



PEDRO PAULO DE CARVALHO BRAGA

**QUALIDADE NA USINAGEM E NO
ACABAMENTO DA MADEIRA DE *Coffea arabica***

**LAVRAS – MG
2011**

PEDRO PAULO DE CARVALHO BRAGA

**QUALIDADE NA USINAGEM E NO ACABAMENTO DA MADEIRA DE
*Coffea arabica***

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

Orientador

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva

Co-orientador

Prof. Ph.D José Tarcísio Lima

**LAVRAS - MG
2011**

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

Braga, Pedro Paulo de Carvalho.

Qualidade na usinagem e no acabamento da madeira de *Coffea arabica* / Pedro Paulo de Carvalho Braga. – Lavras : UFLA, 2011.
88 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.
Orientador: José Reinaldo Moreira da Silva.
Bibliografia.

1. Usinagem da madeira. 2. Qualidade da superfície usinada. 3.
Madeira de *Coffea arabica*. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

CDD – 674.2

PEDRO PAULO DE CARVALHO BRAGA

**QUALIDADE NA USINAGEM E NO ACABAMENTO DA MADEIRA DE
*Coffea arabica***

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 22 de março de 2011.

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo UFLA

Prof. Dr. Antônio Carlos Néri UFLA

Prof. Ph.D José Tarcísio Lima UFLA

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva
UFLA
Orientador

**LAVRAS - MG
2011**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por iluminar meu caminho e me ajudar a superar mais esse obstáculo.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsas e recursos financeiros, que permitiram o desenvolvimento desse projeto.

Agradeço a minha mãe Lea, aos meus irmãos Renata e Hugo, meu sobrinho Gustavo, meu pai Julio e ao meu cunhado Bruno, pelo amor e carinho. Tenham a certeza que essa vitória é de vocês também.

Agradeço aos meus avôs Sebastião (Tosinho) e Tereza pelo exemplo de vida que me deram. Agradeço a todos os tios e tias, primos e primas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse sonho.

Agradeço a minha namorada Ana Clara (surfista do lago paranoa) pelo amor e compreensão que teve comigo nesse período de mestrado. Tenha a certeza que amo muito você e sem a sua presença certamente essa conquista não teria o mesmo sabor.

Agradeço as minhas madrinhas Isabel e Lucinda pela colaboração e dedicação que tiveram comigo desde sempre. Amo muito as senhoras!

Agradeço ao professor e amigo José Reinaldo Moreira da Silva pela oportunidade de desenvolver esse projeto, paciência e ensinamentos.

Agradeço aos professores Paulo Fernando Trugilho, José Tarcísio Lima, Fabio Akira Mori, Lourival Marin Mendes, Giovanni Francisco Rabelo e Antônio Carlos Neri pela amizade e ensinamentos transmitidos durante o mestrado.

Agradeço a todos os colegas do grupo Ciência e Tecnologia da Madeira em especial Alan, Alessandra, Natália, Tati, Thiago, Alexandre (careca), Xisto,

Lina, Tomé, Renilson, Edson, Thiago (Boleta), Cláudia, Andreia e Simone pela colaboração e amizade. Foi muito bom esse período que passei com vocês.

Agradeço ao Senhor João Caixeta por disponibilizar as madeiras do cafeeiro.

Agradeço aos alunos de Iniciação científica Joyce, Mariana, Carol e Breno pelo apoio durante a etapa de coleta de dados e pela amizade.

Agradeço aos laboratoristas e funcionários do Departamento de Ciências Florestais em especial ao Hernani, Carlos, Claret, Meire, Cris e Chica.

E a todos, que, de alguma forma contribuíram para a conclusão de mais uma etapa na minha vida acadêmica, agradeço!

RESUMO

A madeira de *Coffea arabica* L. é um resíduo da indústria cafeeira, largamente utilizado como fonte de energia. Poucos trabalhos têm mostrado outros destinos como a fabricação de pequenos objetos e móveis com *design* rústico. Assim, o objetivo desse trabalho foi encontrar o melhor ajuste de velocidade de corte em serra circular e plaina desempenadeira durante a usinagem da madeira de *Coffea arabica*, levando-se em consideração a qualidade da superfície usinada e otimização da potência requerida ao corte. Avaliou-se também a qualidade do revestimento de dois tipos de vernizes, poliuretânico e nitrocelulósico, aplicados sobre a superfície dessa madeira. A madeira de *Coffea arabica* foi proveniente da renovação de um plantio de 15 anos, espaçamento 3 x 2 m, localizado no município de Machado, sul do estado de Minas Gerais. O cafeeiro foi desganhado, desdobrado, aplainado e cortado obtendo “corpos de prova” de 30 mm de espessura, comprimento e largura variáveis. A partir daí foram realizados os ensaios de usinagem no Laboratório de Usinagem da Madeira (DCF-UFLA) utilizando a serra circular e plaina desempenadeira variando-se rotação, diâmetro da ferramenta de corte, tipo de corte e mantendo velocidade de avanço constante. Os valores de torque do motor foram coletados por meio de inversor de frequência e posteriormente transferidos para um *software* de planilha eletrônica para análise dos dados. Foi realizada também a qualificação da superfície usinada por meio do avanço por dente (*fz*), análise visual (ASTM D 1666-87, 1995) e rugosidades Ra e Rz. Após o ensaio de usinagem os “corpos de prova” aplainados foram lixados e receberam aplicação de dois tipos de vernizes: nitrocelulósico e poliuretânico. A avaliação da película desses dois tipos de vernizes revestida sobre a madeira de *Coffea arabica* foi realizada por meio dos ensaios de dureza, brilho, abrasividade e espessura da camada seca. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) a 5% de significância, em esquema fatorial 3 x 2 (rotação do eixo porta ferramenta e diâmetro da ferramenta de corte) com dez repetições. Os dados de torque mecânico foram submetidos a análise de variância e posteriormente ao teste de Tukey a 5% de significância. Os resultados mostraram que o corte longitudinal apresentou maior valor de torque mecânico quando comparado ao corte transversal. Os “corpos de prova” usinados com rotação de 3600 rpm obtiveram maiores percentuais de notas 1 e 2 caracterizando-os de boa qualidade superficial e a superfície acabada com o verniz poliuretânico apresentou maior resistência ao risco quando comparado ao verniz nitrocelulósico.

Palavras-chave: Processamento mecânico da madeira. Qualidade da superfície usinada. Resíduo

ABSTRACT

The wood of *Coffea arabica* L. is a waste of the coffee industry, widely used as a source of energy. A few works have shown other destination to this wood as small wooden objects and rustic design furniture. Thus, the objective of this work was to find the best setting of cut speed in both circular saw and planer during the woodworking of *Coffea Arabica* wood, taking in account both the quality of machined surface and the optimization of the required power to the cut. It was also assessed the quality of finishing with polyurethane and nitrocellulose varnishes applied on the wood. The *Coffea arabica* wood was obtained from the renovation of a fifteen-years-old plantation, spaced 3 x 2 m, localized at the Machado region, Minas Gerais State, Brazil. The *Coffea* trees were pruned and the stems were sawn, planed and cut, producing 30 mm thick specimens, with length and width variables. After this, tests of machining were carried out using a circular saw and a plane, varying the rotation, diameter of cut tool, type of cut, but maintaining constant the feed speed. The values of motor torque were collected by the variable frequency drive and further exported to an electronic sheet to be analyzed. The classification of the machined surface was also carried out by means of advance per tooth (fz), visual analyze (ASTM D 1666-87, 1995) and surface texture Ra and Rz. After the machining test the specimens were surfaced and sanded to receive the application of the polyurethane and nitrocellulose varnishes. The evaluation of the film of the varnishes applied on the *Coffea arabica* wood was carried out by tests of hardness, brightness, abrasiveness and thickness of dry layer. It was utilized a completely randomized design with 5% of significance, in a 3 x 2 factorial design (rotation of the shaft tool holder and diameter of the cut tool) with ten repetitions. The mechanical torque data were submitted to the analyses of variance and further to the Tukey test at 5% of significance. The results showed that the longitudinal cut presented the higher value of mechanical torque when compared to the transversal cut. The machined specimens with 3600 rpm presented higher percentage of grades 1 and 2 characterizing them as of good superficial quality. The finished surface covered with the polyurethane varnish presented higher resistance to the scratching when compared with the nitrocellulose varnish.

Key-words: Mechanical processing of wood. Quality of the machined surface. Waste.

SUMÁRIO

	Páginas
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BLIOGRÁFICA	13
2.1 <i>Coffea arabica</i>	13
2.2 Qualidades dos produtos na indústria moveleira	15
2.3 Usinagem da madeira	16
2.3.1 Parâmetros de usinagem	17
2.3.1.1 Rotação do eixo porta ferramenta (<i>n</i>)	17
2.3.1.2 Velocidade de corte (<i>Vc</i>)	18
2.3.1.3 Velocidade de avanço (<i>Vf</i>)	19
2.3.1.4 Número de dentes (<i>z</i>)	20
2.4 Forças de corte	21
2.5 Famílias de corte	23
2.6 Influência das propriedades da madeira na usinagem	24
2.7 Qualidade da superfície usinada	26
2.7.1 Avanço por dente	26
2.7.2 Rugosidade em madeira	27
2.7.2.1 Parâmetro de rugosidade <i>Ra</i>	31
2.7.2.2 Parâmetro de rugosidade <i>Rz</i>	32
2.7.3 Qualificação de superfícies usinadas ASTM D 1666-87	32
2.7.4 Cavacos obtidos no processamento da madeira	33
2.7.4.1 Cavaco tipo I	34
2.7.4.2 Cavaco tipo II	35
2.7.4.3 Cavaco tipo III	36
2.8 Inversores de frequência	37
2.9 Acabamento superficial	41
3 MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1 Origem, desdobro e secagem	44

3.2	Densidade básica.....	44
3.3	Ensaio de usinagem	45
3.3.1	Corte.....	45
3.3.2	Aplainamento.....	46
3.3.3	Monitoramento da usinagem.....	47
3.3.3.1	Aquisição dos dados.....	47
3.3.3.2	Potência requerida ao corte.....	50
3.4	Qualificação da superfície usinada.....	50
3.4.1	Norma ASTM 1666-87 (1995).....	50
3.4.2	Determinação do avanço por dente (fz).....	51
3.4.3	Rugosímetro de arraste.....	52
3.5	Preparação dos corpos de prova e aplicação do verniz.....	53
3.5.1	Qualificação da superfície acabada.....	53
3.5.1.1	Ensaio de dureza.....	53
3.5.1.2	Brilho.....	54
3.5.1.3	Abrasividade.....	55
3.5.1.4	Espessura da camada seca.....	56
3.6	Análise estatística.....	57
3.6.1	Ensaio de processamento mecânico.....	57
3.6.2	Qualidade da superfície usinada.....	58
3.6.3	Qualidade do revestimento em madeira de <i>Coffea arábica</i>	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1	Densidade básica.....	59
4.2	Corte longitudinal.....	60
4.3	Corte transversal.....	63
4.4	Consumo de energia requerida	65
4.5	Qualificação da superfície usinada.....	67
4.5.1	Determinação do avanço por dente (fz).....	67

4.5.2	Norma ASTM 1666-87/1995	69
4.5.3	Análise de rugosidade	70
4.6	Qualificação da superfície acabada	73
4.6.1	Dureza	73
4.6.2	Brilho	74
4.6.3	Abrasividade	75
4.6.4	Espessura da camada seca	77
5	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
	ANEXOS	85

1 INTRODUÇÃO

A planta de café chegou ao Brasil vindo da Guiana Francesa, as primeiras plantações ocorreram no norte e nordeste do país, entretanto as condições climáticas dessas regiões não eram favoráveis para o desenvolvimento do café. Por volta de 1800 as mudas foram trazidas para a região sudeste, inicialmente para o estado do Rio de Janeiro e depois para os estados de São Paulo e Minas Gerais. As condições favoráveis de clima e solo nesses estados impulsionaram a cafeicultura no país. Assim, o Brasil se tornou o maior produtor mundial de café no final do século XIX (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002).

Atualmente, a cultura do café tem grande importância na economia brasileira devido a sua expressiva participação no mercado de exportação e na geração de emprego e de renda. O Brasil é, atualmente, o maior produtor de café do mundo, correspondendo por aproximadamente 30% do total produzido (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2010). Em 2010, a distribuição da produção brasileira de café por Estado da Federação encontrava-se da seguinte forma: Minas Gerais (52%), São Paulo (12,3%), Espírito Santo (19%), Paraná (4,9%) e os demais contribuem com 11,8% (CONAB, 2010).

A planta de café possui um período de produção satisfatória do fruto. Esse período varia em torno de 15 a 20 anos, após esse período a produção de café cai fazendo-se necessário à reforma do cafezal. O resíduo lenhoso originado dessa reforma é utilizado como fonte de energia para a torrefação do café. Outra forma de aproveitamento do resíduo lenhoso da lavoura cafeeira é a venda desse material como lenha, praticado por um mínimo valor. Porém, na maioria dos casos, esse material é abandonado e/ou queimado nas próprias lavouras. Outro destino que pode ser dado à madeira do cafeeiro é a fabricação de pequenos objetos, caixas e móveis com *design* rústico. A utilização dessa madeira

apresenta-se como alternativa, para as marcenarias da região sul do estado de Minas Gerais, em agregar valor a esse resíduo gerando renda e emprego para a população. Vale ressaltar que o estado de Minas Gerais é o maior produtor de café do Brasil e pode suprir a demanda de madeira do cafeeiro.

A caracterização anatômica da madeira do cafeeiro, bem como o estudo das propriedades físicas e mecânicas é de fundamental importância para a obtenção de produtos de qualidade com valor agregado. Pereira (2008) realizou a caracterização anatômica, física e mecânica da madeira de *Coffea arabica*. A autora relatou que a espécie apresenta textura fina, superfícies com brilho (importante característica estética), poros solitários, parênquima axial apotraqueal, raios não estratificados e fibra libriforme. A densidade básica média encontrada foi de $0,608 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Outro fator importante e necessário para obtenção de produtos à base de madeira de *Coffea arabica* com qualidade satisfatória é o conhecimento do comportamento dessa madeira frente ao processamento mecânico e aplicação de revestimento. O ajuste correto dos parâmetros de corte durante o processamento mecânico da madeira melhora a qualidade da superfície usinada e reduz custos com consumo de energia e com a afiação da ferramenta de corte. Os produtos com qualidade de revestimento têm maior aceitação no mercado, visto que há uma melhora da estética e um aumento da durabilidade do produto.

O presente trabalho foi realizado com os objetivos de encontrar o melhor ajuste de velocidade de corte em serra circular e plaina desempenadeira durante a usinagem da madeira de *Coffea arabica*, levando-se em consideração qualidade da superfície usinada e otimização da potência requerida ao corte. Avaliou-se também a qualidade do revestimento de dois tipos de vernizes, poliuretânico e nitrocelulósico, aplicados sobre a superfície da madeira de *Coffea arabica*

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Coffea arabica*

A planta do café faz parte da família das rubiáceas e possui mais de sessenta espécies classificadas como sendo do gênero *Coffea*. As espécies que têm maior importância econômica são *Coffea arabica* e *Coffea canephora* (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ - ABIC, 2009). A espécie *Coffea arabica* é responsável por cerca de 70% da produção mundial de café. Os principais países produtores são: Brasil, seguido pela Colômbia e pelo Vietnã. Estes países juntos são responsáveis por 50 a 60% da produção mundial. (ABIC, 2009).

A espécie *Coffea arabica* é de grande importância econômica para as regiões que a cultivam, especialmente nas Américas, uma vez que seu produto é de qualidade superior com aroma e sabor mais apreciados no mundo inteiro, e de maior aceitação na maioria dos mercados consumidores (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002). Atualmente, 75% da produção mundial exportável de café se devem a esta espécie (ABIC, 2009).

O cafeeiro é uma planta perene, dicotiledônea, de porte arbustivo com 3 a 5 metros de altura, apresenta caule lenhoso com diâmetro médio de 8 a 12 cm, casca cinzenta e rugosa, folhas persistentes, onduladas nas bordas e de coloração verde-acinzentada quando jovens e verde-brilhante quando adultas. O sistema radicular é ramificado nas primeiras camadas do solo e pode chegar a 1,5 m de profundidade (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002).

A madeira do cafeeiro pode ser proveniente de podas, ou renovações de lavouras, que são necessárias quando ocorre baixa produtividade dos cafeeiros, devido à idade da planta, ataque de praga ou à ocorrência de geadas. Esta madeira é utilizada como combustível pela própria fazenda ou pode ser vendida no

comércio regional a um baixo valor. Porém, na maioria dos casos, essas madeiras são simplesmente abandonadas e queimadas na própria lavoura (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002).

Pereira (2008) a fim de destinar usos mais nobres à madeira do cafeeiro (*Coffea arabica*) realizou sua caracterização anatômica, física e mecânica. Com relação à anatomia, a autora relatou que a madeira apresenta textura fina, superfície com brilho, que é importante característica estética e não apresenta diferenças significativas entre os elementos anatômicos da base para o topo do caule.

A densidade básica média encontrada foi de $0,608 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, o que a classifica como de densidade média e próxima aos valores de densidade encontrados em algumas madeiras tropicais e, tradicionalmente, utilizadas pelas indústrias madeireiras, como o mogno (*Swietenia macrophylla*) e o freijó (*Cordia goeldina*) com densidade básica média de $0,622 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ e $0,583 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectivamente.

Quanto às características mecânicas, que constituem a base para a utilização de qualquer matéria-prima como que de uso estrutural, Pereira (2008) relatou que no geral as propriedades sempre foram menores que as encontradas em outras espécies de uso estrutural, como em angico-vermelho, *Anadenanthera macrocorpa*, talvez devido à grande presença de nós.

O volume de madeira gerada ainda não foi devidamente quantificado por não ser considerado um produto da indústria cafeeira, apenas um resíduo com baixo valor agregado. Contudo, já ocorrem projetos sociais que começam agregar valores a este resíduo, como pode ser observado na cidade de Baependi, sul de Minas Gerais, onde a madeira é utilizada na produção de móveis e pela Universidade Federal de Lavras na confecção de pequenos objetos de madeira.

2.2 Qualidade dos produtos na indústria moveleira

A melhora da qualidade dos produtos da indústria moveleira é uma constante no setor, sendo julgada de acordo com as seguintes variáveis: material, *design*, durabilidade, relação custo/benefício, adequação ao uso e conformidade com as exigências dos clientes.

Além da tecnologia, os demais fatores de competitividade da indústria de móveis relacionam-se com novas matérias-primas, *design*, especialização da produção, estratégias comerciais e de distribuição. A dinâmica das inovações baseia-se, principalmente, naquelas que se referem ao produto, através do aprimoramento do *design* e da utilização de novos materiais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DO MOBILIÁRIO - ABIMOVEL, 2009).

De acordo com Silva (2002), a grande deficiência na qualidade final dos produtos da indústria de móveis, bem como os baixos rendimentos na transformação da matéria-prima em produtos acabados são decorrentes principalmente de ineficiências no setor de secagem, usinagem e acabamentos superficiais da madeira.

Os inspetores de qualidade da indústria devem reconhecer que condições como tipo de máquina utilizada, desgaste da ferramenta, vibrações indesejadas, parâmetros de usinagem empregados e até mesmo o operador da máquina refletem na qualidade do produto final. Todo esse conjunto de informações fornece uma ferramenta muito útil para o controle de qualidade do processo de fabricação (BET, 1999).

2.3 Usinagem da madeira

A usinagem da madeira é o processamento da madeira por meio de uma ferramenta de corte, visando qualidade do produto e segurança do operador (SILVA et al. 2005).

Segundo Bonduelle (2002), a usinagem da madeira pode ser expressa pela função 5M, sendo:

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

A madeira é um material anisotrópico, podendo então ser usinada de diferentes maneiras, em função da direção e sentido de ataque entre a ferramenta e as fibras da madeira. Leitz (2001) definiu que se pode trabalhar a madeira longitudinalmente, transversalmente e no topo tendo cada um suas peculiaridades.

2.3.1 Parâmetros de usinagem

2.3.1.1 Rotação do eixo porta ferramenta (n)

A rotação é o número de ciclos que o eixo da máquina realiza durante um determinado tempo. A rotação é indicada pela sigla rpm, número de rotações por minuto. A melhoria da qualidade da superfície usinada de uma peça pode ser alcançada com o aumento da rotação do eixo porta ferramenta compatibilizada com o aumento do número de dentes, redução da velocidade de avanço e do tipo de madeira que está sendo processada.

O aumento da rotação a valores extremos, poderá alcançar um ponto em que os gumes giram mais rápido que o tempo de levantamento dos cavacos. Este fenômeno é denominado de raspagem e provoca o escurecimento da superfície usinada e desgaste prematuro do gume de corte da ferramenta, diminuindo a sua vida útil. Neste sentido, Bonduelle (2001) afirma que para as operações de fresagem, os valores de avanço por dente devem estar no intervalo de 1,0 a 1,8 mm.

A rotação do eixo porta ferramenta é, em geral na indústria madeireira brasileira, baixa para se garantir uma velocidade de corte suficiente, principalmente no caso das operações de fresamento cilíndrico tangencial por meio de plaina desempenadeira (BONDUELLE, 2001).

Para Weissenstein (2000), o valor da rotação empregada deve estar entre 5000 e 6000 rpm para plaina desempenadeira quando são usinadas madeiras maciças. Para cortes com serras circulares, a rotação indicada está entre 3000 e 6000 rpm.

2.3.1.2 Velocidade de corte (V_c)

Velocidade de corte é a relação entre o caminho percorrido por um dente em determinado intervalo de tempo. É dada em metros por segundo e pode ser determinada pela Equação 1. Uma velocidade de corte ideal para usinagem depende dos materiais constituintes da ferramenta de corte e do tipo de matéria-prima a ser processada. A Tabela 1 indica os valores de velocidade de corte para diferentes materiais em serras circulares.

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{60.000} \quad (1)$$

Em que:

V_c = velocidade de corte, em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

D = diâmetro da ferramenta, em mm;

n = rotação do eixo porta ferramenta, em rpm.

Tabela 1 Faixas de velocidade de corte recomendado para serras circulares com dentes de metal duro em função do material (Leitz, 2001)

Material	Velocidade de corte ($\text{m}\cdot\text{seg}^{-1}$)
Madeira serrada de baixa densidade	70 – 100
Madeira serrada de média e alta densidade	70 – 90
Chapas de partículas aglomeradas	60 – 80
Chapas laminadas e sarrafeadas	60 – 80
Chapas duras de fibras	60 – 80
Chapas revestidas de material sintético	60 – 120

Mantendo-se todos os parâmetros de corte constantes, quanto maior é a velocidade de corte, melhor é o acabamento superficial, dessa forma a velocidade

de corte deve-se aproximar dos $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, e não dos $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, como é o caso geralmente utilizado (SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL - SENAI, 1995).

O aumento da rotação do eixo porta ferramentas promove um aumento da velocidade de corte. Valores elevados de velocidade de corte podem acarretar o fenômeno denominado de raspagem, o que provoca o escurecimento da superfície usinada e desgaste prematuro do gume de corte da ferramenta, diminuindo a sua vida útil.

De acordo com Reval Serras e Ferramentas para Madeira (2009), serras circulares com diâmetro de 400 mm devem ser utilizadas com velocidades de corte entre 60 a $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para madeiras menos densas e 55 a $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para madeiras mais densas.

2.3.1.3 Velocidade de avanço (V_f)

Velocidade de avanço é o deslocamento da peça de madeira em direção à ferramenta de corte, durante um intervalo de tempo, ela é expressa em metros por minuto (Equação 2)

$$V_f = \frac{Du}{t}$$

(2)

Em que:

V_f = velocidade de avanço da peça, em $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$;

Du = deslocamento de usinagem, em m;

t = tempo necessário para executar o deslocamento de usinagem, em min.

O ajuste da velocidade de avanço depende do tipo de madeira, umidade, potência disponível e altura de corte. Mantendo-se os parâmetros de corte constantes, a medida que reduz a velocidade de avanço, a qualidade da superfície usinada é afetada positivamente. Silva, Braga e Martins (2008) verificaram que na operação de fresamento tangencial em madeiras de *Eucalyptus sp.* a qualidade do acabamento melhorou quando utilizou-se velocidades de avanço de 3 e 6 m·min⁻¹ e rotação de 4600·rpm.

2.3.1.4 Número de dentes (z)

É a quantidade de dentes presentes na ferramenta de corte. Segundo Bonduelle (2001) o número de dentes influencia a qualidade de superfície usinada sob dois aspectos:

- Menor pré-clivagem em maior número de dentes. Este fato é ligado à qualidade da superfície obtida após a usinagem.
- Menor avanço por dente quanto maior o número dos mesmos. Este fato também está ligado à qualidade da superfície obtida após a usinagem.

Sandvik (1999) afirmou que a escolha do número de dentes de uma ferramenta de corte pode ser afetada pelo tipo de acabamento ou quantidade de desgaste, espécie de madeira, tipo de cavaco produzido, potência de corte necessária, velocidade de corte e velocidade de avanço. Além destes, deve-se considerar os seguintes fatores: capacidade de armazenamento de cavacos pela garganta, estabilidade lateral adequada e geometria cortante.

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

2.4 Forças de corte

Os dentes da serra são constituídos por três ângulos básicos (Figura 1). Existem algumas nomenclaturas que definem os ângulos básicos, contudo a nomenclatura utilizada nesse trabalho foi ângulo de ataque (γ), ângulo de cunha (β) e ângulo livre (α). Os ângulos básicos de corte são diretamente relacionados com as forças de corte. Gonçalves (2001) afirmou que a geometria do gume cortante dos dentes de serra tem grande importância em relação ao comportamento das serras e ao desempenho de corte, no que diz respeito ao acabamento superficial da peça e a potência necessária ao corte.

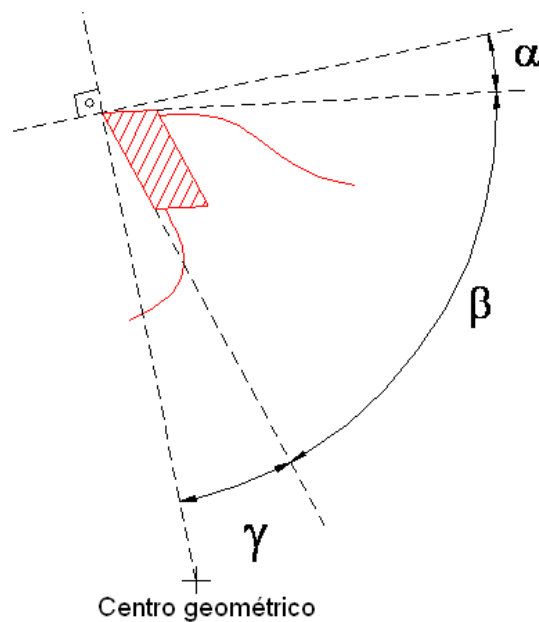


Figura 1 Esquema dos ângulos básicos da usinagem, em que α é o ângulo livre, β é o ângulo de cunha e γ é o ângulo de ataque

O ângulo livre (α) é formado entre a projeção das costas do dente e a reta tangente do cilindro de corte sobre a ponta do gume. De acordo com

Gonçalves (2001) é responsável pela redução do atrito entre a ferramenta e a peça. Logo, contribui na redução dos esforços de usinagem. Para a maioria dos fabricantes de serras circulares seu valor ideal é próximo de 10° .

O ângulo de cunha (β) é formado entre as projeções do peito e costa do dente. Menores valores promovem menores esforços de corte da madeira, contudo, mais frágil será o dente levando-o ao torcimento ou quebra (SILVA, 2002). Alguns fabricantes de serras circulares informam que o valor mínimo deve ser de 45° . De acordo com SENAI (1995) madeiras duras e cortes transversais exigem um ângulo de cunha menor.

O ângulo de ataque (γ) é formado entre a projeção do peito do dente e a reta que vai da ponta do dente ao centro geométrico da ferramenta. De acordo com Santos (1999) esse ângulo juntamente com a resistência da madeira e com a espessura de corte define o tipo de cavaco formado. Gonçalves (2001) afirmou que o ângulo de ataque é o de maior importância, se relaciona com o tipo de madeira, umidade, direcionamento das fibras em relação à direção de corte, potência de corte etc. Para madeiras de baixa densidade, geralmente se empregam elevados ângulos de saída e para madeiras densas e secas é necessário usar valores, os quais tendem a elevar a potência de corte. Para cada espécie haverá uma faixa ótima para o ângulo de ataque. Se o ângulo de ataque variar de -2° a $+2^\circ$, ocorre forte compressão das fibras, necessitando de altos esforços de usinagem (BONDUELLE, 2002)

Néri (2003) afirmou que normalmente as forças de corte decrescem com aumento do ângulo de ataque (γ). O ângulo livre (α) deverá ter um valor mínimo que permita a redução do contato da superfície de folga da ferramenta com a peça da madeira. O ângulo de cunha (β) está relacionado à resistência da ferramenta de corte, ao choque e ao desgaste.

As forças de corte estão relacionadas direta e proporcionalmente à espessura de corte. A fibra na madeira é o elemento que apresenta maior

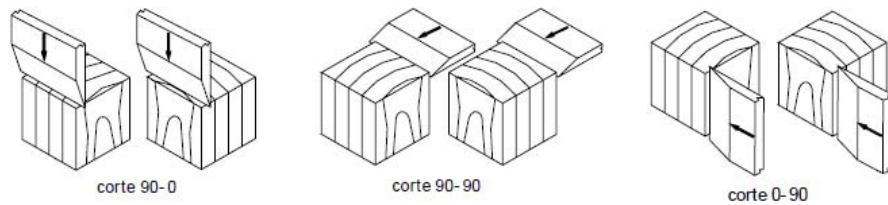
resistência ao corte. Tanto a inclinação das fibras em relação ao plano de corte quanto à direção de corte escolhida, influenciam no módulo das forças de usinagem. Quando as fibras da madeira não estão bem alinhadas em relação à direção do corte, podem surgir forças laterais que provocam vibração e instabilidade no corte. O estado de afiação da ferramenta de corte pode afetar as forças de corte e também a sua qualidade. Se a ferramenta não está bem afiada ou desgastada, o ângulo de saída diminui ou se torna negativo, produzindo um afundamento na superfície da madeira que ocasiona o aparecimento de forças de atrito elevadas. Neste caso as forças de corte tornam-se também maiores (NÉRI, 2003).

O atrito entre o cavaco e a superfície da ferramenta eleva a energia necessária para o corte. A força de atrito varia principalmente com o tipo de cavaco e é pouco afetada pela rugosidade na face da ferramenta. A estrutura anatômica da madeira é, então, fator determinante na força de atrito (GONÇALVES; RUFFINO, 1993).

As relações entre a força de corte e os parâmetros espessura de corte e densidade não são lineares para algumas espécies de eucalipto. A força de corte paralela decresce com o aumento do ângulo de ataque (γ) e em geral aumenta com o aumento da densidade (NÉRI, 1998).

2.5 Famílias de corte

De acordo com Mckenzie (1960) há três famílias de corte ortogonal para madeiras, sendo 0° - 90° , 90° - 0° e 90° - 90° (Figura 2). Elas são representadas pela associação de dois ângulos. O primeiro ângulo é formado entre a aresta de corte da ferramenta e o eixo axial das fibras da madeira. O segundo ângulo é formado entre a direção do corte e o eixo das fibras da madeira.



Fonte: Hoadley (1980) adaptado por Néri (2003)

Figura 2 Representação das famílias de corte ortogonal da madeira

A família de corte $90^{\circ}-0^{\circ}$ é encontrada em processos de corte como os realizados pelas plainas desempenadeiras e, também, nos cortes de tábuas, na direção paralela às fibras. A família de corte $90^{\circ}-90^{\circ}$ é encontrada em cortes realizados com a serra de fita e as forças de corte variam em função do tipo de corte. Normalmente, maiores forças de corte são requeridas para o corte $90^{\circ}-90^{\circ}$ do que para o $90^{\circ}-0^{\circ}$. O tipo $0^{\circ}-90^{\circ}$ requer menores energias para o corte (KOCH, 1985).

2.6 Influência das propriedades da madeira na usinagem

As propriedades físicas, mecânicas, anatômicas e químicas da madeira governam a natureza dos diferentes processos de usinagem. O conhecimento dessas propriedades é fundamental para o bom desempenho do corte (NÉRI, 2003).

Downes (1997) mencionaram que as propriedades físicas e mecânicas da madeira podem ser afetadas pelas dimensões e quantidades das fibras e dos vasos e também pela quantidade de tecido parenquimático. Neste sentido, o aumento do número e dimensões dos vasos poderá causar um decréscimo na densidade da madeira, pois os vasos apresentam mais espaços vazios, os quais poderiam estar ocupados pelas fibras.

A presença de depósitos de minerais abrasivos nas células, teor de resina, porosidade, dimensões das fibras, orientação da grã e a presença de nós, têm grande influência na qualidade da superfície e na eficiência dos processos de transformação da madeira (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

Do ponto de vista da usinagem, as resinas presentes em algumas espécies e a característica geométrica dos vasos ou traqueídeos pode afetar a qualidade da superfície de corte. As resinas podem aderir a ferramenta de corte e causar defeitos no aplainamento, ocorrendo orifícios na superfície, conhecidos como marcas de cavaco ou “Chipmarks” (NÉRI, 2003).

De acordo com Stewart e Polak (1975) a densidade é uma das propriedades que mais fornece informações sobre as características da madeira e quanto maior sua magnitude, quase sempre maior é a retratibilidade, mais difícil de trabalhar e, na maioria das vezes, aumenta as dificuldades de sua secagem.

Os esforços de corte em madeiras muito densas pode chegar a ser cinco vezes maior, quando comparado às madeiras macias. Além disto, o corte perpendicular às fibras (90° - 90°) requer maiores energias e forças de corte em comparação ao corte ao longo das fibras (GONÇALVES, 2000).

Com relação à umidade da madeira, Néri (2003) mencionou que a água presente na madeira é um elemento que não oferece resistência ao corte e ao mesmo tempo é um elemento facilitador do corte. Mas deve-se ressaltar que isso provavelmente ocorra em condições acima do ponto de saturação das fibras. Ainda segundo o mesmo autor, a umidade afeta as propriedades mecânicas da madeira, e por conseguinte, as forças desenvolvidas no processo de usinagem. Lima, Della Lucia e Vital (1986), estudando a influência da umidade nas propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus salina* Smith, observaram que a umidade exerceu um efeito exponencial na resistência a compressão paralela, módulo de elasticidade a flexão e trabalho no limite de proporcionalidade, sendo essas propriedades sempre crescentes com a queda de umidade.

2.7 Qualidade da superfície usinada

Segundo Silva et al. (2009) o conceito de qualidade da usinagem é apresentado diferentemente por dois grupos de pesquisadores. O primeiro grupo conceitua a qualidade apenas por meio dos valores normativos da usinagem, através do cálculo do avanço por dente (fz) ou da profundidade do arco ciclóide (t), sendo expresso em marcas por polegada linear ou em milímetros. O segundo grupo considera não somente os parâmetros indicados acima, mas também a presença de falhas na superfície, que são geradas em função da estrutura da madeira pela presença dos diferentes tipos de células, de suas diferentes dimensões e orientações. Toda essa variação estrutural pode apresentar defeitos na forma de “buracos”, trincas e pré-rachamentos. Alguns autores associam também a qualidade da superfície usinada com o tipo de cavaco obtido o qual, por sua vez, está diretamente relacionado ao ângulo de ataque da ferramenta, à espessura de corte e ao valor e direção da força normal.

2.7.1 Avanço por dente

O avanço por dente calculado ($fz_{\text{calculado}}$) é uma metodologia utilizada para qualificar a superfície usinada da madeira. Essa metodologia analisa a relação entre velocidade de avanço, rotação e número de dentes. O avanço por dente calculado ($fz_{\text{calculado}}$) é determinado por meio da Equação 3.

$$fz_{\text{calculado}} = \frac{Vf \times 1000}{n \times z} \quad (3)$$

Em que:

$fz_{\text{calculado}}$ = avanço por dente calculado, em mm;

V_f = velocidade de avanço da peça, em $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$;

n = rotação do eixo porta ferramenta, em rpm;

z = número de gumes ativos da ferramenta (adimensional);

Essa metodologia indica que quanto menor o valor do avanço por dente (fz), melhor será a qualidade do acabamento. A melhoria da qualidade da superfície usinada pode ser alcançada aumentando a rotação do eixo da máquina e o número de dentes da ferramenta de corte. Outra forma de obter melhorias na qualidade do acabamento é diminuindo a velocidade de avanço.

Na Tabela 2, encontra-se a classificação SENAI (1995) da qualidade dos acabamentos para fresas, desempenho e desengrosso em função dos valores de avanço por dente (fz).

Tabela 2 Classificação da qualidade do acabamento para fresas, desempenho e desengrosso, em função dos valores do avanço por dente (fz), em mm (SENAI,1995)

Avanço por dente (fz), em mm	Qualidade do acabamento
0,3 a 0,8	Fino
0,8 a 2,5	Médio
2,5 a 5,0	Grosso

2.7.2 Rugosidade em madeira

A superfície usinada da madeira possui cinco tipos diferentes de desvios (Figura 3), que são gerados em função de causas bem específicas dentro do processo de confecção da superfície e que são caracterizados pelas suas formas geométricas.

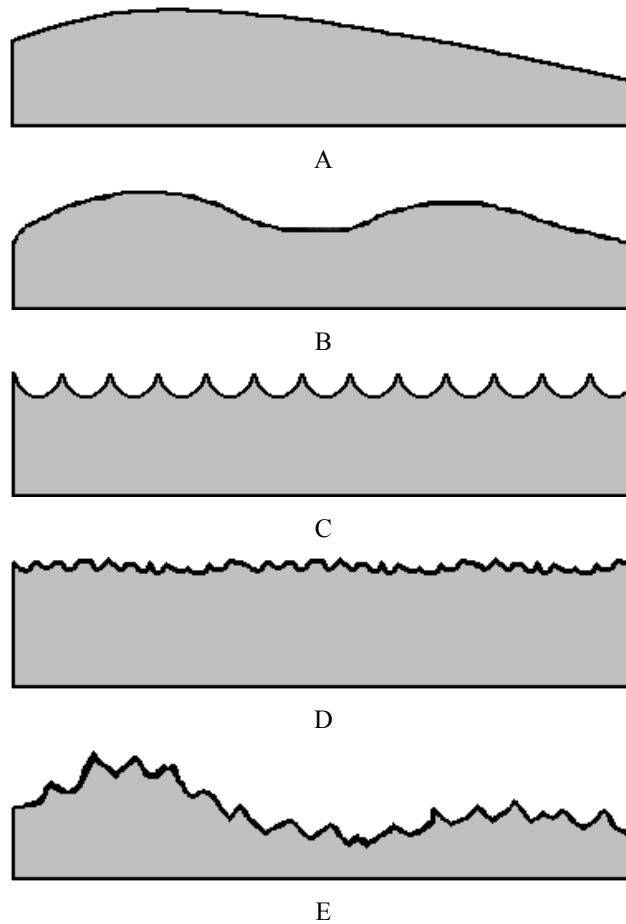


Figura 3 Desvio das formas, em uma superfície, sendo A, B, C, D os respectivos desvios de 1^a, 2^a, 3^a, 4^a ordens; E- superposição desses desvios. Adaptação de Deutches Institut Für Normung - DIN (1982)

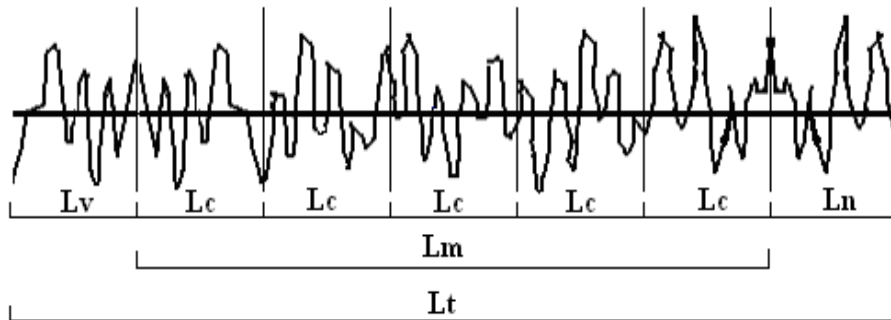
De acordo com Bet (1999) ao se examinar uma superfície completa, os desvios que possam ser verificados em toda a sua extensão são denominados de desvio de 1^a ordem. Os desvios de 2^a ordem, denominados de ondulações, podem se repetir periodicamente. Já os desvios de 3^a ordem são as raias e ranhuras oriundas das marcas de avanço da ferramenta e que somados aos desvios de 4^a e 5^a ordem compõem a rugosidade da superfície. Finalizando, os desvios de 6^a

ordem estão relacionados com a estrutura da matéria e não são incluídos nas medições usuais de rugosidade.

O somatório dos desvios de 1ª ordem (forma), de 2ª ordem (ondulação) e de 3ª a 5ª ordens (rugosidade) forma o perfil graficamente representável e sobre o qual são feitas todas as considerações relativas à metrologia de superfície (BET, 1999).

Os parâmetros de rugosidade são fornecidos pelo rugosímetro de arraste e representam uma forma da expressão matemática entre a variação vertical das superfícies, expresso pelos picos e vales e o deslocamento horizontal do sensor (agulha). Os parâmetros utilizados para avaliar a rugosidade da superfície usinada foram o Ra e o Rz, contudo há outros parâmetros fornecidos pelo rugosímetro de arraste como Rt, Rq, Ry e Sm.

O comprimento de amostragem (Figura 4) também chamado de *cut-off* (Lc) representa o comprimento estipulado da superfície usado como referência para identificar as irregularidades obtidas. A Tabela 3 indica quais valores de *cut-off* utilizar para cada valor de rugosidade. O comprimento de avaliação (Lm) representa o somatório dos comprimentos de amostragem da medição. A distância total percorrida (Lt) representa o caminhamento total do sensor (agulha) durante a medição da rugosidade. O (Lt) contém o comprimento de avaliação (Lm) juntamente com a distância para atingir a velocidade de medição (Lv) e distância para reduzir a velocidade de medição (Ln).



Fonte: Taylor Hobson (2005)

Figura 4 Perfil de rugosidade

Em que:

L_c = Comprimento de amostragem (cut-off)

L_m = Comprimento de avaliação

L_t = Comprimento total percorrido pelo apalpador

L_v = Distância para atingir a velocidade de medição

L_n = Distância para reduzir a velocidade de medição

Tabela 3 Valores recomendáveis de comprimento de amostragem para cada valor de rugosidade (R_a)

R_a (μm)	Mínimo comprimento de amostragem
De 0,1 até 1	0,25
Maior que 1 até 10,0	0,80
Maior que 10,0 até 20,0	2,50
Maior que 20,0	8,00

Fonte: Taylor Hobson (2005)

2.7.2.1 Parâmetro de rugosidade Ra

Esse parâmetro é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do comprimento de avaliação (Equação 4). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de avaliação (L_m) (Figura 5). É sabido que quanto maior esse valor, mais rugosa é a superfície. Contudo, somente o parâmetro Ra não explica o perfil de rugosidade de uma superfície, tornando-se necessário o uso de outros parâmetros de rugosidade para qualificar a superfície.

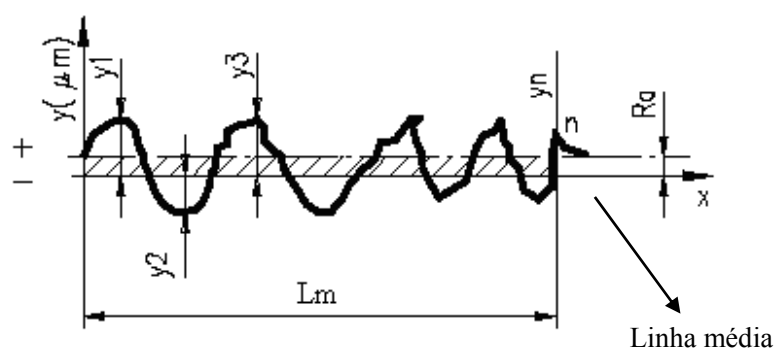
$$Ra = \frac{\sum y_n}{n} \quad (4)$$

Em que:

Ra = Parâmetro de rugosidade (μm)

y_n = Valores absolutos das ordenadas de afastamento, em relação à linha média

n = Número de leituras de y

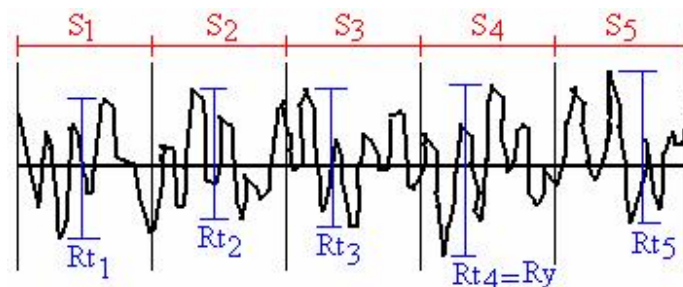


Fonte: Taylor Hobson (2005)

Figura 5 Determinação do parâmetro Ra de rugosidade em superfície

2.7.2.2 Parâmetro de rugosidade Rz

Corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial (Rt) (Equação 5). A rugosidade parcial (Rt) é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes em cada comprimento de amostragem (Figura 6).



Fonte: Adaptação de Silva, Braga e Martins (2008)

Figura 6 Representação gráfica de uma superfície, mostrando os picos e vales de cada comprimento de amostragem (Lc)

$$Rz = \frac{\sum Rt}{n} \quad (5)$$

Em que:

Rz = Parâmetro de rugosidade (μm)

$\sum Rt$ = Somatório dos valores do parâmetro Rt (μm)

n = número de leituras do parâmetro Rt.

2.7.3 Qualificação de superfícies usinadas ASTM D 1666-87

A qualificação de superfícies usinadas em madeira utilizando a norma ASTM D1666-87 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1995) leva em consideração alguns defeitos como arrancamento de

fibras, lasqueamento e falhas de usinagem. A partir daí, por meio de inspeção visual, são atribuídas notas para qualificar essas superfícies. A nota 1 representa à melhor qualidade, correspondendo à superfície isenta de defeito, enquanto que a nota cinco corresponde à pior qualidade com maior grau de defeitos (Tabela 4).

Tabela 4 Classes de qualidade da superfície de madeiras usinadas (ASTM D 1666-87/1995).

Notas	Classificação da superfície aplainada
1	Excelente (isento de defeitos)
2	Boa
3	Regular
4	Ruim
5	Muito ruim

Os resultados obtidos por meio dessa qualificação serão satisfatórios desde que os avaliadores estejam treinados e que tenham prática para reconhecer os defeitos presentes nas superfícies. É importante salientar que a baixa repetitividade das medições torna-se um fator limitante para obtenção de resultados confiáveis.

2.7.4 Cavacos obtidos no processamento da madeira

No processamento da madeira o tipo de cavaco obtido pode prever a qualidade da superfície usinada. No corte ortogonal 90° - 0° pode-se obter três tipos de cavacos distintos.

2.7.4.1 Cavaco Tipo I

No início da formação desse tipo de cavaco ocorre à compressão paralela às fibras e posteriormente ocorre a ruptura por fendilhamento, em um plano à frente da ferramenta de corte, seguindo a direção das fibras (NÉRI, 2003). A obtenção do cavaco Tipo I (Figura 7) tem como característica o baixo requerimento de energia devido à menor resistência a tração perpendicular às fibras ou fendilhamento e baixo desgaste da ferramenta de corte, visto que a ruptura se produz à frente da aresta de corte (GONÇALVES, 2000).



Fonte: Néri (1998)

Figura 7 Cavaco Tipo I obtido em ensaio ortogonal 90° - 0°

Com a formação do cavaco Tipo I a qualidade superficial da madeira é prejudicada quando as fibras estão direcionadas na descendente ao plano de corte, provocando o defeito denominado “fibras lascadas” (GONÇALVES, 2000).

De acordo com Gonçalves (2000) o controle do bom acabamento neste caso para peças longas é dificultado, visto que as fibras para determinadas espécies de madeira se formam com alinhamento aleatório ao longo do tronco da árvore.

2.7.4.2 Cavaco tipo II

O cavaco Tipo II é formado quando ocorre a ruptura por compressão paralela às fibras, o que induz tensões cisalhantes na diagonal, que por sua vez se tornam críticas e resultam em quebra dos elementos da madeira. Dentre os fatores que favorecem a formação do cavaco Tipo II (Figura 8) pode-se citar a pequena espessura de corte e ângulos de ataque variando de 5° a 20°. A demanda de energia para o corte é intermediária, ou seja, está entre aquelas requeridas pelos cavacos dos tipos I e III (NÉRI, 2003).

O desgaste sobre a aresta de corte durante a formação do cavaco Tipo II é relativamente maior que sob as condições do cavaco Tipo I, visto que a aresta de corte está em contato com a madeira durante todo o tempo de usinagem (GONÇALVES, 2000).



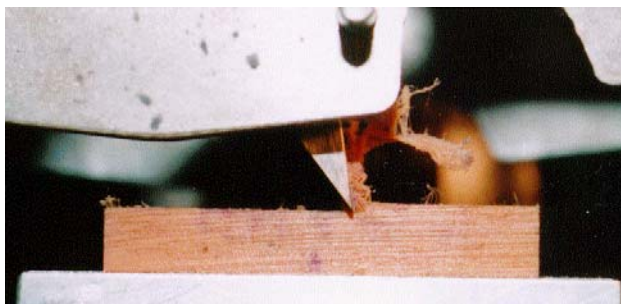
Fonte: Néri (1998)

Figura 8 Cavaco Tipo II obtido em ensaio ortogonal 90°-0°

A formação do cavaco Tipo II produz uma superfície de boa qualidade, porque a aresta cortante exerce um controle que limita os danos e quebras da madeira. Do ponto de vista da qualidade superficial, a formação do cavaco Tipo II é tida como ideal, já que a superfície gerada fica livre de elementos danosos acima e abaixo do plano gerado pela aresta de corte (GONÇALVES, 2000).

2.7.4.3 Cavaco Tipo III

A formação do cavaco Tipo III se inicia com a ferramenta de corte entrando em contato com a peça, e a madeira sendo comprimida paralelamente às fibras. O movimento adicional da ferramenta provoca esforços na madeira até que a ruptura ocorra pelo cisalhamento da madeira, seguida pela compactação dos elementos deformados contra a face da ferramenta (GONÇALVES, 2000). Nesse tipo de formação (Figura 9), o cavaco não escapa para cima da face da ferramenta, permanecendo interposto entre a face e a região onde a madeira cisalha e se rompe. Os fatores que favorecem a formação do tipo III são: pequeno ângulo de ataque, fio de corte da ferramenta muito desgastado e coeficiente de atrito elevado entre o cavaco e a face da ferramenta de corte (NÉRI, 2003).



Fonte: Néri (1998)

Figura 9 Cavaco Tipo III obtido em ensaio ortogonal 90° - 0°

Na formação do cavaco Tipo III, o acabamento superficial é prejudicado pelo pequeno ângulo de ataque da ferramenta, como também pelo desalinhamento das fibras no plano de trabalho em relação à direção de corte. Neste caso as falhas superficiais se dão pela presença de elementos da madeira não completamente

desligados da superfície usinada, denominados de “farpas” (GONÇALVES, 2000).

2.8 Inversores de frequência

O texto a seguir foi baseado no manual de instrução do inversor de frequência, referente à WEG (2008).

Os inversores de frequência ou conversores de frequência (acionamento de frequência ajustável) são equipamentos que utilizam o método de variar a frequência da tensão elétrica, em que o motor pode ser controlado de modo a prover um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica. Dessa forma para possibilitar a operação do torque constante para diferentes velocidades, deve-se variar a tensão proporcionalmente com a variação da frequência, mantendo-se dessa forma, o fluxo constante.

O princípio básico de funcionamento do inversor de frequência consiste em três partes: retificação de entrada, controle do chaveamento com filtragem e saída. Na rede de entrada a tensão é alternada senoidal com frequência fixa em 60 Hz, no Brasil, sendo 50Hz nos outros países da América do Sul e Europa, sendo transformada pelo retificador em corrente contínua. O filtro reduz as ondulações, tornando a saída da parte retificadora, em uma tensão perfeitamente retificada (sem “*ripple*”) conforme a Equação 6.

$$V_{cc} = 1,41 \times V_{rede} \quad (6)$$

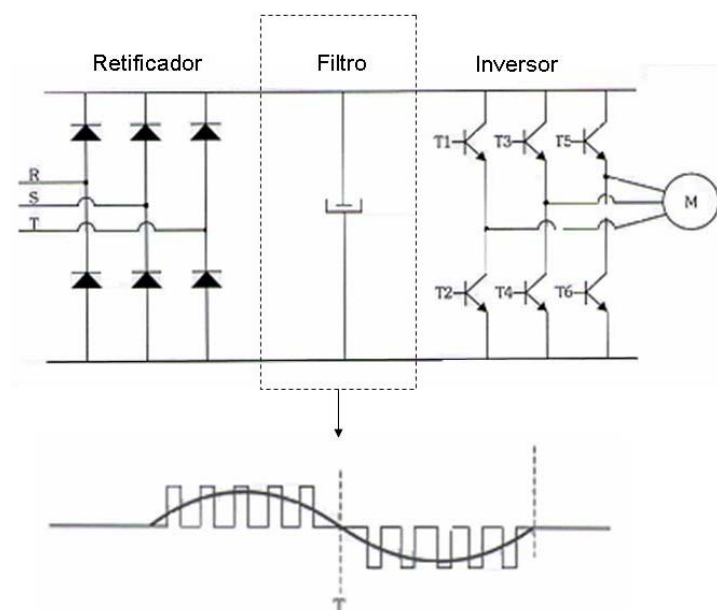
Em que:

V_{cc} = Tensão em corrente contínua

V_{rede} = Tensão da rede elétrica

A tensão contínua é conectada aos terminais de saída pelos transistores IGBT, (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), que funcionam nas regiões de corte e

saturação como uma chave estática, respectivamente aberta e fechada. Esses transistores são chaveados conforme programação do usuário, gerando pulsos de controle com largura variável denominados de PWM (*Pulse Width Modulation*) que fornece uma corrente alternada com a frequência desejada ao motor (Figura 10). Entretanto a forma de onda não é senoidal, pois resulta de chaveamento de um sinal contínuo.



Fonte: Franchi (2007)

Figura 10 Circuito de um inversor de frequência

Ao se variar a frequência da tensão na saída do inversor, a velocidade na ponta do eixo do motor é variada na mesma proporção. Contudo, o inversor deve permitir que o torque do motor (Equações 7, 8 e 9) se mantenha constante em qualquer velocidade.

$$T = K_1 \times \phi_M \times I_2 \times \cos \phi \quad (7)$$

$$\phi_m = K_2 \times \frac{V_1}{f_1} \quad (8)$$

$$P = T \cdot \omega \rightarrow (\omega = 2\pi f)$$

(9)

Em que:

T = Torque do motor (N·m)

ϕ_m = Fluxo magnético (Weber)

I_2 = Corrente do motor (A)

V_1 = Tensão do motor (V)

f_1 = Frequência (Hz)

K_1, K_2 = Constantes dependentes do material e projeto de máquina

ω = Velocidade angular

Considerando que a corrente depende da carga e que esta se mantenha constante, variando-se a tensão e a frequência na mesma proporção, o fluxo magnético se manterá e por consequência o torque ficará constante como se observa na (Figura 11).

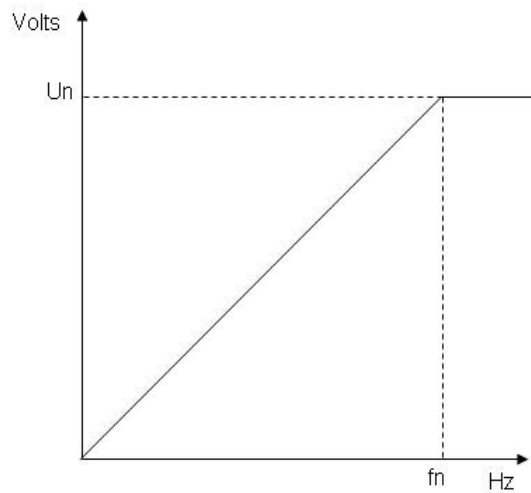


Figura 11 Tensão x frequência do motor – f_n – frequência nominal – U_n – tensão nominal

Com elevação da frequência acima da frequência nominal, o motor passa a operar em uma zona denominada de região de enfraquecimento de campo, pois o fluxo magnético decresce com o aumento da frequência provocando a redução do torque (Figura 12).

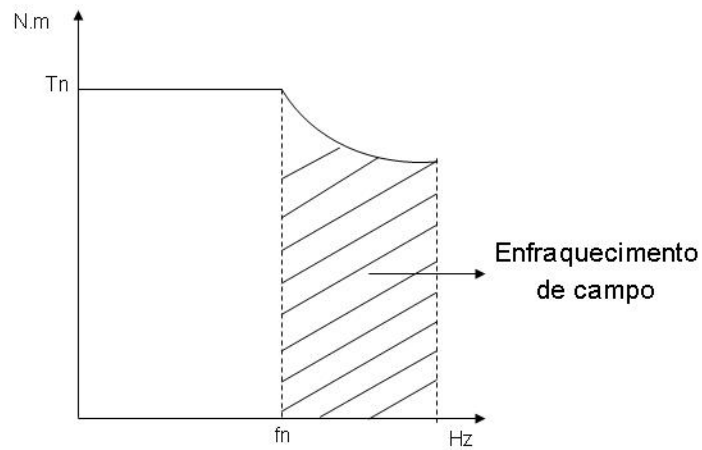


Figura 12 Enfraquecimento do campo acima da frequência nominal

No caso da madeira, como a carga é variável, a variação no torque provocará defeitos de usinagem da peça. Para que o torque se mantenha constante, é necessário manter o fluxo constante, como se observa na Equação 7, em que se considera que o fator de potência também se mantém constante. Desta forma, basta que o inversor de frequência mantenha constante a relação tensão/frequência (U/f) de acordo com a equação 8 para evitar variações de torque. Essa relação será o parâmetro de ajuste do inversor de frequência e deve ser escolhida conforme a aplicação para se obter um melhor rendimento do motor (Equação 10).

$$\eta_r = \frac{F_{rth}^2}{\frac{1}{\eta} + F_{rth}^2 - 1} \quad (10)$$

Em que:

η_r = Rendimento do motor trabalhando com o conversor de frequência

η = Rendimento do motor alimentado por uma onda senoidal

F_{rth} = Fator de redução de torque por distorção harmônica

Os inversores de frequência possuem uma unidade central de processamento que configura os parâmetros de programação do mesmo, sendo que por meio de uma interface homem/máquina permitem-se alterações de alguns desses parâmetros. Além da interface homem/máquina há outros sistemas de entrada e saída de dados tais como: as entradas analógicas que, por meio de sinais eletrônicos analógicos (sinais de tensão ou corrente ajustados por um potenciômetro) permitem o controle da velocidade e a interface de comunicação serial que permite que o inversor de frequência seja controlado/monitorado a distância por um computador central.

2.9 Acabamento superficial

Os acabamentos visam à melhoria da estética de uma madeira usinada e garantem a durabilidade do produto madeireiro. A qualidade do revestimento está relacionada à superfície ancoradora e ao produto utilizado.

Segundo Watai (1995), a preparação da superfície é de primordial importância no acabamento da madeira, pois o filme de acabamento ou revestimento não elimina os defeitos, mas os torna mais evidentes. Normalmente, superfícies de qualidade devem apresentar baixa rugosidade, poucos defeitos e ausência de impurezas. Esses fatores estão intimamente correlacionados com o material a ser utilizado e com os parâmetros de usinagem.

Antes de se aplicar um revestimento sobre a superfície de madeira, esta deve ser revisada, analisando presença de defeitos, e se existirem, estes devem sofrer emasseamento, como forma de corrigir imperfeições. Muitos tipos de massas são encontrados no mercado, sob variadas colorações, de acordo com tonalidades de madeiras de lei (SENAI, 1995).

O lixamento é a operação mais importante na preparação da superfície da madeira para o acabamento (WATAI, 1995). É o primeiro passo para se obter uma boa pintura na madeira, pois elimina marcas de serra e plaina, nivelando a superfície, deixando-a lisa, sendo que deve ocorrer sempre no sentido das fibras. Assim, há melhor ancoragem do material aplicado. A escolha da granulação das lixas deverá ser sempre decrescente, diminuindo cerca de 50% de abrasividade nas demais (SENAI, 1995).

Os produtos, normalmente, utilizados em acabamentos de madeiras são seladoras, tintas, vernizes, óleos, ceras e massas. Os vernizes são tintas incolores - solução de goma, essência ou óleo secativo - utilizadas no acabamento final podendo ser naturais ou sintéticos (WATAI, 1995). Este revestimento deve formar uma película, ser duro e elástico, estando perfeitamente aderido ao

substrato, ser inerte à ação do ambiente e resistente a fatores físicos e químicos, por exemplo (SENAI, 1995).

O verniz nitrocelulósico é considerado um material natural ou reversível, por ser extraído de vegetais. A cura ocorre pela evaporação do solvente, sendo um processo rápido, pois depende de condições internas do ambiente (temperatura e circulação do ar). São reversíveis na presença de alguns solventes. Possui facilidade de aplicação e bom nivelamento da superfície, porém baixa resistência mecânica e química. Seu aspecto final é muito influenciado pela umidade no ambiente de aplicação (SILVA et al., 2002).

O verniz poliuretânico é um produto sintético, tornando-se necessária aplicação de diluentes e aditivos para conferir características adequadas de utilização. Estes componentes não participam da reação de cura, sendo volatilizados após aplicação. Possuem alta resistência mecânica, física e química. São considerados irreversíveis. São produtos mais caros, não permitindo retoques de aplicação (SILVA et al., 2002).

A seladora é um produto químico que tem a função de cobrir e fechar os poros e espaços intercelulares da madeira, preparando-a para receber acabamentos, algumas servem também como acabamento final. Sua aplicação realça a grã da madeira (TINTAS CORAL, 1994 citado por SILVA et al., 2002).

A resistência do verniz ao risco está relacionada à qualidade de superfície da madeira que ancora o acabamento. Normalmente, superfícies de boa qualidade devem apresentar baixa rugosidade, poucos defeitos e ausência de impurezas. Esses fatores estão intimamente correlacionados com o material a ser utilizado e com os parâmetros de usinagem (WATAI, 1995). De acordo com Williams, Knaebe e Feist (1996) a rugosidade da superfície depende, fundamentalmente, da estrutura da madeira e do processamento e tem um efeito importante na seleção, aplicação e vida em serviço dos acabamentos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Origem, desdobro e secagem

A madeira de *Coffea arabica* foi proveniente da renovação de um plantio de 15 anos, espaçamento 3 x 2 m, localizado no município de Machado, sul de Minas Gerais. O cafeeiro foi desgalhado, cortado e transportado para o Laboratório de Usinagem da Madeira (DCF/UFLA). Os toretes foram armazenados em local coberto e posteriormente selecionados. Após a seleção eles foram desdobrados, aplainados e serrados, produzindo corpos de prova de 30 mm de espessura, comprimento e largura variáveis. Os corpos de prova foram empilhados ao ar livre e posteriormente levados para a câmara climática [$T = (20 \pm 3)^\circ\text{C}$ e $UR = (65 \pm 5)\%$] do Laboratório de Tecnologia da Madeira (DCF/UFLA) até atingirem a umidade de equilíbrio de 12%.

3.2 Densidade básica

Foram retirados 30 discos da base e do topo do cafeeiro. Posteriormente, cada disco foi cortado ao meio, totalizando 60 corpos de prova para determinação da densidade. Os corpos de prova foram mantidos imersos em água destilada e a vácuo, até atingirem a máxima expansão volumétrica. Os volumes verdes dos corpos de prova foram determinados pelo método de imersão. Após a obtenção dos volumes as cunhas foram transportadas para uma estufa, com circulação forçada e com temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$, até massa constante. As massas, absolutamente secas dos corpos de prova, foram obtidas por meio de uma balança de precisão de 0,01 g. Com os valores de massa seca e volume verde, obtiveram-se as densidades básicas.

3.3 Ensaios de usinagem

3.3.1 Corte

Os cortes transversais (0° - 90°) e longitudinais (90° - 0°) foram realizados em 120 corpos de prova de madeiras de *Coffea arabica* por meio de uma serra circular de carrinho (Figura 13). As rotações do eixo porta ferramenta, os diâmetros das serras, os ângulos básicos de corte de cada serra (Tabela 5) utilizados nesse trabalho foram semelhantes aos utilizados na indústria moveleira, com a exceção da rotação de 2500 rpm. O avanço da peça em direção a serra foi realizado manualmente com velocidade média de $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



A



B

Figura 13 Operações de corte em serra circular. A - Transversal e B - Longitudinal

Tabela 5 Distribuição dos corpos de prova para o ensaio de usinagem na serra circular

Diâmetros das serras (mm)	Ângulos de corte			Tipos de corte	Rotações do eixo porta ferramenta (rpm)		
	A	B	γ		2500	3000	3500
300	15°	55°	20°	Longitudinal	10	10	10
300	15°	55°	20°	Transversal	10	10	10
400	17°	50°	23°	Longitudinal	10	10	10
400	17°	50°	23°	Transversal	10	10	10

3.3.2 Aplainamento

O aplainamento dos corpos de prova das madeiras de *Coffee arabica* foi realizado em uma plaina desempenadeira com três facas novas. O avanço do corpo de prova em direção ao gume de corte foi realizado de forma manual, mas controlada, apresentando velocidade média de 6 m·min⁻¹. As rotações do eixo porta ferramenta foram de 2400, 3600 e 4000 rpm. Foram utilizados 28 corpos de prova de comprimento e largura variáveis e espessura de 30 mm. A Figura 14 ilustra a operação de aplainamento.



Figura 14 Operação de aplainamento

3.3.3 Monitoramento da usinagem

O monitoramento da usinagem consistiu em determinar o tempo de usinagem e o comprimento de cada corpo de prova com o intuito de obter dados para realizar a qualificação da superfície usinada por meio da metodologia do avanço por dente. O torque do motor foi coletado por meio do inversor de frequência. Esse equipamento além da coleta desse parâmetro melhorou a estabilidade do processo de usinagem e permitiu obter rotações diferentes das estipuladas pelas máquinas de corte. A Figura 15 ilustra o monitoramento do torque do motor.

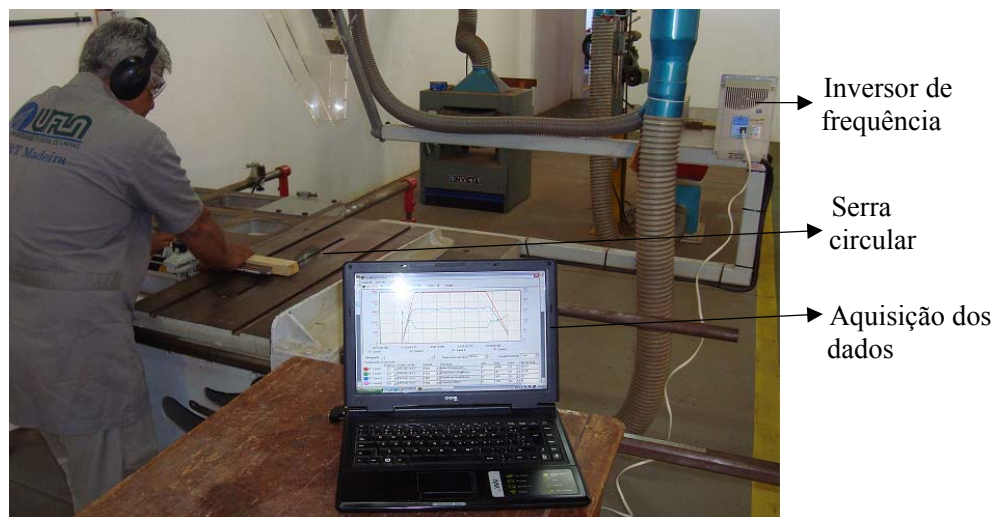


Figura 15 Monitoramento do torque mecânico do motor

3.3.3.1 Aquisição de dados

Os dados adquiridos pelo o inversor de frequência foram exportados para um *software* de planilha eletrônica para serem trabalhados e posteriormente para confecção de gráficos (rotação x torque). A captura dos dados pelo *software* de

parametrização é contínua resultando em uma base de dados composta de rotação (rpm), torque (%), corrente de entrada do motor (A) e tensão (V). Assim, foram identificados os intervalos em que realmente ocorreram os cortes das toras. Para tanto, selecionou-se as faixas de abrupta ascendência/descendência dos valores de torque, intercaladas por faixas de torques reduzidos e aproximadamente constantes (Tabela 6). Essas últimas faixas foram descartadas.

Os valores obtidos de torque pelo *software* correspondem a uma porcentagem do valor do torque nominal do motor. Logo, esse valor foi convertido para unidade de (N·m) para melhor interpretação dos dados. O torque nominal do motor é dado pela Equação 11. Nesse caso, o motor utilizado possui uma potência nominal de 5500 W e rotação nominal de 3500 rpm, logo o torque nominal do motor é de 15,01 N·m. Enfim o valor percentual do torque em N·m, corresponde a uma fração do torque nominal de acordo com a Equação 12.

$$T_{nom} = 9,55 \times \frac{P_{nom}}{n_{nom}} \quad (11)$$

Em que:

T_{nom} = torque nominal do motor (N·m).

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

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

$$T_{mec} = T_{nom} \times \frac{T}{100} \quad (12)$$

Em que:

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

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

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

Tabela 6 Dados de torque do motor, rotação, corrente de entrada no motor e tensão obtidos do inversor de frequência

Tempo	Rotação (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Torque (%)	
08:26:40	2607,00	159	7,60	11,3	Ocioso Descartado
08:26:40	2605,80	159	7,48	14,4	
08:26:41	2604,60	153	7,46	15,4	
08:26:41	2604,60	154	8,47	45,6	Usinagem Selecionada
08:26:42	2605,20	155	9,10	56,2	
08:26:42	2605,80	156	9,59	69,9	
08:26:43	2605,80	157	9,68	72,0	
08:26:43	2605,80	157	10,07	69,6	
08:26:43	2605,80	157	9,33	57,6	
08:26:44	2605,80	156	9,15	55,5	
08:26:44	2605,20	160	7,63	17,4	Ocioso Descartado
08:26:45	2603,40	159	7,55	15,0	
08:26:45	2606,40	159	7,56	11,3	
:	:	:	:	:	Ocioso Descartado
08:27:00	2605,20	159	7,50	14,4	
08:27:01	2605,20	159	7,61	12,6	Usinagem Selecionada
08:27:01	2605,20	154	8,89	55,5	
08:27:02	2605,80	155	9,22	59,6	
08:27:02	2607,00	157	9,60	68,6	
08:27:03	2605,20	157	10,32	79,2	
08:27:03	2605,80	156	9,10	54,5	
08:27:04	2606,40	160	7,72	20,2	
08:27:04	2605,80	159	7,55	14,7	Ocioso Descartado
08:27:04	2605,20	159	7,72	12,3	
08:27:05	2605,80	159	7,64	13,3	

3.3.3.2 Potência requerida ao corte

A potência requerida ao corte foi calculada levando-se em consideração o torque mecânico do motor (N·m), a rotação (rpm) e diâmetro da serra (mm). O cálculo de consumo de energia elétrica foi efetuado conforme a Equação 13.

$$C_{energia} = \frac{T_{mec} \times \left(\frac{D_{serra}}{1000}\right) \times \pi \times \left(\frac{n_{nom}}{60}\right)}{1000} \times t \quad (13)$$

Em que:

$C_{energia}$ = consumo de energia (kWh)

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

D_{serra} = diâmetro do disco da serra (mm);

n_{nom} = rotação nominal (rpm)

t = tempo de usinagem (horas)

3.4 Qualificação da superfície usinada

A qualificação da superfície usinada dos corpos de prova da madeira de *Coffea arabica* foi feita pela avaliação visual, conforme norma ASTM D 1666 87 (ASTM, 1995) posteriormente determinou-se o avanço por dente (fz) (medido e calculado) e por fim foi realizada a avaliação da rugosidade por meio de rugosímetro de arraste.

3.4.1 Norma ASTM 1666-87/1995

Foram realizadas avaliações das superfícies usinadas por três técnicos do grupo de Ciência e Tecnologia da Madeira (DCF/UFLA), devidamente treinados. Eles se basearam nas indicações da norma ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995), atribuindo, por meio de análise visual, notas de 1 a 5 (Tabela 4). Em casos de

divergência das notas de cada avaliador foi realizada uma nova análise conjunta, a fim de se chegar a um consenso.

3.4.2 Determinação do avanço por dente (fz)

No Laboratório de Tecnologia da Madeira (DCF/UFLA) os corpos de prova da madeira de *Coffea arabica* foram submetidos a leituras para verificação do número de marcas por polegada linear. As leituras dos avanços por dente foram feitas a olho nu, conforme exemplificado na Figura 16.

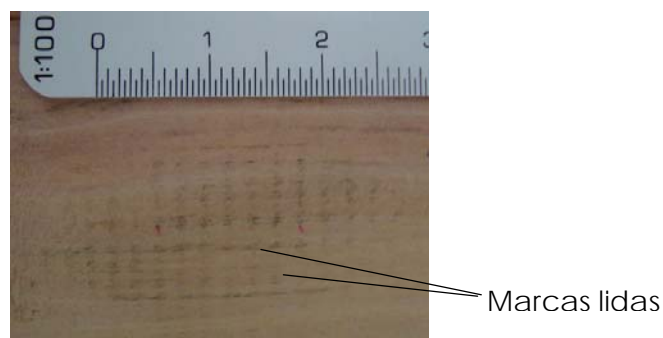


Figura 16 Leitura dos avanços por dente

Efetuiu-se a leitura do número de cristas (marcas lidas) por polegada linear em todos os campos de leitura, corpos de prova e operações de usinagem. A partir desses dados obteve-se o avanço por dente medido, por meio da Equação 14.

$$fz_{\text{medido}} = \frac{CL}{NML - 1} \quad (14)$$

fz_{medido} = Avanço por dente medido (mm)

CL = Comprimento de leitura (20 mm)

NML = Número de marcas lidas

Posteriormente, por meio da Equação 3, calculou-se o avanço por dente, denominado de avanço por dente calculado.

3.4.3 Rugosímetro de arraste

As análises de rugosidade foram realizadas por meio de rugosímetro de arraste, Surtronic 3+ (Taylor Hobson), representado na Figura 17. Os parâmetros analisados foram o Ra e Rz. A metodologia de análise da rugosidade foi feita de acordo com Silva et al. (2006) em que os corpos de prova foram marcados por um retângulo de 1 x 0,5 cm (comprimento x largura) indicando a localização da medição da rugosidade e uma seta indicando o sentido de medição. O comprimento de amostragem (cut-off) utilizado foi de 0,8 mm e o comprimento de medição (Lm) de 8 mm.



Figura 17 Análise da rugosidade realizada por um rugosímetro de arraste

3.5 Preparação dos corpos de prova e aplicação do verniz

Os sarrafos de 25 mm obtidos da madeira do cafeeiro foram colados lateralmente e posteriormente cortados obtendo-se 20 corpos de prova de dimensões de 95 x 95 x 20 mm para o ensaio de abrasividade e 16 corpos de prova de espessura de 25 mm e comprimento e largura variáveis para os ensaios de dureza, brilho e espessura da camada seca.

Todas as amostras foram lixadas com a sequência de lixas de grã 100, 150 e 220, sempre no sentido das fibras evitando-se o riscamento da superfície. Os produtos de acabamento foram aplicados com uma pistola de pressão na cabine de pintura, seguindo orientações dos fabricantes das seladoras e vernizes. Metade dos corpos de prova recebeu selador e verniz nitrocelulósicos e a outra metade dos corpos de prova recebeu fundo acabamento poliuretânicos.

3.5.1 Qualificação da superfície acabada

3.5.1.1 Ensaios de dureza

Com base no trabalho de Silva et al. (2010), o ensaio de dureza foi realizado em 16 corpos de prova de madeira de *Coffea arabica* com superfícies acabadas com verniz nitrocelulósico e poliuretânico. O ensaio consistiu em avaliar a resistência da superfície envernizada ao risco por meio de uma caneta *TQC Hardness Pen* que coleta os dados de pressão exercida sobre a película de verniz. Essa caneta foi pressionada perpendicularmente a superfície envernizada e arrastada com pressão constante. Foram realizados vários riscos variando-se a escala ou alternando os espirais (molas) que são acessórios da caneta (Figura 18), até que fosse observado o arrancamento da película do verniz.

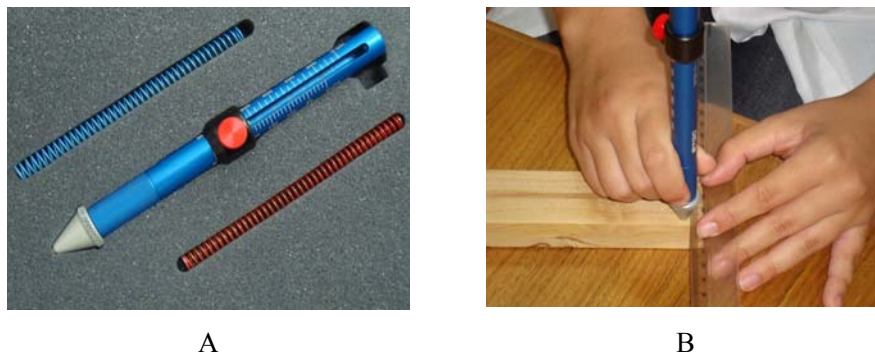


Figura 18 Ensaio de dureza A - *TQC Hardness pen* B - Execução do risco na superfície

3.5.1.2 Brilho

O ensaio de brilho, também com base no trabalho de Silva et al. (2010), consistiu em medir o percentual refletido da luz incidente na superfície acabada com verniz nitrocelulósico e poliuretânico de 16 corpos de prova de *Coffea arabica* por meio do medidor de brilho *Novo-Gloss Trio* (Figura 19). O ângulo de medição utilizado no aparelho foi de 60°, considerado como universal.



Figura 19 Ensaio de brilho

3.5.1.3 Abrasividade

O ensaio de abrasividade foi realizado no Laboratório de Tecnologia da Madeira por meio do abrasímetro *Abrasser* (Figura 20). O objetivo desse ensaio foi determinar a resistência das madeiras envernizadas à fricção de elementos abrasivos. A metodologia utilizada foi desenvolvida por Martins (2008) em que foram utilizadas roldanas abrasivas caracterizadas pelo fabricante por H-18, cargas de 500 g e rotação de 72 ciclos·min⁻¹, submetidos a 500 ciclos de abrasão. Foram avaliados 20 corpos de prova de madeira de *Coffea arabica* com superfície acabada de verniz nitrocelulósico e poliuretânico.



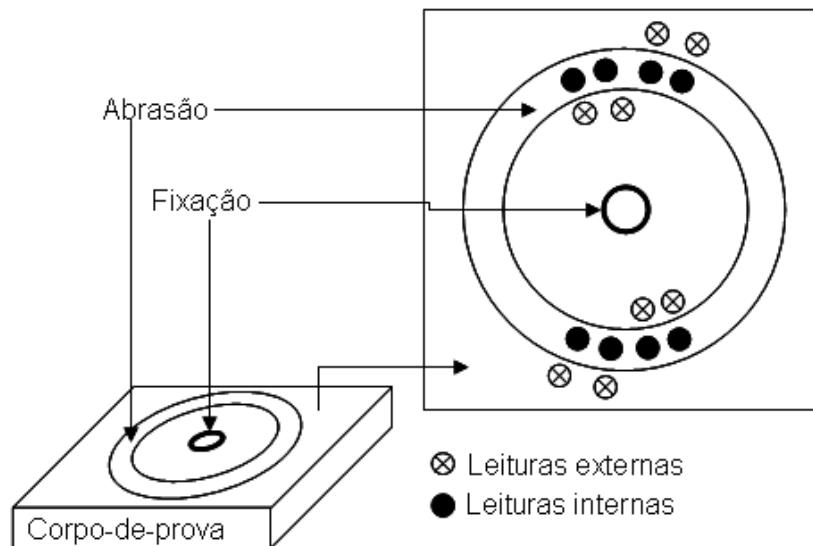
A



B

Figura 20 Ensaio de abrasividade A - Equipamento Abrasser 5135 B - Coleta das depressões por meio de relógio comparador

Após o ensaio de abrasividade foram demarcados dezesseis pontos em cada corpo de prova, sendo oito na superfície de abrasão e oito na superfície original do corpo de prova (Figura 21). Os pontos foram mensurados por meio de um relógio comparador e após as medições foi feito o cálculo da depressão causada pela abrasividade (Equação 15).



Fonte: Adaptação de Martins (2008)

Figura 21 Desenho esquemático das leituras das depressões da abrasividade

$$D_{\text{abrasividade}} = \frac{(Le_1 - Li_1) + (Le_2 - Li_2) + \dots + (Le_7 - Li_7) + (Le_8 - Li_8)}{8} \quad (15)$$

Em que:

$D_{\text{abrasividade}}$ = depressão causada pela abrasividade

Le_i = Leitura externa (superfície original) para $i = 1$ a 8 ;

Li_j = Leitura interna (região de abrasão), para $j = 1$ a 8

3.5.1.4 Espessura da camada seca

O ensaio de espessura da camada seca foi realizado no Laboratório de Tecnologia da Madeira (DCF/UFLA), por meio do *Ultrasound Positector*® 200 (Figura 22). Esse equipamento possui uma sonda que emite pulsos de onda de alta frequência, que são transmitidos para o revestimento por meio de um gel. A onda

é refletida assim que encontra um material com diferente densidade. As leituras de espessura da camada são obtidas por meio do tempo gasto para o sinal de ultrassom se propagar desde a sonda até o revestimento/interface do substrato e voltar (DEFELSKO, 2006).



Fonte: Silva et al. (2010)

Figura 22 Ensaio para mensuração da espessura da camada seca de verniz

O ensaio consistiu em espalhar o gel sobre 3 pontos na madeira, em seguida posicionou-se o sensor sobre o gel, obtendo-se a leitura no visor. Em cada amostra envernizada foram feitas 3 leituras e posteriormente calculou-se a média. Foram avaliados 16 corpos de prova com superfície acabada de verniz nitrocelulósico e poliuretânico.

3.6 Análise estatística

3.6.1 Ensaio de processamento mecânico

A análise estatística foi realizada utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC) a 5% de significância, em esquema fatorial 3 x 2 (rotação do eixo porta ferramenta x diâmetro da ferramenta de corte) com dez repetições. Os

dados de torque mecânico foram submetidos à análise de variância e foi realizado teste de comparação de médias pelo teste Tukey a 5% de significância. Após a análise de variância foi realizado a análise de regressão múltipla, para o torque mecânico do motor em função da rotação do eixo porta ferramenta e diâmetro da ferramenta de corte.

3.6.2 Qualidade da superfície usinada

A análise estatística utilizada para os valores de rugosidade Ra e Rz foi o delineamento inteiramente casualizado (DIC) a 5% de significância com 30 repetições. A qualificação das superfícies usinadas baseada na norma ASTM D 1666-87 (ASTM, 1995) foi realizada por meio de notas. A partir daí verificou-se o percentual de notas obtido para cada avanço por dente.

3.6.3 Qualidade do revestimento em madeira de *Coffea arabica*

A análise estatística da qualidade do revestimento em madeira foi realizada utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC) a 5% de significância com dois tratamentos (madeiras acabadas com o verniz nitrocelulósico e com o verniz poliuretânico) e dezesseis repetições.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade básica

A densidade básica média encontrada para a madeira de *Coffea arabica* foi de $0,616 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, o que a classifica como de densidade média, de acordo com os dados do International Association of Wood Anatomists - IAWA (1989). Na Tabela 7 representa-se a variação dos valores da densidade básica entre base e o topo do tronco. A média encontrada para densidade básica da base foi de $0,624 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ e para densidade básica média do topo de $0,609 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. De acordo com Pereira (2008) esta variação pode ser explicada pelo fato dos componentes anatômicos não apresentarem diferenças entre base e topo.

Tabela 7 Variação base/topo da densidade básica da madeira de *Coffea arabica* L.

Densidade ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Posição no Tronco		
	Base	Topo	Geral
Mínimo	0,594	0,589	
Média	0,624	0,609	0,616
Máximo	0,639	0,649	
Coefficiente de variação (%)	2,2	3,4	4

Comparando a densidade básica da madeira de *Coffea arabica* L. com madeiras tropicais utilizadas pela indústria moveleira, observa-se proximidade dos valores. As espécies mogno (*Swietenia macrophylla*) e freijó (*Cordia goeldina*), utilizadas na fabricação de móveis, apresentam densidade básica média de $0,624$ e $0,590 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, respectivamente (MELO; CORADIN; MENDES, 1990).

4.2 Corte longitudinal

A análise de variância dos valores de torque mecânico no corte longitudinal em madeiras de *Coffea arabica* entre os discos de serra de 300 e 400 mm encontra-se no Anexo 1A. Verifica-se que não houve diferença estatística para a interação (rotação x diâmetro da ferramenta de corte), a 5% de significância. Pela comparação múltipla entre as médias (Tabela 8) observa-se que à medida que aumenta a rotação da serra circular há uma redução significativa no torque obtido e para uma mesma rotação o torque mecânico do motor é maior quando utiliza-se um maior diâmetro de serra.

Tabela 8 Comparação múltipla das médias do torque mecânico do motor para o corte longitudinal com serra de 300 mm e 400 mm de diâmetro em madeiras de *Coffea arabica*

Tratamentos	Rotações (rpm)	Torque (N.m)
1	2500	20,9 a1
2	3000	17,7 a2
3	3500	14,6 a3

Oliveira (2008) avaliando torque mecânico de uma serra circular no corte longitudinal em madeira de *Eucalyptus* sp. verificou também uma redução do torque mecânico a medida que aumentou a rotação da serra circular. Dessa forma, a força necessária para o motor manter sua velocidade, para um mesmo avanço, é muito maior em baixas rotações, já que o torque mecânico indica uma força extra além do torque nominal, que o motor exerce para manter a rotação da serra constante quando está usinando. O mesmo autor ressalta ainda que o operador da máquina deverá aplicar mais força para manter o avanço estabelecido quando a usinagem ocorre em baixas rotações. Então, quanto menor a rotação utilizada maior será o desgaste físico do operador, para um mesmo avanço.

Schulz (1996) avaliando a usinagem em metais verificou que com o aumento da velocidade de corte houve uma redução das forças de mesmo e melhoria da qualidade superficial, porém ocorreu uma redução da vida útil da ferramenta de corte. Néri, Gonçalves e Hernandez (1999), avaliando forças de corte 90° - 0° em madeiras de *Eucalyptus* sp. observaram que a força de corte tende a aumentar com o aumento da densidade da madeira e com a espessura de corte.

O comportamento do torque do motor em função das diferentes rotações mostrou-se de forma semelhante, independentemente dos diâmetros das serras utilizadas. Observa-se uma queda do torque mecânico com aumento da rotação (Figura 23).

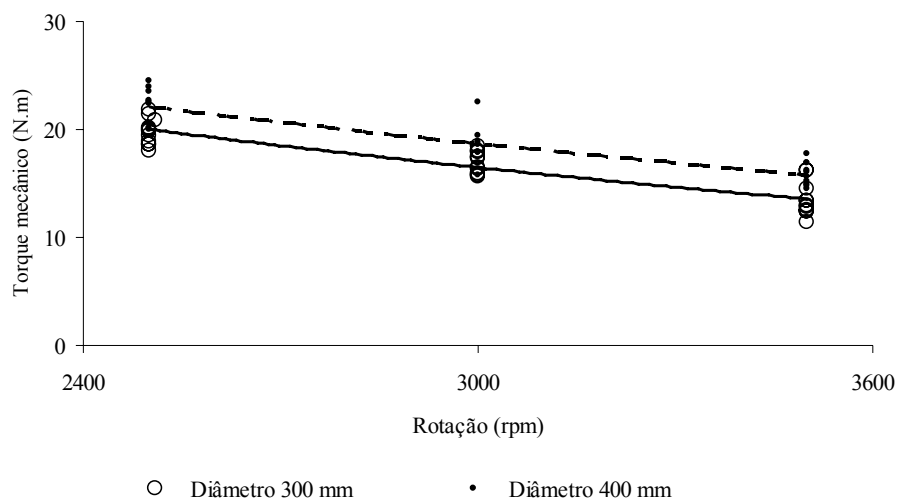


Figura 23 Relação entre o torque mecânico e as diferentes rotações para o corte longitudinal na madeira de *Coffea arabica*

Observa-se que a força necessária para o motor manter sua velocidade, para um mesmo avanço e uma mesma rotação, é maior quando utiliza-se serras com maior diâmetro. Segundo Freud (1998) se todos os parâmetros de usinagem permanecer constantes, o melhor acabamento será obtido pela ferramenta de

maior diâmetro. Contudo, Souza (2009) ressalta que maiores velocidades de corte estão associadas a maiores valores de rotação, elevando conseqüentemente, a potência requerida ao corte. O aumento da potência requerida ao corte acarreta em maior consumo de energia específica, o que eleva o custo da operação.

A Equação 16 representa o resultado da regressão múltipla ajustada. Ela foi determinada para a variável dependente torque mecânico do motor em função da rotação e do diâmetro da ferramenta de corte. Os coeficientes obtidos, bem como os testes dos resíduos encontram-se listados na Tabela 9.

$$T_{mec} = 29,1181 - 0,00631 \times n_{nom} + 0,02187 \times D_{serra} \quad (16)$$

Em que:

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

D_{serra} = diâmetro da serra (mm);

n_{nom} = rotação nominal (rpm)

Tabela 9 - Estatísticas inerentes aos ajustes entre a amplitude registrada em diferentes rotações do eixo porta ferramenta e diâmetro da ferramenta de corte para o corte longitudinal em madeira de *Coffea arabica*

Corte	Parâmetros	Coeficientes	R ² aj	Fcalc	Resíduo			
					Sxy	W	GQ	
Longitudinal	Intercepto	β0	29,1181*					
Longitudinal	Rotação	β1	-0,00631*	0,8	123*	1,3	0,9 ^{ns}	1,1 ^{ns}
Longitudinal	Diâmetro	β2	0,02187*					

β = coeficientes ajustados; R²aj = Coeficiente de determinação ajustado; Fcalc = F calculado; S_{xy} = Desvio padrão residual; W = Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ = Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; ns = não significativo a 5% de significância e * = significativo a 5% de significância.

4.3 Corte transversal

A análise de variância dos valores de torque mecânico no corte transversal em madeiras de *Coffea arabica* entre os discos de serra de 300 e 400 mm encontra-se no Anexo 2A. Observa-se que não houve diferença estatística entre a interação (rotação do eixo porta ferramenta x diâmetro da ferramenta de corte), a 5% de significância. Pela comparação múltipla entre as médias (Tabela 10) observa-se que à medida que aumenta-se a rotação da máquina de corte há uma redução significativa no torque mecânico. Contudo, Souza (2009) analisando o consumo de energia específica no corte transversal (0°-90°) observou que maiores velocidades de corte apresentaram maiores consumos de energia específica. Meyer (1926 citado por KOLLMANN; CÔTÉ, 1984), verificou menor eficiência da energia de corte da madeira com elevadas velocidades de corte em serras circulares.

Tabela 10 Comparação múltipla das médias do torque mecânico do motor para o corte transversal com serra de 300 e 400 mm de diâmetro em madeiras de *Coffea arabica*

Tratamentos	Rotações (rpm)	Torque (N.m)
1	2500	11,3 a1
2	3000	9,1 a2
3	3500	7,3 a3

Os valores de torque mecânico no corte transversal são menores que os valores encontrados no corte longitudinal. Segundo Kock (1985) o corte transversal (0°-90°) requer menor energia para o corte. Este fato é em virtude da disposição das fibras da madeira em relação ao gume de corte. Leitz (2001) afirmou que o corte transversal às fibras é mais fácil de realizar requerendo menor energia de corte, entretanto a superfície usinada se torna áspera em virtude da

disposição das fibras da madeira em relação ao gume de corte.

Pode-se observar também que o aumento do diâmetro da ferramenta de corte proporcionou maiores valores de torque mecânico. Segundo Freud (1998), se todos os parâmetros de usinagem permanecer constantes, o melhor acabamento é dado pela ferramenta de maior diâmetro.

O comportamento do torque do motor em função das diferentes rotações mostrou-se semelhante ao corte longitudinal, independentemente dos diâmetros das serras utilizadas. Observa-se uma queda do torque mecânico com aumento da rotação (Figura 24).

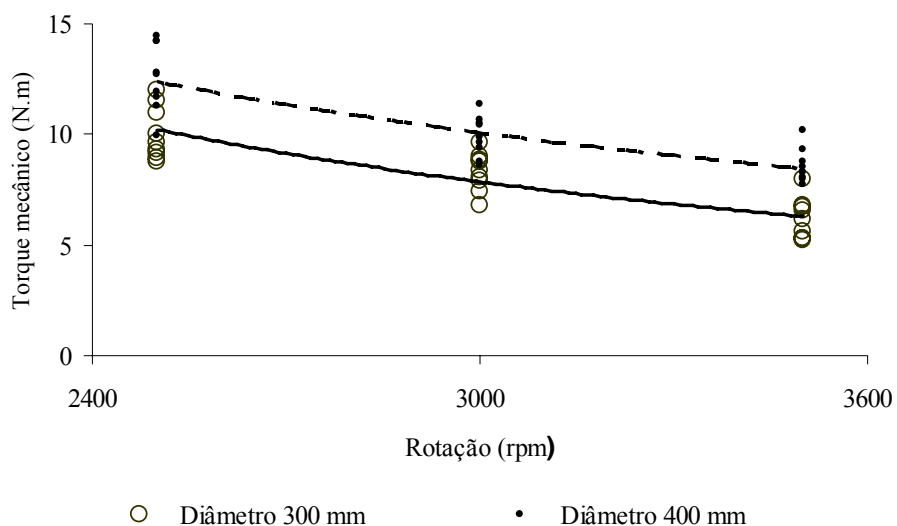


Figura 24 Relação entre o torque mecânico e as diferentes rotações para o corte transversal nas madeiras de *Coffea arabica*

A Equação 17 representa o resultado da regressão múltipla ajustada. Ela foi determinada para a variável dependente torque mecânico do motor em função da rotação e do diâmetro da ferramenta de corte. Os coeficientes obtidos, bem como os testes dos resíduos encontram-se listados na Tabela 11.

$$T_{mec} = 13,41592 - 0,00392 \times n_{nom} + 0,021785 \times D_{serra} \quad (17)$$

Em que:

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

D_{serra} = diâmetro da serra (mm);

n_{nom} = rotação nominal (rpm)

Tabela 11 - Estatísticas inerentes aos ajustes entre a amplitude registrada em diferentes rotações do eixo porta ferramenta e diâmetro da ferramenta de corte para o corte transversal em madeira de *Coffea arabica*

Corte	Parâmetros	Coeficientes	R^2_{aj}	Fcalc	Resíduo			
					S_{xy}	W	GQ	
Longitudinal	Intercepto	β_0	13,4159*					
Longitudinal	Rotação	β_1	-0,0039*	0,78	89*	1,04	0,9 ^{ns}	1,1 ^{ns}
Longitudinal	Diâmetro	β_2	0,02178*					

β = coeficientes ajustados; R^2_{aj} = Coeficiente de determinação ajustado; Fcalc = F calculado; S_{xy} = Desvio padrão residual; W = Teste de normalidade residual Shapiro-Wilk; GQ = Teste de homocedasticidade residual Goldfeld-Quandt; ns = não significativo a 5% de significância e * = significativo a 5% de significância.

4.4 Consumo de energia requerida

Os consumos de energia (kWh) para o corte longitudinal (90°-0°) foram, em média, de 51 (de 0,772 para 0,375) e 45% (de 1,166 para 0,637) maior que o corte transversal (0°-90°), para os diâmetros de 300 e 400 mm, respectivamente (Tabela 12). Esse fato pode ser explicado pelo aumento do torque do motor quando é realizado o corte longitudinal, requerendo maior energia em virtude da disposição das fibras da madeira em relação ao gume de corte da ferramenta.

Tabela 12 – Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do consumo de energia (kWh) para os cortes longitudinal (90°-0°) e transversal (0°-90°) em diferentes diâmetros e rotações, para serras circulares

Diâmetro (mm)	Corte	Rotação (rpm)	Média do Consumo de energia (kWh)	DP (kWh)	CV(%)
300	Longitudinal	2500	0,777	0,048	6,2
		3000	0,798	0,047	5,9
		3500	0,741	0,086	11,6
	Transversal	2500	0,394	0,047	11,9
		3000	0,392	0,041	10,5
		3500	0,340	0,051	15,1
400	Longitudinal	2500	1,165	0,088	7,6
		3000	1,169	0,112	9,6
		3500	1,165	0,080	6,8
	Transversal	2500	0,658	0,080	12,2
		3000	0,623	0,057	9,1
		3500	0,629	0,057	9,1

Em que DP= Desvio Padrão e CV= Coeficiente de variação

Também pode ser observado na Tabela 12 que os diferentes diâmetros das serras proporcionaram uma variação no consumo de energia. Assim, para o corte longitudinal o consumo médio de energia para a serra de 400 mm de diâmetro foi 34% (de 1,166 para 0,772) maior que o encontrado para a serra de 300 mm de diâmetro. Já para o corte transversal, o aumento foi de 41% (de 0,637 para 0,375).

4.5 Qualificação da superfície usinada

4.5.1 Determinação do avanço por dente (fz)

Os valores médios do avanço por dente calculado ($fz_{\text{calculado}}$) e medido (fz_{medido}) obtidos no processo de aplainamento, com velocidade média de avanço manual de $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ para as três rotações do eixo porta ferramenta encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 Valores médios de avanço por dente calculado e medido para diferentes rotações

Rotação (rpm)	$fz_{\text{calculado}}$	fz_{medido}
2400	2,24	2,05
3600	1,46	1,64
4000	1,14	1,61

É importante salientar que para o cálculo do avanço por dente ($fz_{\text{calculado}}$) utilizou-se o número de dentes ativos igual a 1. Este fato foi devido a plaina desempenadeira utilizada não possuir sistema de fixação de ferramentas tipo hidrocentrante e retificação dos dentes após sua fixação, conforme descrito por Bonduelle (2001) e Silva (2002).

Segundo classificação SENAI (1995) presente na Tabela 1 o acabamento obtido foi considerado mediano, independentemente das rotações utilizadas, indicando que a variação da velocidade de corte não proporcionou variação na qualidade da superfície usinada. Contudo, observa-se que houve uma queda no valor do avanço por dente calculado de 49% (de 2,24 para 1,14) entre as rotações de 2400 para 4000 rpm. Este fato sugere que houve um ganho na qualidade, mas que não foi detectada pela classificação do SENAI (1995). Já no trabalho de

Braga (2008), que avaliou as qualidades das superfícies usinadas de madeiras de *Eucalyptus sp*, *Pinus sp* e *Dipteryx odorata*, foi apresentado qualidades finas para velocidade de avanço de $10 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ e rotações de 2730, de 3508 e de 4670 rpm, também utilizando como base a classificação do SENAI (1995).

Pode-se observar na Figura 25 que os valores de avanço por dente, calculados e medidos seguem o mesmo padrão indicando que estas duas metodologias fornecem resultados semelhantes quanto à qualificação da superfície usinada. Contudo, o avanço por dente medido foi superior ao avanço por dente calculado, conforme resultados encontrados por Guimarães (2005) e Silva et al. (2006).

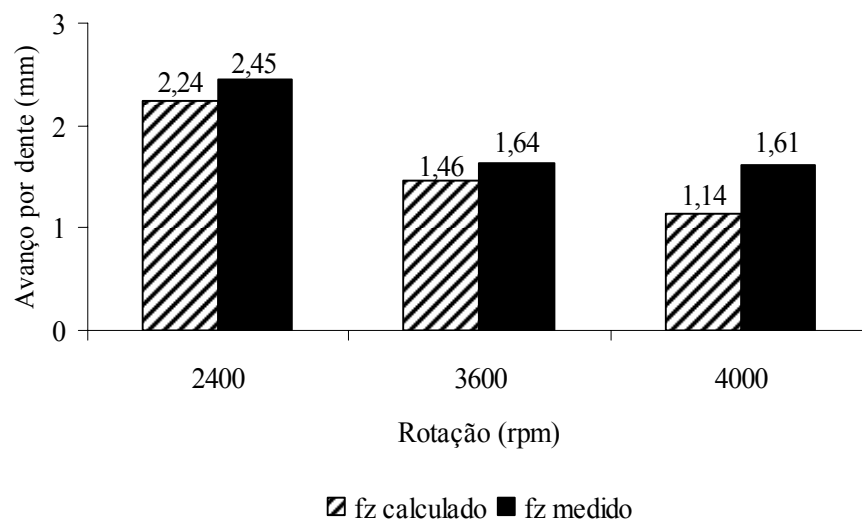


Figura 25 Representação do avanço por dente medido (fz medido) e calculado (fz calculado) nas diferentes rotações

Os valores do avanço por dente medido (fz_{medido}) obtidos para as rotações 3600 e 4000 rpm foram próximos. Esse fato pode ser explicado pela pequena diferença na magnitude dessas rotações.

4.5.2 Norma ASTM 1666-87/1995

Na Tabela 14 encontram-se os percentuais de corpos de prova classificados para as diferentes rotações. Observa-se que os corpos de prova com avanço por dente de 1,46 e 1,14 mm obtiveram maiores percentuais para a nota “2” caracterizando-os de boa qualidade superficial. Os corpos de prova com avanço por dente de 2,24 mm tiveram maiores percentuais para a nota “3”, caracterizando-os de qualidade superficial inferior. Essas superfícies apresentavam defeitos como arrancamentos e levantamentos de fibras, que são originados pelas condições de usinagem. Considerando uma classificação qualitativa, pode-se dizer que 82, 96 e 86% dos corpos de prova podem ser considerados satisfatórios para a operação de aplainamento com as rotações de 2400, 3600 e 4000 rpm, respectivamente. Similarmente, apenas 18, 4 e 14% dos corpos de prova poderiam ser enquadrados como reprovados para a operação de aplainamento com as rotações de 2400, 3600 e 4000 rpm, respectivamente.

Tabela 14 Porcentuais de corpos de prova classificados, segundo a ASTM 1666-87/1995, para os aplainamentos com diferentes rotações

Rotações (rpm)	Avanço por dente calculado (mm)	Percentual de corpos de prova classificados (%)				
		nota 1	nota 2	Nota 3	nota 4	nota 5
2400	2,24	4	25	53	18	0
3600	1,46	21	57	18	4	0
4000	1,14	11	50	25	14	0

Soragi (2009) observou que, com base na norma ASTM 1666-87 (1995), superfícies usinadas definidas como classes de boa qualidade eram formadas por peças que apresentavam baixos valores de avanço por dente calculado ($fz_{\text{calculado}}$ menor que 1,33 mm). Essa tendência também foi encontrada nesse trabalho

(Figura 26). Contudo, para as condições de controle de usinagem, o valor máximo de avanço por dente calculado ($fz_{\text{calculado}}$) que apresentou qualidade boa foi de 2,24 mm.

Silva et al. (2005) também baseando na norma ASTM 1666-87 (ASTM, 1995) avaliaram a qualidade da operação de desempenho em madeiras de *Eucalyptus grandis* e obtiveram maior frequência de peças qualificadas com a nota 3. Comparativamente, os mesmos autores afirmaram que essa classificação foi inferior aquela encontrada para as madeiras de mogno (*Swietenia macrophylla*) e de Imbuia (*Ocotea porosa*). Para a madeira de *Coffea arabica* desse trabalho, verificou-se maior frequência (44%) para a classe que recebeu a nota 2.

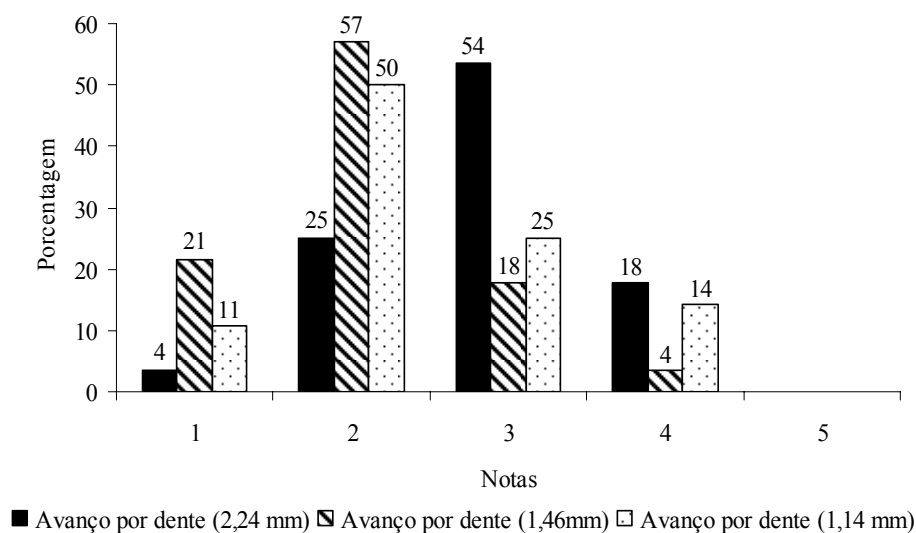


Figura 26 Percentual das notas para cada avanço por dente

4.5.3 Análise da rugosidade

A análise de variância dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz obtidos nas análises de rugosidade da madeira de *Coffea arabica* por meio do rugosímetro de

arraste encontra-se nos Anexos 3A e 4A, respectivamente. Observa-se que foram encontradas diferenças estatísticas entre os tratamentos analisados, a 5% de significância. Pela comparação múltipla entre as médias (Tabela 15) observa-se que os tratamentos 2 e 3, rotações de 3600 e 4000 rpm, respectivamente, não difeririam entre si e apresentaram as melhores qualidades de superfície usinada, pois forneceram menores valores de rugosidades Ra e Rz.

Tabela 15 Valores médios dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz obtidos nas madeiras de *Coffea arabica*

Tratamentos	Rotações (rpm)	Ra (μm)	Rz (μm)
3	4000	2,4 A	15,2 a
2	3600	2,5 A	14,5 a
1	2400	6,7 B	34,2 b

Médias seguidas de, pelo menos, uma mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância.

Os resultados obtidos pela análise de rugosidade foram semelhantes ao encontrado pela metodologia do avanço por dente em que os corpos de prova usinados nas rotações 3600 e 4000 rpm foram considerados de qualidade satisfatória

Os resultados obtidos na qualificação da superfície usinada por meio de rugosímetro de arraste estão de acordo com os resultados obtidos por Braga (2008); Silva et al. (2006, 2008) que observaram que menores velocidades de avanço e maiores velocidades de corte proporcionam superfícies com menores valores de rugosidade e conseqüentemente de melhor qualidade. Contudo esses autores ressaltam que altas velocidades de avanço associadas às baixas velocidades de corte podem acarretar raspagem, com escurecimento da superfície da madeira, devendo ser evitada. Associado a esse fenômeno, Bonduelle (2001)

afirmou que a velocidade de corte aumentada excessivamente também causa o desgaste prematuro do gume de corte da ferramenta, diminuindo sua vida útil.

Silva et al (2008) avaliando a qualidade da superfície usinada na operação de desempenho em madeiras de *Eucalyptus* sp. verificaram que altas velocidades de corte associadas a altas velocidades de avanço aumentaram os valores de rugosidade consequentemente reduziram a qualidade da superfície usinada. As Figuras 27, 28 e 29 ilustram os perfis de rugosidade da superfície usinada da madeira de *Coffea arabica*

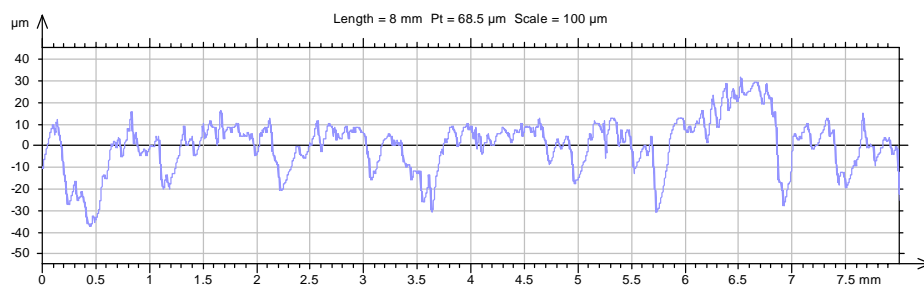


Figura 27 Perfil de rugosidade de amostras de *Coffea arabica* usinadas com rotação de 2400 rpm

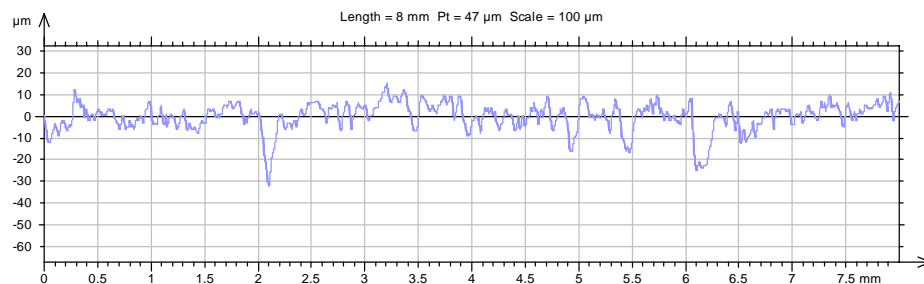


Figura 28 Perfil de rugosidade de amostras de *Coffea arabica* usinadas com rotação de 3600 rpm

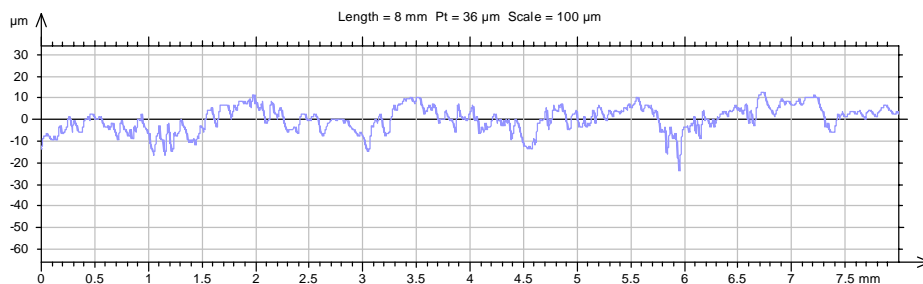


Figura 29 Perfil de rugosidade de amostras de *Coffea arabica* usinadas com rotação de 4000 rpm

A análise do perfil de rugosidade encontrado nos corpos de prova usinados a rotação de 2400 rpm indica que a superfície usinada apresentou altos valores de depressões, de até $-40\ \mu\text{m}$ de profundidade e picos de até $30\ \mu\text{m}$ de altura. Esses valores mostraram alta variação entre picos e vales, caracterizando uma superfície rugosa. Já os perfis de rugosidade encontrado nos corpos de prova usinados a rotações de 3600 e 4000 rpm apresentaram menores depressões -15 a $-20\ \mu\text{m}$ de profundidade e picos de 10 a $15\ \mu\text{m}$, mostrando menores variações entre picos e vales. Esses valores caracterizam essas superfícies como de menores rugosidades e conseqüentemente melhores qualidades quando comparado com rotação de 2400 rpm.

4.6 Qualificação da superfície acabada

4.6.1 Dureza

As pressões médias exercidas nos vernizes nitrocelulósico e poliuretânico sobre a madeira de *Coffea arabica* foram de 240 e 1050 g, respectivamente. Na Tabela 16 encontram-se os valores mínimos, médios e máximos, bem como, o respectivo desvio padrão da média e coeficiente de variação das pressões exercidas sobre a película de verniz nitrocelulósica e poliuretânica. A análise de

variância das pressões obtidas do ensaio de dureza encontra-se no Anexo 5A. Observa-se que foi encontrada diferença estatística, a 5% de significância entre os vernizes analisados.

Tabela 16 Valores mínimo, médio, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação das pressões exercida (g) sobre diferentes vernizes

Vernizes	Valores de pressão (g)			DP (g)	CV (%)
	Mínimo	Médio	Máximo		
Nitrocelulósico	200	240	300	41,83	17,4
Poliuretânico	750	1050	1500	300	28,6

Em que: DP = Desvio padrão da média e CV = Coeficiente de variação

Silva et al. (2010) avaliando a qualidade do acabamento de vernizes nitrocelulósicos em madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Toona ciliata* M. Roemer verificaram que as pressões obtidas para os ensaios de dureza foram de 298 e 230 g, respectivamente. Dessa forma a resistência ao risco do verniz nitrocelulósico aplicado sobre a madeira de *Coffea arabica* é semelhante ao aplicado sobre a madeira de *Toona ciliata*.

Nogueira (2010) avaliando a qualidade do acabamento de verniz poliuretânico em madeira de *Toona ciliata* verificou que a pressão média obtida no ensaio de dureza foi de 430 g, sendo esse valor inferior ao obtido pelo verniz aplicado sobre a madeira de *Coffea arabica*.

4.6.2 Brilho

Os valores médios de brilho obtidos nos corpos de prova de madeira de *Coffea arabica* acabados com os vernizes nitrocelulósico e poliuretânico foram de 35,6 e 47,6%, respectivamente (Tabela 17). Conforme classificação SENAI (1995), esses valores médios de brilho se enquadram na classificação de

semibrilho (30-60% de brilho). A análise de variância dos valores de brilho encontra-se no Anexo 6A. Foi observada diferença estatística, a 5% de significância, entre os vernizes nitrocelulósico e poliuretânico.

Tabela 17 Valores mínimo, médio, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de brilho obtidos sobre diferentes vernizes

Vernizes	Valores de brilho (%)			DP	CV (%)
	Mínimo	Média	Máximo		
Nitrocelulósico	31,6	35,6	42,9	4,4	12,3
Poliuretânico	44,6	47,6	49,6	2,1	4,3

Em que: DP = Desvio padrão e CV = Coeficiente de variação

Silva et al. (2010) avaliando a qualidade do acabamento de verniz nitrocelulósicos em madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Toona ciliata* M. Roemer verificaram que os valores de brilho obtidos foram de 35,5 e 36,1%, respectivamente. Dessa forma o valor médio de brilho do verniz nitrocelulósico aplicado sobre a madeira de *Coffea arabica* foi semelhante ao aplicado sobre a madeira de *Eucalyptus grandis* e *Toona ciliata*.

Nogueira (2010) avaliando a qualidade do acabamento de verniz poliuretânico em madeira de *Toona ciliata* verificou que o valor médio de brilho obtido foi de 57,8%. Esse valor é superior ao obtido pelo verniz poliuretânico aplicado sobre a madeira de *Coffea arabica*.

4.6.3 Abrasividade

As depressões médias obtidas no ensaio de abrasividade sobre vernizes nitrocelulósico e poliuretânico aplicados em madeira de *Coffea arabica* foram de 35,6 e 47,6 mm, respectivamente. Na Tabela 18 encontram-se os valores

mínimos, médios e máximos bem como o respectivo desvio padrão da média e coeficiente de variação das depressões obtidas. Já no Anexo 7A encontra-se a análise de variância dos dados obtidos. Observa-se que não encontrou diferença estatística, a 5% de significância entre os vernizes nitrocelulósico e poliuretânico.

Tabela 18 Valores mínimo, médio, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação das depressões do ensaio de abrasividade nos diferentes vernizes

Vernizes	Depressões de abrasividade (mm)			DP (mm)	CV (%)
	Mínimo	Média	Máximo		
Nitrocelulósico	0,075	0,102	0,158	0,03	26,6
Poliuretânico	0,065	0,09	0,2	0,02	25,0

Em que: DP = Desvio padrão e CV = Coeficiente de variação

Silva et al. (2010) avaliando a qualidade do acabamento de verniz nitrocelulósicos em madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Toona ciliata* M. Roemer verificaram que os valores de depressões obtidos pelo teste de abrasividade foram de 0,054 e 0,060 mm, respectivamente. Dessa forma a depressão média obtida nos corpos de prova de madeira de *Coffea arabica* revestidos com o verniz nitrocelulósico foi maior do que o encontrado nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Toona ciliata*.

Depressões de abrasividade com grandes magnitudes para a madeira de *Coffea arabica* podem estar relacionadas à ancoragem entre o verniz e a superfície da madeira. Segundo Watai (1995), a preparação da superfície é de primordial importância no acabamento da madeira. Normalmente, superfícies de qualidade devem apresentar baixa rugosidade, poucos defeitos e ausência de impurezas. Esses fatores estão intimamente correlacionados com o material a ser utilizado e com os parâmetros de usinagem.

4.6.4 Espessura da camada seca

As espessuras médias da camada seca de vernizes nitrocelulósico e poliuretânico obtidas sobre a madeira de *Coffea arabica* foram de 35,6 e 47,6 μm , respectivamente.

Na Tabela 19 encontram-se os valores mínimos, médios e máximos, bem como o respectivo desvio padrão da média e coeficiente de variação das espessuras mensuradas. Já no Anexo 8A encontra-se a análise de variância dos dados obtidos. Observa-se que houve diferença estatística, a 5% de significância entre os vernizes nitrocelulósico e poliuretânico.

Tabela 19 Valores mínimo, médio, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação das espessuras da camada seca obtidos para diferentes vernizes

Vernizes	Valores das espessuras (μm)			DP (μm)	CV (%)
	Mínimo	Média	Máximo		
Nitrocelulósico	50,56	55,37	65,89	5,08	9,2
Poliuretânico	83,00	85,24	89,20	2,82	3,3

Em que: DP = Desvio padrão e CV = Coeficiente de variação

De acordo com Watai (1995) para obter um acabamento resistente à água ou que possua características eficientes para proteger a madeira ao inchamento pela absorção de umidade da atmosfera, o filme de verniz deve possuir uma espessura mínima de 50 μm . Os valores médios de espessura da camada seca encontrados neste trabalho estão dentro da faixa mínima. Vale ressaltar ainda que as proteções superficiais como é o caso dos vernizes supostamente impermeáveis, dificilmente impedem a total absorção ou perda de água, uma vez que há regiões da madeira com pintura deficiente, ocorrendo então, o processo de inchamento e contração da madeira. Outro fator a ser levado em consideração é que a elevada umidade, principalmente acima do ponto de saturação das fibras é prejudicial ao

acabamento, o que pode ocasionar uma baixa qualidade do produto final (SENAI, 1995).

Nogueira (2010) avaliando a qualidade do acabamento de verniz poliuretânico em madeira de *Toona ciliata* verificou que o valor médio de espessura da camada seca obtido foi de 65,8 μm , sendo esse valor inferior ao obtido pelo verniz poliuretânico aplicado sobre a madeira de *Coffea arabica* que foi de 85,2 μm .

5 CONCLUSÕES

- ✓ O melhor ajuste para obter menor torque mecânico e menor consumo de energia cortando longitudinalmente (0° - 90°) madeira de *Coffea arabica* foi utilizando serra circular de 300 mm de diâmetro e rotação de 3500 rpm.
- ✓ O melhor ajuste para obter menor torque mecânico e menor consumo de energia cortando transversalmente (90° - 0°) madeira de *Coffea arabica* foi utilizando serra circular de 300 mm de diâmetro e rotação de 3000 rpm.
- ✓ A operação de aplainamento apresentou o melhor ajuste de corte quando utilizou-se rotação de 3600 ou 4000 rpm e velocidade de avanço de $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.
- ✓ A qualidade da superfície usinada com as rotações de 3600 e 4000 rpm e velocidade de avanço de $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ foi considerada satisfatória com pequenos levantamentos de fibras, baixos valores de avanço por dente (fz) e rugosidade Ra e Rz.
- ✓ A qualidade da superfície usinada com a rotação de 2400 rpm e velocidade de avanço de $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ foi considerada regular com pequeno a médio levantamento e arrancamento de fibras.
- ✓ Os corpos de prova usinados com rotação de 2400 rpm e velocidade de avanço de $6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ apresentaram baixos valores de avanço por dente e rugosidade mediana.
- ✓ O verniz poliuretânico apresentou maior resistência ao risco, maior valor de brilho e maior espessura da camada seca sobre a madeira de *Coffea arabica*.
- ✓ O ensaio de abrasividade não apresentou diferença estatística entre os vernizes nitrocelulósico e poliuretânico.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard method for conducting machining tests of wood and wood base materials:** ASTM D 1666-87. Philadelphia, 1995. 19 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ. **História do café.** Disponível em: <<http://www.abic.com.br>>. Acesso em: 1 jun. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DO MOBILIÁRIO. Valorização do designer brasileiro. **Revista da Associação Brasileira das Indústrias dos Mobiliários**, São Paulo, n. 9, p. 55-63, maio 2009.

BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor.** 1999. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BONDUELLE, A. Usinagem, material de corte e desgaste do gume. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 64, p. 80-86, maio 2002.

_____. Usinagem, qualidade e custo. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 61, p. 82-86, nov. 2001.

BRAGA, P. P. C. **Análise da superfície usinada de madeiras por meio de rugosímetro de arraste.** 2008. 47 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café de 2010.** Brasília, 2010. 17 p. Apostila. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/101214114758boletim_cafe_dezembro2010.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2011.

DEFELSKO. **Instruction manual PosiTector 200:** ultrasonic coating thickness gage. New York, 2006. 19 p. Apostila.

DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4760:** form deviations: concepts, classification system. Berlin: Beut, 1982. 60 p.

DOWNES, G. M. A. **Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties.** Collingwood: CSIRO, 1997. 132 p.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2007. 250 p.

FREUD, S. **Freud catalogo generale**. London: The British Council, 1998. 207 p.

GONÇALVES, M. T. T. Características de ferramentas de corte. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 59, 2001. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/artigos/serras57.rar>>. Acesso em: 10 nov. 2010.

_____. **Processamento da madeira**. Bauru: USC, 2000. 242 p. Apostila.

GONÇALVES, M. T. T.; RUFFINO, R. T. Mecanismo de formação do cavaco na usinagem da madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1993, São Carlos. **Anais...** São Carlos: EBRAMEN, 1993. 1 CD-ROM.

GUIMARÃES, M. A. M. **Avaliação de superfícies usinadas em madeira de *Eucalyptus grandis***. 2005. 52 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; SOUZA, C. A. S. **Cafecultura**. Lavras: UFLA, 2002. 317 p.

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

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. **List of microscopic features for hardwood identification**. IAWA Bulletin, Leiden, v.10, n.3, p.219-332, 1989.

KOCH, P. Utilization of hardwoods growing on southern pines sites. **Agriculture Handbook**, Washington, v. 2, n. 605, p. 1687-2281, June 1985.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. J. **Principles of wood science and technology**. New York: Springer Verlag, 1984. v. 1, 592 p.

LEITZ. **Leitz Lexikon**. Unterschneidheim, 2001. 150 p.

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

MARTINS, M. **Ensaios de simulação de uso em pisos de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell, *Eucalyptus microcorys* F. Muell e *Corymbia maculata* Hook.** 2008. 48 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

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

MELO, J. E.; CORADIN, V. T. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1990. 1 CD-ROM.

NÉRI, A. C. **Medidas de forças de corte na madeira de eucalipto.** 1998. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1988.

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

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

NOGUEIRA, M. O. G. **Madeira de *Toona ciliata* M. Roem:** análise da superfície usinada e acabada. 2010. 41 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

OLIVEIRA, G. M. V. **Sistema de monitoramento de parâmetros de usinagem da madeira, em tempo real.** 2008. 58 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

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

PEREIRA, M. A. **Confecção de móveis com a madeira de *Coffea arabica* L.** 2008. 58 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

REVAL SERRAS E FERRAMENTAS PARA MADEIRA. **Formatos de dentes e aplicações**. Caxias do Sul, 2009. Disponível em: <<http://www.revalserras.com.br/>>. Acesso em: 10 set. 2010.

SANDVIK, S. **The handbook**: production, use and maintenance of wood band saw blades. Sandviken: Sandvik Steel, 1999. 30 p.

SANTOS, J. C. **Análise do comportamento das forças em função dos parâmetros de corte na usinagem de madeiras**. 1999. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

SCHULZ, H. High speed milling machines. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA, USINAGEM COM ALTÍSSIMA VELOCIDADE DE CORTE, 1., 1996, Santa Bárbara d'Oeste. **Anais...** Piracicaba: UNIMEP, 1996. 1 CD-ROM.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Acabador de móveis**. Ubá: CFP/JAGS, 1995. 29 p.

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

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

_____. Parâmetros de qualidade da usinagem para determinação dos diferentes usos da madeira de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 1, p. 75-83, jan./mar. 2009.

_____. **Preparação de superfícies de madeira e derivados para receber acabamento**. Lavras: UFLA, 1999. 26 p. (Boletim Agropecuário, 28).

_____. **Produtos utilizados no setor de acabamento de móveis de madeira:** características e técnicas de aplicação. Lavras: UFLA, 2002. 27 p. (Boletim Técnico, 35).

_____. Qualificação da superfície usinada em madeiras de *Eucalyptus grandis* W. Hill Maiden, *Toona ciliata* M. Roemer e *Coffea arabica* L. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 8, p. 15-22, jul. 2010. Suplemento.

_____. Utilização de rugosímetro na qualificação de superfícies usinadas em madeiras de *Eucalyptus* sp. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Pedro: EBRAMEN, 2006. 1 CD-ROM.

SORAGI, L. C. **Qualidade de superfícies usinadas em madeira de *Toona ciliata* M. Roem.** 2009. 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

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.

STEWART, H. A.; POLAK, D. J. Relating specific gravity and mechanical properties of hardwoods to machining defects. **Forest Products Journal**, Madison, v. 35, n. 10, p. 69-72, 1975.

TAYLOR HOBSON. **Surtronic 3+ operating instructions.** Disponível em: <<http://www.taylorhobson.com.br/detalhes.asp?linha=1&categ=1>>. Acesso em: 25 out. 2010.

WATAI, L. T. **Tecnologia básica em acabamentos de madeiras.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 103 p.

WEG. **Inversores de frequência:** CFW-08. Florianópolis, 2008. Disponível em: <<http://www.weg.net/files/products/4-2183.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2010.

WEISSENSTEIN, C. Usinagem, condições da ferramenta decide bom acabamento. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 57, p. 30-32, 2000.

WILLIAMS, R. S.; KNAEBE, M. T.; FEIST, W. C. Finishes for exterior wood: selection, application, and maintenance. **Forest Products Society**, Madison, v. 43, n. 10, p. 7-10, Oct. 1996.

ANEXOS

		Página
ANEXO 1A	Resumo da análise de variância para o torque mecânico no corte longitudinal em função das diferentes rotações e diferentes diâmetros das serras	64
ANEXO 2A	Resumo da análise de variância para o torque mecânico no corte transversal em função das diferentes rotações e diferentes diâmetros das serras.	64
ANEXO 3A	Resumo da análise de variância para o parâmetro de rugosidade Ra na operação de desempenho em função das diferentes rotações utilizadas.	64
ANEXO 4A	Resumo da análise de variância para o parâmetro de rugosidade Rz na operação de desempenho em função das diferentes rotações utilizadas	64
ANEXO 5A	Resumo da análise de variância para a dureza em função dos diferentes tipos de vernizes	65
ANEXO 6A	Resumo da análise de variância para o brilho em função dos diferentes tipos de vernizes	65
ANEXO 7A	Resumo da análise de variância para a abrasividade em função dos diferentes tipos de vernizes	65
ANEXO 8A	Resumo da análise de variância para espessura da camada seca em função dos diferentes tipos de vernizes	65

ANEXO 1A Resumo da análise de variância para o torque mecânico no corte longitudinal em função das diferentes rotações e diferentes diâmetros das serras

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio
Rotação	2	200,7644*
Diâmetro	1	64,3056*
Rotação*Diâmetro	2	4,5399 ^{ns}
Erro	54	1,9798
Total corrigido	59	

* - Significativo a 5% de significância

^{ns} – não significativo a 5% de significância

ANEXO 2A Resumo da análise de variância para o torque mecânico no corte transversal em função das diferentes rotações e diferentes diâmetros das serras.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio
Rotação	2	69,6608*
Diâmetro	1	64,0702*
Rotação*Diâmetro	2	1,1329 ^{ns}
Erro	48	1,1383
Total corrigido	53	

* - Significativo a 5% de significância

^{ns} – não significativo a 5% de significância

ANEXO 3A Resumo da análise de variância para o parâmetro de rugosidade Ra na operação de desempenho em função das diferentes rotações utilizadas.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio
Tratamentos	2	180,70000*
Resíduo	87	5,4333221
Total	89	

* - Significativo a 5% de significância

ANEXO 4A Resumo da análise de variância para o parâmetro de rugosidade Rz na operação de desempenho em função das diferentes rotações utilizadas.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio
Tratamentos	2	3822,70000*
Resíduo	87	97,364368
Total	89	

* - Significativo a 5% de significância

ANEXO 5A Resumo da análise de variância para a dureza em função dos diferentes tipos de vernizes

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio
Vernizes	1	1640250*
Resíduo	8	45875
Total	9	

* - Significativo a 5% de significância

ANEXO 6A Resumo da análise de variância para o brilho em função dos diferentes tipos de vernizes

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio
Vernizes	1	357,604000*
Resíduo	8	11,610000
Total	9	

* - Significativo a 5% de significância

ANEXO 7A Resumo da análise de variância para a abrasividade em função dos diferentes tipos de vernizes

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio
Vernizes	1	0,000840 ^{ns}
Resíduo	25	0,000572
Total	26	

^{ns} – não significativo a 5% de significância

ANEXO 8A Resumo da análise de variância para espessura da camada seca em função dos diferentes tipos de vernizes

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado Médio
Vernizes	1	2868,010724*
Resíduo	12	19,844914
Total	13	

* - Significativo a 5% de significância