE DIFERENTES DENSIDADES EM DISTINTAS UMIDADES**

***SPECIFIC CUTTING ENERGY CONSUMPTION IN WOOD WITH
DIFFERENT DENSITIES AND DIFFERENT MOISTURES***

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

APROVADA em 19 de agosto de 2016.

Prof. Dr. Alexandre Monteiro de Carvalho UFRRJ

Profa. Dr. Sílvia Costa Ferreira UFLA

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
Orientador

LAVRAS – MG

2016

À minha mãe, meu maior exemplo de dedicação, responsabilidade e coragem!

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sentir sua presença em todos os momentos da minha vida como meu amigo fiel.

À minha mãe e padrasto, pelas palavras de incentivo, amor e pelas orações a meu favor.

Às minhas irmãs, pelo carinho, apoio e por sempre torcerem por minhas conquistas.

Ao meu pai, que mesmo não estando presente, me inspira profundamente.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade de crescimento intelectual, pessoal e pela realização deste trabalho.

À Comissão de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos e à Fundação de Amparo à Pesquisa (FAPEMIG), por apoio financeiro para a aquisição de equipamentos que permitiram o desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Dr. José Reinaldo, pela orientação, ensinamentos e colaboração com este trabalho. Também ao professor Dr. Paulo Hein pela coorientação, auxílio e incentivo.

À professora Sílvia Ferreira (DEG/UFLA), por toda dedicação, paciência e também pela amizade ao longo deste trabalho.

Ao professor Joaquim Paulo da Silva (DFI/UFLA), pelo empréstimo do analisador de energia durante o experimento.

Aos técnicos de laboratório Heber e Carlos.

Às “rimãs” de orientador Anna e Mônica pela cumplicidade, dicas e apoio.

Aos amigos que conquistei durante este tempo e que trouxeram mais leveza e alegria para este período.

À minha família em Lavras: República M4 (Krill, Gabi e Xi) as melhores companheiras que poderia ter!

RESUMO

Pesquisas para uso adequado da energia durante o processamento da madeira são de interesse da indústria, uma vez que é necessário conhecer a melhor relação entre a energia requerida e a madeira processada. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento da energia requerida no processamento mecânico de madeiras com distintas densidades e umidades. O processamento mecânico foi feito com tupia programada por Comando Numérico Computacional (CNC), que permitiu controle das velocidades de corte e de avanço. Foram processadas três madeiras de *Pinus* spp., *Goupia glabra* (Cupiúba) e *Dipteryx alata* (Cumaru vermelho), com diferentes umidades, as quais foram estabelecidas por meio de secagem contínua. A cada estágio de umidade os corpos de prova foram processados, totalizando oito estágios em cada corpo de prova. Para se conhecer o consumo de energia específica em cada processamento foi utilizado o analisador de energia, marca Fluke. Os menores valores médios de energia específica de corte foram de 299, 262, 292 KJ.cm^{-3} para as madeiras de Cumaru (36%), Cupiúba (71%) e Pinus (85%), respectivamente. Os maiores valores médios de energia requerida foram de 570, 513 e 497 KJ.cm^{-3} , todos para 0% de umidade e madeiras de Cumaru, Cupiúba e Pinus, respectivamente. Os valores de energia próximos ao Ponto de Saturação das Fibras foram de 416, 397 e 359 KJ.cm^{-3} para Cumaru, Cupiúba e Pinus, respectivamente. Observou-se acréscimo de 70 KJ.cm^{-3} (12%) na energia de corte da madeira de Cumaru para queda de 4% na umidade. Para a madeira de Cupiúba o aumento foi de 67 KJ.cm^{-3} (13%) para queda de 12% na umidade e para a madeira de Pinus o aumento foi de 54 KJ.cm^{-3} (11%) para queda de 8% na umidade. Madeiras com maior umidade requisitaram menor energia específica de corte. O analisador de energia permitiu obter os dados de forma satisfatória, os erros atribuídos à taxa de aquisição não interferiram na análise dos dados.

Palavras-chave: Processamento Mecânico. CNC. Analisador de energia.

ABSTRACT

Searches for proper use of energy during wood processing industry are of interest, since it is necessary to know the best relationship between the required energy and raw material of wood processed. The objective of this study was to evaluate the energy performance required in the mechanical processing of wood with different densities and moistures. The mechanical processing was done with router programmed by Computer Numerical Control (CNC), which allowed control of the cutting speed and feeding speed. Three woods were processed species of *Pinus* spp., *Goupia glabra* (Cupiúba) and *Dipteryx alata* (Cumaru vermelho) were processed with different humidities moistures contents, which were established through continuous drying. Every in each stage of humidity moisture the samples were processed, totaling eight stage in each specimen. For the specific energy consumption in each processing is it was used the energy analyzer, Fluke mark. The lowest average values of specific cutting energy were 299, 262 and 292 KJ.cm^{-3} for the timber Cumaru (36%), Cupiúba (71%) and Pinus (85%), respectively. The highest average values of required energy were 570, 513 and 497 KJ.cm^{-3} , all to 0% humidity moisture and for wood Cumaru, Cupiúba and Pinus, respectively. The energy values close to the fiber saturation point were 416, 397 and 359 KJ.cm^{-3} to Cumaru, Cupiúba and Pinus, respectively. It was observed increase of 70 KJ.cm^{-3} (12%) in the power cut wood of Cumaru to for 4% drop in humidity moisture. For wood Cupiúba the increase was 67 KJ.cm^{-3} (13%) to for 12% drop in humidity moisture and the wood of for Pinus the increase was 54 KJ.cm^{-3} (11%) to for 8% drop in humidity moisture. Woods with higher humidity moisture content requisitioned demanded lower specific power cut. The energy analyzer allowed to obtain the data satisfactorily, errors attributable due to the acquisition rate did not affect the analysis.

Keywords: Mechanical processing. CNC. Energy analyzer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica da tensão e da corrente ideais, puramente senoidais	20
Figura 2 – Triângulo de Potências.	22
Figura 3 – Tensão e corrente com forma de onda distorcida.	23
Figura 4 – Tupia fresadora controlada por CNC. A) conjunto mesa - tupia e B) computador controlador do CNC.	32
Figura 5 – Corpos de prova acondicionados em ambiente aberto, por 15 dias.	34
Figura 6 – Corpos de prova de Cumaru, Pinus e Cupiúba, após quatro processamentos em diferentes estágios de umidade.	35
Figura 7 – Sistema básico para a medição da energia de corte com Analisador de energia (FLUKE)	37
Figura 8 – Programação do modo de medição (0,5 s) no analisador de energia para atender às especificações para o experimento	38
Figura 9 – Perfil de potência, em função do tempo, gerado pelo analisador de energia, com valores de potência (máximo, médio e mínimo). Em destaque (retângulo) a energia no momento do corte da madeira	39
Figura 10 – Correlação entre valores de Energia Específica de Corte e a umidade com a linha de tendência e a equação da reta para a madeira de Cumaru.	45
Figura 11 – Correlação entre valores de Energia Específica de Corte e a umidade com a linha de tendência e a equação da reta para a madeira de Cupiúba.	47

Figura 12 – Correlação entre valores de energia específica de corte e a umidade com a linha de tendência e a equação da reta para a madeira de Pinus.	49
Figura 13 – Variação relativa das variáveis umidade e energia específica ao longo dos estágios de umidade em que foram realizados o processamento mecânico (1 ao 8 estágios de umidade).	50
Figura 14 – Correlação entre energia requerida e a variação de umidade para as três madeiras	51
Figura 15 – Correlação entre energia requerida e a variação de umidade para as três madeiras em conjunto.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem de corpos de prova aprovados nos testes de fresagem longitudinal e transversal.....	18
Tabela 2 – Percentual de corpos de prova classificados com qualidade entre regular e ótima após diferentes operações de processamento.....	19
Tabela 3 - Consumo médio de energia específica de corte da madeira de híbridos de <i>Eucalyptus</i> , para diferentes velocidades de corte e de avanço.....	26
Tabela 4 - Valores de densidade básica das madeiras e sua classificação.....	31
Tabela 5 - Valores médios de umidade determinados para as três madeiras nos diferentes estágios e nas diferentes condições de secagem	34
Tabela 6 - Valores de umidades das madeiras de cada espécie calculados para cada estágios de umidade.	36
Tabela 7 - Máximos, mínimos, médias e desvio padrão dos valores de energia específica de corte requeridos para cada madeira, nas diferentes umidades.....	43
Tabela 8 - Valores de umidade média, energia específica média, variação de energia específica absoluta e percentual, em cada estágio de umidade para a madeira de Cumaru	44
Tabela 9 - Valores de umidade média, energia específica média, variação de energia específica absoluta e percentual, em cada estágio de umidade para a madeira de Cupiúba.....	46
Tabela 10 - Valores de umidade média, energia específica média, variação de energia específica absoluta e percentual, em cada estágio de umidade para a madeira de Pinus.	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	A madeira como matéria-prima	15
2.2	Processamento mecânico da madeira	16
2.3	Energia e potência	19
2.3.1	Energia específica de corte (Es)	24
2.4	Comando Numérico Computacional	28
3	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1	Preparo dos corpos de prova	31
3.2	Processamento mecânico em diferentes umidades	32
3.3	Determinação da energia específica de corte	36
3.4	Análise dos dados	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	55
	ANEXO A - DADOS DE POTÊNCIA ATIVA PARA CADA ESTÁGIO DE UMIDADE E PARA CADA MADEIRA	59

1 INTRODUÇÃO

A indústria moveleira e de madeira serrada movimentam um setor de grande exigência quanto a qualidade do produto e eficiência em sua produção. Essas características garantem alto valor agregado dos produtos considerados como destino nobre para o uso da madeira. Esse setor está em expansão (INTELIGÊNCIA DE MERCADO, 2015) com alto nível de exigência quanto a qualidade do produto. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário (ABIMÓVEL, 2015), os móveis de madeira representam 84,5% de participação na indústria, quando confrontados com móveis feitos de metais (8,8%), colchões (2,3%) e outros (4,4%).

O conhecimento das propriedades da madeira é fundamental para que se possa obter produtos com características adequadas e também prever o comportamento da mesma, garantindo maior controle do processo. A umidade e densidade influenciam no processo como, por exemplo, na qualidade da superfície, na resistência ao corte e na energia requerida para cortar. Contudo, ainda não existem pesquisas que mensurem em que magnitude essas propriedades interferem na energia que é requerida durante o processamento. Faltam estudos que correlacionem a requisição de energia específica de corte com valores diferentes de umidade.

O uso de tecnologias que permitam controlar melhor o processamento mecânico são fundamentais para alcançar melhores resultados para esse setor. Máquinas controladas por Comando Numérico Computacional (CNC) possibilitam maior precisão e menor tempo de corte e que a execução das operações possam ter parâmetros previamente determinados, com a repetitividade e a reprodutibilidade dos ensaios. Essa configuração permite o estudo das variações pertinentes somente à matéria-prima.

A energia específica requerida ao se cortar é uma variável importante de ser avaliada para garantir que as máquinas estejam sendo eficientes no

processamento mecânico, sem desperdícios energéticos. Também, evita sobrecarga que gere interrupções de produção (paradas técnicas) por exceder limites de requisição dos motores eletromotrizes. A energia específica de corte requerida pode variar de acordo com os parâmetros referentes ao processo, como velocidade de corte e de avanço e também com as características pertinentes à matéria-prima, sendo essa de grande interesse ao se trabalhar com a madeira.

Conduziu-se, este trabalho com o objetivo de avaliar o comportamento da energia requerida no processamento mecânico de madeiras com distintas densidades (alta, média e baixa) e com diferentes umidades.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A madeira como matéria-prima

Dentre as propriedades tecnológicas, as características físicas como densidade, umidade e retratibilidade são fundamentais para entender o comportamento da madeira. Por ser um material higroscópico a madeira sofre alterações em sua estrutura físico-química de acordo com a umidade ambiente em função do equilíbrio higroscópico (PANSHIN; ZEEUW, 1980).

A umidade é uma propriedade de grande importância quanto ao uso da madeira, pois as características da mesma podem alterar de acordo com a entrada ou saída de água que ocorre com a mudança na umidade. A NBR 7190 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997) propôs classes de umidade em que a determinação da resistência mecânica e a rigidez da madeira está em função das condições ambientais que a estrutura de madeira será utilizada. A umidade de referência para uso da madeira é de 12%, umidade em que se considera que a madeira encontra-se mais estável. Essa normatização é importante, uma vez que, a madeira pode tornar-se menos rígida com o aumento da umidade, tornando-se inadequada para o uso estrutural. Saber a umidade é fundamental para garantir a estabilidade do comportamento que a madeira terá durante o seu processamento, sendo que o corte da madeira se trata de superar sua resistência.

A resistência mecânica da madeira está intimamente relacionada com a água que se encontra na parede celular das fibras. Acima do PSF, não se verifica efeito significativo sobre a resistência mecânica da madeira. Para valores de 0% de umidade até o PSF a água na madeira afeta a resistência mecânica, uma vez que, nessas condições, a saída de água reduz a quantidade das ligações de hidrogênio fragilizando a estrutura interna da madeira (WIANDY; ROWELL, 1984 citado por LOGSDON, 1998).

Em estudo com sete espécies de eucalipto, avaliaram-se gradientes de umidade e densidade em direções radiais e axial do lenho das árvores, *in natura*. Para duas espécies (*E. urophylla* e *E. grandis*), o diferencial de umidade da madeira nas regiões mais internas chegou a 80%. Essa variação da umidade foi inversamente proporcional à densidade, pois madeiras mais densas possuem menor proporção de espaços vazios e, conseqüentemente, menor quantidade de água livre (OLIVEIRA; HELLMEISTER; TOMAZELLO FILHO, 2005). Este estudo comprovou que a umidade e densidade são características que podem sofrer variações dentro da madeira.

As paredes celulares dos elementos anatômicos que compõem o lenho e os espaços vazios entre esses elementos interferem na densidade da madeira. As paredes celulares correspondem à fração sólida, formada pelos componentes químicos fundamentais (celulose, hemiceluloses e lignina). Além disso, é observada a presença de componentes acidentais (extrativos e minerais). A variação nessa composição, a organização celular e o arranjo estrutural serão responsáveis pelas mudanças de densidade ao longo do lenho (BURGUER; RICHTER, 1991).

A mesma árvore pode ter grandes variações de densidade ao longo do seu lenho, em razão da heterogeneidade na sua organização celular. É a densidade que controla a extensão das alterações dimensionais que ocorrem na madeira com as mudanças na umidade abaixo do ponto de saturação das fibras. Por estar diretamente relacionada com todas as propriedades básicas, a densidade desempenha um papel importante para determinar a utilidade de cada tipo de madeira (BROWN; PANSIN; FORSAITH, 1952).

2.2 Processamento mecânico da madeira

O processamento mecânico é realizado com a pretensão de se obter peças com dimensão e qualidade desejáveis. A madeira é utilizada desde a

antiguidade, contudo, ainda faltam tecnologias para atender ao processamento da mesma e às suas peculiaridades, uma vez que se trata de um material biológico com comportamento variável (LUCAS FILHO; BOEHS, 2007).

Ao se usinar deve-se levar em consideração diversos fatores: área e espessura do corte, geometria da ferramenta, ângulo de posição e estado de afiação da ferramenta, velocidade de corte e também o material que será usinado (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Para Lucas Filho e Boehs (2007), é interessante que seja estudado o comportamento de diferentes espécies de madeira em diferentes processos de usinagem (fresagem, aplainamento, furação) para que seja relacionado os fatores que são inerentes ao processo e a matéria-prima, ou seja, densidade, resistência mecânica e umidade.

Silva, Castro e Evangelista (2015) estudaram a madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden em diferentes idades: 10, 14, 20 e 25 anos usinadas para a produção de móveis. As madeiras com idades maiores apresentaram melhores desempenhos para serem utilizadas na indústria moveleira. A umidade aparente considerada foi de 12% e a massa específica das madeiras foi maior com o aumento da idade. Na Tabela 1, mostra-se a avaliação do ensaio de fresagem das madeiras, em que as mais velhas (20 e 25 anos) e mais densas obtiveram maior aprovação. As notas representam a qualidade, sendo 1 excelente e 5 muito ruim, os corpos de prova aprovados para o setor moveleiro deveriam ter notas 1 e 2.

Tabela 1 - Porcentagem de corpos de prova aprovados nos testes de fresagem longitudinal e transversal

Idade (anos)	Nota 1	Nota 2	Nota 3	Nota 4	Nota 5	Corpos de prova aprovados (%)
	%	%	%	%	%	
10	18	22	47	10	3	40
14	40	25	25	7	3	65
20	60	30	8	2	0	90
25	62	28	7	2	1	90

Fonte: Adaptada de Silva, Castro e Evangelista (2015).

Malkoçoğlu e Özdemir (2005) analisaram a qualidade da superfície usinada, levando em consideração madeiras de folhosas (Faia oriental, Castanha Anatólio e Amieiro preto) e coníferas (Pinheiro silvestre e Abeto oriental) para diferentes operações: aplainar, tornear, perfurar, entalhar e lixar. Os resultados dos ensaios mostraram que as folhosas apresentaram melhor desempenho ao serem usinadas quando comparadas com as coníferas (TABELA 2). Os autores justificaram o desempenho superior da madeira de folhosas, em razão de sua densidade básica ser mais elevada quando comparada com coníferas.

Tabela 2 – Percentual de corpos de prova classificados com qualidade entre regular e ótima após diferentes operações de processamento

Espécies arbóreas	Percentual de corpos de prova por tipo de processamento (%)				
	Aplainar	Entalhar	Tornear	Perfurar	Lixar
Faia oriental	95	100	96	100	96
Castanha anatólio	86	95	88	98	71
Amieiro preto	81	97	93	94	60
Pinheiro silvestre	94	85	67	92	81
Abeto oriental	61	77	44	70	66

Fonte: Adaptada de Malkoçoğlu e Özdemir (2005).

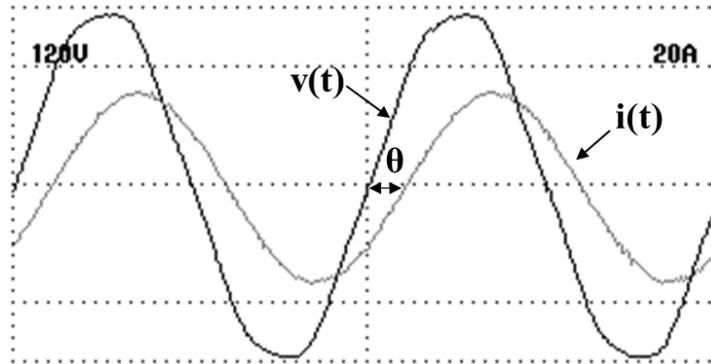
A usinagem da madeira deve levar em consideração não apenas obter peças com as dimensões desejadas, mas sim o conjunto, que inclui a qualidade da peça usinada, o custo e a segurança do operador (SILVA et al., 2005).

2.3 Energia e potência

A capacidade de realização de trabalho de um corpo é entendida como energia. O motor ao ser ligado à rede transforma a energia elétrica em mecânica, que fica disponível na ponta do eixo para realização de trabalho. A potência elétrica, por sua vez, indica a quantidade de energia por unidade de tempo.

A potência elétrica, também chamada de instantânea, em sistemas ideais é obtida pela relação entre as grandezas de tensão e corrente (FIGURA 1).

Figura 1 – Representação gráfica da tensão e da corrente ideais, puramente senoidais



A tensão e a corrente são representadas no domínio do tempo e podem ser calculadas pelas Equações 1 e 2.

$$v(t) = \sqrt{2} V \text{ sen}(\omega t) \quad [1]$$

$$i(t) = \sqrt{2} I \text{ sen}(\omega t - \theta) \quad [2]$$

Em que:

V = tensão (Volts);

I = corrente (Amperes);

ω = frequência angular da rede (rad.s^{-1})

θ = ângulo de defasagem entre tensão e corrente

$v(t)$ = tensão no tempo

$i(t)$ = corrente no tempo

A frequência angular (ω) pode ser calculada em função da frequência da rede, conforme descrito na Equação 3.

$$\omega = 2\pi f \quad [3]$$

Em que:

f = frequência da rede

A potência instantânea deste sistema é dada conforme Equação 4.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad [4]$$

Entretanto, como tensão e corrente estão defasadas de um ângulo θ , a potência instantânea pode ser dividida em potência aparente (S), potência ativa (P) e potência reativa (Q). A potência aparente é a potência elétrica total entregue a carga. Ela é dada pela multiplicação dos valores da tensão e da corrente (EQUAÇÃO 5). A potência ativa (P) é a parcela da potência aparente que realiza trabalho. Ela é dada pelo valor médio da potência instantânea (EQUAÇÃO 6). Finalmente, a potência reativa (Q) é a parcela da potência aparente que não realiza trabalho e pode ser calculada pela Equação 7.

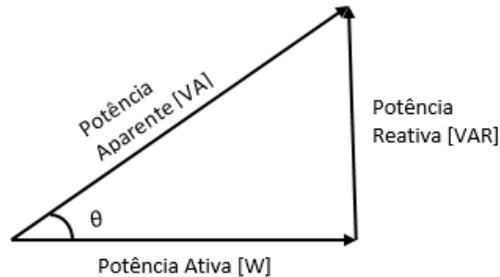
$$S = VI \quad [5]$$

$$P = VI \cos\theta \quad [6]$$

$$Q = VI \sen\theta \quad [7]$$

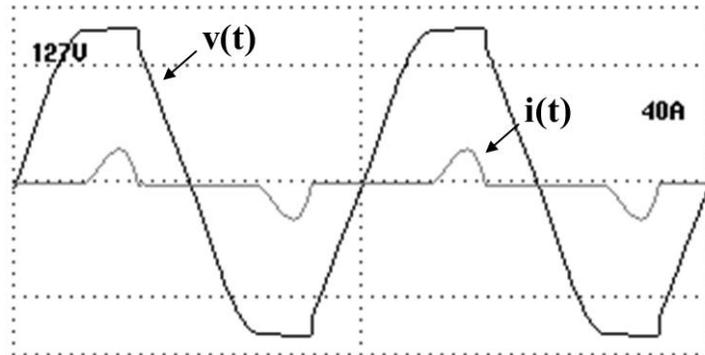
O motor elétrico não consome apenas potência ativa que irá ser convertida em trabalho, mas também potência reativa necessária para magnetização de seus componentes (GRUPO WEG, 2013). A potência instantânea de um sistema balanceado, pode ser analisada pelo triângulo de potências (FIGURA 2).

Figura 2 – Triângulo de Potências.



Quando determinados tipos de motores utilizam circuitos eletrônicos para controlar a velocidade, o motor pode absorver a corrente de forma de onda que é diferente da tensão que o alimenta. Nesse caso, ela é chamada de não-linear. Esse tipo de carga gera correntes chamadas de harmônicas, que são consideradas deformações na forma de ondas. Essas deformações de tensão ou de corrente significam que a qualidade da energia não é ótima (SCHNEIDER ELECTRIC, 2003). As deformações causadas pelos harmônicos tornam a onda da corrente com formato não senoidal. As definições de potência descritas anteriormente, não são válidas para sistemas distorcidos, que apresentam as formas de onda de tensão e corrente como apresentado na Figura 3. Nesses casos, a potência ativa deve ser calculada pela sua definição, como sendo o valor médio da potência instantânea (Equação 8). Essas peculiaridades exigem equipamentos com sensibilidade para detectá-las.

Figura 3 – Tensão e corrente com forma de onda distorcida.



$$P = \int p(t) dt = \int [v(t) \cdot i(t)] dt \quad [8]$$

Em que:

P = Potência ativa (Watt)

$p(t)$ = Potência no tempo

$v(t)$ = Tensão no tempo

$i(t)$ = Corrente no tempo

dt = Derivada

Durante processamentos mecânicos, é possível medir a potência ativa por meio dos medidores de energia elétrica próprios para esse fim. O medidor de energia elétrica é um equipamento que permite analisar parâmetros, tais como tensão, corrente e potência. Eles geram relatórios precisos e armazenam os dados (FLUKE CORPORATE, 2000). Medições em que tensão e corrente não são ideais exigem equipamentos específicos como o analisador de energia que consegue medir com precisão esses dados.

Com o medidor de energia, mede-se as potências elétricas requeridas durante o processamento. Esses dados permitem relacionar a realização de trabalhos como, por exemplo, o fresamento, com a energia de corte exigida.

2.3.1 Energia específica de corte (E_s)

Durante o processamento mecânico a máquina requer energia elétrica. No entanto, parte dessa energia é dissipada em forma de calor, parte é exigida para acionar o motor e o restante para executar o corte (MOTORES WEG, 2013). A energia específica de corte é a energia efetiva consumida para remover determinada unidade de volume do material da peça (SALMON, 1992).

É possível estabelecer relação e obter a energia específica de corte por meio da potência ativa adquirida com um analisador de energia. Pois, o analisador permite fazer a leitura da potência requerida propriamente para o corte. A energia específica é calculada por meio da razão entre a potência de corte e a taxa de remoção de material (EQUAÇÃO 9). A taxa de remoção é o volume de material que foi removido em determinado intervalo de tempo. A unidade será dada em energia por volume ou por força por área.

$$E_s = \frac{P}{Tx} \quad [9]$$

Em que:

E_s = Energia específica de corte ($J \cdot mm^{-3}$)

P = Potência (Watt)

Tx = Taxa de remoção ($mm^3 \cdot s^{-1}$)

As variáveis do processo, como velocidade de avanço e de corte, número de dentes, tipo de máquina e rotação do eixo do motor interferem na energia que é requerida ao corte. Sabe-se que as características do material a ser usinado também são importantes fontes de variação sobre a energia requerida,

uma vez que alteram a resistência ao corte do material. Na literatura pertinente ao material madeira, os dados apresentados mostram a existência da relação entre energia e características dessa matéria-prima. Contudo, não é clara a magnitude e o perfil da interferência entre essas variáveis.

As principais linhas de pesquisa no processamento mecânico da madeira visam identificar quais os parâmetros do processo interferem na qualidade e na otimização da usinagem. Em trabalho realizado por Souza et al. (2011) estudou-se a influência dos parâmetros do processamento, como velocidade de avanço e de corte e número de dentes no consumo de energia específica de corte de madeira de *Eucalyptus* saturadas e secas. Os cortes foram feitos em serra circular utilizando carrinho mecânico de movimentação. A energia requerida foi medida por meio dos dados do inversor de frequência. Como resultado os autores atestaram que maiores velocidades de corte, menores velocidades de avanço e serra circular de 40 dentes consumiram maior quantidade de energia específica. Os autores também determinaram condições ideais de corte para cada material genético, visando a diminuir a energia específica de corte sem comprometer a qualidade. Como recomendações, os autores sugeriram que próximos trabalhos confrontassem a energia em função da umidade e densidade com distribuição radial.

Gontijo (2012) analisou 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. Foi utilizado carrinho com avanço mecânico e serra circular para fazer os cortes. A energia específica foi obtida por meio do inversor de frequência. Os resultados mostram que maiores velocidades de corte e menores velocidades de avanço requereram, em geral, mais energia específica de corte (TABELA 3). No entanto, o trabalho não conseguiu relacionar as umidades encontradas para os corpos de prova com a energia específica requerida.

Tabela 3 - Consumo médio de energia específica de corte da madeira de híbridos de *Eucalyptus*, para diferentes velocidades de corte e de avanço

Parâmetro	Consumo médio de energia específica de corte (J.cm ⁻³)	Coefficiente de variação (%)
Velocidade de corte (m.s ⁻¹)		
36	113,06	13
41	115,51	16
46	108,19	19
51	112,07	22
56	119,11	22
Velocidade de avanço (m.min ⁻¹)		
11	131,55	14
14	108,18	19
17	99,87	18
20	102,61	18

Fonte: Gontijo (2012)

Rigatti (2010) estudou a influência dos parâmetros de usinagem na fresagem de diferentes metais. Os resultados demonstraram que, em análise isolada dos parâmetros de corte, o aumento da velocidade de corte reduz a energia específica de corte e a força de usinagem e que a velocidade de avanço foi o fator mais influente na energia específica. Ao se aumentar a velocidade de avanço reduziu-se o consumo de energia e aumentou a força de usinagem. Esses dados são bastantes similares aos encontrados na literatura com a usinagem da madeira.

Melo (2013), em experimento utilizando diferentes materiais genéticos, estudou a influência da estrutura anatômica no consumo de energia específica durante o corte das madeiras. Os parâmetros de processamento como velocidade de avanço, velocidade de corte, número de dentes, rotação do eixo porta ferramentas e serra circular foram fixados. Como resultado houve correlação significativa entre a densidade básica, comprimento e largura dos raios, fração

parede e coeficiente de rigidez das fibras e fração parede total do lenho. O material genético influenciou o consumo máximo de energia específica. Os cortes feitos longitudinalmente tiveram consumo superior aos feitos transversalmente.

A energia específica consumida durante o processamento mecânico é um importante parâmetro para avaliar a eficiência da ferramenta de corte. Os trabalhos desenvolvidos apresentados aqui tendem a relacioná-la com as variáveis envolvidas no processo de usinagem, deixando ainda uma lacuna em relação a energia específica e a forma como a matéria-prima madeira afeta seu consumo.

Aguilera (2011) verificou a energia de corte necessária para serrar MDF e a relação com a rugosidade da superfície. A umidade dos painéis estava entre 8 e 9%. Os painéis foram usinados em serra circular com 34 e 24 dentes. Para medir a energia de corte o autor utilizou equipamento elétrico conectado a um computador, gravando emissões acústicas e transmitindo a frequência. O processamento de MDF com serras circulares em altas velocidades produziram acabamento superficial pior, ao longo da borda da placa, exigindo energia de corte menor para todas as espessuras de placas.

Aguilera e Muñoz (2011) avaliaram o efeito da espessura média do cavaco na energia total de corte e rugosidade em madeiras de *Acacia melanoxylon* e *Sequoia sempervirens*. A energia e potência foram obtidas por meio da medição da tensão e corrente. O sistema de medição possuía uma amostragem a cada segundo e enviava os dados para o computador. A energia e potência de corte média teve aumento quando a espessura média dos cavacos foi maior.

Lusth, Grandin e Hellström (2012) determinaram o consumo de energia durante o corte de madeira com picador em duas velocidades de corte e diferentes ângulos de ferramenta. A energia específica foi considerada como a

energia associada ao corte de determinada área. Os autores esperavam que o consumo de energia aumentasse com o aumento do ângulo, o que não ocorreu. Os mesmos atribuem esse resultado à proporção de cavacos que não foram completamente separados formando grandes agregados sendo responsáveis pela dissipação de energia maior.

Silva (2016) estudou a requisição de potência de corte em madeiras com densidades distintas utilizando o comando numérico computacional que controlou as velocidades de avanço e de corte durante o fresamento. Os cortes foram realizados em sentidos variados em relação às fibras da madeira. Em seus resultados o autor constatou que houve aumento de consumo de potência com o aumento da velocidade de avanço e de corte e também com o aumento da densidade da madeira. Os cortes realizados perpendicular às fibras requereram maior energia específica de corte. O autor não conseguiu definir classes de densidades com representatividade e não definiu a umidade dos corpos de prova durante o processamento.

2.4 Comando Numérico Computacional

Visando a tornar os processos mecânicos mais eficientes o Comando Numérico Computacional permite programar e controlar as ações de máquinas como os movimentos nos eixos x, y e z simultaneamente (KOREN, 1976).

Por meio dos softwares de execução das ações no CNC, é possível que sejam feitos desenhos variáveis. As definições do processamento mecânico, como velocidades de avanço e de corte, espessura e profundidade do fresamento são pré-determinadas permitindo maior controle das variações do processo.

O CNC permite aumentar o volume de produção e também a precisão nas peças produzidas. O tempo de execução do corte e de realização de desenhos também diminui resultando em menor tempo de maquinação (TECNOPAMPA, 2014).

Com o uso do CNC é possível, em pesquisas científicas, estabelecer os parâmetros do processo como velocidades e profundidade, além do desenho a ser reproduzido na peça, e mantê-los sem variações. Essa função permite que ao se monitorar o processamento mecânico, todas as variações sejam atribuídas apenas a matéria-prima, como ocorre neste trabalho.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram adquiridas no mercado local de Lavras/MG três tábuas de três espécies diferentes, sendo: *Pinus* spp., *Goupia glabra* (Cupiúba) e *Dipteryx alata* (Cumaru vermelho). A seleção das espécies foi com base em classes de densidades (MELO; CORADIN; MENDES, 1992). Foram determinadas as densidades básicas do material biológico de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003) e os valores encontram-se apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de densidade básica das madeiras e sua classificação.

Espécies	Densidade básica (g.cm ⁻³)	Classificação
Pinus	0,368	Baixa
Cupiúba	0,717	Média - alta
Cumaru	0,914	Alta

Fonte: Dados do autor (2016).

3.1 Preparo dos corpos de prova

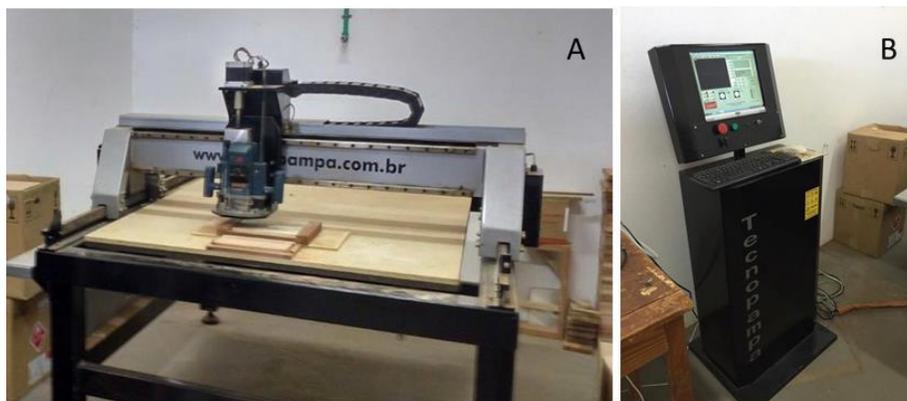
Para cada espécie, foram produzidos três corpos de prova com dimensões nominais de 30 cm x 10 cm x 1 cm, obtidos das tábuas úmidas. Esses corpos de prova foram retirados das regiões internas das tábuas, em relação aos seus três eixos. Para tanto, as tábuas foram aplainadas em suas duas faces e cortadas em suas extremidades e largura, apresentando umidade elevada e homogênea. Após sua obtenção, os corpos de prova foram armazenados para que não houvesse perda desta umidade inicial, pois os mesmos foram destinados a obtenção de dados de energia específica de corte.

3.2 Processamento mecânico em diferentes umidades

A umidade dos corpos de prova representou a fonte principal de variação para a pesquisa, fazendo necessário o controle rigoroso de sua magnitude durante cada processamento. A determinação da umidade dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003), tendo diferentes estágios de acordo com a mudança de umidade das madeiras.

Primeiramente, os corpos de prova úmidos (1º estágio de umidade) foram pesados, utilizando balança de precisão 0,01g. Após a pesagem, efetuou-se o processamento mecânico, realizado no Laboratório de Usinagem da Madeira (DCF/UFLA). Foram realizados cortes longitudinais de 20 cm de comprimento, 6 mm de largura e 3 mm de profundidade por meio de uma tupia (BOSCH, GOF 1300 CE), com potência de 1300 W. Essa tupia foi acoplada à mesa copiadora que é controlada por um CNC (TECNO PAMPA, ROUTER) que permitiu o controle das velocidades de corte e de avanço (FIGURA 4).

Figura 4 – Tupia fresadora controlada por CNC. A) conjunto mesa - tupia e B) computador controlador do CNC.



Para a execução do corte, o CNC foi programado com as velocidades de avanço e de corte, conforme indicado por Silva (2016). Assim, a energia

específica de corte pode ser analisada em função da influência apenas da umidades e da densidade básica da matéria-prima.

O desenho dos cortes efetuados nos corpos de prova teve o formato linear de 20 cm de comprimento. O CNC utiliza softwares para transformação das programações em ações da máquina. Dessa forma, a linha foi desenhada no software *MSCad LT*, que é um software de desenho livre. A seguir, o desenho foi inserido software *SheetCam* e transformado em linguagem de máquina, gerando um código específico, que foi executado pelo software *Plasma* que interpretou a linguagem e transmitiu o comando para a tupia acoplada à mesa copiadora, que executou o corte no corpo de prova.

Acoplado à tupia, utilizou-se uma fresa de 6 mm de diâmetro, velocidade de avanço de $2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, velocidade de penetração de $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (SILVA, 2016), cujo processamento periférico, assemelhou-se ao corte $90^\circ - 0^\circ$ do corte ortogonal.

Após o corte, os corpos de prova foram pesados e armazenados em diferentes umidades relativas e temperaturas, a fim de se obter diferentes umidades, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores médios de umidade determinados para as três madeiras nos diferentes estágios e nas diferentes condições de secagem

Estágios de umidade	Umidade média (%)			Condição de secagem
	Cumaru	Cupiúba	Pinus	
1º	36	71	85	Madeiras úmidas
2º	34	59	47	15 dias em ambiente aberto (Figura 5)
3º	30*	44	39	10 dias em ambiente com barreira física**
4º	26	35	29	10 dias em ambiente com barreira física**
5º	22	22	23	4 horas na estufa a 60°C
6º	17	18	15	8 horas na estufa a 60°C
7º	10	12	8	12 horas na estufa a 60°C
8º	0	0	0	24 horas na estufa 103°C

* Representam a de umidade próximas ao Ponto de Saturação das Fibras.

** A barreira física foi realizada com estrutura plástica, evitando assim a perda acelerada de umidade.

Fonte: Dados do autor (2016)

Figura 5 – Corpos de prova acondicionados em ambiente aberto, por 15 dias.



Após estabilização em cada estágio de umidade, os corpos de prova foram novamente pesados, processados de forma idêntica ao estágio inicial da madeira úmida, isto é, com as mesmas velocidades de corte e de avanço e demais controles do CNC e pesados novamente.

Na Figura 6, apresentam-se os corpos de prova de cada espécie após os processamentos em quatro primeiros estágios. Cada corte apresentado representa um estágio de umidade.

Figura 6 – Corpos de prova de Cumaru, Pinus e Cupiúba, após quatro processamentos em diferentes estágios de umidade.



Considerando o último estágio de umidade como a madeira absolutamente seca, foram calculadas as massas secas de todos os corpos de prova e relacionadas com as massas úmidas correspondentes a cada estágio de umidade e assim foi possível calcular as umidades (ABNT, 2003). As umidades calculadas para os corpos de prova em cada estágio de umidade encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de umidades das madeiras de cada espécie calculados para cada estágios de umidade.

Estágios de umidade	Umidade por madeira (%)		
	Cumaru	Cupiúba	Pinus
1º	36	71	85
2º	33	59	46
3º	30	44	39
4º	27	35	29
5º	22	22	22
6º	17	18	15
7º	10	12	8
8º	0	0	0

3.3 Determinação da energia específica de corte

A energia requerida no corte foi medida utilizando-se analisador de energia da marca FLUKE, modelo 435 (FIGURA 7). Foram conectadas duas pontas de prova. A primeira ponta foi a de tensão (600V) e a segunda ponta de corrente (20A). Elas foram adequadas para os níveis de potência das especificações da tupia.

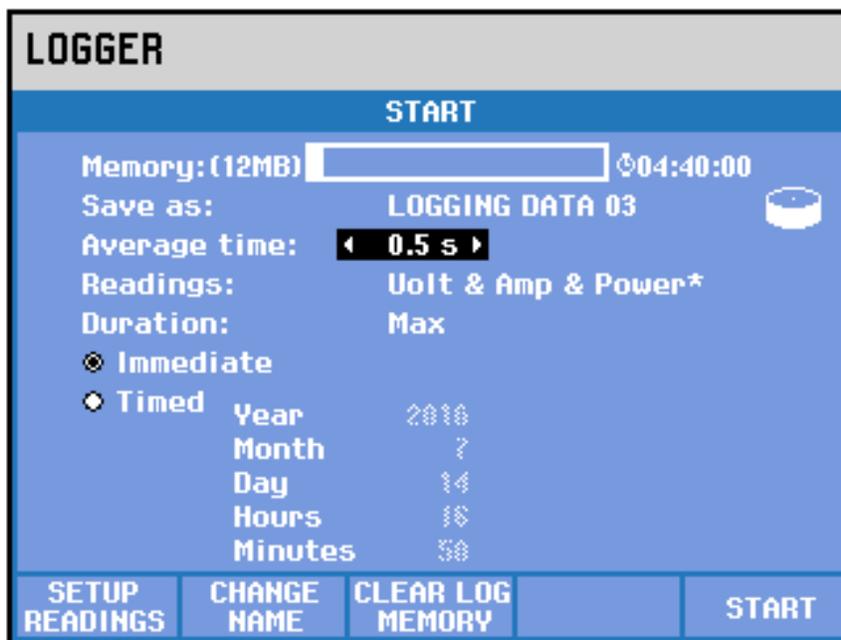
A corrente da tupia não é senoidal, mas tem harmônicas, assim, o equipamento analisador de energia é o apropriado para esse tipo de situação. O analisador de energia recebeu as informações e analisou a energia requerida pela máquina para quantificá-la.

Figura 7 – Sistema básico para a medição da energia de corte com Analisador de energia (FLUKE)



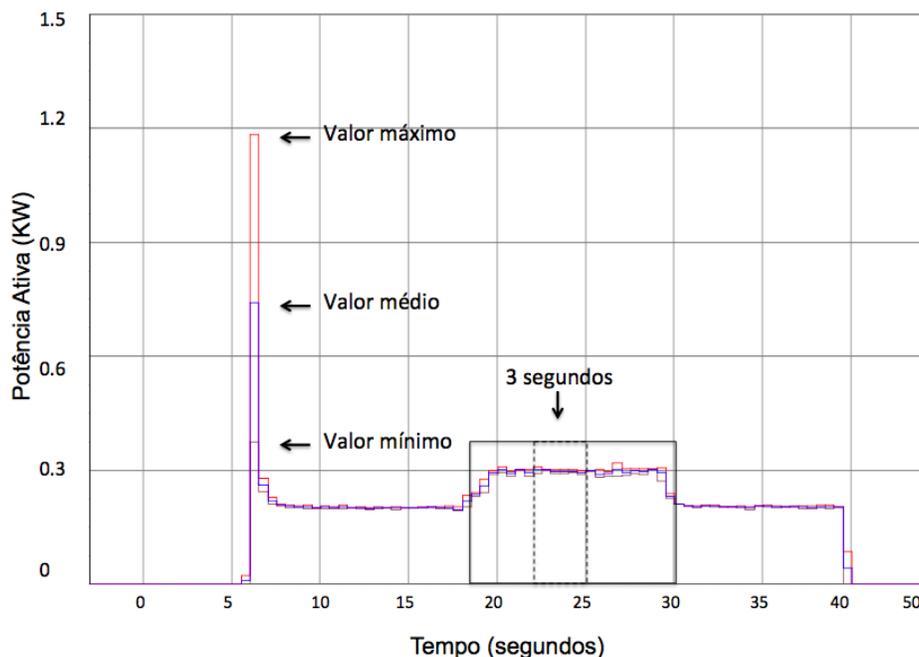
O equipamento utilizado faz a leitura de pontos de forma ininterrupta, gerando valores de potência média para o período de aquisição programado. A taxa de aquisição de dados que o FLUKE possui é de 0,0083 s, ou seja, permite a coleta de 120 dados por segundo. O modo de medição que representa o valor mínimo permitido pelo analisador ou o período em que é registrada a média dos dados coletados e gerados, foi definido em 0,5 segundos (FIGURA 8).

Figura 8 – Programação do modo de medição (0,5 s) no analisador de energia para atender às especificações para o experimento



Com o analisador de energia, foram obtidos os dados de potência ativa máxima, média e mínima (KW) requerida pela máquina, ao longo do tempo de corte, em segundo. No gráfico gerado pelo analisador, é possível observar o pico inicial que indica o momento de partida do motor. Após é mostrado o momento em que a máquina está girando a vazio. Finalmente, apresenta o trabalho da fresa processando, isto é início do corte propriamente dito (FIGURA 9).

Figura 9 – Perfil de potência, em função do tempo, gerado pelo analisador de energia, com valores de potência (máximo, médio e mínimo). Em destaque (retângulo) a energia no momento do corte da madeira



Os dados gerados pelo analisador contemplam a potência requerida a partir do momento em que a tupia foi ligada. Foi feita a triagem dos dados, de forma a utilizar apenas os valores referentes ao período de corte efetivo. Em decorrência da taxa de aquisição de dados do analisador observam-se (FIGURA 9) valores transitórios que dificultaram precisar o início e fim do corte da madeira. Para eliminar esses valores transitórios não foram considerados todos os dados no período de corte. Assim, utilizou-se apenas o intervalo de 3 segundos para obter valores da potência ativa.

A potência ativa em função do tempo de execução do trabalho corresponde a energia consumida, sendo possível relacionar com o volume de material removido ao longo do corte e obter a energia específica de corte.

Baseada na Equação 9, a energia específica de corte foi calculada pela Equação 10, em que a taxa de remoção foi desmembrada em tempo e volume.

$$ES = \frac{P * t}{Vol} \quad [10]$$

Em que:

ES = Energia específica ($J * mm^{-3}$)

P = Potência ativa (Watt)

T = Tempo (s)

Vol = Volume (mm^3)

Os valores de potência ativa (ANEXO A) e tempo de execução do corte foram obtidos pelo analisador de energia. Esse fornece um valor de potência ativa a cada 0,5 segundo. Para o cálculo da energia específica no intervalo de 3 segundos, foi considerada a média dos valores de potência ativa fornecidas pelo analisador.

O volume de material removido foi calculado com base do diâmetro da fresa, na profundidade de penetração e no comprimento do corte. Essas dimensões foram mensuradas com paquímetro digital (0,01 mm). Contudo, foi necessário ajustar o volume removido para o tempo de 3 segundos de corte.

3.4 Análise dos dados

Foi realizada a estatística descritiva dos valores de energia específica de corte obtidos nos 8 estágios de umidade. Foram confrontados os valores de energia de corte requerida com as 3 classes de densidade básica, representadas pelas três madeiras distintas e nos diferentes estágios de umidade.

O perfil da energia específica de corte em função do tempo foi analisado graficamente. O valor médio de energia específica de corte para cada tratamento foi correlacionado com os valores de densidade e de umidade para cada espécie.

A análise de variância, correlações de Pearson e regressões lineares foram determinadas por meio do software estatístico SPSS v. 20.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados gerais de potência ativa média requerida, para todas as espécies nas diferentes umidades, obtidos com o analisador de energia (Fluke), estão apresentados no Anexo A. A madeira que requereu maior quantidade de energia específica de corte foi o Cumaru (623 KJ.cm^{-3}), que representou também a maior densidade básica e, conseqüentemente, menores umidades. O valor médio de energia para todas as madeiras processadas foi de 404 KJ.cm^{-3} . O mínimo valor de energia requerida ao corte foi observado para a madeira Cupiúba (205 KJ.cm^{-3}), com a umidade de 75%.

A análise geral dos dados da energia específica requerida para cada madeira apresentou forte relação com a variação da umidade, em que o aumento da umidade requereu menores valores de energia. Na Tabela 7, podem ser observados os valores.

Tabela 7 - Máximos, mínimos, médias e desvio padrão dos valores de energia específica de corte requeridos para cada madeira, nas diferentes umidades

Madeira	Energia específica de corte (KJ.cm^{-3})			
	Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão
Pinus	513	374	272	81,33
Cupiúba	567	395	205	75,42
Cumaru	623	442	290	85,20
Geral	623	404	205	80,22

Fonte: Dados do autor (2016)

Para a madeira de Cumaru, o menor valor médio de energia específica de corte requerida foi de 299 KJ.cm^{-3} , a 36% de umidade. O maior valor médio de requisição de energia foi de 570 KJ.cm^{-3} para 0% de umidade. O valor de

energia próximo ao Ponto de Saturação das Fibras (30%), foi de 416 KJ.cm^{-3} . A maior variação de energia específica ocorreu do estágio 2º para o 3º (12,28%) que representou um aumento de 70 KJ.cm^{-3} . A análise dos valores médios de energia específica de corte nos diferentes estágios de umidade para a madeira de Cumaru encontra-se na Tabela 8. Também podem ser observadas as variações absolutas e percentuais da energia específica entre estágios sucessivos.

Tabela 8 - Valores de umidade média, energia específica média, variação de energia específica absoluta e percentual, em cada estágio de umidade para a madeira de Cumaru

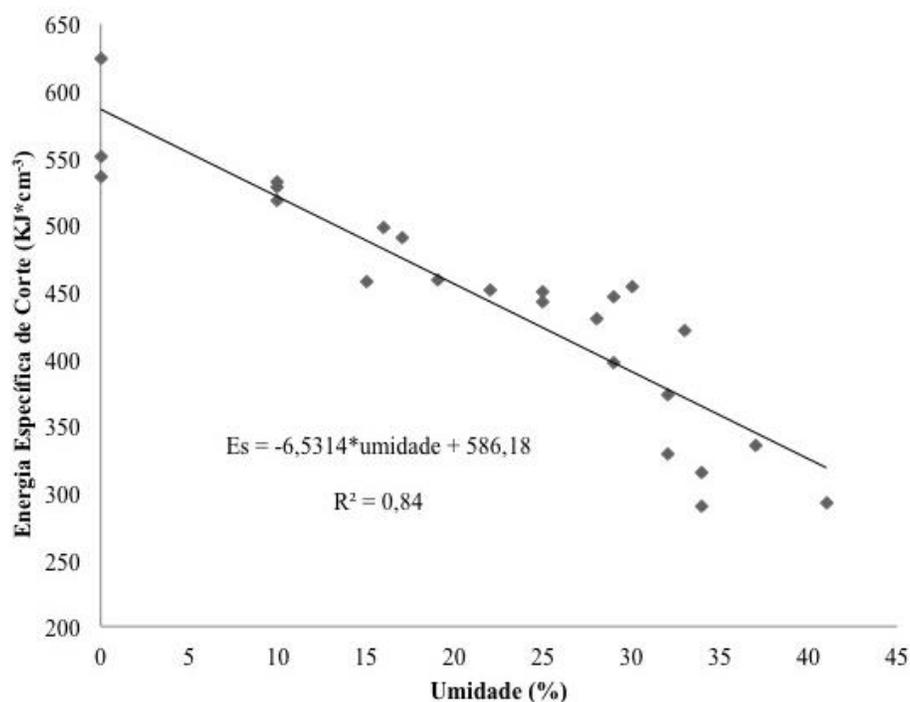
Estágios de umidade	Umidade (%)	Energia Específica de Corte média (KJ.cm^{-3})	Variação da energia específica	
			KJ.cm^{-3}	(%)
1º	36	299		
2º	34	346	47	8,25
3º	30	416	70	12,28
4º	25	446	30	5,26
5º	22	455	9	1,58
6º	17	482	27	4,74
7º	10	526	44	7,72
8º	0	570	44	7,72

Fonte: Dados do autor (2016)

A partir dos valores de requisição de energia para as diferentes umidades, foi calculada a equação da reta para a madeira de Cumaru. A equação pode ser utilizada para estimar possíveis valores de requisição de energia para diferentes umidades de interesse. A correlação entre a umidade e a energia para o Cumaru foi negativa, ou seja, apresentou tendência inversamente proporcional. O coeficiente de determinação (R^2) da regressão, obtida com os dados, foi alto. Sendo a umidade a variável que explica o aumento do consumo de energia

específica durante o corte, conforme ocorre a secagem da madeira. A madeira do Cumaru possui alta densidade, indicando maior consumo de energia ao se realizar o corte (FIGURA 10).

Figura 10 – Correlação entre valores de Energia Específica de Corte e a umidade com a linha de tendência e a equação da reta para a madeira de Cumaru.



Fonte: Dados do autor (2016)

O menor valor médio de energia específica de corte para a madeira de Cupuíba foi de e 262 KJ.cm⁻³ a 71% de umidade. O maior valor de requisição de energia foi de 513 KJ.cm⁻³ para 0% de umidade. Próximo ao PSF o valor médio de requisição de energia específica de corte foi de 397 KJ.cm⁻³. O maior aumento em energia específica foi de 67 KJ.cm⁻³ (13%) e ocorreu para a diferença de 12% de umidade (TABELA 9).

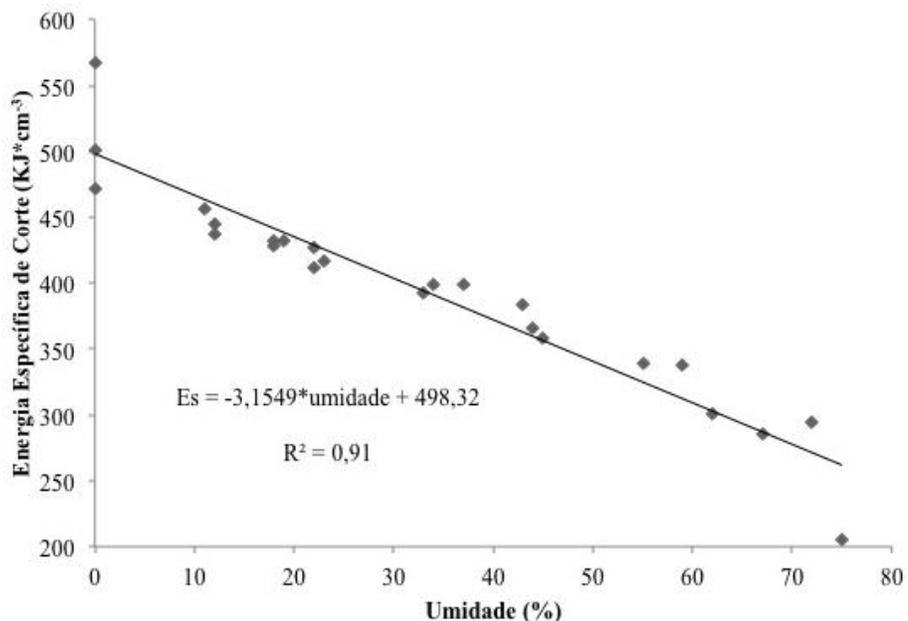
Tabela 9 – Valores de umidade média, energia específica média, variação de energia específica absoluta e percentual, em cada estágio de umidade para a madeira de Cupiúba

Estágios de umidade	Umidade (%)	Energia Específica de Corte média (KJ.cm ⁻³)	Variação da energia específica	
			KJ.cm ⁻³	(%)
1º	71	262		
2º	59	326	64	12,48
3º	44	369	43	8,38
4º	35	397	28	5,46
5º	22	419	22	4,29
6º	18	431	12	2,34
7º	12	446	15	2,92
8º	0	513	67	13,06

Fonte: Dados do autor (2016)

Na Figura 11, apresenta-se o gráfico com a reta gerada à partir da correlação entre os valores de energia específica com as diferentes umidades. O coeficiente de determinação para a equação da madeira de Cupiúba foi alto (0,9), isso ocorre por terem sido contempladas umidades regulares, permitindo uma melhor análise do comportamento em relação as variáveis.

Figura 11 – Correlação entre valores de Energia Específica de Corte e a umidade com a linha de tendência e a equação da reta para a madeira de Cupiúba



Fonte: Dados do autor (2016)

A menor requisição média de energia específica de corte foi de 292 KJ.cm⁻³ para a madeira de Pinus com 85% de umidade. O maior valor médio de requisição de energia foi de 497 KJ.cm⁻³ para 0% de umidade. Em umidade próxima ao PSF (29%) a energia requerida foi de 359 KJ.cm⁻³. O maior aumento de energia de corte foi de 54 KJ.cm⁻³ (11%) para a diferença de 8% na umidade (TABELA 10).

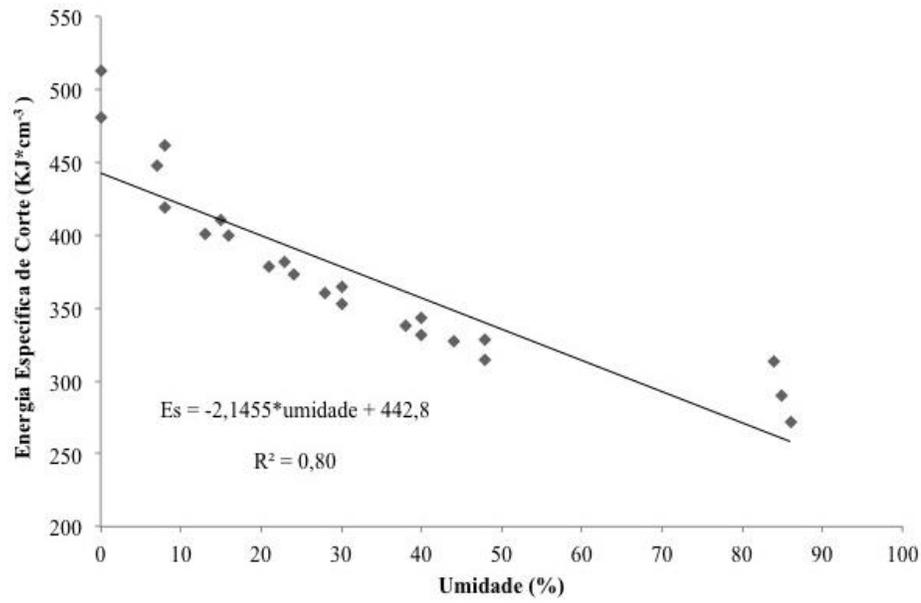
Tabela 10 – Valores de umidade média, energia específica média, variação de energia específica absoluta e percentual, em cada estágio de umidade para a madeira de Pinus.

Estágios de umidade	Umidade (%)	Energia Específica de Corte média (KJ.cm ⁻³)	Variação da energia específica	
			KJ.cm ⁻³	(%)
1º	85	292		
2º	47	323	31	6,24
3º	39	338	15	3,02
4º	29	359	21	4,23
5º	23	378	19	3,82
6º	15	404	26	5,23
7º	8	443	39	7,85
8º	0	497	54	10,87

Fonte: Dados do autor (2016)

O Pinus foi a madeira que apresentou menor coeficiente de determinação e também é a madeira com menor densidade, ainda assim o valor de R^2 foi satisfatório (0,80) indicando que existe relação negativa entre as variáveis analisadas. Na distribuição geral dos valores, observou-se que ocorreu um intervalo de umidade que não apresentou dados. Isso se deve à secagem rápida que ocorreu na madeira de Pinus para os primeiros estágios de secagem (FIGURA 12).

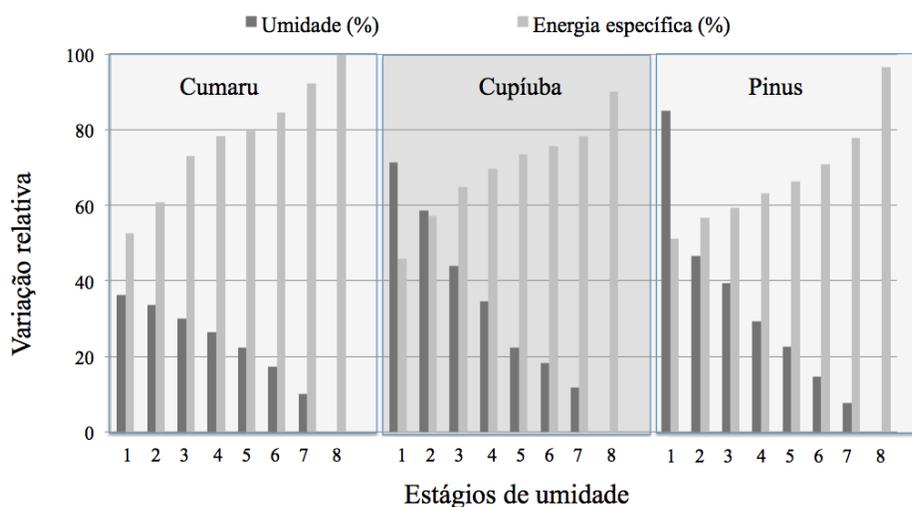
Figura 12 – Correlação entre valores de energia específica de corte e a umidade com a linha de tendência e a equação da reta para a madeira de Pinus.



Fonte: Dados do autor (2016)

Considerando a energia específica de corte e a umidade em percentual é possível observar a tendência inversamente proporcional que apresentou a variável resposta energia específica em relação à umidade (FIGURA 13).

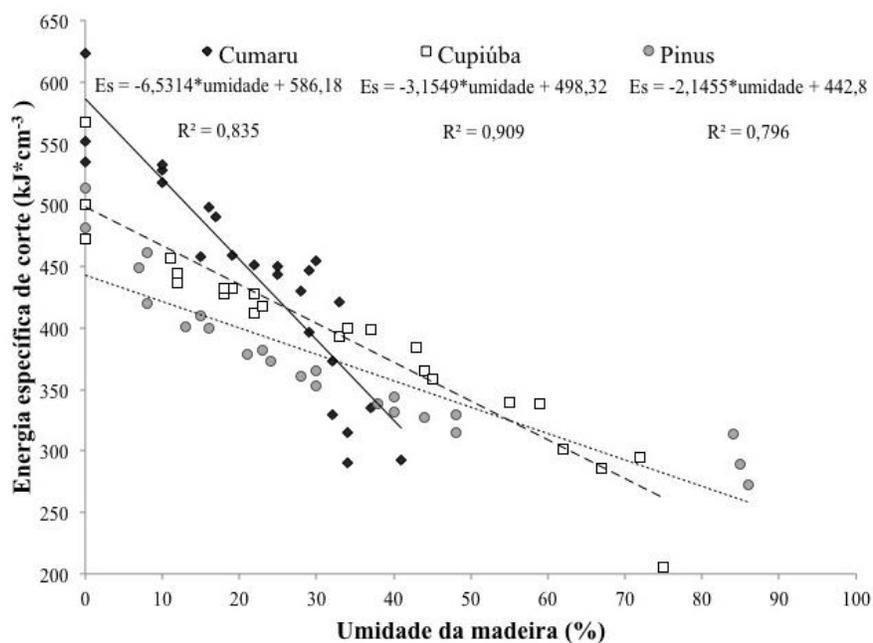
Figura 13 – Variação relativa das variáveis umidade e energia específica ao longo dos estágios de umidade em que foram realizados o processamento mecânico (1 ao 8 estágios de umidade).



Fonte: Dados do autor (2016)

Observando as retas geradas com os valores de energia específica de corte nas diferentes umidades para as três madeiras, pode-se notar comportamento diferente entre as madeiras. A madeira de Cumaru, apresentou maior inclinação da reta, ou seja, uma pequena variação da umidade tem grande acréscimo no consumo de energia específica de corte. O efeito da umidade para o Cumaru torna-se menor, sendo esta a madeira de alta densidade. O Pinus, madeira com baixa densidade, teve a menor inclinação da reta, dessa forma, variações sutis na umidade interferem de forma mais intensa na requisição de energia específica. Sendo o efeito da umidade maior. A madeira de Cupiúba teve inclinação da reta intermediária comparada com as outras (FIGURA 14).

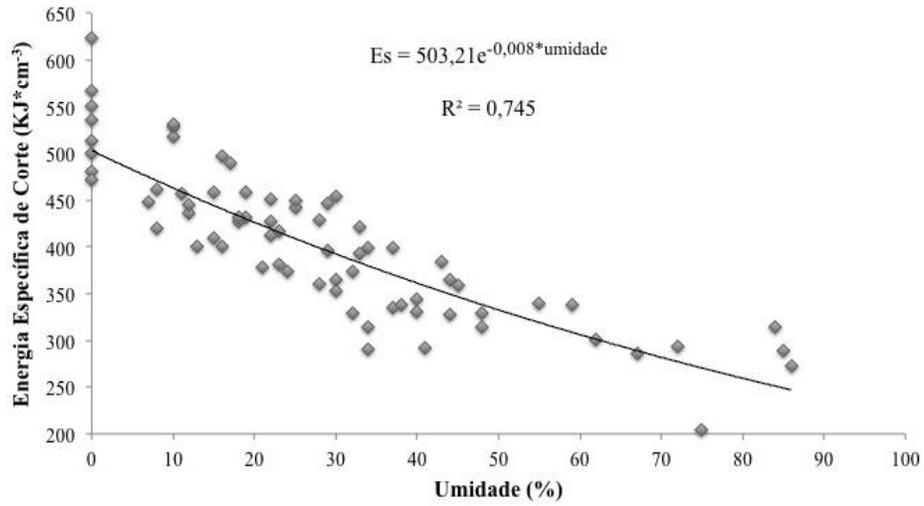
Figura 14 – Correlação entre energia requerida e a variação de umidade para as três madeiras



Fonte: Dados do autor (2016)

A densidade foi fator determinante para as taxas de consumo. A madeira com maior densidade, Cumaru, requereu maior média e a de menor densidade, Pinus, requereu menor média. Porém, de forma conjunta, a tendência de consumo da energia específica apresentou o mesmo comportamento para as madeiras considerando a distribuição dos valores de energia requeridos ao longo das diferentes umidades, com comportamento exponencial os valores em conjunto geraram um valor alto de coeficiente de determinação (0,75) como apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Correlação entre energia requerida e a variação de umidade para as três madeiras em conjunto



5 CONCLUSÃO

Com este trabalho foi possível concluir que existe comportamento de relação negativa entre a umidade e o consumo de energia específica de corte. Com isso, foi possível gerar equações das retas para as três madeiras, sendo assim, possível estimar valores de energia específica de corte para umidades de interesse.

Os maiores valores médios de energia requerida foram de 570, 513 e 497 KJ.cm^{-3} para as madeiras de Cumaru, de Cupiúba e de Pinus, respectivamente, todos a 0% de umidade. Os valores de energia próximos ao Ponto de Saturação das Fibras foram de 416, 397 e 359 KJ.cm^{-3} para Cumaru, Cupiúba e Pinus, respectivamente.

A madeira de Cumaru teve acréscimo de 70 KJ.cm^{-3} (12%) para queda de 4% na umidade. A Cupiúba teve acréscimo de 67 KJ.cm^{-3} (13%) para queda de 12% na umidade. A madeira de Pinus teve acréscimo 54 KJ.cm^{-3} (11%) para queda de 8% na umidade.

O uso do analisador de energia permitiu o cálculo da energia específica de corte de forma eficaz, sendo seu uso indicado para trabalhos futuros sobre energia específica de corte. Os erros atribuídos à taxa de aquisição, em decorrência dos valores transitórios das medições dos dados, não interferiram na análise de comportamento entre as variáveis de interesse.

A metodologia trabalhada permitiu acompanhar diferentes umidades e correlacioná-las à energia de corte. No entanto, sugere-se estabelecer intervalos de variação das umidades mais homogêneos, para permitir conhecer melhor a relação desses fatores.

REFERÊNCIAS

AGUILERA, A. Cutting energy surfasse roughness in médium density fiber board rip sawing. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 69, n. 1, p. 11-18, Feb. 2011.

AGUILERA, A.; MUÑOZ, H. Rugosidad superficial y potencia de corte enelcepillado de *Acacia Melanoxylon* y *Sequoia Sempervirens*. **Ciencia y Tecnologia**, Concepción, v. 13, n. 1, p. 19-28, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDUSTRIAS DO MOBILIÁRIO – ABIMÓVEL. Disponível em: <www.abimovel.com>. Acesso em: janeiro de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

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

BROWN, H. P.; PANSIN, A. J.; FORSAITH, C. C. **Textbook of wood technology**. New York: MCGraw-Hill, 1952. 783 p.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, New York, v. 46, n. 3, p. 313-332, 2006.

FLUKE CORPORATE. **Keeping your word upan drunning**. Holanda: [s.n.], 2000. Disponível em: <www.fluke.com>. Acesso em: 15 nov. 2015.

GONTIJO, G. T. **Energia específica em cortes transversais em madeiras de Eucalyptus sp.** 2012. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

GRUPO WEG. **Especificação de motores elétricos**. Jaraguá do Sul: [s.n.], 2013. Disponível em: <www.weg.com>. Acesso em: 15 nov. 2015.

INTELIGÊNCIA DE MERCADO – **IEMI**. Disponível em: <www.iemi.com.br>. Acesso em: 15 fev. 2015.

KOREN, Y. Interpolar for a computer numerical control system. **IEEE Transactions on Computers**, New York, v. 25, n. 1, p. 32-37, Jan. 1976.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 1998. 174 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

LUCAS FILHO, F. C.; BOEHS, L. Usinagem da madeira na indústria de móveis. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 108, out. 2007. Disponível em: <http://www.remade.com.br/revistadamadeira_materia.php?num=1162&subject=Usinagem&title=Usinagem>. Acesso em: 15 mar. 2015.

LUSTH, H.; GRANDIN, P.; HELLSTRÖM, L. The dependency of energy consumption on cutting angles in the canter chipping process. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, Sundsvall, v. 27, n. 5, p. 886-889, Dec. 2012.

MALKOÇOĞLU, A.; ÖZDEMİR, T. The machining properties of some hardwoods and softwoods naturally grown in Eastern black sea region of turkey. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 173, n. 3, p. 315-320, Apr. 2005.

MELO, J. E.; CORADIN, V. T. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. **Silvicultura**, São Paulo, v. 12, n. 42, p. 695-699, 1992.

MELO, L. E. L. **Influência da estrutura anatômica no consumo de energia específica de corte da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia***. 2013. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

OLIVEIRA, S. T. J.; HELLMEISTER, C. J.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, jan./fev. 2005.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. de. **Textbook of wood technology**. 4. ed. New York: CRC Press, 1980. 722 p.

RIGATTI, A. M. Y. **Avaliação da força de usinagem e energia específica de corte no fresamento com alta velocidade de corte.** 2010. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

SALMON, S. C. **Fundamentals of grinding. Modern grinding process technology.** New York: McGraw-Hill, 1992. 225 p.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Qualidade de energia harmônica.** 5. ed. Schneider: [s.n.], 2003. 19 p.

SILVA, C. J.; CASTRO, R. V.; EVANGELISTA, V. W. Influência da idade na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maides, visando uso na indústria moveleira. **Scientias Florestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 117-125, mar. 2015.

SILVA, E. M. **Fresamento com comando numérico computadorizado em madeiras de *Corymbia* e de *Eucalyptus*:** análise do consumo de energia. 2016. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

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

SKAAR, C. **Wood-water relations.** Berlim: Springer Verlang, 1988. 292 p.

SOUZA, M. E. et al. Specific cutting energy consumption in a circular saw for *Eucalyptus satands* VM01 and MN463. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 109-115, jan./mar. 2011.

TECNOPAMPA. Indústria de máquinas Ltda 2014. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <www.tecnopampa.com.br>. Acesso em: 15 nov. 2015.

**ANEXO A - DADOS DE POTÊNCIA ATIVA PARA CADA ESTÁGIO DE
UMIDADE E PARA CADA MADEIRA**

Tabela A1 – Valores de potência ativa obtidos para a madeira de Pinus durante os oito estágios de umidade

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
1° estágio de umidade			
1	229.778	2,42	3
	229.778	2,42	3
	236.406	2,42	3
	231.987	2,42	3
	240.825	2,42	3
	234.197	2,42	3
2	248.000	2,71	3
	247.333	2,71	3
	243.333	2,71	3
	247.333	2,71	3
	245.333	2,71	3
	245.333	2,71	3
3	227.568	2,18	3
	227.568	2,18	3
	229.778	2,18	3
	227.568	2,18	3
	227.568	2,18	3
	229.778	2,18	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
2° estágio de umidade			
1	257.333	2,49	3
	260.000	2,49	3
	262.000	2,49	3
	262.000	2,49	3
	262.667	2,49	3
	262.000	2,49	3
2	231.987	2,15	3
	229.778	2,15	3
	229.778	2,15	3
	234.197	2,15	3
	238.615	2,15	3
	240.825	2,15	3
3	269.547	2,52	3
	273.966	2,52	3
	271.756	2,52	3
	282.803	2,52	3
	276.175	2,52	3
	282.803	2,52	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
3° estágio de umidade			
1	247.453	2,23	3
	249.662	2,23	3
	247.453	2,23	3
	245.244	2,23	3
	249.662	2,23	3
	238.615	2,23	3
2	233.250	2,06	3
	233.250	2,06	3
	230.940	2,06	3
	228.631	2,06	3
	233.250	2,06	3
	235.559	2,06	3
3	256.667	2,27	3
	266.667	2,27	3
	260.000	2,27	3
	258.000	2,27	3
	261.333	2,27	3
	260.000	2,27	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
4º estágio de umidade			
1	249.662	2,01	3
	240.825	2,01	3
	229.778	2,01	3
	225.359	2,01	3
	227.568	2,01	3
	243.034	2,01	3
2	268.667	2,32	3
	276.667	2,32	3
	280.667	2,32	3
	276.667	2,32	3
	283.333	2,32	3
	284.000	2,32	3
3	254.081	2,06	3
	249.662	2,06	3
	245.244	2,06	3
	247.453	2,06	3
	249.662	2,06	3
	256.291	2,06	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
5° estágio de umidade			
1	269.547	2,04	3
	265.128	2,04	3
	260.709	2,04	3
	254.081	2,04	3
	238.615	2,04	3
	238.615	2,04	3
2	270.667	2,13	3
	266.000	2,13	3
	268.000	2,13	3
	270.667	2,13	3
	270.000	2,13	3
	268.000	2,13	3
3	297.913	2,25	3
	295.603	2,25	3
	288.675	2,25	3
	279.438	2,25	3
	277.128	2,25	3
	279.438	2,25	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
6° estágio de umidade			
1	267.338	2,00	3
	267.338	2,00	3
	265.128	2,00	3
	265.128	2,00	3
	269.547	2,00	3
	265.128	2,00	3
2	229.778	1,71	3
	227.568	1,71	3
	231.987	1,71	3
	227.568	1,71	3
	227.568	1,71	3
	229.778	1,71	3
3	249.662	1,89	3
	254.081	1,89	3
	256.291	1,89	3
	258.500	1,89	3
	262.919	1,89	3
	267.338	1,89	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
7° estágio de umidade			
1	276.667	1,95	3
	272.000	1,95	3
	270.000	1,95	3
	270.000	1,95	3
	272.000	1,95	3
	274.667	1,95	3
2	262.000	1,77	3
	264.667	1,77	3
	266.000	1,77	3
	263.333	1,77	3
	265.333	1,77	3
	264.000	1,77	3
3	250.000	1,67	3
	250.667	1,67	3
	258.667	1,67	3
	255.333	1,67	3
	260.667	1,67	3
	261.333	1,67	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
8° estágio de umidade			
1	265.333	1,65	3
	260.000	1,65	3
	264.000	1,65	3
	267.333	1,65	3
	263.333	1,65	3
	266.667	1,65	3
2	267.333	1,56	3
	268.667	1,56	3
	268.000	1,56	3
	264.000	1,56	3
	266.667	1,56	3
	264.000	1,56	3
3	282.803	1,31	3
	280.594	1,31	3
	289.432	1,31	3
	291.641	1,31	3
	289.432	1,31	3
	285.013	1,31	3

Continua...

Tabela A2 – Valores de potência ativa obtidos para a madeira de Cupuíba durante oito estágios de umidade

Corpo de prova	Potência Ativa Total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (seg)
1° estágio de umidade			
1	280.667	2,86	3
	277.333	2,86	3
	281.333	2,86	3
	278.000	2,86	3
	284.667	2,86	3
	283.333	2,86	3
2	196.000	2,88	3
	195.333	2,88	3
	196.000	2,88	3
	198.000	2,88	3
	196.667	2,88	3
	197.333	2,88	3
3	271.756	2,89	3
	276.175	2,89	3
	271.756	2,89	3
	271.756	2,89	3
	278.385	2,89	3
	278.385	2,89	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
2° estágio de umidade			
1	251.333	2,26	3
	255.333	2,26	3
	252.000	2,26	3
	252.000	2,26	3
	255.333	2,26	3
	261.333	2,26	3
2	277.128	2,77	3
	279.438	2,77	3
	279.438	2,77	3
	274.819	2,77	3
	277.128	2,77	3
	279.438	2,77	3
3	271.756	2,44	3
	276.175	2,44	3
	278.385	2,44	3
	276.175	2,44	3
	276.175	2,44	3
	276.175	2,44	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
3° estágio de umidade			
1	251.872	2,09	3
	251.872	2,09	3
	251.872	2,09	3
	251.872	2,09	3
	260.709	2,09	3
	256.291	2,09	3
2	282.803	2,37	3
	287.222	2,37	3
	285.013	2,37	3
	278.385	2,37	3
	285.013	2,37	3
	282.803	2,37	3
3	250.000	1,99	3
	251.333	1,99	3
	254.000	1,99	3
	254.667	1,99	3
	257.333	1,99	3
	259.333	1,99	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
4º estágio de umidade			
1	265.128	2,04	3
	269.547	2,04	3
	262.919	2,04	3
	265.128	2,04	3
	267.338	2,04	3
	271.756	2,04	3
2	274.819	2,07	3
	274.819	2,07	3
	277.128	2,07	3
	274.819	2,07	3
	279.438	2,07	3
	272.509	2,07	3
3	237.868	1,79	3
	237.868	1,79	3
	230.940	1,79	3
	240.178	1,79	3
	242.487	1,79	3
	240.178	1,79	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
5° estágio de umidade			
1	253.333	1,84	3
	254.000	1,84	3
	250.000	1,84	3
	248.667	1,84	3
	254.000	1,84	3
	256.667	1,84	3
2	248.667	1,82	3
	254.667	1,82	3
	252.000	1,82	3
	254.667	1,82	3
	255.333	1,82	3
	254.000	1,82	3
3	265.128	1,87	3
	265.128	1,87	3
	265.128	1,87	3
	267.338	1,87	3
	269.547	1,87	3
	265.128	1,87	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
6° estágio de umidade			
1	276.175	1,94	3
	276.175	1,94	3
	276.175	1,94	3
	278.385	1,94	3
	276.175	1,94	3
	280.594	1,94	3
2	278.000	1,92	3
	276.667	1,92	3
	280.667	1,92	3
	274.667	1,92	3
	272.667	1,92	3
	274.000	1,92	3
3	280.594	1,96	3
	278.385	1,96	3
	282.803	1,96	3
	282.803	1,96	3
	287.222	1,96	3
	282.803	1,96	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
7° estágio de umidade			
1	278.000	1,91	3
	274.667	1,91	3
	278.667	1,91	3
	278.000	1,91	3
	280.667	1,91	3
	280.667	1,91	3
2	285.013	1,92	3
	285.013	1,92	3
	287.222	1,92	3
	287.222	1,92	3
	282.803	1,92	3
	278.385	1,92	3
3	285.013	1,85	3
	280.594	1,85	3
	280.594	1,85	3
	282.803	1,85	3
	280.594	1,85	3
	280.594	1,85	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
8° estágio de umidade			
1	269.547	1,73	3
	271.756	1,73	3
	276.175	1,73	3
	271.756	1,73	3
	271.756	1,73	3
	276.175	1,73	3
2	282.803	1,71	3
	287.222	1,71	3
	282.803	1,71	3
	285.013	1,71	3
	287.222	1,71	3
	285.013	1,71	3
3	264.000	1,41	3
	264.667	1,41	3
	267.333	1,41	3
	266.667	1,41	3
	269.333	1,41	3
	266.667	1,41	3

Continua...

Tabela A3 – Valores de potência ativa obtidos para a madeira de Cumaru durante oito estágios de umidade

Corpo de prova	Potência Ativa Total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (seg)
1° estágio de umidade			
1	287.222	2,94	3
	287.222	2,94	3
	282.803	2,94	3
	291.641	2,94	3
	280.594	2,94	3
	276.175	2,94	3
2	288.667	2,96	3
	284.000	2,96	3
	289.333	2,96	3
	290.000	2,96	3
	287.333	2,96	3
	289.333	2,96	3
3	284.667	2,77	3
	286.667	2,77	3
	294.667	2,77	3
	295.333	2,77	3
	290.000	2,77	3
	294.667	2,77	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
2º estágio de umidade			
1	288.667	2,65	3
	288.000	2,65	3
	289.000	2,65	3
	288.000	2,65	3
	298.333	2,65	3
	288.667	2,65	3
2	293.850	2,64	3
	293.850	2,64	3
	296.060	2,64	3
	291.641	2,64	3
	298.269	2,64	3
	296.060	2,64	3
3	284.056	2,31	3
	284.056	2,31	3
	284.056	2,31	3
	288.675	2,31	3
	290.985	2,31	3
	290.985	2,31	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
3° estágio de umidade			
1	302.688	2,26	3
	300.479	2,26	3
	296.060	2,26	3
	296.060	2,26	3
	298.269	2,26	3
	300.479	2,26	3
2	285.000	2,05	3
	289.333	2,05	3
	287.600	2,05	3
	287.333	2,05	3
	289.533	2,05	3
	289.333	2,05	3
3	302.688	2,12	3
	304.897	2,12	3
	309.316	2,12	3
	304.897	2,12	3
	300.479	2,12	3
	300.479	2,12	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
4º estágio de umidade			
1	302.688	2,05	3
	298.269	2,05	3
	298.269	2,05	3
	309.316	2,05	3
	302.688	2,05	3
	307.107	2,05	3
2	276.667	1,87	3
	277.333	1,87	3
	276.667	1,87	3
	274.000	1,87	3
	280.667	1,87	3
	280.000	1,87	3
3	302.688	2,02	3
	300.479	2,02	3
	304.897	2,02	3
	300.479	2,02	3
	300.479	2,02	3
	304.897	2,02	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
5° estágio de umidade			
1	298.269	2,01	3
	302.688	2,01	3
	300.479	2,01	3
	302.688	2,01	3
	302.688	2,01	3
	307.107	2,01	3
2	307.107	2,06	3
	309.316	2,06	3
	307.107	2,06	3
	313.735	2,06	3
	315.944	2,06	3
	320.363	2,06	3
3	295.603	1,97	3
	290.985	1,97	3
	300.222	1,97	3
	297.913	1,97	3
	304.841	1,97	3
	311.769	1,97	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
6° estágio de umidade			
1	298.667	1,95	3
	299.333	1,95	3
	298.000	1,95	3
	300.667	1,95	3
	295.333	1,95	3
	298.000	1,95	3
2	320.667	1,98	3
	324.000	1,98	3
	328.000	1,98	3
	328.667	1,98	3
	326.667	1,98	3
	311.333	1,98	3
3	276.667	1,70	3
	281.333	1,70	3
	282.667	1,70	3
	282.667	1,70	3
	283.333	1,70	3
	282.000	1,70	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
7º estágio de umidade			
1	318.154	1,88	3
	326.991	1,88	3
	331.410	1,88	3
	322.573	1,88	3
	320.363	1,88	3
	322.573	1,88	3
2	279.438	1,58	3
	279.438	1,58	3
	277.128	1,58	3
	277.128	1,58	3
	272.509	1,58	3
	281.747	1,58	3
3	291.641	1,65	3
	293.850	1,65	3
	291.641	1,65	3
	298.269	1,65	3
	291.641	1,65	3
	293.850	1,65	3

Continua...

Continuação....

Corpo de prova	Potência ativa total média (KW)	Volume de material removido (mm ³)	Tempo de corte (s)
8° estágio de umidade			
1	338.038	1,84	3
	333.620	1,84	3
	329.201	1,84	3
	320.363	1,84	3
	326.991	1,84	3
	324.782	1,84	3
2	300.479	1,63	3
	300.479	1,63	3
	302.688	1,63	3
	300.479	1,63	3
	298.269	1,63	3
	296.060	1,63	3
3	274.667	1,34	3
	274.000	1,34	3
	277.333	1,34	3
	285.333	1,34	3
	284.667	1,34	3
	278.000	1,34	3