

CLEVERSON PINHEIRO

EFEITOS DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NO FRESAMENTO
DE *Pinus elliottii*

Guaratinguetá
2014

CLEVERSON PINHEIRO

**EFEITOS DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA NO FRESAMENTO
DE *Pinus elliottii***

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

Guaratinguetá
2014

Pinheiro, Cleverson

P654 Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de
e Pinus Elliottii / Cleverson Pinheiro. – Guaratinguetá :
[s.n.], 2014

122 f. : il.

Bibliografia: f. 118-122

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

1. Umidade 2. Usinagem I. Título

CDU 621.9

CLEVERSON PINHEIRO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP/FEG


Prof. Dr. MARCOS VALERIO RIBEIRO
UNESP/FEG


Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBURCIO GONÇALVES
UNESP/ITAPEVA

Junho de 2014

DADOS CURRICULARES

CLEVERSON PINHEIRO

NASCIMENTO	19.06.1983 – ITARARÉ / SP
FILIAÇÃO	Vicente Pinheiro Ivonete Marques Pinheiro
2004/2008	Curso de Graduação Engenharia Industrial Madeireira - Universidade Estadual Paulista.
2012/2014	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

De modo especial, à minha esposa Simone,
que foi a grande incentivadora para que eu trilhasse este
caminho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador e amigo, *Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves* que sempre me orientou e incentivou para que eu pudesse fazer o melhor trabalho.

À minha *esposa Simone*, que é a fonte de inspiração colocada por Deus em minha vida, que sempre está ao meu lado.

Aos meus *pais, irmãos e amigos* que sempre estiveram torcendo pelas minhas conquistas.

Aos professores *Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves e Ricardo Marques Barreiros*, pelas dicas no planejamento dos ensaios.

Aos colegas, professores e técnicos do *Campus* da UNESP de Itapeva e de Guaratinguetá, que contribuíram para o bom andamento e conclusão deste estudo, em especial aos professores *Ricardo Marques Barreiros, Gustavo Ventorim, Elen Aparecida Martines Morales* e aos técnicos *Anderson Machado dos Santos, David José Tenório de Aquino, Tiago Matos Andres, Waldecir de Araujo* do campus da UNESP de Itapeva, por disponibilizar, o uso de seus laboratórios e equipamentos, bem como na contribuição direta em algumas etapas do trabalho.

Ao colega Paulo Roberto Gomes Alves da UNESP de Itapeva pela ajuda com as fotos nos ensaios de usinagem.

Aos professores titulares e suplentes nas bancas de qualificação e de exame de dissertação: *Marcos Valério Ribeiro, Ivaldo de Domênico Valarelli, Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves e José Vitor Candido de Souza*.

"Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível."

São Francisco de Assis

Este trabalho contou com apoio da seguinte entidade:

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

PINHEIRO, C. **Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de *Pinus elliottii***. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

Inúmeros fatores influenciam a usinagem da madeira, entre eles destacam-se os parâmetros de usinagem e as propriedades deste material, tendo a análise da rugosidade como a principal ferramenta para a determinação destas influências. Apesar do avanço do conhecimento sobre a usinagem da madeira, ainda existe pouca informação sobre a influência destes fatores e suas interações no processo de usinagem, visto que algumas indústrias madeireiras se deparam com questões referentes à redução de retrabalhos que visam à correção da rugosidade das peças de madeiras usinadas. Com isto, objetivou-se analisar a influência do teor de umidade da madeira de *Pinus elliottii*, de seus anéis de crescimento e dos sentidos de corte, no processo de fresamento cilíndrico tangencial, utilizando ferramenta de metal duro. Foram levantados dados de qualidade superficial medidos em termos dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t , obtidos pelo método de apalpamento mecânico, bem como dados de potência consumida e emissão sonora gerados pelo processo de usinagem. O planejamento e análise dos experimentos se basearam na metodologia de Taguchi, definindo três níveis de teor de umidade (U) em % ($8 \leq U < 12$; $12 \leq U < 16$; $16 \leq U < 20$), dois níveis para os anéis de crescimento (lenho inicial e lenho tardio) e dois níveis para o sentido de corte (concordante e discordante). Os dados de potência consumida e emissão sonora foram analisados somente em termos do sentido de corte e do teor de umidade. A combinação dos níveis dos fatores que trouxeram os melhores resultados, em termos de qualidade superficial, emissão sonora e potência consumida foi o sentido de corte discordante, teor de umidade entre 8 e 12 % e lenho tardio. Foram determinadas diferenças estatisticamente significativas entre os níveis dos três fatores de entrada analisados pelo parâmetro de rugosidade R_t . Através do parâmetro R_a foi determinada diferença estatisticamente significativa apenas para os níveis do fator sentido de corte. Pela emissão sonora, ocorreram diferenças estatisticamente significativas para os níveis dos dois fatores analisados (teor de umidade e sentido de corte). Não ocorreram diferenças estatisticamente significativas entre os níveis dos fatores teor de umidade e sentido de corte, quando analisados os dados de potência consumida.

Palavras chave: Rugosidade, Umidade, Usinagem, Taguchi, Anéis de crescimento.

PINHEIRO, C. **Effects of moisture content of wood in the milling of *Pinus elliottii***. 2014. 122 f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

Numerous factors influence the machining of wood, among them we highlight the machining parameters and the properties of this material, having the analysis of roughness as the primary tool for determining these influences. Despite the advancement of knowledge about machining of wood, there is still little information about the influence of these factors and their interactions in the machining process, since some timber industries they run into issues relating to the reduction of rework aimed at correction of roughness of machined wood parts. With this, the objective of analyzing the influence of the moisture content of the wood of *Pinus elliottii*, their growth rings and the machining direction in the process cutting cylindrical milling tangential, using hard metal tool. Were raised surface quality data measured in terms of roughness parameters Ra and Rt, obtained by the method of mechanical probing move, as well as power consumption and noise emission generated by the cutting process. Planning and analysis of the experiments were based on Taguchi methodology by defining three levels of moisture content (U) in % ($8 \leq U \leq 12$; $12 < U < 16$; $16 \leq U < 20$), two levels to the growth rings (initial wood and latewood) and two levels to the cutting direction (up milling and down milling). The data in power consumed and noise emission were analyzed only in terms of the sense of court and the moisture content. The combination of the levels of the factors that brought the best results, in terms of surface quality, noise emission and power consumed has been the machining direction up milling, moisture content between 8 and 12 % and latewood. Statistically significant differences were determined between the levels of the three input factors analyzed by the roughness parameter Rt. Through parameter Ra was determined statistically meaningful only for cutting direction factor levels. By noise emission, statistically significant differences occurred for two-factor analyzed levels (moisture content and the cutting direction). No statistically significant differences between levels of moisture content and the cutting direction, when analyzed the data of power consumed.

Keywords: Roughness, moisture content, machining, Taguchi, Growth rings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ângulos da ferramenta - fresamento.....	33
Figura 2 - Relação entre ângulo de corte e materiais de fabricação das ferramentas para usinagem de madeiras.....	34
Figura 3 – Relações das variáveis de entrada e saída que podem ser estudadas em um processo de fresamento.....	35
Figura 4 - (a) Fresamento frontal periférico; (b) Fresamento plano periférico ou tangencial..	36
Figura 5 - (a) Fresamento discordante; (b) Fresamento concordante.....	36
Figura 6 – Movimentos, direções e velocidades da ferramenta e da peça.....	39
Figura 7 - Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo de corte (f_e) no fresamento tangencial discordante.....	40
Figura 8 - Profundidade ou largura de usinagem (a_p) e penetração de trabalho (a_e) nos fresamentos: a) no periférico discordante, b) frontal (faceamento) e c) topo/frontal com fresa de topo.	41
Figura 9 - Principais tipos de corte ortogonal.....	43
Figura 10 - Componentes de força atuantes no corte ortogonal.	44
Figura 11 - a) Grã direita ou regular, b) Grã irregular espiralada e c) Grã irregular entrecruzada.....	50
Figura 12 - Seção transversal de um tronco de Pinus taeda e a identificação dos lenhos inicial e tardio.	52
Figura 13 – Distinção entre as regiões de madeira juvenil e adulta.	52
Figura 14 - Relação de densidade e teor de umidade da madeira.....	54
Figura 15 - Possíveis formas de água existentes na madeira.....	59
Figura 16 - Teor de umidade de equilíbrio da madeira (linhas no plano) em função da umidade relativa e temperatura.....	60
Figura 17 - Três eixos principais de madeira com relação à direção da grã e anéis de crescimento.....	63
Figura 18 - Elementos que compõe a superfície.	65
Figura 19 - Comprimentos para a avaliação da rugosidade.....	66
Figura 20 - Representação do parâmetro R_a	67
Figura 21 - Representação do parâmetro R_t	67
Figura 22 - Perfil teórico R_t de uma superfície usinada por fresamento tangencial.	68

Figura 23 - a) Ilustração do efeito Hall, Machado et al. (2011) e b) Sensor de efeito Hall utilizado.	72
Figura 24 - Esquema da formação da escala em decibels.	73
Figura 25 - a) Níveis de ruído em ambientes; b) Alguns exemplos de intensidade sonora.....	74
Figura 26 - a) Ruído do tipo contínuo; b) Ruído do tipo flutuante; c) Ruído do tipo impacto.	75
Figura 27 - Tábuas selecionadas para o estudo.	78
Figura 28 - Demarcação das regiões sem defeito nas tábuas, para a retirada das amostras.	79
Figura 29 - (a) Esquadrejadeira; (b) Obtenção do comprimento de 990 mm; (c) Obtenção da espessura de 23 mm; (d) Desempeno das peças para posterior definição da largura de 145 mm, na desgrossadeira.	80
Figura 30 - (a) Seccionadora utilizada para a confecção dos corpos de provas; (b) Confecção dos corpos de prova e (c) dimensões dos corpos de prova (315 x 65 x 23) mm.	81
Figura 31 - (a) Corpos de prova com a massa inicial determinada; (b) Corpos de prova em estufa para posterior determinação da massa seca.....	81
Figura 32 - (a) Corpos de prova enumerados para a determinação da densidade; (b) Corpos de prova na câmara climatizadora e (c) balança e paquímetro utilizados na determinação da densidade aparente.....	82
Figura 33 - (a) determinação massa da amostra saturada imersa em água (m_{im}); (b) determinação da massa das amostras saturadas (m_v) e (c) secagem dos corpos de prova em estufa, para posterior determinação da massa seca (m_s).	84
Figura 34 - (a) Climatizadoras utilizadas na obtenção das classes de umidade; (b) Display da climatizadora indicando a temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente.	84
Figura 35 - Medição do teor de umidade utilizando medidor capacitivo.	85
Figura 36 - Centro de usinagem: (a) base portante; (b) montante monobloco móvel; (c) grupo operador; (d) prancha que suporta o cabeçote de trabalho; (e) ventosas de fixação das peças a serem usinadas e (f) unidade de operações e estruturação de programas.....	86
Figura 37 - Centro de usinagem: (a) grupo operador e (b) cabeçote de usinagem.	87
Figura 38 - Fresa de metal duro com cortes helicoidais para acabamento. Identificação de suas dimensões básicas (D, L, I e S) e ângulos (de hélice, de cunha, de folga e de saída).	87
Figura 39 - Corpos de prova da classe de umidade 1.	88
Figura 40 - (a) suporte adaptado para fixação dos corpos de prova; (b) colocação do corpo de prova no suporte; (c) corpo de prova pronto para ser usinado.	88
Figura 41 - (a) programa de usinagem; (b) usinagem de um corpo de prova; (c) trajetória da ferramenta.....	90

Figura 42 - (a) corpo de prova após a usinagem; (b) corpo de prova com os sentidos de corte e as repetições.....	90
Figura 43 - (a) transformador de corrente; (b) sensor de efeito Hall.....	91
Figura 44 - (a) computador para aquisição de dados; (b) módulo de canais; (c) placa de aquisição de dados e (d) tela do software LabView, com o sinal sendo coletado.....	92
Figura 45 - (a) medidor de nível de pressão de som portátil apresentando o valor do nível sonoro em decibels; (b) medição do ruído sonoro em frente ao centro de usinagem.....	93
Figura 46 - Medição da rugosidade dos corpos de prova após a usinagem.....	93
Figura 47- Modelo de gráfico para análises em relação às médias.	95
Figura 48 - Efeitos principais dos fatores sobre: (a) as médias e (b) a razão S/N, para a rugosidade Ra.	103
Figura 49 - Efeitos principais dos fatores sobre: (a) as médias e (b) a razão S/N, para a rugosidade Rt.....	104
Figura 50 - Interação entre o sentido de corte e anel de crescimento para as médias da rugosidade Ra.	107
Figura 51 - Interação entre o sentido de corte e anel de crescimento para as médias da rugosidade Rt.....	107
Figura 52 - Interação entre o sentido de corte e o teor de umidade para as médias da rugosidade Ra.	108
Figura 53 - Interação entre o sentido de corte e o teor de umidade para as médias da rugosidade Rt.....	108
Figura 54 - Interação entre o anel de crescimento e o teor de umidade para as médias da rugosidade Ra.	109
Figura 55 - Interação entre o anel de crescimento e o teor de umidade para as médias da rugosidade Rt.....	109
Figura 56 - Efeitos principais dos fatores sobre: (a) as médias e (b) a razão S/N, para a potência consumida.	114
Figura 57- Efeitos principais dos fatores sobre: (a) as médias e (b) a razão S/N, para a emissão sonora.	115

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos materiais duros em termos da aplicação na usinagem de materiais.	31
Quadro 2 - Materiais para ferramenta de usinagem de madeira em função do tipo de material a ser usinado.	32
Quadro 3 - Propriedades mecânicas de algumas madeiras.	64
Quadro 4 - Comprimento de amostragem (“cut-off”) recomendados para perfis de usinagem não periódicos.	66
Quadro 5 - Padrões dos medidores de ruído conforme a aplicação.	76
Quadro 6 - Valores de umidade relativa do ar e temperatura utilizados para o estabelecimento da umidade de equilíbrio da madeira desejada.	85
Quadro 7 - Valores dos parâmetros utilizados nos ensaios de usinagem.	89
Quadro 8 - Fatores de entrada e seus níveis para a análise da qualidade superficial.	96
Quadro 9 - Fatores de entrada e seus níveis para a análise da potência consumida e emissão sonora.	96
Quadro 10 - Matriz ortogonal de dados experimentais L 36 ($3^1 \times 2^2$), organizada pelos níveis de cada fator.	97
Quadro 11 - Matriz ortogonal de dados experimentais L 18 ($3^1 \times 2^1$), organizada pelos níveis de cada fator.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Exemplo de matrizes ortogonais internas e externas para o método de Taguchi.....	95
Tabela 2 - Densidade aparente a 12 %, densidade básica e teor de umidade para o <i>Pinus elliottii</i>	99
Tabela 3 – Estatística descritiva para a rugosidade Ra.....	100
Tabela 4 - Estatística descritiva para a rugosidade Rt.	102
Tabela 5 - Análise de variância para as médias (Ra e Rt).	110
Tabela 6 - Análise de variância para as razões S/N (Ra e Rt).	111
Tabela 7 - Estatística descritiva para a emissão sonora.....	112
Tabela 8 - Estatística descritiva para a potência consumida.	112
Tabela 9 - Análise de variância para as médias da potência consumida e emissão sonora....	116
Tabela 10 - Análise de variância para as razões S/N para a potência consumida e emissão sonora.	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMCI	-	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	-	American National Standard Institute
ANOVA	-	Análise de Variância
ABRAF	-	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
CNC	-	Comando Numérico Computadorizado
CV	-	Coeficiente de Variação
DP	-	Desvio Padrão
GL	-	Graus de Liberdade
IEC	-	International Electrotechnical Commission
ISO	-	International Organization for Standardization
IPT	-	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
M	-	Sistema da Linha Média
PMVA	-	Produtos de Maior Valor Agregado
PSF	-	Ponto de Saturação das Fibras
NBR	-	Norma Brasileira Registrada
NIS	-	Nível de Intensidade Sonora
SIL	-	Sound Intesity Level
SQ	-	Soma de Quadrados
SQM	-	Soma de Quadrados Médios
UE	-	Umidade de Equilíbrio

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	profundidade ou a largura de usinagem	[mm]
a_e	penetração de trabalho	[mm]
$\cos \varphi$	fator de potência	-
D_a	densidade da água a 25°C	[kg.m ⁻³]
D_{ap}	densidade aparente	[kg.m ⁻³]
$D_{ap(12\%)}$	densidade da madeira a 12% de umidade	[kg.m ⁻³]
D_b	densidade básica	[kg.m ⁻³]
f	avanço por volta	[mm/rev.]
f_z	avanço por dente	[mm]
f_c	avanço de corte	[mm]
f_e	efetivo de corte	[mm]
F_n	força normal	[N]
F_p	força paralela	[N]
F_a	força de atrito	[N]
F_l	força lateral	[N]
i	corrente alternada de uma das fases	[A]
I	intensidade sonora de um som	[W.cm ⁻²]
l_e	comprimento de amostragem (cut-off ou λ_c)	[mm]
l_m	comprimento de medição	[mm]
l_t	comprimento total de medição	[mm]
l_v	comprimento para atingir a velocidade de medição do apalpador	[mm]
l_n	comprimento para parada do apalpador	[mm]
$m_{12\%}$	massa de amostra a 12% de umidade	[kg]
m_i	massa inicial da amostra	[kg]
m_s	massa da amostra seca	[kg]
m_f	massa final da amostra	[kg]
m_{im}	massa da amostra imersa em água	[g]
m_v	massa da amostra saturada em água	[kg]
N	Força normal de atrito	[N]
P_{fe}	plano de trabalho	-
P_{ap3F}	potência aparente para motores trifásicos	[W]
R_a	rugosidade média	[μ m]
R	resultante das componentes das forças normal e paralela	[N]

R_t	máxima distância pico a vale	[μm]
R_z	média de altura de pico-a-vale	[μm]
S/N	razão sinal ruído	-
$U_{(\%)}$	porcentagem de umidade	-
U_{cc}	Tensão de corrente continua	[V]
U	tensão de uma das fases	[V]
$V_{12\%}$	volume da amostra a 12% de umidade	[m^3]
V_c	velocidade de corte	[m.s^{-1}]
V_f	velocidade de avanço	[m.min.^{-1}]
V_e	velocidade efetiva de corte	[m.min.^{-1}]
γ_f	ângulo de saída lateral da ferramenta	[graus]
α_f	ângulo de folga lateral da ferramenta	[graus]
β_f	ângulo de cunha lateral da ferramenta	[graus]
h	espessura de corte	[mm]
h'	espessura do cavaco	[mm]
w	largura de corte	[mm]
φ	direção de avanço	[graus]
η	ângulo da velocidade efetiva de corte	[graus]
ρ	ângulo da força resultante	[graus]
λ	ângulo entre a R e a força normal de atrito N	[graus]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Motivações para a pesquisa	22
1.2 Objetivos.....	23
1.2.1 Objetivo Geral	23
1.2.2 Objetivos específicos.....	23
1.3 Premissas da pesquisa.....	23
1.4 Justificativa da pesquisa	24
1.5 Originalidade do estudo.....	24
1.6 Delimitação do assunto da pesquisa	25
1.7 Benefícios da pesquisa.....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 Ferramenta de corte e grandezas de usinagem	28
2.1.1 Composição e características do material para ferramentas de usinagem.....	28
2.1.2 Geometria das ferramentas de usinagem	32
2.1.3 Grandezas físicas no processo de fresamento	34
2.1.3.1 Movimentos, direções e velocidades em fresamento.	37
2.1.3.2 Grandezas de corte em fresamento.....	39
2.1.3.3 Fresamento tangencial com fresas de dentes helicoidais.....	41
2.2 Sistemas de corte para usinagem da madeira	42
2.3 CARACTERÍSTICAS DA INTERAÇÃO ENTRE A FERRAMENTA DE CORTE E A PEÇA A SER USINADA.....	44
2.4 Propriedades da madeira.....	46
2.4.1 Características da madeira de pinus.....	48
2.4.2 Propriedades anatômicas da madeira.....	48
2.4.3 Grãos e texturas	49
2.4.4 Lenho inicial e lenho tardio	50
2.4.5 Madeira Juvenil e madeira adulta	52
2.4.6 Principais propriedades físicas da madeira.....	53
2.4.6.1 Densidade	53
2.4.6.2 Umidade da madeira.....	55
2.4.7 Propriedades mecânicas da madeira	62
2.5 Determinação do Acabamento superficial nas operações de usinagem	64

2.5.1 Parâmetros para a quantificação da rugosidade.....	65
2.5.2 Estudos atuais sobre a quantificação da rugosidade na madeira	68
2.6 Medição da potência em usinagem.....	71
2.7 Emissão sonora	72
2.8 Projeto de experimentos	76
3 MATERIAIS E MÉTODO	78
3.1 Matéria prima e preparação dos corpos de prova	78
3.2 Determinação do teor de umidade	81
3.3 Determinação das densidades aparente e básica da madeira	82
3.3.1 Determinação da densidade aparente	82
3.3.2 Determinação da densidade básica	83
3.4 climatização dos corpos de prova destinados ao fresamento	84
3.5 Equipamentos e procedimentos utilizados no ensaio de usinagem	85
3.5.1 Centro de usinagem	86
3.5.2 Captação da variação de corrente elétrica para determinação da potência consumida ...	91
3.5.3 Coleta e armazenamento de dados de corrente elétrica	91
3.5.4 Coleta de dados da variação de nível sonoro durante a usinagem.....	93
3.6 Determinação da rugosidade da madeira usinada.....	93
3.7 Planejamento experimental PELO MÉTODO DE TAGUCHI	94
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
4.1 Densidade básica, densidade aparente e teor de umidade.	99
4.2 ANÁLISES DE RESULTADOS ESTATÍSTICOS DESCRITIVOS para a rugosidade Ra e Rt.....	99
4.3 Análise do efeito dos fatores na média e na razão S/N para a rugosidade Ra e Rt.	102
4.4 Análise do efeito das interações dos fatores na média e na razão S/N para a rugosidade Ra e Rt.....	106
4.5 Análise de variância (ANOVA) para os efeito dos fatores na média e na razão S/N para a rugosidade Ra e Rt.....	110
4.6 ANÁLISES DE RESULTADOS ESTATÍSTICOS DESCRITIVOS para a potência consumida e emissão sonora	111
4.7 Análise do efeito dos fatores na média e na razão S/N para a potência consumida e emissão sonora.....	113
4.8 Análise de variância (ANOVA) para os efeito dos fatores na média e na razão S/N para potência consumida e emissão sonora.	115

5 CONCLUSÃO	117
6 REFERENCIAS	118

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro caracteriza-se por uma extensa cadeia de produção, gerando uma diversidade de produtos e serviços, compreendendo a produção, a colheita e o transporte de madeira, além do processamento desta matéria prima gerando produtos finais nos segmentos industriais de papel e celulose, painéis de madeira industrializada, madeira processada mecanicamente, siderurgia a carvão vegetal e biomassa, entre outros tantos produtos e aplicações possíveis para este material.

Segundo o estudo setorial da Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2009) nos dias atuais, a maior parcela da madeira serrada produzida no país ainda é baseada em espécies de folhosas tropicais (Região Amazônica). No entanto as espécies oriundas de reflorestamentos (*Pinus* e *Eucalyptus*) detêm uma parcela expressiva dos volumes de produção no Brasil e têm crescido continuamente.

As primeiras espécies de pinus que foram introduzidas e cultivadas no Brasil foram *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, originárias dos Estados Unidos e adaptados ao clima das regiões Sul e Sudeste, onde ocorrem os plantios comerciais dessas espécies. A partir da década de 1960, iniciaram-se as experimentações com espécies tropicais como *P. caribaea*, *P. oocarpa*, *P. tecunumanii*, *P. maximinoi* e *P. patula*, possibilitando a expansão da cultura de *Pinus spp.* em todo o Brasil, usando-se a espécie adequada para cada região ecológica. Até o final da década de 1950, o Instituto Florestal de São Paulo havia testado um total de 55 espécies de pinus (SHIMIZU, 2005).

O *Pinus spp.* tem se destacado pela ampla utilização na fabricação de móveis, chapas, lápis, serrados em geral, molduras, mourões e painéis reconstituídos, por ser uma espécie amplamente disponível, estando presente em sua maioria nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e São Paulo. Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013) do total produzido no Brasil, cerca de 76% das áreas são destinadas a indústria de celulose e papel, 15% vão para a indústria de painéis reconstituídos e madeiras processadas mecanicamente e 9% são utilizados pela indústria siderúrgica.

Segundo Zhong et al. (2013) no Brasil a espécie de *Pinus elliottii*. é amplamente utilizada para a fabricação de móveis e painéis reconstituídos, por ser uma espécie amplamente disponível na região e apresentar propriedades que favorecem sua usinagem. A madeira de pinus é uma conífera, que cresce em muitas variedades e em várias partes do mundo, apresenta textura uniforme, fácil de trabalhar e de bom acabamento. Tem também

alguma resistência contra a retração, inchamento e deformação. O pinus é geralmente de coloração amarelo claro e tem um padrão de grã larga.

Dentro dos produtos de madeira processada mecanicamente, destacam-se a madeira serrada, lâminas, chapas de madeira e produtos de maior valor agregado (PMVA) que incluem pisos de madeiras, portas e janelas, molduras, componentes para móveis, entre outros.

Apesar de todo o avanço na utilização de tecnologias para a fabricação de produtos de maior valor agregado, ainda existe pouca ou nenhuma informação técnico-científica sobre as melhores combinações dos fatores de produção, no que se refere à usinagem do material para a obtenção da qualidade superficial adequada aos mais variados fins. Dentro destas variáveis de processo destaca-se a falta de conhecimento sobre a influência de propriedades físicas e anatômicas da madeira sobre a qualidade superficial, propriedades que aliadas aos outros vários fatores que influenciam o processo de remoção de material pela usinagem, evidenciam as lacunas de conhecimento sobre estes processos, que precisam ser preenchidas.

Algumas indústrias madeireiras, focando na melhoria do processo, se deparam com questões referentes às variáveis que influenciam na qualidade do produto final em um processo de usinagem, como por exemplo, o quanto a rugosidade de uma peça de madeira, após a usinagem é influenciada pela quantidade de água presente nesta ou pelos parâmetros de usinagem, como o sentido de corte. Na combinação destas variáveis podem existir interações que interferem na melhor qualidade superficial após a usinagem e o não entendimento destas relações tem ocasionado grandes complicações e retrabalhos, como por exemplo, no processo de fabricação de molduras a base de madeira, quando pelo aumento da rugosidade, quando surge à necessidade de inserção de etapas no processo para correção das superfícies, aplicando técnicas de lixamentos manuais, que não fazem parte do processo.

1.1 MOTIVAÇÕES PARA A PESQUISA

Na crescente demanda por produtos de qualidade, as empresas são confrontadas com o difícil problema de aumento da produtividade sem comprometer a qualidade. Desta forma a usinagem deve ser capaz de fornecer à indústria da madeira em geral o acabamento necessário à superfície dos produtos, juntamente com a velocidade desejada, menor custo de trabalho. Para Elmas et al. (2011), no ambiente de negócios competitivo atual, estes são os atributos necessários para que uma fábrica venha a sobreviver e prosperar. Com isto gerar informações sobre a rugosidade e a influência da madeira em relação a suas propriedades físicas e

anatômicas sobre a qualidade superficial após um processo de usinagem, contribuirá para a redução dos custos dos processos em operações industriais.

A necessidade de melhoria das indústrias sobre os processos de usinagem em relação a influência dos diferentes fatores e combinação destes, mais especificamente os fatores teor de umidade, anéis de crescimento e sentido de corte no processo de fresamento é a principal motivação deste trabalho, pois entendendo melhor essas variáveis pode-se aumentar a qualidade superficial do produto e diminuir ou eliminar retrabalhos no processo, como por exemplo, a necessidade de lixamento das peças após o processo de usinagem.

1.2 OBJETIVOS

Diante da necessidade de gerar informações científicas e tecnológicas que contribuam para a melhoria da eficiência dos processos de usinagem madeira, na geração de produtos madeireiros de qualidade, são propostos os seguintes objetivos:

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar os efeitos da variação do teor de umidade no fresamento tangencial da madeira de *Pinus elliottii* em centro de usinagem de Comando Numérico Computadorizado (CNC), usando ferramenta de metal duro, analisando a qualidade superficial, a potência consumida e emissão sonora do processo.

1.2.2 Objetivos específicos

Além do fator teor de umidade, objetiva-se avaliar a influência dos seguintes fatores de entrada, e suas interações, na usinagem da madeira por fresamento:

- ✓ Sentido de corte (concordante e discordante);
- ✓ Anéis de crescimento (lenho inicial e tardio).

Apontar as melhores combinações das variáveis de entrada que proporcionem melhor qualidade superficial com a menor variabilidade do processo.

1.3 PREMISSAS DA PESQUISA

Melhorar a compreensão das variáveis de entrada e suas interações na influência do processo de usinagem da madeira através do fresamento, permitindo uma melhor orientação

para a tomada de decisões na fase de planejamento do processo e no momento da fabricação dentro das indústrias madeireiras, garantindo o melhor dimensionamento dos processos de manufatura de produtos de madeira, visando à melhoria destes.

1.4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Na indústria de fabricação de molduras de madeira existem algumas questões práticas e teóricas sobre a usinagem da madeira, quando se trata do surgimento de defeitos superficiais, principalmente a alta rugosidade (arrepimento das fibras), geradas no processo de fresamento da madeira em máquinas denominadas moldureiras. As discussões sobre as principais causas da falta de qualidade na superfície da peça usinada concentram-se nos parâmetros de usinagem e nas características da madeira, bem como no seu teor de umidade e em suas características anatômicas. A falta de um melhor entendimento desta questão tem ocasionado grandes paradas e retrabalhos no processo de fabricação de molduras, quando são inseridas etapas no processo para correção das superfícies com rugosidade acima do aceitável, aplicando lixamento manual, para diminuir a aspereza das peças e muitas vezes preenchendo as falhas, provenientes de lascamento do material, com massas apropriadas, para o posterior lixamento manual.

O contexto apresentado, justifica o foco dado a este trabalho, pois no processo de fabricação de molduras de madeira o teor de umidade pode variar de 8 a 15 %, dependendo de como a madeira foi seca e também da aplicação que será dada a determinado lote, podendo ainda apresentar situações em que o teor de umidade varie de 6 a 18%.

1.5 ORIGINALIDADE DO ESTUDO

O trabalho tem sua originalidade principalmente pelo fato de avaliar a variação do teor de umidade e seus efeitos na usinagem. Na maioria dos estudos fixa-se como o ideal o teor de umidade de 12 % e com base neste valor os demais parâmetros são estudados. No entanto, na prática, existe uma considerável variação de teor de umidade dentro de um lote que será usinado.

Outro ponto a ser debatido é a anatomia da madeira, que para a pinus, após terem sido retirados os defeitos como os nós, bolsas de resinas, etc., restam ainda a diferença entre os lenhos inicial e tardio que podem ocasionar diferenças na qualidade superficial, em termos de rugosidade.

Uma terceira questão se refere ao sentido de corte no fresamento que, pesando em otimização de processo da usinagem em CNC, por exemplo, interfere na questão de tempos de usinagem, pois ao fazer uma usinagem na borda de um painel de madeira, a ferramenta avança usinando no sentido de corte discordante, por exemplo, e retorna usinando no sentido de corte concordante, para não desperdiçar movimento, voltando em vazio.

1.6 DELIMITAÇÃO DO ASSUNTO DA PESQUISA

A pesquisa se limita ao estudo do fresamento concordante/discordante em centro de usinagem CNC com ferramenta de metal duro, da espécie de *Pinus elliottii* em diferentes teores de umidades do material. As peças de madeiras, que originaram os corpos de prova, são provenientes de secagem em estufa de aproximadamente 80 horas, aplicada a fabricação de molduras. Buscando caracterizar os aspectos como qualidade do produto em termos da rugosidade relacionando com as variáveis de entrada envolvidas na usinagem (teor de umidade, sentido de usinagem e anéis de crescimento) para, a partir de resultados de investigações teóricas e práticas, apresentar as considerações sobre as melhores combinações para a busca da produtividade do processo de manufatura.

O estudo também contempla a avaliação da potência consumida e emissão sonora neste tipo de usinagem, considerando os diferentes teores de umidade e o sentido de corte.

O planejamento experimental pelo método de Taguchi foi aplicado visando identificar as melhores combinações para a redução da rugosidade e ao mesmo tempo identificar as melhores condições para a redução da variabilidade do processo.

As demais variáveis do processo de fresamento foram mantidas fixas em um determinado nível e logicamente não fizeram parte das análises e discussões.

A revisão bibliográfica se limitou a levantar os aspectos teóricos para o desenvolvimento do trabalho e para argumentar as discussões e conclusões, por isso não se pretendeu aprofundar os tópicos mais do que o necessário e nem muito menos esgotar o assunto.

1.7 BENEFÍCIOS DA PESQUISA

Os principais benefícios apresentados à comunidade serão a divulgação de conhecimento técnico científico, tanto para a comunidade acadêmica que realiza pesquisas

sobre este material e suas técnicas de processamento, quanto para a comunidade industrial que investe em melhoria da qualidade de produtos e processos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem três aspectos básicos no processo de usinagem, que podem ser objetos de estudos: o material a ser usinado, a ferramenta de corte utilizada na usinagem e como ela realiza a remoção de cavaco e o equipamento responsável pelos movimentos relativos entre ferramenta de corte e material a ser usinado, evidentemente podem ser analisadas as combinações destes três aspectos nos seus diferentes fatores em níveis específicos, resultando em análises mais complexas, porém mais precisas das condições apropriadas de usinagem.

Machado et al. (2011) e Santos e Sales (2007) classificam o processo de usinagem dividindo-o em duas categorias: a convencional onde se enquadram o torneamento, fresamento, furação, aplainamento, mandrilamento, serramento, brochamento, roscamento, retificação, etc. e a não convencional que empregam outras modalidades de energia para remover o material, como o ultra som, laser, plasma, fluxo abrasivo, reações químicas ou eletrolíticas, feixes de elétrons, etc.

Machado et al. (2011) descreve as várias grandezas físicas e suas combinações para a realização do processo de usinagem dos materiais, entre elas estão: os movimentos relativos entre a peça e a aresta cortante, direções dos movimentos que causam diretamente a retirada do cavaco, percursos da ferramenta na peça, velocidades da ferramenta e velocidade de avanço entre a ferramenta e peça, plano de trabalho e ângulos da direção de avanço, ângulo da direção efetiva de corte, avanço por dente, avanço de corte, avanço efetivo de corte, profundidade ou largura de usinagem, penetração de trabalho, penetração de avanço, entre outros. Segundo estes autores as definições destas grandezas são necessárias para o estudo da usinagem.

Devido à quantidade e complexidade dos fatores que estão envolvidos no processo de usinagem, várias pesquisas buscam entender quais fatores mais influenciam na qualidade final do produto acabado, qualidade medida principalmente em termos do perfil de rugosidade obtida, conforme a necessidade de cada produto. Entretanto poucos trabalhos analisam a influencia das interações existentes entre os diferentes fatores no processo de usinagem, que em se tratando da madeira, ainda tem sua complexidade aumentada devido às características deste material.

Os tópicos subsequentes apresentam a influência que cada um dos aspectos básicos do processo de usinagem dos materiais, mais especificamente da madeira, e as interações que podem existir entre eles. Serão apresentados o embasamento teórico e os estudos mais

relevantes e atuais sobre a influência dos diferentes fatores no processo de usinagem de madeira e quais as tecnologias que estão sendo utilizadas para a determinação de sua qualidade superficial.

2.1 FERRAMENTA DE CORTE E GRANDEZAS DE USINAGEM

Conhecer quais as características das ferramentas de corte e como elas devem interagir com o material é de extrema importância para o processo de usinagem. A correta remoção de cavaco somente ocorre através da combinação de algumas variáveis. No que se refere à ferramenta de corte, esta necessita ser mais resistente que o material usinado, além de possuir arestas cortantes e superfícies adequadas para a penetração no material e remoção do cavaco. Além das características da ferramenta, o processo de usinagem depende de movimentos relativos entre ferramenta de corte e material a ser usinado, bem como do conhecimento das características deste material, que no caso da madeira, tem sua complexidade aumentada por ser um material anisotrópico.

Warcholinski, Gilewicz e Ratajski (2011) descrevem que a usinagem de materiais à base de madeira requer uma aplicação de ferramentas de alta qualidade. Isto, segundo Kilik, Hiziroglu e Burdurlu (2006) e Warcholinski, Gilewicz e Ratajski (2011) esta necessidade é devida às propriedades específicas do material usinado, tais como a anisotropia da estrutura e as propriedades de corte do material nas diferentes direções (transversal e tangente às fibras), as mudanças locais abruptas da estrutura (lenho inicial e tardio) e a densidade variável de acordo com a seção transversal.

2.1.1 Composição e características do material para ferramentas de usinagem

As ferramentas de corte utilizadas no processo de usinagem são fabricadas com diversos materiais e suas combinações, para atender à variedade dos processos de usinagem, originados da necessidade de obtenção de uma infinidade peças com variadas características físicas, químicas e mecânicas, por isso, para cada caso deve-se levar em consideração diversos fatores para a escolha da ferramenta adequada a ser utilizada, a fim de alcançar o melhor custo-benefício, fator chave para a sobrevivência de qualquer empresa, nesse mercado tão competitivo e exigente.

Os principais requisitos ou fatores desejados para ferramentas de corte são a resistência mecânica, que inclui: dureza, resistência da aresta de corte, resistência à flexão e tenacidade,

além da resistência à oxidação e resistência a altas temperaturas, entre outras, em geral o material necessita possuir uma resistência interna de ligação dos elementos constituintes, que satisfaça as exigências de determinada solicitação mecânica e/ou química, mantendo suas características de corte adequadas para obtenção de superfícies dentro de uma qualidade esperada e em um menor tempo possível. Porém não existe um material para ferramenta que possua todas essas características, existindo a necessidade de conhecimento dos materiais apropriados ou a combinação destes para a obtenção das propriedades desejadas.

Segundo Machado et al. (2011) o processo de usinagem baseia-se na remoção de material, com a utilização de materiais mais duros e resistentes que a peça a ser usinada e a operação de matérias frágeis ou operações com corte interrompido, como o fresamento, necessitam de ferramentas com materiais com suficiente tenacidade para suportar os choques e impactos comuns a estes processos, contudo a propriedade de dureza não pode ser deixada de lado, o que se tornou um desafio para os fabricantes de ferramentas. Estes autores classificam os materiais que são utilizados ferramentas em: aços carbono e aços ligados, aços rápidos, ligas fundidas, metal duro, cermets, cerâmicas e diamante e nitreto de boro cúbico.

Sobre o metal duro, Ferraresi (1977) afirma que sua combinação de dureza a temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, fazem deste material um dos mais importantes na confecção de ferramentas de corte. Essencialmente é formado por dois constituintes, um carbetos extremamente duro e de alta resistência ao desgaste, composto do carbetos de tungstênio somente ou associado com outros carbetos, como de titânio, tântalo e nióbio, principalmente, eles conferem a dureza a temperatura ambiente e a altas temperaturas e a resistência ao desgaste. O outro constituinte é um elemento aglomerante ou ligador, tratando-se de um metal do grupo do ferro, usualmente cobalto, cuja função é aglomerar as partículas duras dos carbetos, sendo responsável pela tenacidade do material.

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2013) o metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbetos de tungstênio, usualmente em combinação com outros carbetos, como carbetos de titânio, tântalo e nióbio. O tamanho destas partículas varia geralmente entre 1 a 10 μm e ocupam de 60 a 95% do volume do material. O metal aglomerante é, na maioria das vezes, o cobalto.

De acordo com Ferraresi (1977) a dureza tanto à temperatura ambiente como a elevadas temperaturas, e a resistência à ruptura transversal, dado este que se utiliza para avaliar a tenacidade, são as propriedades fundamentais que se exigem do metal duro quando aplicado

em ferramentas de corte. A grande aplicação destes materiais, também fabricados pelo processo de sinterização (metalurgia do pó) se deve ao fato deles possuírem a combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica, resistência à compressão, resistência ao choque, resistência a quente e tenacidade em altos níveis.

Segundo Weissenstein (1997) o metal duro também recebe o nome de wídia e carbeto de tungstênio, sendo um material sinterizado, de alta resistência ao desgaste, utilizado com larga abrangência industrial para a usinagem de metais, madeiras e seus derivados. Também é utilizado na confecção de ferramentas compostas retas e perfiladas, ou em forma de facas retas e perfilado, mas intercambiáveis. É um material de excelente utilização para ferramentas de corte para madeira e seus derivados, sendo muito resistente ao desgaste da aresta cortante. Com uso de ferramentas de metal duro conseguem-se maiores velocidades de corte do que com ferramentas confeccionadas em aço. A durabilidade das arestas de corte das ferramentas de metal duro é de 10 a 60 vezes maiores que as das ferramentas de corte confeccionadas em aço para ferramentas.

Os metais duros, com ou sem revestimento, são materiais de ferramentas utilizados na usinagem, fabricados em várias classes, que foram desenvolvidas para cobrir a ampla faixa de necessidade operacional existente e são regulamentadas pela International Organization for Standardization (ISO). A norma ISO 513 (2013) classifica os metais duros em seis grupos, designados pelas letras P, M, K, N, S e H, também designado por um código de cores (respectivamente, azul, amarelo, vermelho, verde, laranja e cinza). A ISO acrescentou três novas classes de metal duro (N, S, H) em relação à norma anterior, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) observa-se uma diferente abordagem da ISO com classificação do metal duro, não mais baseada em composição química, mas na aplicação do material. Pode-se dizer, porém que a classe N tem composição similar à classe K, a S tem composição similar à M e a classe H tem composição similar à classe K.

A classificação dentro de um grupo ou outro é feita de acordo com a aplicação do metal duro, uma vez que a variedade de composições químicas e processos de fabricação torna difícil a padronização baseada em outras características. A norma ISO 513 (2013) apresenta os seis grupos de aplicação divididos de acordo com diversos tipos de materiais a serem usinados, identificados por uma letra maiúscula e uma cor, como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos materiais duros em termos da aplicação na usinagem de materiais.

Grupo principal de aplicação			Grupo de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Materiais duros para corte		-	
P	azul	Aço: todos os tipos e aço fundido, exceto aço inoxidável, com estrutura austenítica.	P 01 P 10 P 20 P 30 P 40 P 50	P 05 P 15 P 25 P 35 P 45	↑a	↓b
M	amarela	Aço inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço austenítico/ferrítico e aço fundido.	M 01 M 10 M 20 M 30 M 40	M 05 M 15 M 25 M 35	↑a	↓b
K	vermelha	Ferro fundido: ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafite esferoidal e ferro fundido maleável.	K 01 K 10 K 20 K 30 K 40	K 05 K 15 K 25 K 35	↑a	↓b
N	verde	Materiais não ferrosos: alumínio e outros materiais não ferrosos, materiais não metálicos.	N 01 N 10 N 20 N 30	N 05 N 15 N 25	↑a	↓b
S	marron	Superligas e titânio: ligas especiais, resistentes às altas temperaturas, baseadas em ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio.	S 01 S 10 S 20 S 30	S 05 S 15 S 25	↑a	↓b
H	cinza	Materiais com alta dureza: Aço temperado, materiais de aço fundido temperado, aço fundido com coquilha.	H 01 H 10 H 20 H 30	H 05 H 15 H 25	↑a	↓b
a A diminuição do número associado à letra de identificação resulta no aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.						
b O aumento do número associado à letra de identificação resulta no aumento da tenacidade.						

Fonte: adaptado de (NORMA ISO 513, 2013).

Para a usinagem de madeiras e seus derivados, Weissenstein (1997) comenta que esses materiais são usados para cabeçotes de plainas moldureiras, tupias, em forma de fresas de haste para utilização em centros de usinagem ou em fresas retas ou perfiladas para confecção

de ranhuras, rebaixos ou perfis. Segundo este autor, as ferramentas inteiriças, também denominadas ferramentas de um elemento só, podem ser confeccionadas em:

- ✓ Aço carbono (lâmina de serra fita, disco de serra circular comum, etc.);
- ✓ Aço liga (fresas inteiriças, brocas, etc.);
- ✓ Aço rápido (brocas helicoidais e paralelas, fresas de haste para tupia superior, fresas maciças para tupia e facas para plaina moldureiras);
- ✓ Metal duro (fresa maciça de haste especial para uso em centros de usinagem).

No Quadro 2 são apresentadas as aplicações de uma variedade de materiais para a fabricação das ferramentas de corte para a usinagem de madeiras, retiradas do catálogo de um fabricante, conforme algumas características de material a ser usinado, principalmente o teor de umidade e densidade do material.

Quadro 2 - Materiais para ferramenta de usinagem de madeira em função do tipo de material a ser usinado.

Tipo de ferramenta		Ferramentas individuais						
		Ferramentas com dentes soldados						
		Jogo de ferramentas						
		Aplicação da ferramenta	Fresar					
Material de corte		SP	HL	HS	ST	HWV	HWH	DP
Material a ser usinado								
Tipo	qualidade							
Madeiras maciças	Madeiras macias Seco	1	1	1	2	1		
	Úmido		1	1	1			
	Madeiras duras Seco			1	2	1		
	Úmido			2	1			
	Madeiras prensadas							
			1	1		1	2	
Madeiras e derivados							1	1
	Materiais aglomerados Revestida						1	1
	Revestida com plástico						1	1
	Revestida com papel						1	1
							1	1
	Materiais de fibras (MDF) Revestida						1	1
	Revestida com plástico						1	1
	Revestida com papel						1	1
	Fibras duras						1	1
	Fibras macias					1	1	
	Materiais prensados (HPL/CPL)						2	1

Fonte: adaptado de (Catálogo Leitz)

Legenda: 1 = apropriado; 2 = relativamente apropriado; SP = aço especial; HL = aço liga de alto rendimento; HS = aço super rápido; ST = estelite; HWV = metal duro para madeiras macias; HWH = metal duro para madeiras e derivados; DP = diamante policristalino.

2.1.2 Geometria das ferramentas de usinagem

Machado et al. (2011) e Santos e Sales (2007) afirmam que a geometria das ferramentas de corte tem grande influência na usinagem dos materiais.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR ISO 3002-1 (2013) especifica as grandezas e termos utilizados em usinagem com geometria definida. Esta parte da norma define a nomenclatura de alguns conceitos básicos sobre ferramentas de corte, ela é aplicável à geometria de cada tipo de ferramenta de corte e enfatiza uma terminologia conhecida para elas, que se destina a prover uma estrutura nas quais podem ser estabelecidas a nomenclatura e as normas adequadas para os diversos tipos de ferramentas de corte, como ferramentas monocortantes, brocas helicoidais, fresas e ferramentas manuais. No entanto, as normas para tipos individuais de ferramentas de corte não utilizarão toda a faixa de termos e definições estabelecidos na nomenclatura básica desta parte da ABNT NBR ISO 3002.

Nesta norma além da parte 1, também tem previsão de conter as seguintes partes:

Parte 2: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte – Fórmula de conversão geral para a relação entre os ângulos da ferramenta e de trabalho;

Parte 3: Quantidades geométricas e cinemáticas em usinagem;

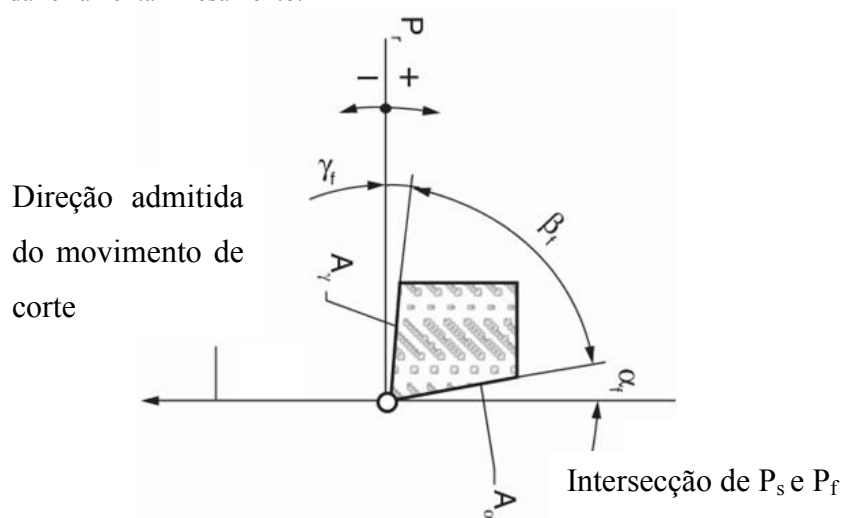
Parte 4: Forças e energia;

Parte 5: Terminologia básica para o processo de retificação utilizando rebolos.

Um conjunto de ângulos é necessário para definir os ângulos da ferramenta, isto é, o sistema de ângulos da ferramenta. Estes são denominados ângulos da ferramenta. Estes são necessários para a fabricação, ajuste medição da ferramenta.

A simbologia padrão utilizada pela Norma ABNT NBR ISO 3002-1 (2013) a respeito dos principais ângulos da ferramenta de corte no fresamento é apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Ângulos da ferramenta - fresamento.



Fonte: adaptado de (Norma ABNT NBR ISO 3002-1: 2013).

Onde:

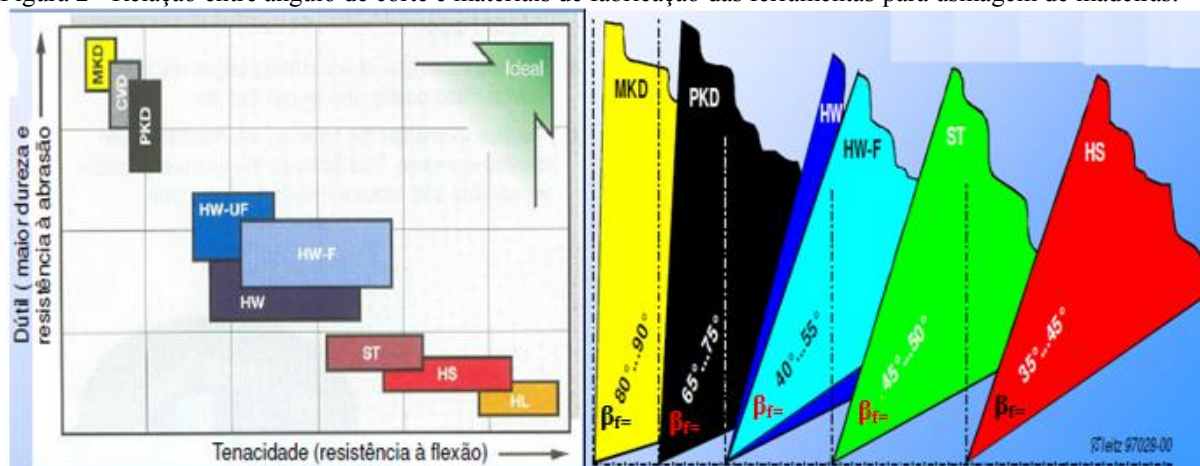
γ_f = ângulo de saída lateral da ferramenta - é o ângulo entre a superfície de saída A_s e o plano de referência da ferramenta P_r , medido no plano admitido de trabalho P_f .

α_f - ângulo de folga lateral da ferramenta- ângulo entre a superfície principal de folga A_α e a o plano de corte da ferramenta P_s , medido no plano admitido de trabalho P_f .

β_f - ângulo de cunha lateral da ferramenta – ângulo entre a superfície de saída A_s e a superfície de folga A_α , medido no plano admitido de trabalho P_f .

Algumas empresas fabricantes de ferramentas para a usinagem de madeira relacionam o material de fabricação da ferramenta de corte e a geometria angular de corte, visando uma combinação das melhores características de dureza, resistência à abrasão e tenacidade da ferramenta cortante. É apresentada na Figura 2, a relação entre o material de fabricação da ferramenta de corte e a geometria angular de corte.

Figura 2 - Relação entre ângulo de corte e materiais de fabricação das ferramentas para usinagem de madeiras.



Fonte: adaptado de (Catálogo Leitz)

Legenda: MKD = Diamante Sintético Monocristalino; CVD (Chemical Vapour Deposition) diamante = Deposição Química em fase vapor; PKD = Diamante Policristalino (Sintético); HW= metal duro; HW-UF = metal duro ultrafino; HW-F = metal duro fino; ST = estelite; HS = aço super-rápido; HL = aço liga de alto rendimento; β_f = ângulo da ferramenta.

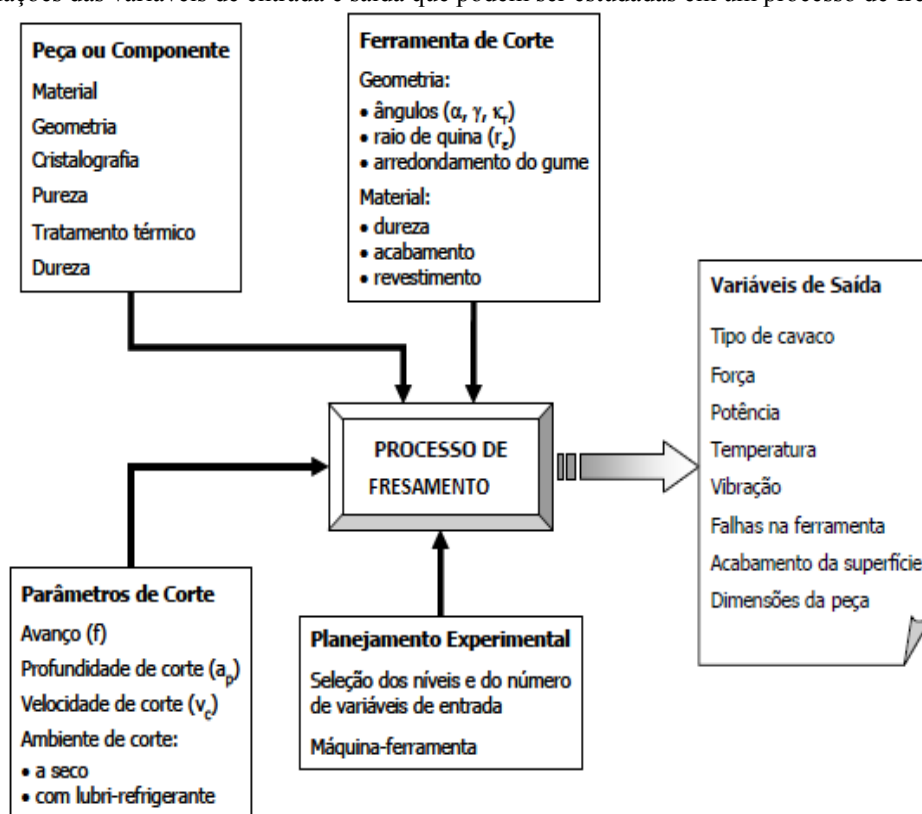
2.1.3 Grandezas físicas no processo de fresamento

Stemmer (1992) descreve o fresamento como uma usinagem no qual a remoção de material da peça se realiza de forma intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta, geralmente multicortante (isto é, com múltiplos dentes de corte). As vantagens deste processo residem na variedade de formas que podem ser produzidas, na qualidade dos acabamentos superficiais, nas altas taxas de remoção de cavacos e na disponibilidade de ampla variedade de ferramentas.

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) comentam que o fresamento é uma operação de usinagem realizada por uma ferramenta denominada fresa, esta possui arestas cortantes coladas simetricamente ao redor de um eixo, que realiza o movimento de corte da fresa. O movimento de avanço pode ser realizado tanto pela fresa como pela peça a ser usinada.

As variáveis envolvidas no processo de usinagem por fresamento são as variáveis independentes de entrada (aquelas que interferem no processo) e as variáveis dependentes de saída (sofrem influência dos parâmetros de entrada). É apresentado na Figura 3, um exemplo de algumas das principais relações de variáveis de entrada/saída, associadas ao processo de fresamento.

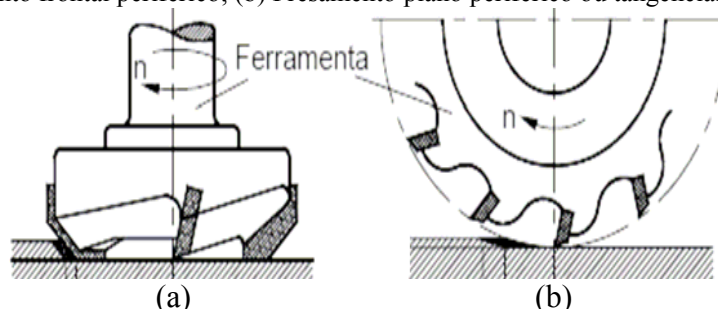
Figura 3 – Relações das variáveis de entrada e saída que podem ser estudadas em um processo de fresamento.



Fonte: adaptado de (Notas de aula de Bonetii, 2010).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) o fresamento é classificado, em termos da posição do eixo árvore da máquina – ferramenta, em fresamento horizontal (quando o eixo árvore está na posição horizontal), vertical ou inclinado. Segundo a posição dos dentes ativos da fresa, as operações de fresamento podem ser agrupadas segundo dois tipos fundamentais: fresamento plano periférico ou tangencial e o fresamento plano frontal periférico ou frontal, como apresentado na Figura 4.

Figura 4 - (a) Fresamento frontal periférico; (b) Fresamento plano periférico ou tangencial.

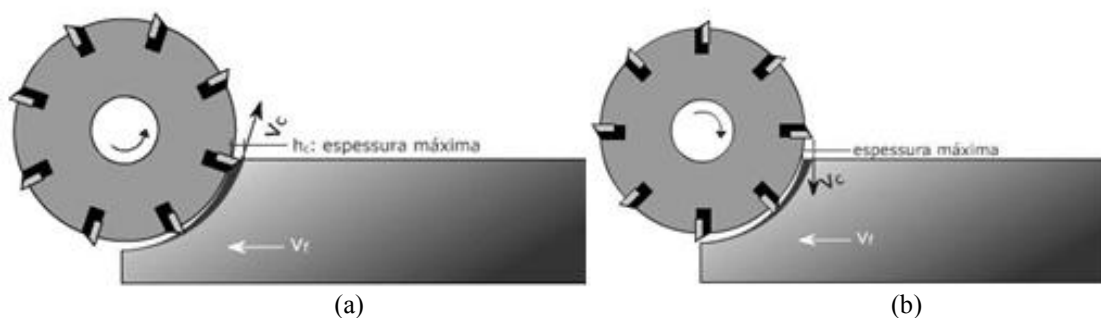


Fonte: (<http://tudosobreusinagem.blogspot.com.br/2012/03/fresamento.html>) acesso em 04/03/2014.

As operações de fresamento plano periférico frontal são aquelas nas quais as arestas de corte estão dispostas na superfície frontal da ferramenta, fazendo com que o eixo da fresa permaneça perpendicular à superfície gerada.

Na operação de fresamento plano periférico ou tangencial as arestas de corte estão posicionadas na superfície cilíndrica da ferramenta, fazendo com que o eixo da fresa permaneça paralelo à superfície gerada. Neste fresamento fica evidente a relação de posicionamento relativo da ferramenta e a direção de avanço sobre a peça a ser usinada, desta relação definiram-se os métodos de fresamento concordante e discordante como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - (a) Fresamento discordante; (b) Fresamento concordante.



Fonte: (<http://www.metalica.com.br/fresamento-e-suas-finalidades>) acesso em 04/03/2014.

Segundo Gonçalves (2000) no fresamento convencional ou discordante (up-milling), as ferramentas movem-se contrariamente ao movimento da peça, enquanto que no fresamento concordante (downmilling) a ferramenta e a peça se movimentam na mesma direção. Este tipo de classificação somente vale no fresamento cilíndrico tangencial, de grande utilização no beneficiamento de madeiras.

Uma característica importante das operações de fresamento discordante e concordante é a formação do cavaco em forma de uma vírgula. Diniz, Marcondes e Coppini (2013)

comentam que a espessura de corte varia de zero a um valor máximo no fresamento discordante e de um valor máximo a zero no fresamento concordante (Figura 5 a e b).

2.1.3.1 Movimentos, direções e velocidades em fresamento.

Segundo Machado et al. (2011) os movimentos nas operações de usinagem são reais entre a peça e a aresta cortante e a peça considerada estacionária. Segundo estes autores podem ser definidos dois tipos de movimentos, um que causa diretamente a saída de cavaco e os que não participam diretamente de sua retirada.

A direção e os sentidos de corte aliados aos movimentos da ferramenta e ou da peça a ser usinada interagem para que ocorra a remoção de cavaco. Na Figura 6 são apresentados os conceitos das direções, velocidades e ângulos aplicados para a análise no processo de usinagem por fresamento, conforme as seguintes definições estabelecidas pela norma ABNT NBR ISO 3002-1 (2013).

O movimento de corte é definido como o movimento proporcionado manualmente ou por uma máquina-ferramenta, relativo entre a aresta de corte e a peça, realizado de forma que a superfície de saída se aproxime do material da peça. Normalmente, o movimento de corte absorve a maior parte da força total requerida para realizar uma operação de usinagem. Segundo Machado et al. (2011) este movimento, na ausência do movimento de avanço, produz somente uma retirada de cavaco.

Dentro do movimento de corte se enquadram a:

- ✓ Direção do movimento de corte: direção instantânea do movimento de corte no ponto de corte escolhido em relação à peça.
- ✓ Velocidade de corte (V_c): velocidade instantânea do movimento de corte no ponto de corte escolhido em relação à peça.

A velocidade de corte (V_c), em m.s^{-1} , para o fresamento é calculado pela Equação (1):

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000 \times 60} \quad (1)$$

Onde:

D = Diâmetro da ferramenta, em mm;

n = Rotação do eixo árvore, em rpm.

Segundo a norma ABNT NBR ISO 3002-1 (2013) o movimento de avanço é movimento adicional proporcionado manualmente ou por uma máquina-ferramenta, relativo entre a aresta de corte e a peça, o qual, quando acrescido ao movimento de corte, leva à

remoção repetida ou contínua dos cavacos e a criação de uma superfície usinada com as características geométricas desejadas. O movimento pode prosseguir por etapas ou continuamente, em ambos os casos, geralmente, ele absorve uma pequena quantidade de força total requerida para realizar uma operação de usinagem. Dentro do movimento de avanço se enquadram a:

- ✓ Direção de avanço: direção instantânea do movimento de avanço no ponto de corte escolhido em relação à peça.
- ✓ Velocidade de avanço (V_f): velocidade instantânea do movimento de avanço no ponto de corte escolhido em relação à peça.

A velocidade de avanço (V_f), em m.min.^{-1} , para o fresamento é calculado pela Equação (2):

$$V_f = \frac{n \times f_z \times Z}{1000} \quad (2)$$

Onde:

n = Rotação do eixo árvore, em rpm;

f_z = Avanço por dente, em mm;

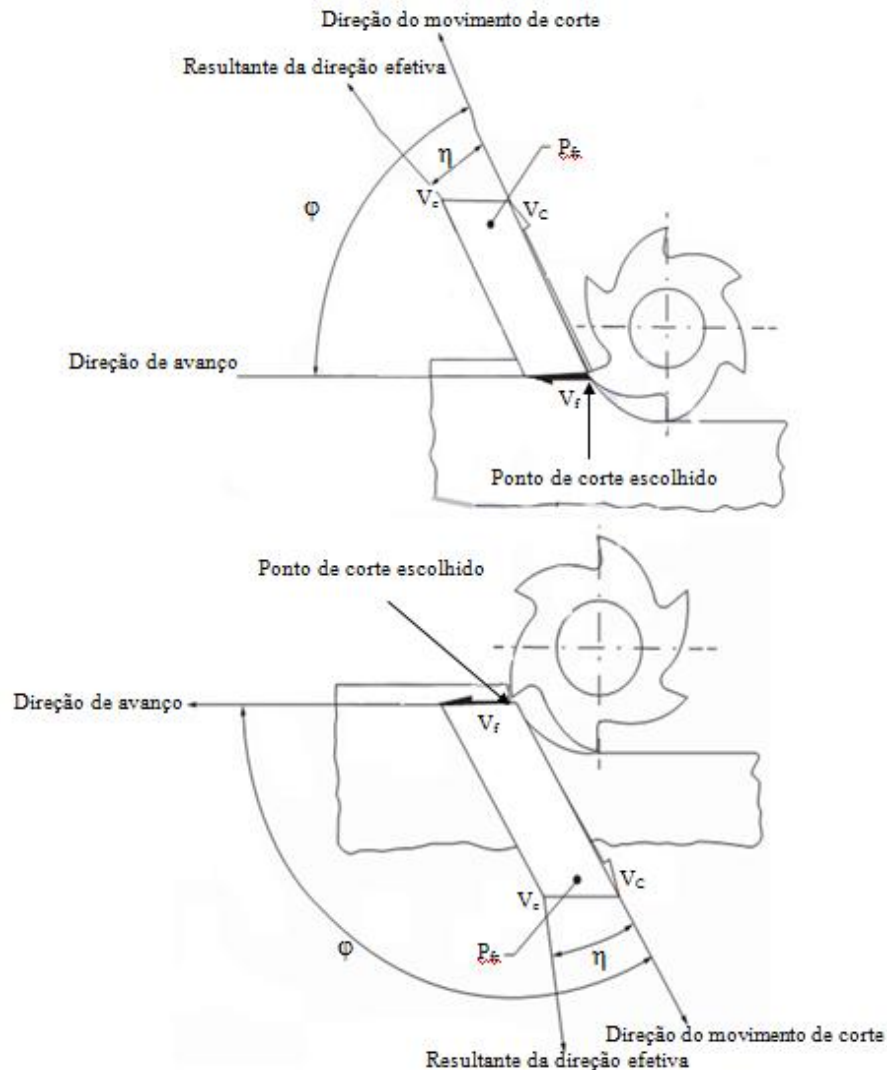
Z = Número de dentes.

O movimento efetivo de corte é a resultante dos movimentos simultâneos de corte e de avanço. Entro deste se enquadram a:

- ✓ Direção efetiva de corte: direção instantânea do movimento efetivo no ponto de corte escolhido em relação à peça.
- ✓ Velocidade efetiva de corte (V_e): velocidade instantânea do movimento efetivo no ponto escolhido em relação à peça.

A norma também apresenta o ângulo da direção de avanço (φ) entre as direções dos movimentos simultâneos de avanço e de corte. Ele é, portanto, medido no plano admitido de trabalho P_{fe} (ou apenas P_f) (plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, contém as direções de corte e avanço). E o ângulo da velocidade efetiva de corte (η), ângulo entre a direção do movimento de corte e a resultante da direção efetiva. Ele é, portanto, medido no plano de trabalho P_{fe} .

Figura 6 – Movimentos, direções e velocidades da ferramenta e da peça.



Fonte: adaptado de (NORMA ABNT NBR ISSO 3002-1, 2013).

2.1.3.2 Grandezas de corte em fresamento.

Segundo Machado et al. (2011) essas grandezas devem ser ajustadas na máquina direta ou indiretamente, são definidas como segue.

Avanço (f)

É o percurso de avanço em cada volta (mm/rev.) ou em cada curso da ferramenta (mm/golpe). No caso das fresas, distingue-se o avanço por dente (f_z), que representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta, conforme apresentado na Figura 7.

O avanço é calculado pela Equação (3):

$$f = Z \times f_z \quad (3)$$

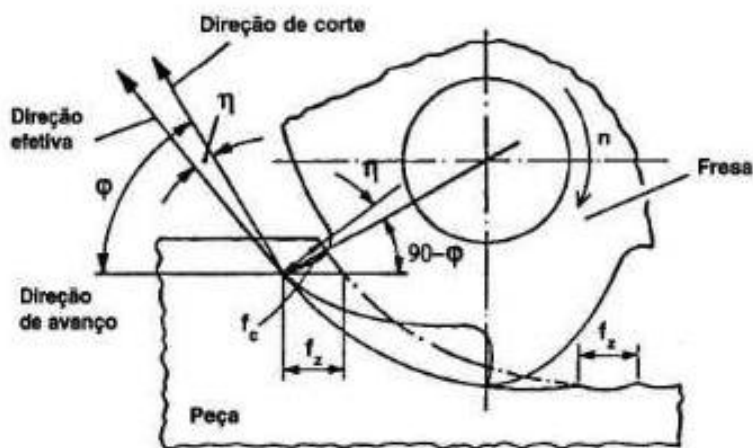
Onde:

Z = número de dentes;

f_z = Avanço por dente, em mm.

O avanço por dente ainda pode ser decomposto no avanço de corte (f_c) e no avanço efetivo de corte (f_e). O avanço de corte (f_c) é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção de corte no plano de trabalho e o avanço efetivo de corte (f_e) representa a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção efetiva de corte no plano de trabalho, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo de corte (f_e) no fresamento tangencial discordante.



Fonte: (MACHADO et al. , 2011)

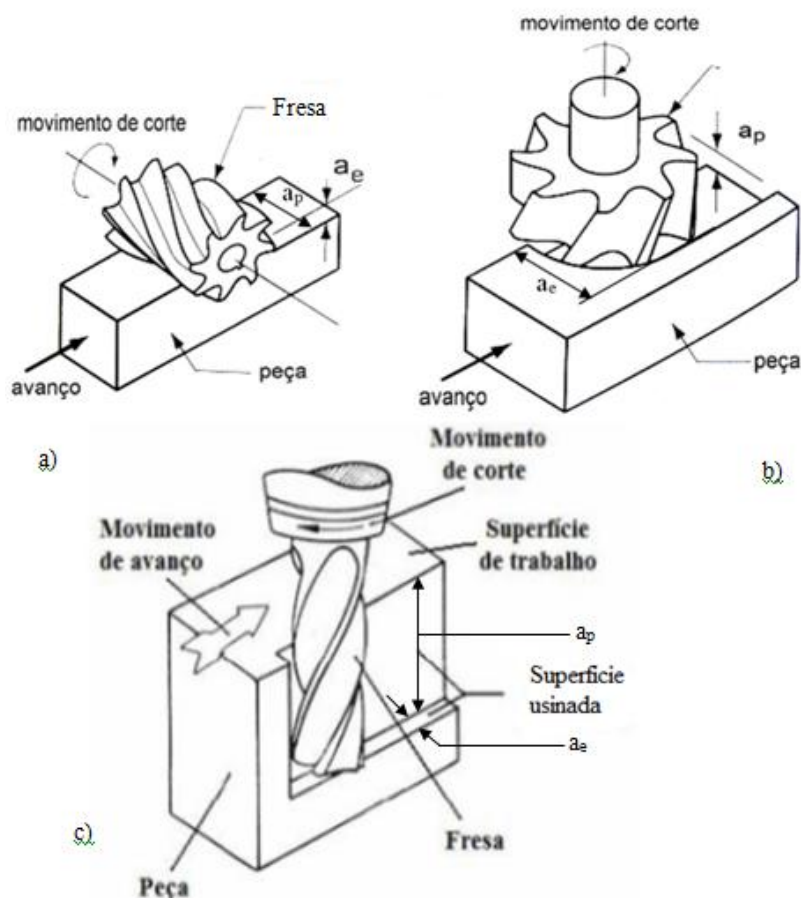
Onde:

η = Ângulo de direção efetiva;

φ = Ângulo de direção de avanço.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) as grandezas de penetração descrevem geometricamente a relação de penetração entre a ferramenta e a peça. A profundidade ou a largura de usinagem (a_p) é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho e a penetração de trabalho (a_e) é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e perpendicularmente a direção de avanço. As grandezas para as operações de fresamento são apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Profundidade ou largura de usinagem (a_p) e penetração de trabalho (a_e) nos fresamentos: a) no periférico discordante, b) frontal (faceamento) e c) topo/frontal com fresa de topo.



Fonte: adaptado de (<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABVjAAH/fresa-pronto-ebah>), acesso em 04/03/2014.

2.1.3.3 Fresamento tangencial com fresas de dentes helicoidais

Nas fresas com dentes e canais helicoidais, as arestas penetram progressivamente na peça, produzindo um corte mais suave e contínuo. Por outro lado, gera-se um esforço axial na fresa, que pode tentar tirar a ferramenta ou o mandril do cone de acionamento.

Em fresas helicoidais, distinguem-se:

- ✓ Hélice direita: olhando a fresa de cima, os canais fogem para a direita.
- ✓ Hélice esquerda: olhando a fresa de cima, os canais fogem para a esquerda.

Fresas cilíndricas helicoidais, fresas de disco de dentes cruzados, fresas de topo e fresas cilíndrico frontais são exemplos deste tipo de ferramenta.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) enquanto no fresamento tangencial de dentes retos a força de corte aumenta rapidamente, com o ângulo ϕ caindo bruscamente a zero quando $\phi = \phi_0$ nas fresas cilíndricas de dentes helicoidais ou inclinados, isto não acontece,

pois durante no fresamento com fresas de dentes helicoidais, enquanto um dente da fresa inicia seu trabalho o primeiro dente ainda esta cortando, com isto, para as mesmas condições de usinagem, a força máxima de corte e sua oscilação, são bem menores que nas fresas cilíndricas de dentes retos. Um ponto importante a ser considerado é o surgimento de uma componente da força de usinagem na direção axial, exigindo que o eixo árvore da máquina seja bem dimensionado para suportar esse tipo de esforço.

2.2 SISTEMAS DE CORTE PARA USINAGEM DA MADEIRA

Segundo Gonçalves (2000) em razão da sua estrutura, as propriedades mecânicas e físicas da madeira variam de acordo com a direção considerada (anisotropia). Portanto, o corte na madeira não pode ser abordado sem a consideração do seu comportamento anisotrópico. Por isso, foi sugerida por especialistas em usinagem da madeira a adoção de uma convenção definindo as principais direções de corte.

Kivimaa¹ (1952) apud Gonçalves³ (2000) determinou uma considerável influência do sentido de corte sobre as forças de usinagem. Inicialmente, definiu o corte ortogonal como sendo a situação onde a aresta da ferramenta é perpendicular à direção do movimento de avanço da peça. Máquinas como serra fita, serra circular e plainas de corte plano podem ser estudadas utilizando o princípio do corte ortogonal.

McKenzie² (1964) apud Gonçalves³ (2000) propôs, também, uma notação com dois números para descrever situações diferentes de corte que podem ocorrer durante o corte ortogonal da madeira. O primeiro representa o ângulo entre a aresta da ferramenta e a fibra da madeira. O segundo indica o ângulo entre a direção de corte e a fibra da madeira. Esta notação define as três principais direções de corte (Figura 9), chamados 90-0, 90-90, e 0-90. A situação 90-0 (direção longitudinal ou axial) é encontrada em ações de corte como no processo de fresamento, em aplainamento ou desengrosso e trabalhos de corte de molduras na direção paralela às fibras. O corte perpendicular às fibras requer maior energia para ser efetuado que o corte ao longo das fibras, e, portanto no corte perpendicular às fibras, a força de corte tende a ser maior que no corte paralelo às fibras.

¹ Kivimaa, E. **Die Schnittkraft in der Holzbearbeitung. Holz als Roh- und Werkstoff.** v. 10, 3: S. 94-108, 1952.

² Mc KENZIE, W. M. Fundamental aspects of the wood cutting process. **Forest Products Journal.** V.10, n. 9, p. 447-456. 1964.

³ GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da Madeira.** Bauru, SP. 245p, 2000

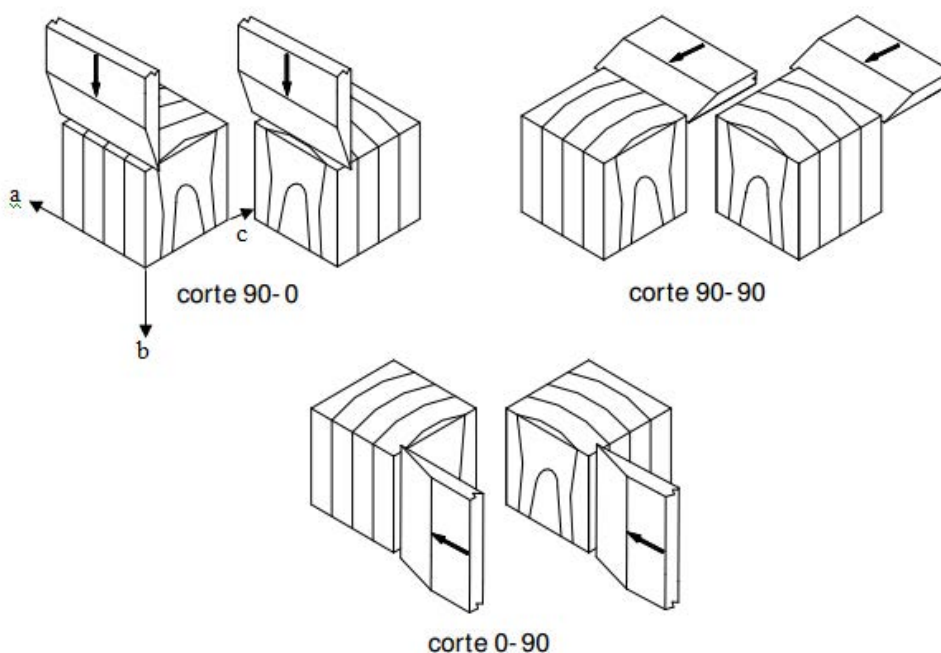
Gonçalves (2000) comenta que em razão da estrutura ordenada da madeira, caracterizada por um crescimento orientado das fibras, dos vasos e raios, as propriedades físicas e mecânicas variam segundo a direção considerada. Razão por que, os diferentes modos de cortar não podem ser abordados sem uma definição prévia do comportamento anisotrópico da madeira. Este autor apresenta as três direções principais relativas ao corte, ilustradas na Figura 9:

Corte 90 – 0: ângulo de 90° entre a aresta de corte e a direção das fibras; movimento de corte paralelo às fibras (direção longitudinal ou axial);

Corte 0 – 90: aresta de corte paralela à direção das fibras; direção do movimento de corte perpendicular às fibras (direção radial/tangencial);

Corte 90 – 90: aresta de corte e a direção do movimento de corte são perpendiculares à direção das fibras (direção transversal).

Figura 9 - Principais tipos de corte ortogonal.



Fonte: adaptado de (McKenzie, W.M. apud Goncalves, 2000).

Onde:

a = direção radial;

b = direção longitudinal ou axial;

c = direção tangencial.

Juntando as características de usinagem geradas pelo sentido de corte, em combinação com os movimentos e velocidades de avanço e corte, dos ângulos das ferramentas e das

características da madeira, resulta em uma complexa interação, que influenciam nos esforços de corte e na qualidade da superfície usinada.

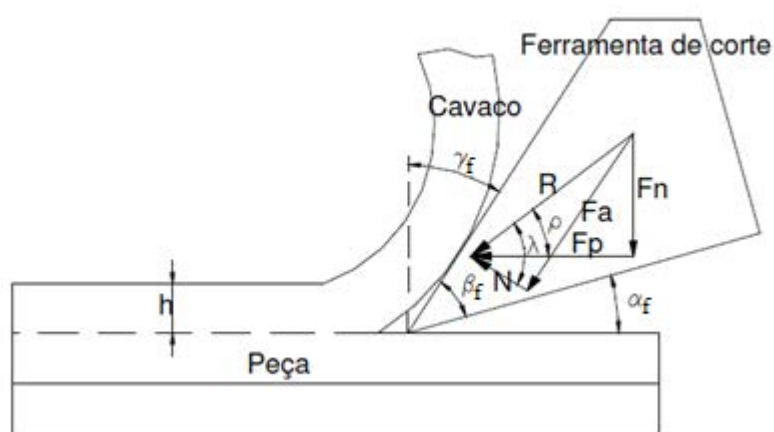
2.3 CARACTERÍSTICAS DA INTERAÇÃO ENTRE A FERRAMENTA DE CORTE E A PEÇA A SER USINADA

O cavaco gerado é o fragmento de madeira produzido na interação entre os movimentos relativos da ferramenta de corte e da peça que esta sendo usinada. A formação destes cavacos depende da geometria da ferramenta, do teor de umidade da madeira e do movimento da ferramenta com relação à orientação das fibras.

Para a remoção do cavaco da peça de madeira, durante qualquer processo de corte, primeiramente deve-se iniciar a rompimento da estrutura das fibras que ocorre entre o fio da ferramenta de corte e a peça de madeira. Sabendo que a resistência da madeira varia com a direção da fibra a configuração do cavaco, a potência de corte e a qualidade da superfície podem ser muito afetadas pela direção de corte.

As forças atuantes no processo de usinagem, para a formação do cavaco, são originadas da interação entre a ferramenta de corte e a peça a ser usinada. Pela Figura 10 observa-se a representação das componentes das forças que atuam no momento da usinagem.

Figura 10 - Componentes de força atuantes no corte ortogonal.



Fonte: adaptado de (Woodson e Koch, 1970).

Onde:

F_n = força normal - componente perpendicular à força paralela e perpendicular à superfície gerada;

F_p = força paralela - componente que age paralelamente ao movimento relativo da ferramenta;

F_a = força de atrito - força entre a superfície da ferramenta de corte e o cavaco produzido;

F_l = força lateral - componente perpendicular ao plano formado pelas forças paralela e normal (perpendicular ao plano da folha);

R = resultante das componentes normal e paralela - R representa a soma da força normal com a força paralela;

ρ = ângulo da força resultante - ângulo no qual a tangente é igual à força normal dividida pela força paralela;

N = Força normal de atrito - que ocorre na interface (superfície de saída) entre a ferramenta de corte e o cavaco;

λ = ângulo entre a R e a força normal de atrito N - ângulo no qual a tangente é igual à força de atrito dividida pela força normal de atrito.

Segundo Woodson e Koch (1970) alguns parâmetros relacionados ao corte da madeira interferem na usinagem da madeira:

a) ângulo de saída ou ataque (γ_f) - Normalmente as forças de corte decrescem com o aumento de γ_f .

Para cada espécie deverá existir uma faixa ótima para o ângulo de ataque, na qual será obtida a melhor qualidade de superfície;

b) ângulo de folga (α_f) - Este ângulo deverá ter um valor mínimo que permita a redução do contato da superfície de folga da ferramenta com a peça da madeira;

c) ângulo da ferramenta (β_f) - Este ângulo está relacionado à resistência da ferramenta de corte ao choque e ao desgaste;

d) espessura de corte (h) - Estará diretamente relacionada às forças implicadas no processo de corte;

e) orientação das fibras em relação ao corte - Tendo em vista que a madeira apresenta resistências diferentes de acordo com a direção do esforço em relação às fibras, esta direção afetará as forças implicadas durante a usinagem;

f) afiação da ferramenta de corte - Quando a ferramenta de corte não está bem afiada ou quando está desgastada, o ângulo de ataque diminui ou torna-se negativo, produz-se um afundamento na superfície da madeira que ocasiona o aparecimento de forças de atrito elevadas.

g) atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta de corte - A força de atrito é função do tipo de cavaco, sendo pouco afetada pela rugosidade na face da ferramenta.

Esta força sofre menor variação em relação ao ângulo de saída e espessura do cavaco quando comparado à influência do tipo de cavaco e espécie de madeira. A estrutura anatômica da madeira é, então, fator determinante na força de atrito.

h) vibração lateral - A vibração lateral pode ocorrer em consequência da orientação das fibras em relação ao corte. Quando as mesmas não estão perfeitamente alinhadas (fibras retorcidas, desvio de fibras, etc.) podem ocorrer grandes esforços laterais durante o processo de usinagem.

2.4 PROPRIEDADES DA MADEIRA

A madeira possui uma microestrutura de extrema complexidade, devido a sua configuração orgânica e composição química, a qual pode variar em função do local de origem, condições do clima, características gerais do solo e variabilidade da espécie. A madeira é um material de características particulares, basicamente poroso, constituído por diferentes estruturas cujo elemento básico é a célula. Os vários tipos de células possuem funções diversas no vegetal, tais como, condução da seiva, suporte, armazenamento de substâncias nutritivas, entre outras. Cada uma dessas funções confere uma forma diferente às células. Algumas são mais alongadas, outras em forma de cubo. Umas possuem paredes mais espessas, outras paredes mais finas. Estas diferenças proporcionam características específicas nas diferentes espécies, dentro da mesma espécie até mesmo dentro da mesma árvore, como diferentes características de permeabilidade, textura, propriedades físicas e mecânicas.

Para Saloni, Lemaster e Jackson (2010) a usinagem em materiais não homogêneos como a madeira, tem seu grau de complexidade do processo aumentado, devendo ser consideradas muitas variáveis durante a usinagem.

Segundo Gonçalves (2000) a madeira é um material heterogêneo de estrutura anisotrópica, sendo esta constituída por células dispareas que no vegetal vivo devem cumprir três funções: transporte das seivas, a transformação de produtos e armazenamento de substâncias para reserva e por último a sustentação do vegetal.

Pesquisadores dedicam estudos sobre as características deste material e como ele se comporta durante a transformação mecânica para os mais variados fins e se depararam com suas complexas propriedades.

Segundo Silva, Lima e Trugilho (2007) a madeira é anisotrópica, podendo ser usinada em diferentes planos e de diferentes maneiras, em função da direção e sentido de ataque da ferramenta em relação às fibras.

Já Teixeira et al. (2011) estudaram a influência da anisotropia da madeira no desgaste das ferramentas diamantadas, eles comentaram que a heterogeneidade da estrutura e a disposição irregular das fibras associadas à característica altamente abrasiva da madeira são os principais fatores para ocorrência dos elevados desgastes nas ferramentas de corte na indústria moveleira. Para estes pesquisadores, existem dois fatores importantes que afetam significativamente o processo de usinagem da madeira, a irregularidade estrutural natural das madeiras e o teor de umidade. A irregularidade na disposição das fibras e os veios provocam uma anisotropia em suas propriedades. Com a redução da umidade, alguns elementos químicos existentes na seiva acabam ficando cristalizados entre as fibras, afetando a atuação das ferramentas de corte nos processos de usinagem.

Os resultados obtidos por Karinkanta, Illikainen e Niinimäki (2011) indicaram que a anisotropia da madeira afeta a superfície resultante no processo de lixamento, sendo o processo de desgaste influenciado pela natureza anisotrópica da madeira. As propriedades das partículas que foram liberadas a partir da superfície durante o lixamento foi dependente da orientação da grã e, se a partícula se originou a partir do lenho inicial ou tardio. Além do mais Hiziroglu, Zhong e Tan (2013) descrevem a madeira como sendo um material higroscópico alterando suas propriedades com a flutuação em condições climáticas do ambiente circundante, principalmente em relação a umidade.

Segundo Silva et al. (1996) os principais defeitos no processo de usinagem da madeira estão ligados a quatro fontes básicas. Primeiramente, têm-se as variações das propriedades da madeira, seguido das características de funcionamento das máquinas e das ferramentas de corte e por último o treinamento da mão de obra.

Tan, Sharif e Sudin (2012) realizaram uma avaliação da rugosidade com o auxílio de filtros anatômicos a superfície da madeira lixada, eles afirmaram que a superfície de madeira lixada caracteriza-se não só por irregularidades de processamento, mas também irregularidades anatômicas inerentes da estrutura heterogênea da madeira. As características anatômicas poderiam distorcer o valor de rugosidade medido com um perfilômetro de superfície e causar uma má interpretação potencial da qualidade de superfície, prejudicando o desempenho de processamento.

Silva et al. (2005) em seus estudos sobre a influência da morfologia das fibras na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis hill ex. maiden*, comentaram que é preciso conhecer a estrutura da madeira e os parâmetros de usinagem para entender suas relações, que proporcionam os bons resultados em qualidade. Estes pesquisadores buscaram verificar as variações no sentido medula–casca de diferentes operações de usinagem e das dimensões das fibras da madeira de *Eucalyptus grandis hill ex. maiden*.

Conhecendo-se microestrutura do material é possível o uso de diferentes espécies para as mais diversas aplicações em geral.

2.4.1 Características da madeira de pinus

Segundo Zenid (2009) o gênero *Pinus spp.* é indicado para a construção civil leve interna, como forros, painéis, lambris. Dento deste gênero encontra-se o *Pinus elliottii*, espécie introduzida nos estados de Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo. Destacam-se algumas características importantes desta espécie como: densidade baixa; macia ao corte, grã direita; textura fina, fácil de ser trabalhada, fácil de desdobrar, aplainar, desenrolar, lixar, torneiar, furar, fixar, colar e permite bom acabamento. Apresenta densidade aparente de 480 kg/m³ a 15 % de umidade e densidade básica de 420 kg/m³. Seus principais usos na construção civil são: cordões, guarnições, rodapés, forros e lambris, molduras, fôrmas para concreto, pontaletes e andaimes, além da fabricação de móveis estandar, partes internas de móveis, móveis torneados (para exportação), cabos para vassouras, palitos de fósforo, compensados, laminados, torneados, brinquedos, embalagens, paletes, bobinas, carretéis, pincéis etc.

2.4.2 Propriedades anatômicas da madeira

O correto entendimento da constituição anatômica da madeira e de suas propriedades é a base para o conhecimento de suas outras propriedades, sendo elas: propriedades físicas, mecânicas e químicas. O uso da madeira em seus diversos campos de aplicação pode ser descrito, com base nestas propriedades que dependem de maneira geral da constituição do lenho, na organização das estruturas celulares e suas funções e dos seus constituintes químicos, conhecendo as relações existentes para a formação do lenho, pode-se entender as respostas para cada tipo de solicitação exigida da madeira.

Para Gonçalves (2000), dentre os aspectos anatômicos, físicos e químicos da madeira que interferem em sua transformação podem ser citados: direcionamento das fibras, densidade, teor de umidade, concentração de resinas, presença de nós entre outros defeitos.

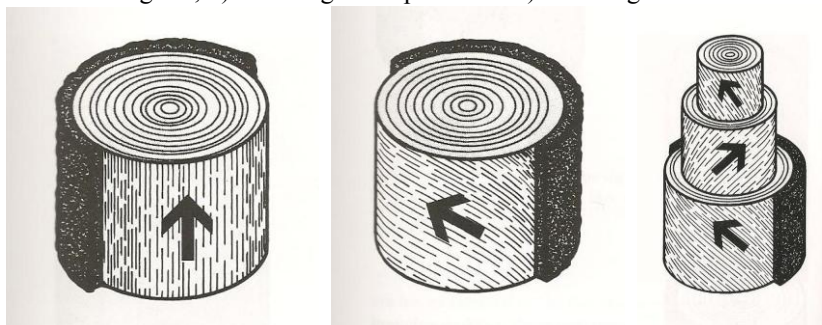
Silva et al. (1999) estudaram as relações entre a anatomia da madeira e a qualidade da usinagem e acabamento da superfície e concluíram que a qualidade final de um produto relaciona-se com as operações de usinagem e com a estrutura física e anatômica da madeira. Com relação à estrutura microscópica da madeira, em qualquer operação de usinagem as fibras da madeira são arrancadas e, raramente, cortadas. Este efeito pode ser explicado pela grande dimensão das arestas de corte das ferramentas em relação às dimensões das fibras. As fibras apresentam dimensões, geralmente, menores que os raios das arestas das ferramentas utilizadas na usinagem, principalmente quando são utilizados materiais que não permitem a confecção de arestas muito “vivas”. Neste caso as fibras da madeira são raspadas ou arrancadas e não cortadas. Os principais defeitos nos processos de fresamento, corte e furação, estão ligados às variações nas propriedades da madeira, as condições das máquinas e das ferramentas de corte e ao treinamento do operador da máquina.

2.4.3 Grãos e texturas

Segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) os termos grã e textura da madeira são comumente usados e vagamente relacionados. O termo grã é frequentemente usado em referência a tamanhos relativos e distribuições de células, como em grãos finas e grosseiras. Este uso da grã é mais ou menos sinônimo de textura. Grã é também utilizado para indicar a orientação das células do sistema axial ("direção de fibra"), ou seja, envolve a orientação dos elementos celulares em relação ao eixo vertical da árvore.

Quando as células são paralelas ao crescimento vertical, a grã é direita ou regular. Quando a grã apresenta desvios ou inclinações em relação ao eixo principal do tronco, a grã é chamada irregular, podendo ser grã oblíqua ou ainda grã entrecruzada. Estas características podem ser mais bem entendidas com o auxílio da Figura 11.

Figura 11 - a) Grã direita ou regular, b) Grã irregular espiralada e c) Grã irregular entrecruzada.



Fonte: adaptado de (a . img.com q groups 218 01 1 2 1 616 name u la(),pdf) acesso em 02/05/2014.

Esta orientação é decorrente das mais diversas situações em que a árvore é submetida durante o seu processo de crescimento, culminando em grande variação natural no arranjo e na direção dos tecidos axiais, o que origina vários tipos de grãs. Estas características geram sérias consequências para a utilização da madeira, como a diminuição da resistência mecânica, aumento das deformações de secagem e dificuldade para se conseguir um bom acabamento superficial.

Os estudos realizados por Campatelli et al. (2010) sobre a análise da mecânica de corte de madeira, com diferentes orientações de grã para a espécie de madeira *Douglas-fir* (*Pseudotsuga Menziesii* Franco Var. *Menziesii*) com teor de umidade médio de 11%, verificaram que a análise das forças de corte para madeira com respeito a diferentes orientações de grã permitiu identificar que a mecânica de corte de madeira é muito complexa.

2.4.4 Lenho inicial e lenho tardio

Os anéis de crescimento são camadas de xilema ou floema secundárias, produzidas aparentemente durante uma estação de crescimento; o xilema é frequentemente divisível em lenho inicial e tardio.

A produção de madeira difere de acordo com a época do ano. Na primavera e verão, as células formadas são mais largas, com paredes mais finas, resultando em madeira menos densa, menos resistente, mais clara e mais acessível à água. Durante o outono e inverno, por outro lado, as novas células criadas são menores e suas paredes celulares são mais espessas, consequentemente, a madeira formada é mais densa, escura e resistente e menos permeável.

Segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) esta alternância de células menos densas e mais densas formam os anéis de crescimento. A camada formada durante a primavera, denominada lenho inicial ou primaveril, aparece como uma

faixa mais clara, ao passo que a camada originada no inverno, chamada de lenho tardio ou estival, pode ser vista como uma região mais escura. Os anéis de crescimento são mais visíveis em árvores de regiões de clima temperado, onde as diferenças entre as estações são mais pronunciadas.

Barreiros (2012) cita algumas características e diferenças entre o lenho inicial e do lenho tardio, como seguem:

- ✓ Lenho inicial:
 - células com paredes menos espessas;
 - maior espessura do lenho;
 - lume celular grande;
 - menor massa específica.
- ✓ Lenho tardio:
 - células com paredes mais espessas;
 - menor espessura do lenho;
 - lume celular pequeno ($\text{lume} \leq \text{duas vezes a espessura da parede}$);
 - maior massa específica.

Ainda segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) a estrutura de madeira determina a densidade da madeira, em madeiras leves em que o lenho tardio é abundante em relação ao lenho inicial, a densidade é mais elevada (por exemplo, 0,59 de densidade básica, *Pinus palustris*). O inverso é verdadeiro, quando há muito mais lenho inicial do que lenho tardio (por exemplo, 0,35 de densidade básica, *Pinus strobus*). Em resumo, a densidade aumenta à medida que a proporção de células com paredes celulares espessas, aumenta. Em folhosas, a densidade é dependente não só da espessura da parede de fibra, mas também da quantidade de espaço vazio ocupado pelos vasos e parênquima. Em todas as madeiras, a densidade está relacionada com a proporção do volume de material de parede celular com o volume de lúmen dessas células.

Conforme a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) existe variação nas propriedades de coníferas devido à variação na porcentagem de lenho inicial e tardio (maior a porcentagem de lenho tardio, maior a massa específica da madeira) e se existe uma transição gradual ou abrupta do lenho inicial para o tardio, o que afeta a aparência da madeira, a trabalhabilidade e a superfície será mais ou menos áspera. Coníferas de madeiras mais densas (duras) apresentam uma transição abrupta do lenho inicial para o tardio. Enquanto que coníferas de madeiras menos densas (macias), embora apresentem anéis anuais

de crescimento distintos, tem transição gradual entre os lenhos, e há geralmente pouco lenho tardio.

Com o auxílio da Figura 12 observa-se a distribuição e posição dos anéis de crescimento de madeira de *Pinus taeda*, onde o anel anual de crescimento é representado por uma faixa escura de lenho tardio e uma faixa clara de lenho inicial.

Figura 12 - Seção transversal de um tronco de *Pinus taeda* e a identificação dos lenhos inicial e tardio.

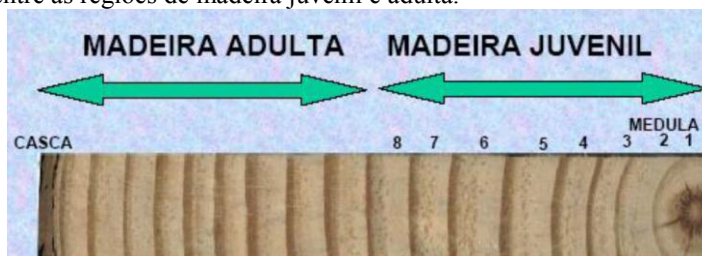


Fonte: (notas de aula sobre estrutura anatômica da madeira de coníferas, disciplina de química da madeira, PROF. Dr. Umberto Klock, UFPR, 2012).

2.4.5 Madeira Juvenil e madeira adulta

Segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) dois exemplos chave da biologia da árvore que afetam a qualidade da madeira, podem ser vistos na formação da madeira juvenil e madeira adulta. A madeira juvenil é a primeira madeira da árvore a ser formada, ou seja, quando a árvore ainda é jovem (os anéis são os mais próximos da medula), isto pode ser verificado por uma análise da Figura 13.

Figura 13 – Distinção entre as regiões de madeira juvenil e adulta.



Fonte: (Notas de aula de Estrutura Morfológica da Madeira, Prof. Ricardo Marques Barreiros, UNESP, 2012).

Gonçalves e Néri (2005) comentam que as propriedades químicas, físicas, anatômicas e mecânicas de madeira durante os primeiros anos da vida de árvore são diferentes da madeira formada durante a fase adulta. Esta distinção nas propriedades mais fortemente marcada para

coníferas. A madeira juvenil apresenta menor densidade e mais baixas resistências, e que as forças de corte são diretamente relativas a estes parâmetros, as forças de corte normal e paralela foram menores na região.

Para Haygreen e Bowyer¹ (1995) *apud* Gonçalves e Néri (2005) tanto em coníferas como em folhosas, as células de madeira juvenil são geralmente menores do que as de madeira adulta, a estrutura da célula também é diferente: na madeira juvenil, há uma maior proporção de células de paredes finas. Estas características fazem a densidade e resistência em madeira juvenil inferior em madeira adulta, e essas diferenças provavelmente têm consequências em forças de corte.

No trabalho de Gonçalves e Néri (2005) verificou-se que ocorreram diferenças de magnitude das forças de corte nessas duas regiões, sendo as forças de corte paralela, em média, 33,4% maiores na zona de madeira adulta, no corte 90-0, e 12% maiores no corte 90-90. Esse resultado é coerente com a diferenciação da estrutura anatômica do material, uma vez que as forças geradas durante a usinagem dependem, diretamente, de suas propriedades.

2.4.6 Principais propriedades físicas da madeira

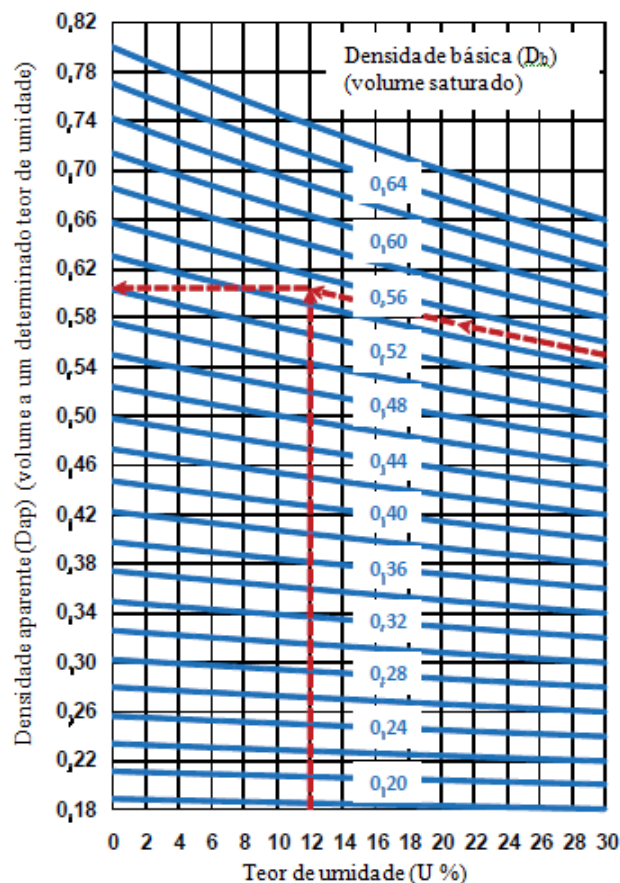
2.4.6.1 Densidade

Segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) a densidade é o peso ou a massa de madeira dividida pelo volume da amostra a um teor de umidade determinado. Assim, a unidade de densidade normalmente é expressa no sistema internacional (SI) em quilogramas por metro cúbico (kg.m^{-3}). A densidade específica é definida como a razão da densidade de uma substância à densidade da água (ρ_w) a uma temperatura de referência especificado, tipicamente 4° C, onde ρ_w é 1 g.cm^{-3} (1.000 kg.m^{-3}). Portanto, um material com uma densidade de 5 g.cm^{-3} tem uma densidade específica de 5. Quando valores de densidade são relatados na literatura, o teor de umidade da madeira também deve ser especificado. A densidade básica da madeira (D_b) varia significativamente entre as espécies. Embora a densidade da maioria seca das espécies esteja entre cerca de 320 e 720 kg.m^{-3} o intervalo na verdade estende-se desde cerca de 160 kg.m^{-3} para a balsa a mais de 1.040 kg.m^{-3} para algumas outras madeiras. Dentro de uma determinada espécie, D_b varia por causa de características anatômicas, tais como a proporção de madeira lenho inicial e de lenho tardio e

¹ HAYGREEN, J.G.; BOWYER, J.L. **Forest products and wood science**. Ames: Iowa State University Press, 1995.

cerne de alburno. Para um número limitado de espécies, minerais e substâncias extraíveis podem afetar também densidade. Madeira é usada em uma ampla gama de condições e, portanto, tem uma vasta gama de valores de conteúdo de umidade em serviço. A determinação da densidade da madeira (incluindo água) a um teor de umidade determinado, densidade aparente (D_{ap}), é muitas vezes necessária para algumas aplicações, como por exemplo, os cálculos das cargas estruturais ou pesos de transporte. É apresentado na Figura 14, um gráfico que relaciona a densidade básica (D_b) e a umidade da madeira (U) para encontrar a densidade aparente (D_{ap}) correspondente a uma certa umidade, para madeiras com uma densidade básica entre 160 a 700 kg.m^{-3} .

Figura 14 - Relação de densidade e teor de umidade da madeira.



Fonte: adaptado de (Wood handbook: wood as an engineering material, 2010).

As densidades básica e aparente podem ser calculadas pelas Equações (4) e (5), respectivamente de acordo com a Norma Brasileira Registrada (NBR) 07190 (1997).

$$D_b = \left(\frac{m_s}{V_{\text{sat}}} \right) \quad (4)$$

Onde:

D_b = densidade básica, em kg.m^{-3} ;

m_s = massa de amostra seca, em kg;

V_{sat} = volume da madeira saturada, em m^3 .

$$D_{ap(12\%)} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (5)$$

Onde:

$D_{ap(12\%)}$ = densidade da madeira a 12% de umidade, em $kg.m^{-3}$;

$m_{12\%}$ = massa de amostra a 12% de umidade, em kg;

$V_{12\%}$ = volume da amostra a 12% de umidade, em m^3 .

Segundo Gonçalves (2000) a densidade é uma das características mais significativas para ordenar as espécies do ponto de vista das forças de corte. Na ausência de qualquer informação empírica em relação às forças envolvidas, em uma dada condição de usinagem para uma determinada espécie, pode-se fazer uma aproximação comparando-se às informações sobre duas outras espécies de densidade conhecida através de uma proporcionalidade linear de forças e densidade. Entretanto este procedimento seria uma aproximação grosseira, visto que as interações entre as espécies, teor de umidade, espessura de cavaco e ângulo de saída da ferramenta são fatores complexos demais para serem tão simplesmente representados.

2.4.6.2 Umidade da madeira

Segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) a parede celular é em grande parte composta de celulose e hemicelulose, e os grupos hidroxilas desses produtos químicos fazem da parede celular, um material higroscópico. A lignina, o agente de cimentação das células, é uma molécula relativamente hidrofóbica, isto significa que as paredes celulares da madeira têm uma grande afinidade para a água, mas a capacidade das paredes para absorver a água é limitada, em parte, pela presença de lignina. Água na madeira tem um forte efeito sobre as propriedades da madeira, e as relações de água na madeira muito afetam o seu uso industrial.

Segundo Zenid (2009), várias propriedades da madeira são afetadas pelo teor de umidade das peças. Considera-se a madeira seca quando o seu teor de umidade está em equilíbrio com a umidade relativa do ambiente onde a madeira será utilizada. Nesta situação, as propriedades mecânicas são superiores e a movimentação dimensional é menor do que quando a madeira está verde.

Vários autores argumentam sobre a influência do teor de umidade no processo de usinagem da madeira, como Kollman¹ et al. (1984) apud Lucas Filho² (2004), Ferronho (2006), Jankowsky³ (1990) apud Rosso (2006), Néri (2003), Gonçalves (2000), Aguilera e Muñoz (2011).

Kollman et al. (1984) apud Lucas Filho (2004), citaram o teor de umidade como uma das propriedades físicas de grande influência na usinabilidade da madeira. Estes mesmos autores explicam que, a força de corte diminui quando o teor de umidade é aumentado. Esse efeito, segundo eles, pode ser justificado pela absorção de água na parede celular, aumentando o espaço entre as células e diminuindo assim a resistência mecânica da madeira a teores de umidade elevados. Por outro lado, quando a teores de umidade muito baixos (madeira seca), ou seja, umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, há uma redução dos espaços submicroscópicos entre as células formadoras da parede celular, aumentando a rigidez da mesma e com isso, aumentando a resistência mecânica de modo exponencial.

Ferronho (2006) comenta que o teor de umidade é uma propriedade física que tem grande influência na usinagem da madeira.

Segundo Jankowsky (1990) apud Rosso (2006), a umidade da madeira além de influir no seu tratamento com fluidos, resistência ao ataque de fungos xilófagos, colagem, afeta também o seu processamento mecânico.

Segundo Néri (2003) a umidade afeta as propriedades mecânicas da madeira, e, por conseguinte, as forças desenvolvidas no processo de usinagem. A madeira seca requer um maior esforço para o corte do que a madeira verde (com umidade acima do ponto de saturação das fibras), devido à contração volumétrica na secagem e o aumento das propriedades de resistência.

Para Gonçalves (2000) vários são os fatores que interferem sobre as forças e a potência de usinagem, nas diferentes operações de corte da madeira, afetando o desempenho de corte das ferramentas, como teor de umidade, densidade e direcionamento das fibras (referente à madeira) e espessura de corte, velocidade de corte e geometria da ferramenta (referente ao processo).

¹ KOLLMANN, F.F.P.; CÔTE, W.A.J. **Principles of Wood Science and Technology**. New York. 1984. v.1, 592 p.

² LUCAS FILHO, F. C.. **Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis**. 2004. 176 f. Tese (Doutorado) - 2004.

³ JANKOWSKY, I. P. **Fundamentos de secagem de madeiras. Documentos florestais**. Piracicaba, 1990.

Aguilera e Muñoz (2011) comentam que o estado da geometria e material da aresta de corte é parte resultante fundamental da qualidade, como também é a matéria-prima em termos de seu conteúdo de umidade e densidade.

Para Gonçalves (2000) o esforço de corte é mais elevado quando se corta madeira seca e menor para madeira verde. A taxa de aumento do esforço de corte varia desde desprezível, para madeiras muito densas (acima de 1000 kg.m^{-3}), a até 20% de acréscimo de esforço de corte entre o estado verde e seco, de uma espécie muito macia.

Koch (1964) comenta que, de modo geral as forças de corte para o corte ortogonal na direção 90-0, permanece aproximadamente constante na madeira seca até cerca de 8% de umidade, e então cai para aproximadamente 1/4 ou 1/2 desse valor quando a madeira se aproxima do ponto de saturação.

Ainda para Gonçalves (2000) o efeito da umidade nas características mecânicas da madeira pode ser genericamente expresso dizendo que a madeira seca é mais resistente do que a madeira úmida. Uma vez que se exceda o ponto de saturação das fibras, nenhuma mudança apreciável nas propriedades mecânicas da madeira a temperaturas normais pode ser observada.

Segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) a relação entre o peso da água contida no seu interior e o seu peso no estado completamente seco, expresso em porcentagem, definem o teor de umidade da madeira (teor de umidade na base seca).

Segundo a NBR 07190 (1997) o teor de umidade na base seca é calculado pela Equação (6).

$$U_{(\%)} = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

$U_{(\%)}$ = porcentagem de umidade;

m_i = massa inicial da amostra, em kg;

m_s = massa da amostra seca, em kg.

Segundo Goulet (1980)¹ e Beaudoin² (1996) apud Couto e Barcellos (2011) considerando que a madeira é um material higroscópico, ela conterà em seu interior água em

¹ GOULET, M. **Notes des cours de physique du bois**. Québec: Département des Sciences du Bois et de La Forêt, Université Laval, 1980. 139 p.

² BEAUDOIN, M. **Propriétés physico-mécaniques du bois**. (In): FORESTIERIE, M. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Québec: Les Presses de L'Université Laval. 1996. p. 1301- 1311.

diferentes formas. Por esta razão e pelo fato de ser utilizada em diferentes cadeias produtivas, o seu teor de umidade, pode ser calculado de diferentes formas:

1ª: teor de umidade em relação à massa absolutamente seca, conforme a Equação (6);

2ª: teor de umidade em relação à massa úmida ou bruta, onde a razão será entre a massa de água e a massa úmida total.

Segundo Couto e Barcellos (2011) o teor de umidade na base seca é utilizado para expressar teores de umidade para a madeira beneficiada mecanicamente por usinagem, para o uso em móveis, molduras, portas, etc., em que seu valor pode ultrapassar os 100 %, já o teor de umidade na base úmida é empregado às pastas celulósicas e em consequência também para a madeira empregada na fabricação destas. O teor de umidade quando expresso na base úmida jamais excede aos 100 %.

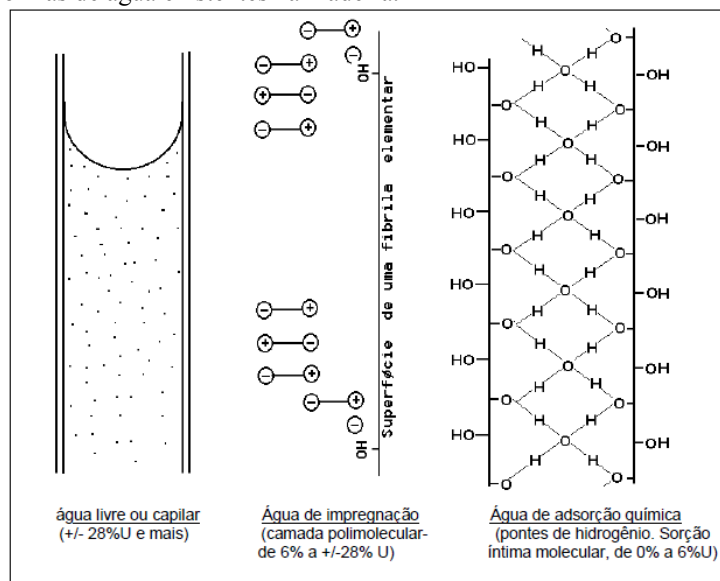
Segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) existe uma relação entre a massa específica da madeira de uma árvore recém cortada e a água contida nos seus espaços celulares e intercelulares (água livre ou de capilaridade), da água impregnada nas paredes celulares (água de impregnação) e da água que participa da sua constituição química (água de adsorção química).

Segundo Klock (2012) a água presente na madeira pode ser dividida em três diferentes condições de extrema importância em termos de qualidade, sendo elas:

- ✓ Água livre ou de capilaridade: a que preenche seus espaços capilares, formados pelos lúmens e espaços intercelulares (acima de aproximadamente 28 % de umidade);
- ✓ Água de impregnação adsorvida: a impregnada nos espaços submicroscópicos da parede celular, ligadas por forças elétricas polares (entre 6 e 28 % de umidade) e;
- ✓ Água de adsorção química: a aderida às interfaces existentes entre moléculas de celulose e de hemicelulose por forças de valências secundárias monomoleculares, forças de Van de Wall e ligações de hidrogênio (entre 0 e 6 % de umidade).

A distribuição dos três diferentes tipos de água presentes na madeira é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Possíveis formas de água existentes na madeira.



Fonte: (notas de aula sobre estrutura anatômica da madeira de coníferas, disciplina de química da madeira, PROF. Dr. Umberto Klock, UFPR, 2012).

Operacionalmente, o ponto de saturação das fibras (PSF) é considerado como a umidade acima do qual as propriedades físicas e mecânicas de madeira não mudam em função do teor de umidade. O ponto médio de saturação das fibras de madeira está entorno 30% de umidade, mas em espécies e peças individuais de madeira pode variar em vários pontos percentuais deste valor.

Segundo Klock (2012) teoricamente somente depois de toda água livre ou de capilaridade ser removida, começa ocorrer a perda da água de impregnação contida nos espaços submicroscópicos, existentes entre os constituintes estruturais da parede celular (entre macrofibrilas, microfibrilas e fibrilas elementares de celulose, bem como do interior das regiões amorfas das fibrilas elementares). Neste momento, o teor de umidade da madeira corresponde ao PSF é de grande importância prática. A maioria das propriedades da madeira independem do seu teor de umidade, enquanto este se situa acima do PSF. No entanto, elas passam a ser bem relacionadas com o teor de umidade quando este se encontra abaixo do PSF, pois a partir daí até 0 % de umidade, a madeira se contrairá e, de forma geral, torna-se mais resistente.

O ponto de saturação da fibra separa as duas primeiras formas de água presentes na madeira. Dentro de uma mesma peça de madeira, o teor de umidade no qual ambos, lúmen e paredes celulares, são completamente saturados com água é o conteúdo máximo de umidade possível dentro do material madeira. A densidade básica (D_b) é o principal determinante do teor de umidade máxima, pois com o seu aumento, o volume do lúmen deve diminuir,

diminuindo os espaços vazios disponíveis á presença de água livre, isto para todas as espécies, pois a densidade básica das paredes celulares (madeira propriamente dita) é constante entre as espécies.

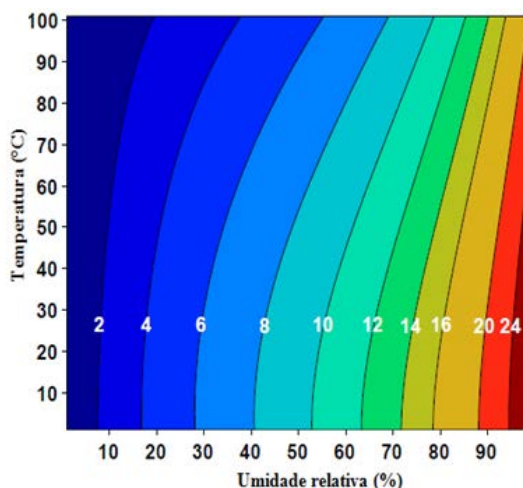
Controlar o teor de umidade da madeira é uma ação de extrema importância para sua correta utilização, este controle auxilia na diminuição dos defeitos secagem como empenamentos, arqueamentos, torções e defeitos de usinagem, como arrepiaamentos das fibras ou lascamentos das arestas das peças de madeira acabadas, entre outros defeitos. Alguns defeitos são encontrados em produtos de madeira antes que ela adquirira equilíbrio higroscópico com o ambiente (temperatura e umidade relativa do ar).

Segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) como a madeira é um material higroscópico, e por usualmente estar sujeita a alterações no teor de umidade em função das variáveis do meio ambiente, ela está quase sempre perdendo ou ganhando umidade para atingir um estado de equilíbrio com a atmosfera. Quando isto ocorre, diz-se que a madeira está em “equilíbrio higroscópico” com o ambiente. O teor de umidade, ao atingir o equilíbrio higroscópico, é função das condições climáticas e da espécie florestal e é conhecido como “umidade de equilíbrio da madeira”. Isto ocorre quando se estabelece um equilíbrio entre a tensão de vapor d’água contido no ar e a pressão de vapor interna e istente no interior do lenho.

A umidade de equilíbrio atingida pela madeira depende, principalmente, da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente.

O comportamento do teor de umidade equilíbrio da madeira em função da temperatura e da umidade relativa é apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Teor de umidade de equilíbrio da madeira (linhas no plano) em função da umidade relativa e temperatura.



Fonte: adaptado de (Wood handbook: wood as an engineering material, 2010).

Segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) existem vários métodos para determinar o teor de umidade da madeira, entretanto eles se limitam apenas a alguns, em função da forma e do estado que a madeira poderá se encontrar e da precisão desejada os mais utilizados são:

a) Método por pesagens

Inicia-se com a pesagem da amostra com teor de umidade desconhecido (m_i) e anotando-se o valor de sua massa. Em seguida a amostra é levada à estufa, a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, até sua secagem completa. A verificação desta é realizada por pesagens periódicas até a observância de massa constante, indicando a total remoção da água na condição de climatização utilizada.

Observada a secagem completa da madeira, a amostra é resfriada em temperatura ambiente, no interior de um dessecador contendo algum produto higroscópico que a mantenha totalmente desidratada, a exemplo da sílica gel com indicador de umidade, normalmente utilizada.

Com a massa obtida após a secagem (m_s) e resfriamento, determina-se a massa da água removida ($m_i - m_s$) e relaciona-se este valor com a massa da madeira seca (m_s).

Posteriormente às determinações dos pesos com a madeira úmida e seca, estes valores são relacionados, e a razão entre o peso úmido e peso seco é multiplicada por 100 para obtermos o resultado em porcentagem.

b) Métodos que utilizam aparelhos elétricos

Os aparelhos elétricos utilizados para a determinação do teor de umidade da madeira podem ser construídos de duas formas distintas: Os baseados na resistência da madeira à passagem de uma corrente contínua, ou na sua capacidade elétrica. A principal desvantagem dos aparelhos elétricos é não ser possível à determinação de teores de umidade inferiores a 6%, e a pouca precisão alcançada a teores de umidade superiores a 30%, embora tenham escalas para medições até 60% de umidade.

Aparelhos baseados em medidas de resistência.

Estes aparelhos são utilizados atualmente e baseiam-se na resistência que a madeira oferece à passagem de uma corrente elétrica contínua.

A resistência da madeira à passagem elétrica é muito variável com pequenas variações do teor de umidade da madeira, sendo este diretamente determinado por aparelhos portadores de escalas convertidas para a sua medição, em percentuais, em vez de se determinar resistência elétrica propriamente dita.

Este tipo de aparelho determina diretamente teores de umidade compreendidos entre 6 e 25 %, com precisão de aproximadamente 1,5 %, são portáteis, de pequenas dimensões e não necessitam de instalações elétricas externas para a sua utilização, pois funcionam com baterias de fácil aquisição no mercado.

Além das vantagens supracitadas, estes aparelhos possuem eletrodos em formas variadas, adequados para diferentes espessuras de madeira e, até mesmo, para a determinação do teor de umidade de serragem.

A resistência à passagem da corrente elétrica também varia com a espécie de madeira, com a temperatura e tipo da grã da madeira, esta última influenciando na direção de circulação da corrente elétrica (paralela ou perpendicularmente às fibras).

Aparelhos baseados na capacidade elétrica.

Estes aparelhos baseiam-se na medição da capacidade elétrica da madeira, ou da constante dielétrica. Eles têm, afora o princípio de funcionamento, as mesmas características dos aparelhos anteriormente descritos.

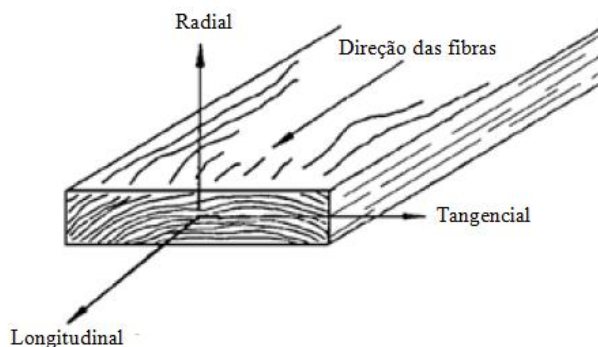
A entrada de água nos espaços submicroscópicos da parede celular, causa a dilatação e o amolecimento da madeira. Assim, de forma geral, quanto maior for o teor de umidade, menor é a sua resistência. Esta influência se verifica entre um teor de umidade entre zero e ± 30 %; acima deste ponto não ocorrem alterações das propriedades elásticas e mecânicas da madeira.

2.4.7 Propriedades mecânicas da madeira

Segundo a obra Wood handbook: Wood as an engineering material (2010) a madeira pode ser descrita como um material ortotrópico, ou seja, ele tem propriedades mecânicas únicas e independentes nas direções dos três eixos perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial (Figura 17). O eixo longitudinal é paralelo da fibra (grã); o eixo radial é normal aos

anéis de crescimento (perpendiculares à grã na direção radial); e o eixo tangencial é perpendicular à grã, mas tangente para os anéis de crescimento.

Figura 17 - Três eixos principais de madeira com relação à direção da grã e anéis de crescimento.



Fonte: adaptado de (Wood handbook: wood as an engineering material, 2010).

Propriedades mecânicas mais comumente medidas representam as "Propriedades de resistência" para projeto, incluem o módulo de ruptura na flexão, tensão máxima de compressão paralela à grã, tensão de compressão perpendicular à grã e cisalhamento paralelo a grã. Medições adicionais são feitas frequentemente para avaliar o trabalho de carga máxima em flexão, impacto, flexão, força, dureza e resistência à tração perpendicular a grã.

Segundo Gonçalves (2000) a dureza é uma propriedade mecânica intimamente associada à massa específica. Pode ser grosseiramente avaliada pela impressão da unha nas faces da madeira, contribuindo também para a distinção de espécies. Madeiras excessivamente moles apresentam dificuldades quanto à obtenção de superfícies lisas, pela ocorrência de um arrancamento das células destes tecidos frágeis, resultando numa superfície aveludada. Por outro lado, espécies com massa específica muito alta são difíceis de ser trabalhada, por provocarem grande desgaste das ferramentas em vista de sua acentuada dureza.

Algumas dessas propriedades, agrupadas de acordo com as categorias de floresta de folhosas e de coníferas (não correlacionados com dureza ou maciez), são apresentadas no Quadro 3, para muitas espécies comercialmente importantes.

Quadro 3 - Propriedades mecânicas de algumas madeiras.

Nomes comuns e científicos das espécies	Teor de umidade	Massa específica	Flexão estática			Compressão paralela às fibras (kPa)	Cisalhamento paralelo às fibras (kPa)	Dureza lateral (N)	local de origem
			Módulo de ruptura (kPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Trabalho em máxima carga (kJ/m ³)				
*Pinheiro do Paraná (<i>Araucaria augustifolia</i>)	verde	0,46	49600	9300	67	27600	6700	2500	AM
	12%	-	93100	11100	84	52800	11900	3500	
*Peroba rosa (<i>Aspidosperma spp., peroba group</i>)	verde	0,66	75200	8900	72	38200	13000	7000	AM
	12%	-	83400	10500	63	54600	17200	7700	
*Pinus caribéia (<i>Pinus caribaea</i>)	verde	0,68	77200	13000	74	33800	8100	4400	AM
	12%	-	115100	15400	119	58900	14400	5500	
*Pinus oocarpa (<i>Pinus oocarpa</i>)	verde	0,55	55200	12000	48	25400	7200	2600	AM
	12%	-	102700	15500	75	53000	11900	4000	
*Pinus radiata (<i>Pinus radiata</i>)	verde	0,42	42100	8100	-	19200	5200	2100	AS
	12%	-	80700	10200	-	41900	1100	3300	
*Piquia (<i>Caryocar spp.</i>)	verde	0,72	85500	12500	58	43400	11300	7700	AM
	12%	-	117200	14900	109	5800	13700	7700	
**Pinus elioti (<i>Pinus elliotii</i>)	verde	0,42	-	6463	-	18500	5800	1932	AM
	15%	0,48	-	-	-	31500	-	-	

Fonte: adaptado de *(Wood handbook: wood as an engineering material, 2010).

** (Zenid, Geraldo José. Madeira: uso sustentável na construção civil, 2009).

A massa específica é baseada no peso seco em estufa e volume ao verde ou a 12% de umidade.

2.5 DETERMINAÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NAS OPERAÇÕES DE USINAGEM

O acabamento superficial é resultante da influência de vários fatores como as condições da máquina, geometria de corte e desenho construtivo da ferramenta, parâmetros de corte, perfil e método de fixação da peça. Levando em consideração que as interfaces máquina/peça/ferramenta não são perfeitas, ou seja, possui uma rigidez limitada, a superfície fresada sempre estará sujeita aos erros em sua forma e posição. Um dos erros muito comuns é o de ondulação, resultado de folgas mínimas entre a face do eixo árvore e a face da peça em usinagem ou mesmo o posicionamento axial irregular das arestas de corte.

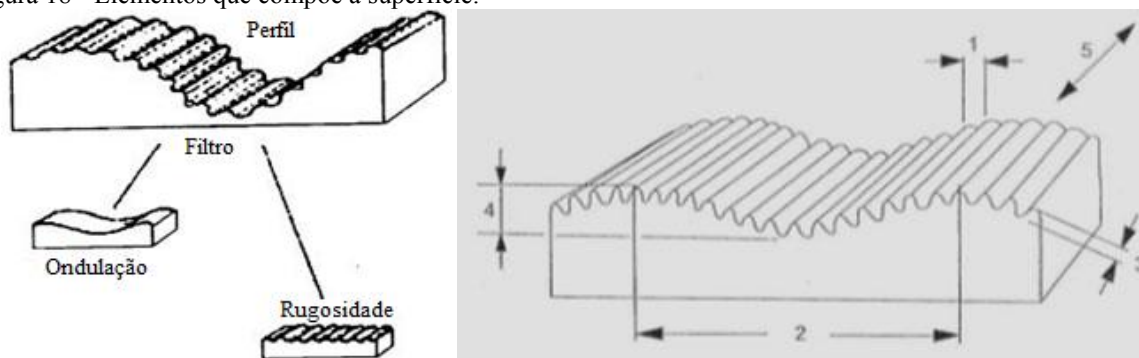
Machado et al. (2011) comentam que o acabamento de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores que podem ser divididos em rugosidade, ondulações e falhas. Estes autores definem o acabamento de uma superfície usinada da seguinte forma:

- ✓ As ondulações e erros de forma são definidos como irregularidades superficiais ou erros macrogeométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades. Podem ser geradas por vibrações e flexões da ferramenta e/ou da peça devido à força de usinagem, erros de fixação da peça ou da ferramenta, etc.

- ✓ As falhas são interrupções na topografia típica de uma superfície. São não intencionais, inesperadas e indesejáveis. Podem ser causadas por defeitos inerentes ao processo de usinagem, como inclusões, trincas, etc.
- ✓ A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc.). Em muitos casos a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem.

É apresentado na Figura 18, um perfil efetivo de uma superfície e suas características do acabamento superficial.

Figura 18 - Elementos que compõe a superfície.



Fonte: adaptado de (Novaski, 2013).

1 – comprimento da rugosidade; 2 – comprimento da ondulação; 3 – amplitude da rugosidade (altura pico-vale); 4 – amplitude da ondulação; 5 – orientação dos sulcos.

2.5.1 Parâmetros para a quantificação da rugosidade

Segundo Machado et al. (2011) a rugosidade pode ser avaliada por diversos parâmetros, que podem ser classificados em:

Parâmetros de amplitude: determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície;

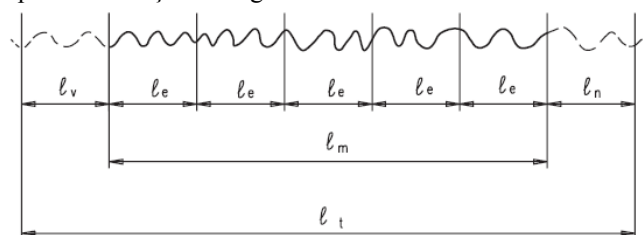
Parâmetros de espaço: determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície;

Parâmetros híbridos: determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço.

A norma NBR ISO 4287 (2002) utiliza o sistema de medição da rugosidade baseado na linha média, onde todas as grandezas de medição da rugosidade são definidas a partir do conceito de linha média, esta divide o perfil tal que a soma das áreas acima é igual à soma das áreas abaixo, ao longo do comprimento de medição (l_m).

As normas NBR 4287/2002 e NBR 4288/2008 padronizaram os parâmetros e critérios para avaliação da rugosidade no apalpamento mecânico onde deve se estabelecer um comprimento de medição (l_m), com cinco comprimentos de amostragem (l_e) chamados de (“cut-off”) como apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Comprimentos para a avaliação da rugosidade.



Fonte: adaptado da (NBR ISO 4287 (2002)).

Onde:

l_e : comprimento de amostragem (“cut-off”);

l_m : comprimento de medição – trecho considerado no perfil rugosidade utilizado diretamente na avaliação;

l_t : comprimento total de medição;

l_v : comprimento para atingir a velocidade de medição do apalpador;

l_n : comprimento para parada do apalpador.

Tanto o valor de (l_v) como o de (l_n) não são considerados na avaliação da rugosidade.

O “cut-off”, de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008) deve ser escolhido de acordo com o Quadro 4, sendo que os aparelhos de medição, conhecidos como rugosímetros, apresentam os valores limites de “cut-off” padronizados.

Quadro 4 - Comprimento de amostragem (“cut-off”) recomendados para perfis de usinagem não periódicos.

Rugosidade Média R_a (μm)	Mínimo Comprimento (l_e) “cut-off” (mm)
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,8
Maior que 2,0 até 10,0	2,5
Maior que 10,0	8

Fonte: adaptado da (ABNT – NBR ISO 4288 (2008))

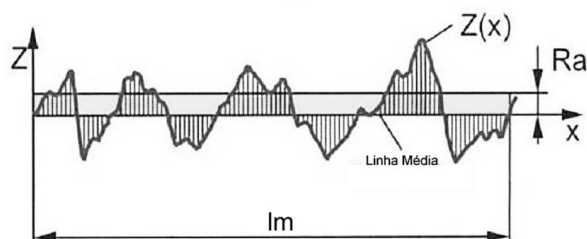
A norma NBR ISO 4287 (2002) apresenta os parâmetros empregados na quantificação da rugosidade, entre eles o desvio aritmético médio ou rugosidade média (Figura 20) que tem por definição a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de

amostragem e a altura total do perfil ou máxima distância pico a vale (Figura 21) que é definida como a soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de amostragem.

O valor de rugosidade média pode ser dado pela Equação (7) e é expresso em (μm):

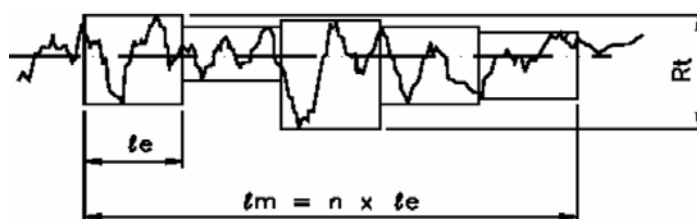
$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |Z(x)| dx \quad (7)$$

Figura 20 - Representação do parâmetro Ra.



Fonte: adaptado de (ZACARIAS, D. Análise do Processo de Lixamento Tubular da Madeira de *Corymbia citriodora*, 2012).

Figura 21 - Representação do parâmetro Rt.



Fonte: adaptado de (ZACARIAS, D. Análise do Processo de Lixamento Tubular da Madeira de *Corymbia citriodora*, 2012).

Segundo Machado et al. (2011) entre os parâmetros de amplitude o Ra é o mais utilizado como parâmetro de controle do processo, sendo muito utilizado na indústria, sendo disponível nos instrumentos mais simples, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito. Para alguns processos de fabricação com frequência muito alta de vales ou picos, o parâmetro não é adequado, já que a distorção provocada pelo filtro eleva o erro a altos níveis. Em casos nos quais é desejável (ou mesmo necessário) especificar a altura máxima da rugosidade, o parâmetro Rt devem ser empregados, pois são diretamente influenciados por qualquer defeito ou irregularidade na superfície. Estes autores comentam ainda que os parâmetros de rugosidade (Ra e Rt) para a operação de fresamento tangencial, podem ser calculados teoricamente pelas Equações (8) e (9), respectivamente:

$$Ra = \frac{f_z^2}{18 \times \sqrt{3} \times R} \quad (8)$$

$$Rt = \frac{f_z^2}{8 \times R} \quad (9)$$

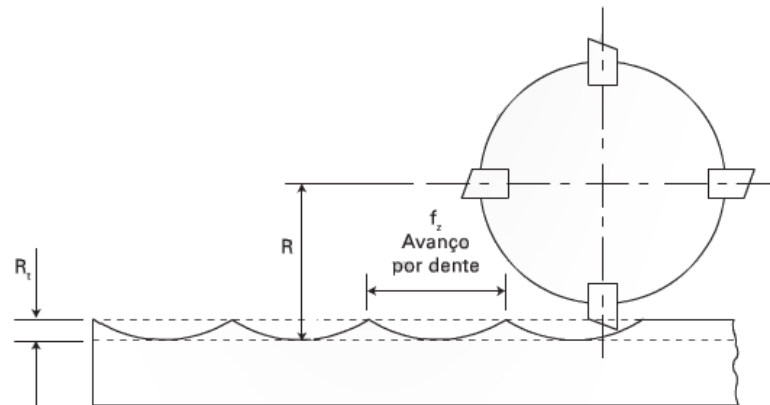
Onde:

R = raio da ferramenta, em mm;

f_z = avanço por dente, em mm.

O perfil teórico Rt para um fresamento tangencial é apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Perfil teórico Rt de uma superfície usinada por fresamento tangencial.



Fonte: adaptado de (Machado et al., 2011)

2.5.2 Estudos atuais sobre a quantificação da rugosidade na madeira

Segundo Elmas et al. (2011) os sistemas de medição de perfil para obter características de superfície podem ser divididos em dois grupos principais - os métodos de contato e sem contato. Zhong, Hiziroglu e Chan (2013), Hiziroglu et al. (2013) e Ayrilmis, Benthien e Thoemen (2012) acrescentam que atualmente não existe um método padrão aceito para determinar a rugosidade da superfície de madeira e de produtos derivados de madeira.

A respeito do método de caracterização da superfície de usinagem sem contato, a maioria dos métodos utilizados são baseados no método óptico, argumentam Elmas et al. (2011). Estes métodos incluem profilômetros ópticos (baseados principalmente no método a laser), microscópios, analisadores de imagem, espectrógrafos de imagem, interferômetros, transdutores de fibra óptica, manchas de luz branca, dispersão de laser, sistemas de

seccionamento de luz óptica, etc. Os métodos ópticos podem ser classificados em três categorias de acordo com o seu princípio de funcionamento: Sensoriamento de triangulação, análise de sombra e seccionamento de luz.

Para Elmas et al. (2011) o método mais comum de obtenção de dados de perfil de superfície, considerando contato direto com a peça usinada, é a utilização do contato mecânico do perfilômetro de ponta em toda a superfície, rastreando o movimento da ponta para obter informações do perfil. De acordo com Islam et al. (2011) e Jeyapoovan e Murugan (2013) os sistemas de medição do perfil da superfície têm sido amplamente utilizados em várias indústrias de processos para a avaliação do acabamento superficial e do desgaste da ferramenta de corte.

Para Kilic, Hiziroglu e Burdurlu (2006) uma das principais vantagens do método do perfilômetro de ponta é apresentação do perfil real dos parâmetros de rugosidade numéricos da superfície. Qualquer tipo de irregularidades e magnitude da rugosidade numa superfície pode ser quantificada objetivamente por este método.

Jeyapoovan e Murugan (2013) descrevem que, para o método do perfilômetro de ponta, a topografia de superfície tem duas características fundamentais, que são a amplitude de pico ou vale na superfície, e o comprimento de onda entre os cumes e vales. Medições de superfície são geralmente expressos em termos de perfil de uma superfície $y(x)$, em duas dimensões e são considerados como equivalentes para expressões tridimensionais. O movimento vertical da ponta da agulha, para perfilômetro de ponta, é medido para um comprimento pré-determinado na horizontal. A ponta de agulha do perfilômetro, no entanto, não consegue chegar a todos os vales da superfície e atua como um filtro passa baixo de dados de superfície. Portanto, o raio da ponta da agulha tem uma limitação nas medições de superfícies finas. Além disso, os componentes de alta frequência de rugosidade da superfície são filtrados pela ponta da agulha, bem como qualquer deformação não linear na superfície não pode ser avaliada de forma adequada. Além disso, a ponta da agulha pode causar danos e/ou pode ser danificada em contato com a superfície a ser medida. A exigência de um tempo considerável para o posicionamento do perfilômetro de ponta sobre a superfície, antes da medição é outra limitação.

Apesar das limitações apontadas por Jeyapoovan e Murugan (2013) alguns autores como Kilic, Hiziroglu e Burdurlu (2006), Zhong, Hiziroglu e Chan (2013) e Hiziroglu et al. (2013) perceberam em seus estudos que o perfilômetro de ponta é um método apropriado para análise da superfície de produtos madeireiros.

Vários autores tem avaliado a rugosidade superficial utilizando o perfilômetro de ponta, como Hiziroglu et al. (2013); Ayrimis, Benthien e Thoemen (2012); Baharoğlu et al. (2012); Candan et al. (2012); Aslan, Coşun e Kiliç (2008). Nos estudos de Zhong, Hiziroglu e Chan (2013), além do uso de perfilômetro foi utilizado também um instrumento de varredura de topografia da superfície (3D) a laser (sem contato). Bakar, Hiziroglu e Tahir (2013) mediram a rugosidade superficial usando um perfilômetro portátil.

utores como Baharoğlu et al. (2012), Candan et al. (2012) tem seguido norma ISO 4287 (1987/1997) para determinação dos três parâmetros de rugosidade: a rugosidade média (R_a), a média de altura de pico-a-vale (R_z) e altura máxima de pico-a-vale (R_t).

Jeyapoovan e Murugan (2013) argumentam que apesar do perfilômetro de ponta ser convencionalmente utilizado na medição da rugosidade da superfície, este método não é adequado para medições em linha de produção, uma vez que este processo de medição é invasivo e é do tipo de contato. Havendo uma necessidade crescente de um método confiável, online e sem contato para medições de superfície.

Segundo Zhong, Hiziroglu e Chan (2013), a rugosidade da superfície de madeira e produtos de madeira pode ser facilmente determinada com valores numéricos usando várias técnicas indiretas.

Segundo Zhong, Hiziroglu e Chan (2013) e Hiziroglu et al. (2013) a maior parte das propriedades físicas e mecânicas de espécies madeireiras e materiais derivados de madeira são extensivamente investigados e listados na literatura, mas o mesmo não ocorre para análise da qualidade superficial de peças usinadas. De acordo com Zhong, Hiziroglu e Chan (2013), a irregularidades da superfície de madeira maciça, tradicionalmente, não é tão reconhecida quanto em outros materiais de engenharia, incluindo metais e plásticos.

Estudos sobre a análise da rugosidade superficial em processos de usinagem têm sido feitos para diferentes espécies de madeira. Os principais estudos concentram-se na avaliação da qualidade superficial considerando os planos de corte tangencial e radial em superfícies aplainadas e lixadas, como nos estudos de Kilic, Hiziroglu e Burdurlu (2006) e Aslan, Coşun e Kilic (2008). No entanto, na literatura não foram encontrados estudos que tratam da rugosidade em superfícies aplainadas considerando diferentes teores de umidade da matéria-prima, como sugerido por Kilic, Hiziroglu e Burdurlu (2006) e Aknouchea et al. (2009), lenhos inicial e tardio, bem como sentido de corte.

Além das propriedades características do material madeira, Elmas et al. (2011), acrescentam que a qualidade da superfície de madeira depende também de variáveis

relacionadas aos equipamentos de usinagem. Estas variáveis de processo incluem a condição de corte da ferramenta, parâmetros estruturais da máquina-ferramenta, vibrações do cabeçote de usinagem, desequilíbrio do eixo, geometria de corte da ferramenta, ambiente, entre outros.

Para Sarı a a e Güllü (201) e sla n, Coş un e Kilic (2008) um dos critérios mais importantes na determinação da qualidade da superfície dos materiais é a rugosidade da superfície. Kilic, Hizirolu e Burdurlu (2006) e Hizirolu et al. (2013) acrescentam que a qualidade da superfície de produtos sólidos de madeira influencia outras etapas do processos de fabricação, como o acabamento.

Na indústria de painéis a base de madeira para produção de mobiliário, Ayrilmis, Benthien e Thoemen (2012), tratam as características de superfície em termos de rugosidade como uma importante medida na determinação da qualidade do produto final. Para Baharoğlu et al.(2012) um aumento na rugosidade reduz a qualidade final dos produtos usinados. Aslan, Coş un e Kilic (2008) e Zhong, Hizirolu e Chan (2013) acrescentam que superfícies lisas reduzem o uso de materiais de acabamento e, ao mesmo tempo, proporcionam uma melhor aderência de adesivos utilizados em processos de colagem. Jeyapoovan e Murugan, (2013) acrescentam que este é fator importante na determinação do funcionamento satisfatório dos componentes usinados.

Elmas et al. (2011) e Islam et al. (2011) descrevem que durante anos, a inspeção visual tem sido utilizada em indústrias para determinar a qualidade do acabamento da superfície. Uma vez que, na maioria dos casos, ela não consegue garantir um padrão mínimo de qualidade consistente no acabamento, sistemas de medição baseados no perfilômetro de ponta tiveram sucesso em relação à inspeção humana. No entanto, nos últimos anos, a tendência é a de explorar outras técnicas para a realização de medições de perfil de superfície.

2.6 MEDIÇÃO DA POTÊNCIA EM USINAGEM

Segundo Machado et al. (2011) a potência em usinagem pode ser medida, experimentalmente, por meio da tensão e da corrente elétrica consumida. Para os casos de motores trifásicos, os componentes de potência devem ser multiplicados por $\sqrt{3}$, pois a corrente no caso de ligação em triângulo das bobinas, e a tensão, no caso de ligação em estrela, são multiplicadas por esse valor. Portanto a potência aparente para motores trifásicos pode ser calculada pela Equação (10):

$$P_{ap3F} = U \times i \times \sqrt{3} \times \cos \varphi \quad (10)$$

Onde:

P_{ap3F} = potência aparente para motores trifásicos, em Watts;

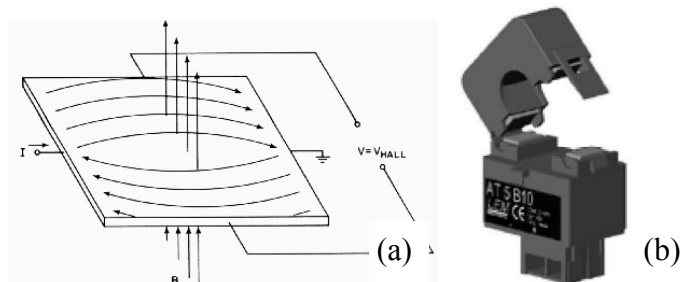
U = tensão de uma das fases, em Volts;

i = corrente alternada de uma das fases, em Amperes;

$\cos \varphi$ = fator de potência.

Segundo Machado et al. (2011) a obtenção da diferença potencial pode ser medida por volímetros e para a obtenção da corrente, pode-se usar amperímetros ligados em série dentro do circuito, entretanto, este procedimento pode causar problema de intrusão nas máquinas ferramentas, nestes casos utilizam-se os dispositivos de Efeito Hall. Nestes sensores a diferença de potencial gerada é proporcional à corrente que gerou (Figura 23 a e b), e a razão entre ambas é chamada Resistência de Hall, que é uma característica do material utilizado, estes sensores são colocados externamente aos cabos elétricos sem que precisem ser interrompidos.

Figura 23 - a) Ilustração do efeito Hall, Machado et al. (2011) e b) Sensor de efeito Hall utilizado.



Fonte: Sensor de efeito Hall (fabricante LEM, modelo AT B10).

2.7 EMISSÃO SONORA

Segundo Fernandes (2005) o som é um fenômeno vibratório resultante de variações da pressão no ar. Essas variações de pressão se dão em torno da pressão atmosférica e se propagam longitudinalmente, à velocidade de 344 m/s para 20 °C. Segundo este autor, todo som se caracteriza por três variáveis físicas: frequência, intensidade e timbre.

A frequência é o número de oscilações por segundo do movimento vibratório do som para uma onda sonora em propagação, é o número de ondas que passam por um determinado referencial em um intervalo de tempo.

A intensidade do som é a quantidade de energia contida no movimento vibratório. Essa intensidade se traduz com uma maior ou menor amplitude na vibração ou na onda sonora. Para um som de média intensidade essa amplitude é da ordem de centésimos de milímetros.

A intensidade de um som pode ser medida através de dois parâmetros:

- ✓ A energia contida no movimento vibratório (W.cm^{-2});
- ✓ A pressão do ar causado pela onda sonora ($\text{BAR} = 1 \text{ dina.cm}^{-2}$).

O timbre é a forma de onda da vibração sonora.

Segundo Fernandes (2005) o número de decibels (dB) nada mais é que aquele expoente da relação das intensidades físicas, multiplicado por 10 e a intensidade sonora medida em decibels é definida como Nível de Intensidade Sonora (NIS) ou Sound Intesity Level (SIL), em inglês.

Assim, o NIS, medido em decibels, satisfaz a construção fisiológica do nosso ouvido.

O (NIS) pode ser calculado pela Equação (11):

$$\text{NIS} = 10 \times \log \frac{I}{I_{\text{ref}}} \quad (11)$$

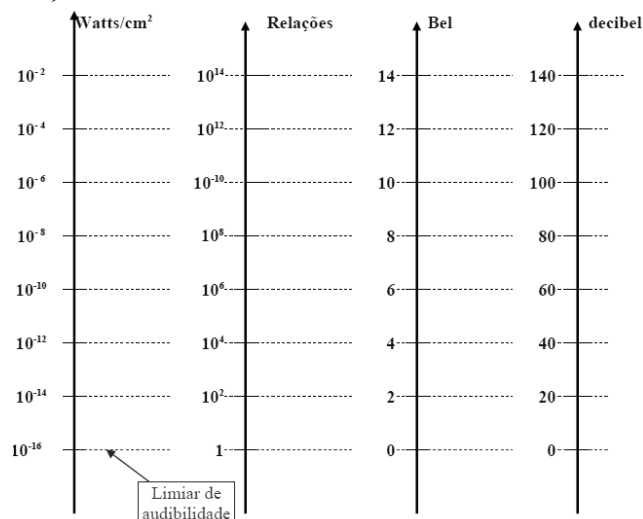
Onde:

I = intensidade sonora de um som, em W.cm^{-2} ;

$I_{\text{ref}} = 10^{-16} \text{ W.cm}^{-2}$.

É utilizada uma escala logarítmica para a intensidade sonora, como apresentada na Figura 24.

Figura 24 - Esquema da formação da escala em decibels.



Fonte: (Apostila de Acústica e ruídos, Prof. Dr. João Candido Fernandes, UNESP/Bauru, 2005).

Na Figura 25 observam-se alguns níveis de intensidade de som, relacionando com o ambiente ou fonte geradoras mais comuns.

Figura 25 - a) Níveis de ruído em ambientes; b) Alguns exemplos de intensidade sonora.



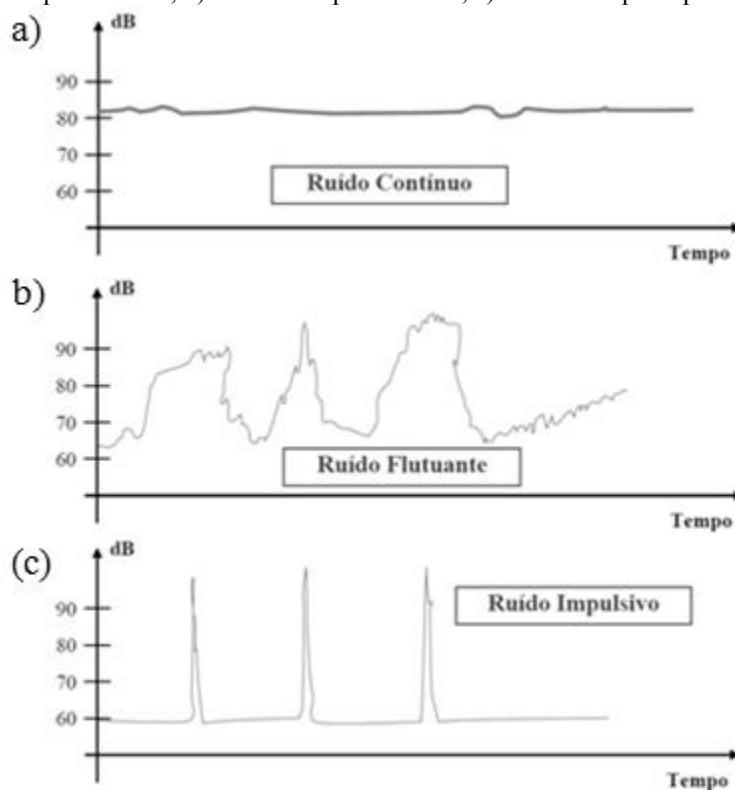
Fonte: (Apostila de Acústica e ruídos, Prof. Dr. João Candido Fernandes, UNESP/Bauru, 2005).

Fernandes (2005) define o ruído, de maneira subjetiva, como toda sensação auditiva desagradável, ou fisicamente, como todo fenômeno acústico não periódico, sem componentes harmônicos definidos. De um modo geral, os ruídos podem ser classificados em três tipos:

- ✓ Ruídos contínuos: são aqueles cuja variação de nível de intensidade sonora é muito pequena em função do tempo. São ruídos característicos de bombas de líquidos, motores elétricos, engrenagens, etc. Exemplos: chuva, geladeiras, compressores, ventiladores.
- ✓ Ruídos flutuantes: são aqueles que apresentam grandes variações de nível em função do tempo. São geradores desse tipo de ruído os trabalhos manuais, afiação de ferramentas, soldagem, o trânsito de veículos, etc. São os ruídos mais comuns nos sons diários.
- ✓ Ruídos impulsivos ou de impacto: apresentam altos níveis de intensidade sonora, num intervalo de tempo muito pequeno. São os ruídos provenientes de explosões e impactos. São ruídos característicos de rebiteadeiras, impressoras automáticas, britadeiras, prensas, etc.

São apresentadas na Figura 26 (a), (b) e (c), as características de variação dos três tipos de ruídos comumente encontrados no dia a dia.

Figura 26 - a) Ruído do tipo contínuo; b) Ruído do tipo flutuante; c) Ruído do tipo impactivo.



Fonte: adaptado de (Apostila de Acústica e ruídos, Prof. Dr. João Candido Fernandes, UNESP/Bauru, 2005).

Segundo Fernandes (2005) a medição dos níveis de som é a principal atividade para avaliação dos problemas do ruído em um ambiente. Pode-se ser realizada desde uma simples avaliação local, passando por um levantamento mais minucioso, até uma análise de alta precisão usando analisadores de frequência. Essas medições devem ser realizadas por medidores de nível de pressão de som (chamados erradamente de decibelímetros), que estejam de acordo com as normas internacionais. Os aparelhos de boa procedência atendem os padrões da International Electrotechnical Commission (IEC) e do American Standards Institute (ANSI). Portanto, os equipamentos de medida de som devem atender a uma dessas normas:

IEC 651 (1979) - Sound Level Meters;

IEC 804 (1985) - Integrating-Averaging Sound Level Meters;

ANSI S1.4 - (1983) - Specification for Sound Level Meters

ANSI S1.25 - (1991) - Specification for Personal Noise Dosimeters

ANSI S1.11 - (1986) - Specification for Oitava Filters.

Em função de sua precisão nas medições (tolerâncias), os medidores são classificados pela ANSI em três padrões, e pela IEC em quatro, como apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Padrões dos medidores de ruído conforme a aplicação.

Padrão ANSI S1.4	Padrão IEC 651	Aplicação
0	0	Referência padrão de laboratório
1	1	Uso em laboratórios ou campo em condições controladas
2	2	Uso geral em campo
Não existe	3	Inspeções rotineiras, tipo "varredura" para constatar se os níveis de ruído estão substancialmente acima dos limites de tolerância

Fonte: adaptado de (Apostila de Acústica e ruídos, Prof. Dr. João Candido Fernandes, UNESP/Bauru, 2005).

2.8 PROJETO DE EXPERIMENTOS

O objetivo principal do método de Taguchi é o de melhorar as características de um processo ou de um produto através da identificação e ajuste dos seus fatores controláveis, que irão minimizar a variação do produto final em relação ao seu objetivo. Ao ajustar os fatores no seu nível ótimo, os produtos podem ser fabricados de maneira a que se tornem mais robustos a toda e qualquer mudança que possa ocorrer e que seja incontrolável (condições ambientais, variação dimensional, tempos de acondicionamento, etc.).

No método Taguchi, a matriz ortogonal pode fornecer um meio eficiente para realizar os experimentos com o menor número de tentativas. A razão sinal/ruído (S/N) de Taguchi é utilizada como a característica de escolha de qualidade. Para a otimização do processo, existem três S/N características de proporção: menor é a melhor, maior é melhor e nominal é melhor. Neste estudo, a rugosidade média aritmética (Ra), distância entre pico e vale (Rt), a potência consumida e a emissão sonora são investigadas visando obter as condições ótimas de usinagem, com isto, a razão menor é melhor é selecionada para atingir aspereza mínima, mínimo consumo de potência e mínima emissão sonora.

A razão sinal ruído (S/N), onde o menor é melhor é dada pela Equação (12):

$$S/N = -10 \times \log \frac{(\sum y^2)}{n} \quad (12)$$

Onde:

S/N = razão sinal ruído.

y = valor da resposta;

n = número de repetições.

Sarı a a e Güllü (201) utilizaram o método de Taguchi para planejar a combinação dos fatores e seus diferentes níveis no estudo de usinagem de aços, eles optaram por esta metodologia devido a complexidade da usinagem de aços no que diz respeito a dificuldade de determinar os efeitos dos parâmetros de processo na qualidade da superfície.

Segundo Pimenta et al. (2012) o método de planejamento experimental de Taguchi proporciona o estudo das variáveis de entrada que fazem parte de um processo e suas interações com número reduzido de experimentos originalmente planejados, pois a organização das combinações das variáveis de entrada é realizada por matrizes fracionadas saturadas. Estes autores ainda comentam que para a definição dos experimentos, são utilizados vários arranjos ortogonais (matrizes experimentais), genericamente designados por L_n , onde “n” representa o número de experiências a realizar. A razão sinal/ruído (S/N) de Taguchi é uma função logarítmica utilizada para otimizar o processo ou projeto do produto, minimizando a variabilidade.

Segundo Souza et al. (2011), existem três tipos de relação (S/N):

- ✓ Menor é melhor (quanto menor o valor da resposta, melhor é para o processo);
- ✓ Maior é melhor (quanto maior o valor da resposta, melhor é para o processo);
- ✓ Nominal é melhor (quanto mais próximo da especificação, melhor é para o processo).

Neste trabalho, como o mencionado acima, existe uma combinação de fatores que devem ser muito bem descritos e avaliados, como é o caso do processo de usinagem, segundo Sarı a a e Güllü (2013) este processo sozinho já apresenta um alto grau de complexidade, devido a existência de vários fatores envolvidos. Juntando esta complexidade do processo de usinagem com a heterogeneidade da madeira, fica evidente a necessidade de uma análise mais robusta, para se chegar a resultados concisos. Por este motivo e pela possibilidade de análise de fatores com diferentes níveis, é que foi optado de método de planejamento de Taguchi.

3 MATERIAIS E MÉTODO

O trabalho foi dividido em duas frentes: determinação de propriedades físicas da madeira e ensaios de usinagem.

Os procedimentos para a preparação dos corpos de prova estão descritos nas seções seguintes.

Os dados levantados foram organizados com o auxílio do software Excel 2007, exceto os de potência que foram tratados pelo software MATLAB 7.9. O planejamento de experimentos pela metodologia de Taguchi e todos os cálculos estatísticos foram efetuados com o auxílio do software Minitab 15.

3.1 MATÉRIA PRIMA E PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

De um lote de madeira foram selecionadas aleatoriamente dezoito tábuas de dimensões: (3000 x 148 x 25) mm da espécie *Pinus elliottii* (Figura 27). O lote de madeira foi obtido de uma empresa fabricante de molduras e painéis. Nesta, a secagem é realizada em estufa convencional em aproximadamente 80 horas. Antes da retiradas das tábuas, estas estavam em um pacote de madeira umas sobre as outras, sem separação das camadas por separadores e em local coberto mais não climatizado por mais de dois meses no campus da UNESP de Itapeva/SP mantendo, portanto, uma umidade de equilíbrio com o ambiente. Foi identificado que as tábuas selecionadas foram retiradas tangencialmente aos anéis de crescimento da madeira.

Figura 27 - Tábuas selecionadas para o estudo.



Fonte: Autor.

De cada uma das dezoito tábuas, foram confeccionadas peças sem defeitos (nós, bolsas de resina e medula) (Figura 28), com as seguintes dimensões: (990 x 145 x 23) mm. As reduções na largura e espessura das amostras tiveram como objetivo eliminar as possíveis tortuosidades e falhas de superfícies das peças. A redução do comprimento das peças para 990 mm foi determinada para aproveitar ao máximo as regiões das tábuas sem defeitos e obter o maior número possível de amostras com as dimensões finais para o ensaio de usinagem e para as determinações da densidade e umidade. Este procedimento foi aplicado para que a amostragem fosse representativa, fornecendo uma maior quantidade de corpos de prova para as determinações de densidade e umidade e para representar os diferentes teores de umidade após o procedimento de climatização.

Figura 28 - Demarcação das regiões sem defeito nas tábuas, para a retirada das amostras.



Fonte: Autor.

A redução do comprimento foi realizada em uma esquadrejadeira da marca VERRY modelo LIFE (Figura 29 a e b) obtendo o comprimento nominal de 990 mm, em seguida as peças foram submetidas ao processo de ajuste de espessura em máquina desengrossadeira da marca BALDAN modelo DGR4 (Figura 29 c), obtendo 23 mm de espessura nominal. Para o ajuste da largura primeiramente as peças passaram por um processo de desempeno na máquina desempenadeira da marca ROCCO modelo PMS 350 (Figura 29 d) retornando em seguida para a desengrossadeira para o ajuste da largura nominal de 145 mm.

Figura 29 - (a) Esquadrejadeira; (b) Obtenção do comprimento de 990 mm; (c) Obtenção da espessura de 23 mm; (d) Desempeno das peças para posterior definição da largura de 145 mm, na desengrossadeira.

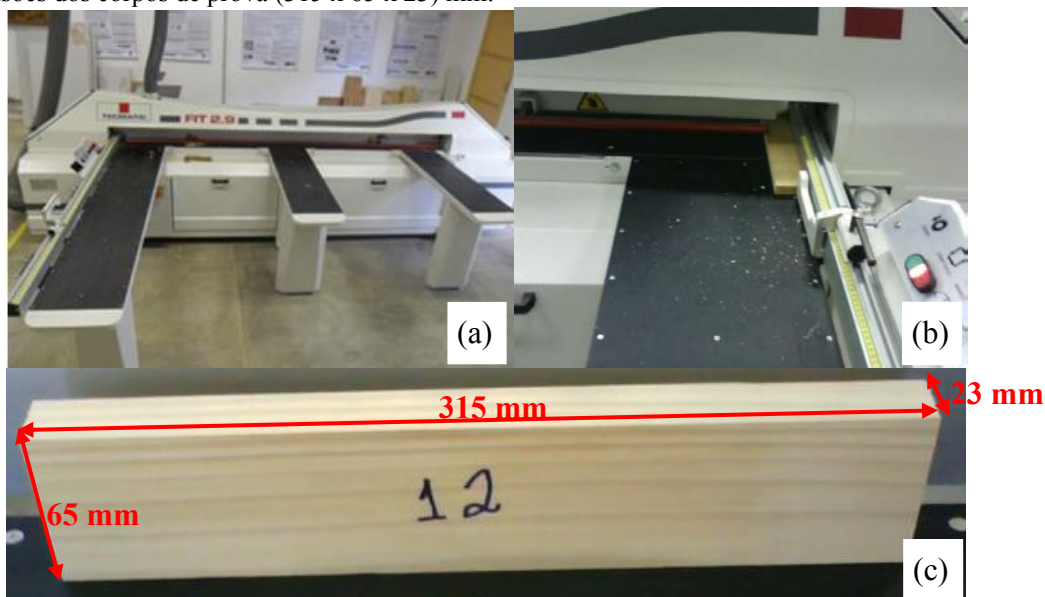


Fonte: Autor.

Das dezoito peças com dimensões nominais de (990 x 145 x 23) mm foram retiradas seis peças para a confecção dos corpos de prova para as determinações da densidade básica, densidade aparente e teor de umidade.

Com as doze peças restantes foram confeccionados os corpos de prova para a realização dos experimentos de usinagem. Cada uma das doze peças gerou seis corpos de prova, totalizando 72 corpos de prova com dimensões nominais de (315 x 65 x 23) mm. Para isto utilizou-se de em uma seccionadora da marca TECMATIC modelo FIT 2.9 (Figura 30 a e b). Após este procedimento os corpos de prova foram colocados em uma estufa climatizadora para a obtenção de três classes diferentes de teor de umidade conforme apresentado no item 3.4.

Figura 30 - (a) Seccionadora utilizada para a confecção dos corpos de prova; (b) Confecção dos corpos de prova e (c) dimensões dos corpos de prova (315 x 65 x 23) mm.



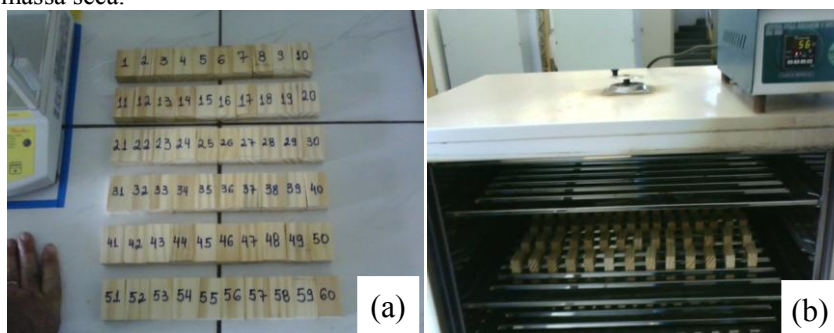
Fonte: Autor.

3.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Os procedimentos para a determinação do teor de umidade da madeira seguiram o normativo do anexo B da norma NBR 07190-1997 Projetos de estruturas de madeira.

O teor de umidade das amostras foi determinado pelo método gravimétrico (em estufa com $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante). Determinou-se a massa inicial (m_i) do corpo-de-prova com exatidão de 0,01 g (Figura 31 a), logo após colocaram-se os corpos de prova na câmara de secagem, com temperatura de $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ (Figura 31 b). Durante a secagem, a massa dos corpos de prova foram medidas a cada 6 h, até a ocorrência de uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5 % da última massa medida. Esta massa foi considerada como a massa seca (m_s). Conhecida a massa seca (m_s) dos corpos de prova, determinou-se a umidade à base seca, utilizando a Equação (6) da seção 2.4.6.2.

Figura 31 - (a) Corpos de prova com a massa inicial determinada; (b) Corpos de prova em estufa para posterior determinação da massa seca.



Fonte: Autor.

3.3 DETERMINAÇÃO DAS DENSIDADES APARENTE E BÁSICA DA MADEIRA

A posição para retirada dos corpos de prova para os ensaios de análise física da madeira seguiram o normativo do anexo B da norma NBR 07190-1997 Projetos de estruturas de madeira, bem como a determinação da densidade aparente e densidade básica.

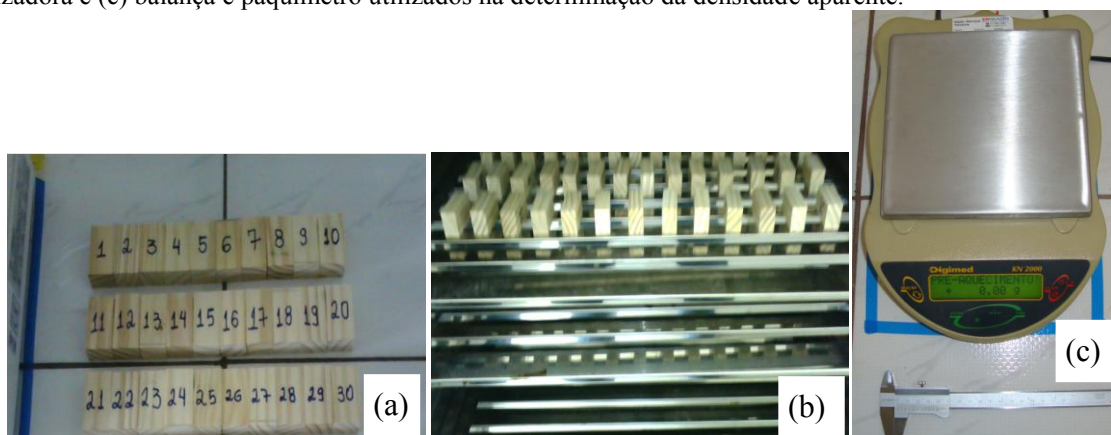
3.3.1 Determinação da densidade aparente

Antes que fossem realizadas as medições da massa e volume, os 30 corpos de prova (Figura 32 a) destinados a este fim passaram por climatização em estufa de controle automático de umidade e temperatura, objetivando um teor de umidade médio de 12 % (Figura 32 b), conforme recomendação da norma NBR 07190-1997.

A massa de cada corpo de prova, utilizado na determinação da densidade aparente foi determinada em uma balança com precisão de 0,01 g da marca Digimed, modelo KN 2000 (Figura 32 c). O volume de cada corpo de prova foi determinado com o auxílio de um paquímetro da marca Digimess com precisão de 0,05 mm (Figura 32 c), calculando a média de três medições em três posições distintas de cada dimensão (comprimento, largura e espessura).

A densidade aparente D_{ap} foi determinada, pela razão entre a massa e o volume de corpos de prova com teor de umidade de 12 %, dada pela Equação (5) da seção 2.4.6.1.

Figura 32 - (a) Corpos de prova enumerados para a determinação da densidade; (b) Corpos de prova na câmara climatizadora e (c) balança e paquímetro utilizados na determinação da densidade aparente.



Fonte: Autor.

3.3.2 Determinação da densidade básica

Os corpos de prova destinados a este fim foram saturados em um dessecador com água fechado e com pressão negativa, realizada por bomba de vácuo. O procedimento de retirada de ar do dessecador foi realizado duas vezes por dia até que foi identificado variação da massa dos corpos de prova, em balança semi analítica, menor ou igual a 0,5 % entre uma medição e outra.

Após a saturação dos corpos de prova com água foi determinado o volume destes através do método da balança hidrostática. Os corpos de prova foram mergulhados dentro de um tanque cheio de água presos por uma haste até a submersão completa, evitando que eles tocassem na parede ou no fundo do recipiente, a haste foi presa pela parte inferior da balança com sensibilidade de 0,1 g da marca Bel, como apresentado na Figura 33 a. Foi anotada a massa da amostra saturada imersa em água (m_{im}). Removeu-se a água superficial dos corpos de prova e pesaram-se as amostras saturadas (m_v) na mesma balança (Figura 33 b). Em seguida foram secos em câmara de secagem, para a obtenção da massa seca (m_s), com temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, como mostrado na Figura 33 c, até uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5 % da última massa medida. A densidade básica foi determinada conforme a Equação (4) da seção 2.4.6.1, modificada pela Equação (13) seguinte:

$$D_b = \left(\frac{m_s}{m_v - m_{im}} \right) \times D_a \quad (13)$$

Onde:

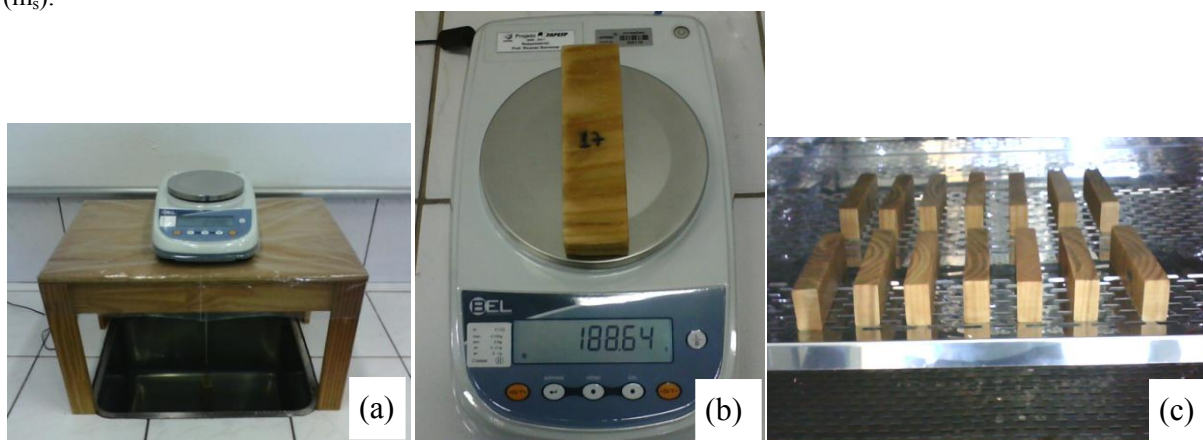
D_b = densidade básica, kg.m^{-3} ;

m_s = massa da amostra seca, em kg;

m_v = massa da amostra saturada em água, em kg;

m_{im} = massa da amostra saturada imersa em água, em kg.

Figura 33 - (a) determinação massa da amostra saturada imersa em água (m_{im}); (b) determinação da massa das amostras saturadas (m_v) e (c) secagem dos corpos de prova em estufa, para posterior determinação da massa seca (m_s).

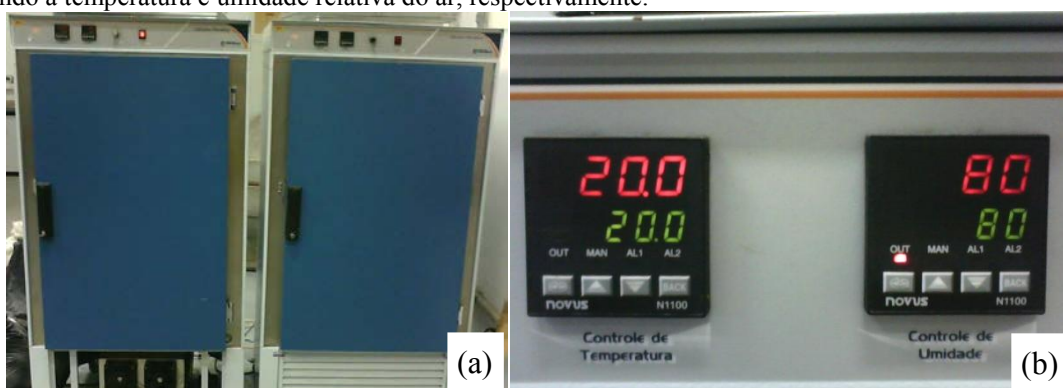


Fonte: Autor.

3.4 CLIMATIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DESTINADOS AO FRESAMENTO

Os 72 corpos de prova foram divididos em três grupos iguais e colocados em estufas climatizadoras automáticas da marca TECNAL modelo TE 4001 (Figura 34 a). Onde foi possível controlar o teor de umidade e temperatura (Figura 34 b). O objetivo da climatização foi obter três classes de umidade ($8 \% \leq x < 12 \%$; $12 \% \leq x < 16 \%$; $16 \% \leq x < 20 \%$). A verificação do teor de umidade foi realizada por medições constantes do teor de umidade de cada corpo de prova através do método capacitivo de medição da umidade, utilizando um medidor da marca Marrari, modelo M51 (Figura 35), até que as peças adquirissem o teor de umidade médio estabelecido para cada classe. Este medidor de umidade possui as seguintes características: faixa de medição de umidade de 3 a 35 %, resolução de 0,1 %, precisão de 1,0 %, profundidade de medição de até 30 mm, área de leitura de (50 x 70) mm, mede madeira com densidade básicas de 0,20 a 0,99.

Figura 34 - (a) Climatizadoras utilizadas na obtenção das classes de umidade; (b) Display da climatizadora indicando a temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente.



Fonte: Autor.

A climatização, para cada classe de umidade foi definida através da umidade relativa e temperatura, obtendo assim a umidade de equilíbrio da madeira (UE). Os valores de umidade de equilíbrio da madeira, umidade relativa e temperatura na estufa de climatização são apresentados no Quadro 6, estes valores foram determinados com base na Figura 16.

Quadro 6 - Valores de umidade relativa do ar e temperatura utilizados para o estabelecimento da umidade de equilíbrio da madeira desejada.

UE (%)	Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)
$8 \leq <12$	30	45
$12 \leq <16$	25	65
$16 \leq <20$	20	80

Fonte: Autor.

Os corpos de prova permaneceram nas climatizadoras até momentos antes da usinagem para evitar variações de umidade, mantendo o teor umidade atingidos para cada classe. Uma última medição da umidade foi realizada, utilizando o método capacitivo. Os valores de umidade foram coletados nas regiões do corpo de prova onde seria realizada a usinagem, como apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Medição do teor de umidade utilizando medidor capacitivo.



Fonte: Autor.

3.5 EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE USINAGEM

Neste item são apresentados os detalhes e as especificações mais relevantes sobre os equipamentos utilizados nos experimentos de usinagem da madeira e o procedimento utilizado nos experimentos, são abordados também os equipamentos utilizados para as coletas de dados dos experimentos.

Todos os procedimentos de coleta de dados, fixação e retirada dos corpos de prova no suporte da bancada do centro de usinagem, medição da emissão sonora e operação do centro

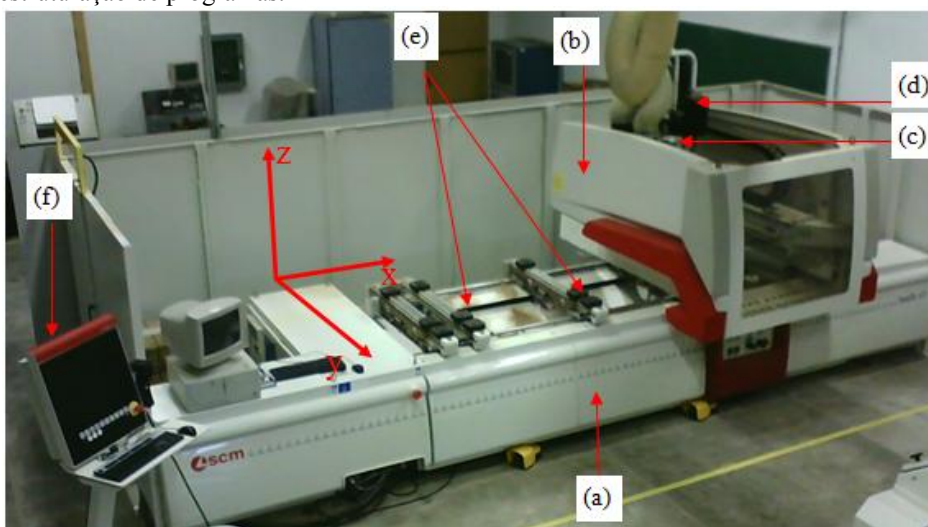
de usinagem foram realizados por uma única pessoa, a fim de minimizar os efeitos dos erros atribuídos ao operador.

3.5.1 Centro de usinagem

Para a usinagem dos corpos de prova foi utilizado um centro de usinagem da marca SCM modelo TECH Z1. Trata-se de uma máquina com controle numérico computadorizado (CNC) que trabalha unicamente com madeira ou materiais com atributos físicos semelhantes. A estrutura desta máquina é basicamente constituída por dois elementos principais: base portante (Figura 36 a) e o montante monobloco que translada ao longo do eixo X (Figura 36 b).

O grupo operador, com motor de 2,2 kW (Figura 36 c) é composto por um cabeçote de usinagem. Ele está disposto sobre uma prancha (Figura 36 d), que se movimenta sobre o montante móvel (Figura 36 b) ao longo do eixo Y e que engloba movimentos ao longo do eixo Z, a fixação das peças a serem usinadas é realizada pelos dispositivos com ventosas pneumáticas (Figura 36 e), a máquina também possui uma unidade de controle de operações e estruturação de programas de usinagem (Figura 36 f). Na Figura 36 também observam-se as direções dos eixos X, Y e Z da máquina.

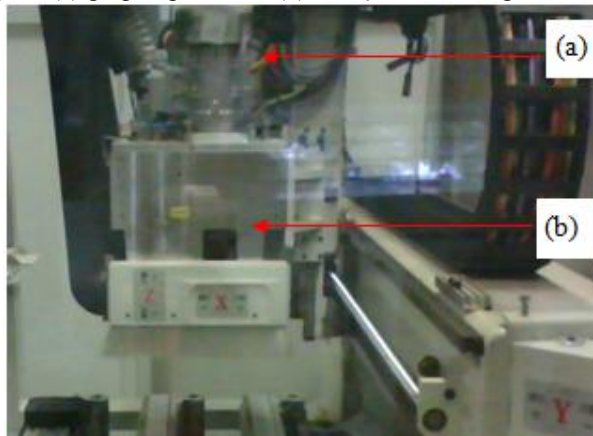
Figura 36 - Centro de usinagem: (a) base portante; (b) montante monobloco móvel; (c) grupo operador; (d) prancha que suporta o cabeçote de trabalho; (e) ventosas de fixação das peças a serem usinadas e (f) unidade de operações e estruturação de programas.



Fonte: Autor.

Pela Figura 37, pode-se ter uma visão interna do montante monobloco móvel com cabeçote de usinagem (b) suportado pelo grupo operador (a). Notam-se as direções de operação (x, y, z) fixadas no corpo do equipamento.

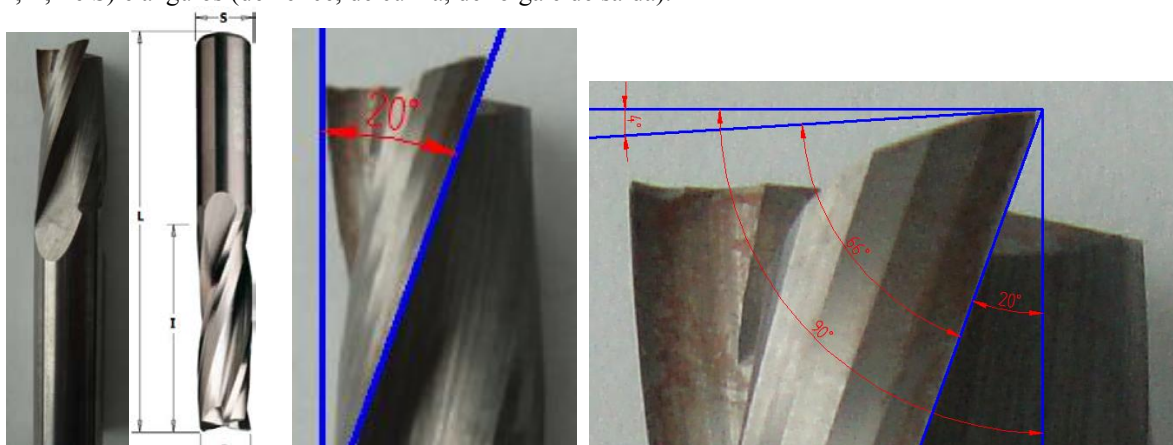
Figura 37 - Centro de usinagem: (a) grupo operador e (b) cabeçote de usinagem.



Fonte: Autor.

Foi utilizada uma fresa de metal duro integral (Figura 38), com as seguintes especificações: $D = 16 \text{ mm}$, $L = 90 \text{ mm}$, $I = 35 \text{ mm}$, $S = 16 \text{ mm}$, com três cortes helicoidais positivos com ângulo de hélice de 20° , ângulo de folga de 4° , ângulo de cunha de 66° e ângulo de saída de 20° . Estes ângulos foram obtidos pela medição de imagem utilizando o software Solid Edge ST5.

Figura 38 - Fresa de metal duro com cortes helicoidais para acabamento. Identificação de suas dimensões básicas (D, L, I e S) e ângulos (de hélice, de cunha, de folga e de saída).



Fonte: Fotos: autor. Imagem adaptada de (Catálogo do fabricante: CMT, código nº 193.161.11).

Dos 72 corpos de prova, com dimensões de $(315 \times 65 \times 23) \text{ mm}$, climatizados em três diferentes classes de umidade, foram retirados 12 de cada uma das três das classes de umidade. Eles foram enumerados de 1 a 36. Os corpos de prova com numeração de 1 a 12

representaram a classe de umidade 1, os corpos de prova com numeração de 13 a 24 representaram a classe de umidade 2 e os corpos de prova com numeração de 25 a 36 representaram a classe de umidade 3, conforme a Figura 39.

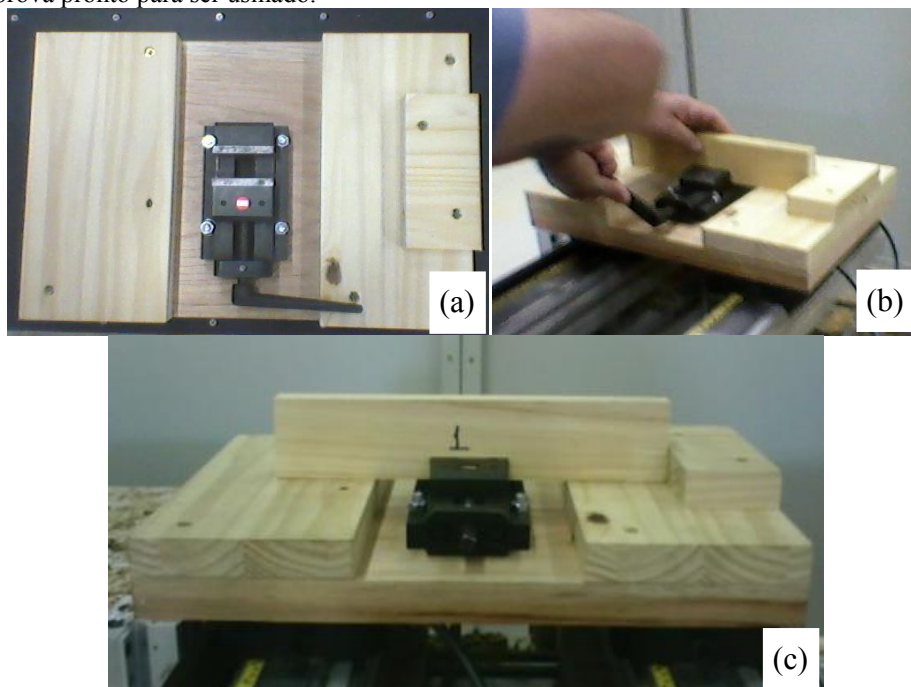
Figura 39 - Corpos de prova da classe de umidade 1.



Fonte: Autor.

Para a fixação adequada dos corpos de prova na bancada do centro de usinagem foi necessário à confecção de um suporte onde eram fixados os corpos de prova (Figura 40 a). O suporte por sua vez foi fixado pelas ventosas pneumáticas do centro de usinagem (Figura 40 b). Esta adequação foi necessária pelo fato de que a usinagem deveria ocorrer na maior face dos corpos de prova (largura) no sentido do comprimento, e as ventosas do centro de usinagem não conseguiam prender os corpos de prova utilizando a outra face (espessura).

Figura 40 - (a) suporte adaptado para fixação dos corpos de prova; (b) colocação do corpo de prova no suporte; (c) corpo de prova pronto para ser usinado.



Fonte: Autor.

Os parâmetros de usinagem adotados e os valores de rugosidade teóricas (R_a e R_t) calculadas com o auxílio das equações (8) e (9) respectivamente, são apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 - Valores dos parâmetros utilizados nos ensaios de usinagem.

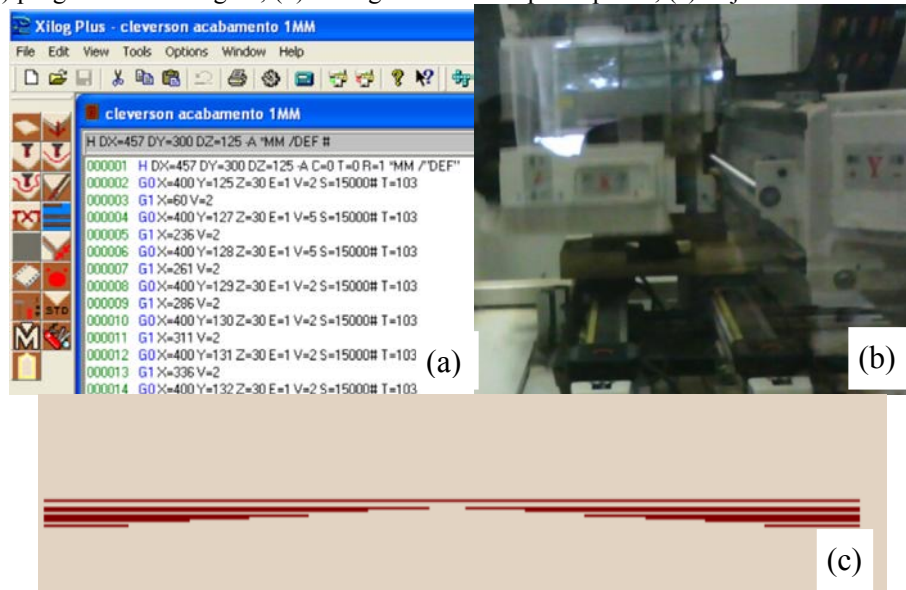
Parâmetro	Valor	Unidade
Rotação da ferramenta	15000	Rotação por minuto
Penetração de trabalho (a_e)	1	Milímetro
Diâmetro da ferramenta	16	Milímetro
Velocidade de corte	10,56	Metros por segundo
Velocidade de avanço	2	Metros por minuto
Avanço por dente	0,04	Milímetro
Largura de corte (a_p)	30	Milímetros
R_a teórica	0,022	Micrometro
R_t teórica	0,031	Micrometro
Ângulo de cunha lateral da ferramenta (β_f)	66	Graus
Ângulo de saída lateral da ferramenta (γ_f)	20	Graus
Ângulo de folga lateral da ferramenta (α_f)	4	Graus
Ângulo de hélice da ferramenta (ϕ)	20	Graus

Fonte: Autor.

O centro de usinagem foi pré-programado para realizar seis repetições consecutivas de usinagem para cada sentido de corte em cada corpo de prova. Dada às dimensões do corpo de prova de (315 x 65 x 23) mm, uma primeira usinagem sempre era realizada em todo o comprimento do corpo de prova, a fim de eliminar possíveis desalinhamentos proporcionados pela fixação do corpo de prova no suporte. A ferramenta retornava totalmente a posição inicial e iniciava o processo de usinagem primeiramente com seis usinagens no sentido discordante e depois com mais seis usinagens no sentido concordante, interrompendo automaticamente a operação ao final da usinagem conforme a programação pré-definida. A cada repetição de usinagem, uma área usinada de (25 x 30) mm era gerada no corpo de prova. Nesta área onde, posteriormente, foram realizadas as medições de rugosidade no lenho inicial e tardio.

São apresentados na Figura 41, o programa criado para a usinagem, a trajetória dos movimentos que a ferramenta percorreu para realizar a usinagem e o momento que um corpo de prova estava sendo usinado.

Figura 41 - (a) programa de usinagem; (b) usinagem de um corpo de prova; (c) trajetória da ferramenta.



Fonte: Autor.

Momentos antes do início da usinagem eram ligados o programa para a aquisição automática dos dados referentes à variação de corrente elétricas e instantes antes da usinagem efetiva era ligado o medir de nível de pressão de som para a captação de emissão sonora, anotando a maior emissão sonora, entre as seis repetições de usinagem, para cada sentido de corte.

O perfil do corpo de prova após as seis repetições de usinagem teve o formato de pirâmide com seis degraus de cada lado (Figura 42 a e b). Imediatamente após a usinagem os corpos de prova eram acondicionados em sacos de polietileno lacrados que foram abertos no momento da mediação da rugosidade.

Figura 42 - (a) corpo de prova após a usinagem; (b) corpo de prova com os sentidos de corte e as repetições.

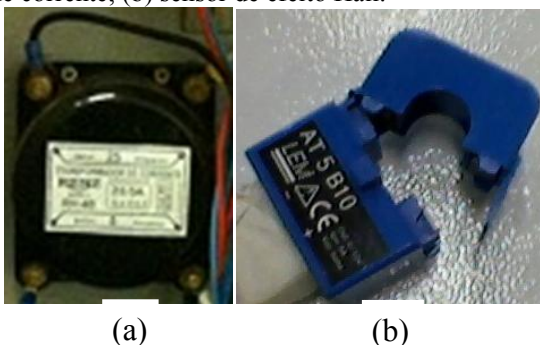


Fonte: Autor.

3.5.2 Captação da variação de corrente elétrica para determinação da potência consumida

A potência de corte consumida foi obtida através da captação da variação da corrente elétrica utilizando-se de um transformador da marca Renz, modelo RH-40, com redução de 25A (Ampéres) para 5 A (Figura 43 a), este transformador reduziu a corrente que foi coletada pelo sensor de efeito Hall da marca LEM, modelo AT B10 (Figura 43 b), que realiza a medição eletrônica de correntes de onda em corrente alternada, ele possui saída de tensão 0-10V DC proporcional ao valor RMS da corrente primária. Este sensor de efeito Hall foi conectado externamente aos cabos de alimentação do motor responsável pela rotação da ferramenta, para a captação da variação da corrente elétrica.

Figura 43 - (a) transformador de corrente; (b) sensor de efeito Hall.



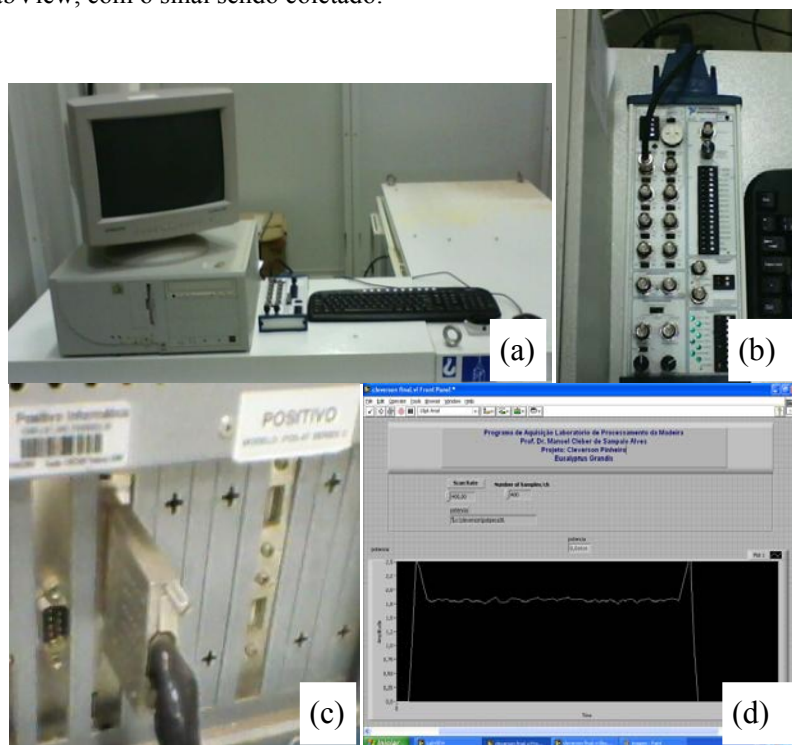
Fonte: Autor.

O sinal de diferença de potencial gerada pela corrente foi captado pelo sensor de efeito Hall e coletada pela placa de aquisição de dados.

3.5.3 Coleta e armazenamento de dados de corrente elétrica

A variação da corrente elétrica na usinagem foi adquirida instantaneamente para cada corpo de prova usinado á uma taxa de 400 pontos por segundo através do sensor de efeito Hall instalados no centro de usinagem. O sensor de efeito Hall foi conectado a um módulo de canais da marca National Instruments modelo BNC-2120 (Figura 44 b), e este conectado a placa de aquisição de dados marca National Instruments modelo NI PCI 6220 (Figura 44 c) inserida do computador de aquisição de dados posicionado ao lado do centro de usinagem (Figura 44 a). Os sinais adquiridos através da placa foram processados e armazenados através de um programa pré-elaborado no software LABVIEW versão 7.1 (Figura 44 d).

Figura 44 - (a) computador para aquisição de dados; (b) módulo de canais; (c) placa de aquisição de dados e (d) tela do software LabView, com o sinal sendo coletado.



Fonte: Autor.

A potência consumida foi calculada através da Equação (10) (seção 2.6), o sinal adquirido (em U_{CC}) a uma taxa de 400 pontos por segundo foi transformado na unidade de potência (Watts).

Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em Volts é necessário converter o valor de Volts para Ampères para que se possa aplicar esse valor na Equação (10). O fabricante do transdutor de corrente alternada fornece essa equação para a transformação do dado adquirido em Volts para Ampères de acordo com a Equação (14), porém, como foi necessário utilizar um transformador de corrente de redução 25A/5A, a variável U_{CC} foi multiplicada por 5.

$$i = \frac{U_{CC} \times 5}{2} \quad (14)$$

Onde:

i = corrente, em Ampères;

U_{CC} = Tensão de corrente continua, em Volts.

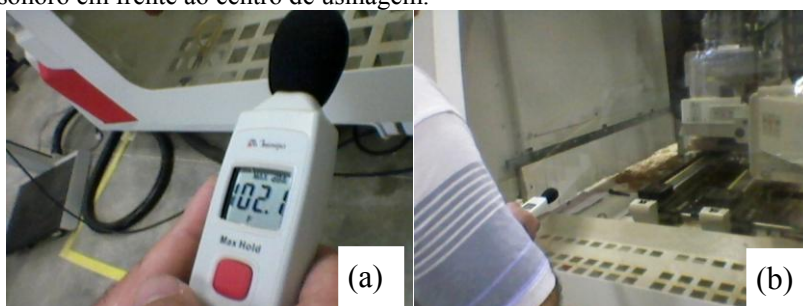
Substituindo o valor da corrente (Equação (14)), o valor da tensão de fase do motor da ferramenta (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, têm-se a Equação (15), que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em Watts.

$$P_{ap3F} = \frac{U_{cc} \times 5}{2} \times 220 \times 0,92 \times \sqrt{3} \quad (15)$$

3.5.4 Coleta de dados da variação de nível sonoro durante a usinagem

A variação do nível sonoro foi medida com um medidor de nível de pressão de som portátil da marca MINIPA modelo MLS- 1310 (Figura 45 a e b), os valores foram anotados manualmente em formulário de coleta de dados.

Figura 45 - (a) medidor de nível de pressão de som portátil apresentando o valor do nível sonoro em decibels; (b) medição do ruído sonoro em frente ao centro de usinagem.



Fonte: Autor.

Com o centro de usinagem ligado, porém não em regime efetivo de trabalho foi verificado um nível sonoro de 75,5 decibels. Para cada um dos 36 corpos de prova foi tomada a maior emissão sonora entre as seis repetições de usinagem para cada sentido de corte.

3.6 DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DA MADEIRA USINADA

As rugosidade das peças foi determinada pelo rugosímetro da marca Taylor Robson, modelo Surtronic 25+, de haste de medição com ponta apalpadora cone esférico de diamante, raio de ponta de 2 μm (Figura 46). Foram levantados os parâmetros Ra e Rt (como definido anteriormente), para a avaliação da superfície usinada. Foi utilizado o filtro Gaussiano Robusto.

Figura 46 - Medição da rugosidade dos corpos de prova após a usinagem.



Fonte: Autor.

O comprimento de amostragem (Le) ou λc “*cut-off*” foi de 2,5 mm.

Os valores de rugosidade (Ra e Rt) dos 36 corpos de prova foram obtidos simultaneamente. Esses valores de rugosidade foram medidos nos lenho inicial e lenho tardio de cada área usinada das seis repetições, tanto para o sentido de corte concordante como para o discordante.

Após a medição de rugosidade corpos de prova retornavam para os sacos de polietilenos lacrados.

3.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PELO MÉTODO DE TAGUCHI

A metodologia de Taguchi é um método de projetar experimentos que geralmente requer somente uma fração das combinações dos modelos fatoriais completos. Uma matriz ortogonal significa que o modelo é equilibrado para que os níveis dos fatores sejam ponderados igualmente. Devido a isso, cada fator pode ser avaliado independentemente de todos os outros fatores, para que o efeito de um fator não influencie a estimativa de outro fator.

Nesta metodologia, primeiro definem-se os fatores de entrada e seus níveis e em seguida escolhe uma matriz ortogonal apropriada para estes fatores. Os fatores de entrada chamados também de fatores de controle, compreendem a matriz interna. Ao mesmo tempo, pode-se determinar um conjunto de fatores de ruído, junto com um projeto experimental para esse conjunto de fatores. Os fatores de ruído compõem a matriz externa. Estes fatores são aquelas variáveis que provocam variação funcional, ou seja, são variáveis incontroláveis. Através da Tabela 1, pode ser observado um exemplo de uma combinação de matrizes ortogonais de Taguchi, onde a matriz L9 corresponde a matriz interna e a matriz L8 corresponde a matriz externa. Desse modo cada uma das nove combinações da matriz interna é testada nas oito combinações da matriz externa, o que fornece uma amostra com 72 ensaios. Os valores (y_{12} , y_{13} , etc.) são as respostas das variáveis de saída para cada combinação dos níveis dos fatores da matriz interna e externa, estes valores são utilizados no cálculo da razão sinal ruído (S/N). A média e a variância são utilizadas para gerar a tabela de análise de variância (ANOVA).

A definição da matriz externa é opcional e depende da necessidade de avaliação da influência de um ruído externo na análise.

Tabela 1- Exemplo de matrizes ortogonais internas e externas para o método de Taguchi.

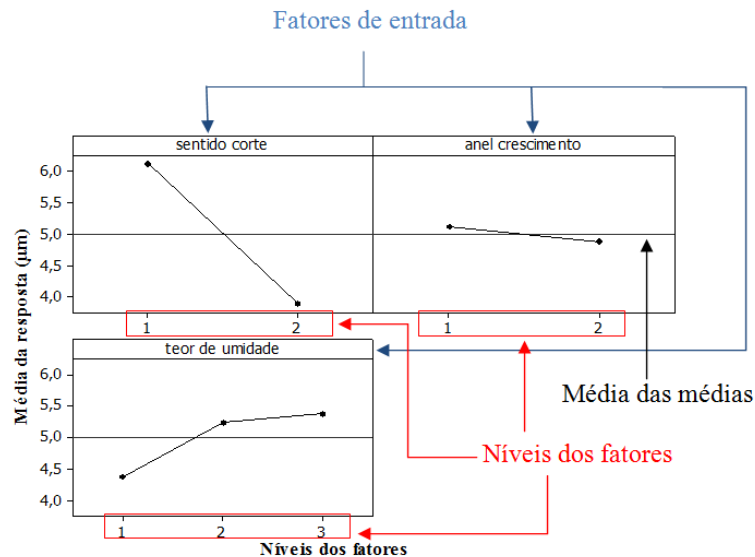
Experimento	Matriz interna				Matriz externa										Média	Variância
					x5	1	1	1	1	2	2	2	2			
					x6	1	1	2	2	1	1	2	2			
					x7	1	2	1	2	1	2	1	2			
x ₁	x ₂	x ₃	x ₄													
1	1	1	1	1	y ₁₁	y ₁₂	y ₁₃	y ₁₄	y ₁₅	y ₁₆	y ₁₇	y ₁₈	Ȳ ₁	S ² ₁		
2	1	2	2	2	y ₂₁	y ₂₂	y ₂₃	y ₂₄	y ₂₅	y ₂₆	y ₂₇	y ₂₈	Ȳ ₂	S ² ₂		
3	1	3	3	3	y ₃₁	y ₃₂	y ₃₃	y ₃₄	y ₃₅	y ₃₆	y ₃₇	y ₃₈	Ȳ ₃	S ² ₃		
4	2	1	2	3	y ₄₁	y ₄₂	y ₄₃	y ₄₄	y ₄₅	y ₄₆	y ₄₇	y ₄₈	Ȳ ₄	S ² ₄		
5	2	2	3	1	y ₅₁	y ₅₂	y ₅₃	y ₅₄	y ₅₅	y ₅₆	y ₅₇	y ₅₈	Ȳ ₅	S ² ₅		
6	2	3	1	2	y ₆₁	y ₆₂	y ₆₃	y ₆₄	y ₆₅	y ₆₆	y ₆₇	y ₆₈	Ȳ ₆	S ² ₆		
7	3	1	3	2	y ₇₁	y ₇₂	y ₇₃	y ₇₄	y ₇₅	y ₇₆	y ₇₇	y ₇₈	Ȳ ₇	S ² ₇		
8	3	2	1	3	y ₈₁	y ₈₂	y ₈₃	y ₈₄	y ₈₅	y ₈₆	y ₈₇	y ₈₈	Ȳ ₈	S ² ₈		
9	3	3	2	1	y ₉₁	y ₉₂	y ₉₃	y ₉₄	y ₉₅	y ₉₆	y ₉₇	y ₉₈	Ȳ ₉	S ² ₉		

Fonte: Autor.

O experimento é realizado, executando o conjunto completo das configurações do fator de ruído em cada combinação com a configuração dos fatores de controle (em cada rodada de experimentos). Cada coluna da matriz ortogonal representa um fator específico com dois ou mais níveis. Cada linha representa uma corrida, os valores da célula (níveis do fator) indicam as configurações do fator para a corrida.

Os gráficos que auxiliam as análises dos efeitos dos fatores sobre a média e sobre a razão sinal ruído são plotados em termos dos níveis de cada fator, os valores respostas determinados para cada nível do fator são comparados com a média das médias (linha horizontal plotada no gráfico). Um exemplo deste tipo de gráfico é apresentado na Figura 47.

Figura 47- Modelo de gráfico para análises em relação às médias.



Fonte: Autor.

Os fatores de entrada utilizados para a análise da qualidade superficial e seus respectivos níveis são apresentados no Quadro 8. O fator A (sentido de corte) com seus dois níveis (concordante e discordante) refere-se ao corte paralelo as fibras. O fator B (anéis de crescimento) com seus dois níveis (lenho inicial e lenho tardio) refere-se aos dois tipos de lenhos presentes na madeira. O fator C (teor de umidade U (%)) com seus três níveis ($8 \leq U < 12$; $12 \leq U < 16$; $16 \leq U < 20$), refere-se às classes de teor de umidade da madeira usinada, avaliadas neste trabalho.

Quadro 8 - Fatores de entrada e seus níveis para a análise da qualidade superficial.

	Níveis		
Fator:	1	2	3
A (sentido de corte)	Concordante	Discordante	
B (anéis de crescimento)	Lenho inicial	Lenho tardio	
C (teor de umidade (%))	$8 \leq U < 12$	$12 \leq U < 16$	$16 \leq U < 20$

Fonte: Autor.

Os fatores de entrada utilizados para a análise da potência consumida e emissão sonora e seus respectivos níveis são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 - Fatores de entrada e seus níveis para a análise da potência consumida e emissão sonora.

	Níveis		
Fator:	1	2	3
A (sentido de corte)	Concordante	Discordante	
B (teor de umidade (%))	$8 \leq U < 12$	$12 \leq U < 16$	$16 \leq U < 20$

Fonte: Autor.

O delineamento experimental utilizado para a combinação dos níveis dos fatores de entrada, na análise da qualidade superficial, em termos da rugosidade média (R_a em μm) e rugosidade total (R_t em μm) para um fator (teor de umidade) com três níveis (3^1) e dois fatores (sentido de usinagem e anéis de crescimento) com dois níveis (2^2) foi organizado pela matriz ortogonal de Taguchi L36 ($1^3 \times 2^2$), como apresentado no Quadro 10. Para a análise da potência consumida (Watts) e da emissão sonora (decibels) para um fator (teor de umidade)

com três níveis (3^1) e um fator (sentido de usinagem) com dois níveis (2^1) foi organizado pela matriz ortogonal de Taguchi L18 ($1^3 \times 2^1$) como apresentado no Quadro 11.

Para que se pudesse investigar adequadamente a razão sinal/ruído foram realizados seis repetições para cada experimento.

Quadro 10 - Matriz ortogonal de dados experimentais L 36 ($3^1 \times 2^2$), organizada pelos níveis de cada fator.

Experimento	A (sentido de corte)	B (anéis de crescimento)	C (teor de umidade)
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	1	1
5	1	1	2
6	1	1	3
7	1	1	1
8	1	1	2
9	1	1	3
10	1	2	1
11	1	2	2
12	1	2	3
13	1	2	1
14	1	2	2
15	1	2	3
16	1	2	1
17	1	2	2
18	1	2	3
19	2	1	1
20	2	1	2
21	2	1	3
22	2	1	1
23	2	1	2
24	2	1	3
25	2	1	1
26	2	1	2
27	2	1	3
28	2	2	1
29	2	2	2
30	2	2	3
31	2	2	1
32	2	2	2
33	2	2	3
34	2	2	1
35	2	2	2
36	2	2	3

Fonte: Autor.

Quadro 11 - Matriz ortogonal de dados experimentais L 18 ($3^1 \times 2^1$), organizada pelos níveis de cada fator.

Experimento	A (sentido de corte)	B (teor de umidade)
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	2
5	1	2
6	1	2
7	1	3
8	1	3
9	1	3
10	2	1
11	2	1
12	2	1
13	2	2
14	2	2
15	2	2
16	2	3
17	2	3
18	2	3

Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DENSIDADE BÁSICA, DENSIDADE APARENTE E TEOR DE UMIDADE.

A densidade aparente média dos 30 corpos de prova foi $501,280 \text{ kg.m}^{-3}$, com teor de umidade de equilíbrio (UE) de 12 %. Depois da saturação dos corpos de prova, foram coletados por amostragem, 14 corpos de prova, e calculado a média das densidades básicas, que foi de $416,360 \text{ kg.m}^{-3}$. Para a mesma espécie, Zenid (2009) encontrou uma densidade básica média de 420 kg.m^{-3} e densidade aparente a 15 % de umidade de 480 kg.m^{-3} . Através da Tabela 2 são apresentados os valores mínimos, médios e máximos de densidade básica (D_{bm}), aparente ($D_{apm,12\%}$) e o teor de umidade médio (U_m), com desvio padrão, coeficiente de variação e o número de amostras (N).

Tabela 2 - Densidade aparente a 12 %, densidade básica e teor de umidade para o *Pinus elliottii*.

	unidades	N	mínimo	média	máximo	desvio padrão	coeficiente de variação (%)
$D_{apm, 12\%}$	kg.m^{-3}	30	401,160	501,280	593,550	0,053	10,630
D_{bm}	kg.m^{-3}	14	347,090	416,360	467,330	0,034	8,100
U_m	%	60	13,395	14,363	15,789	0,475	3,310

Fonte: Autor.

Nota: O teor de umidade médio (U_m) apresentado corresponde ao teor de umidade das amostras armazenadas ao ar livre, antes da seleção para este trabalho.

4.2 ANÁLISES DE RESULTADOS ESTATÍSTICOS DESCRITIVOS PARA A RUGOSIDADE RA E RT.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados valores resumo (mínimos, médios, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação) da medição das rugosidades Ra e Rt, respectivamente, para cada combinação dos níveis dos fatores de entrada analisados neste trabalho. Estas tabelas apresentam a combinação do fator A (sentido de corte) com os seus dois níveis (nível 1: concordante; nível 2: discordante), do fator B (anéis de crescimento) com os seus dois níveis (nível 1: lenho inicial; nível 2: lenho tardio) e do fator C (teor de umidade) com seus três níveis (nível 1: $8 \leq U < 12$; nível 2: $12 \leq U < 16$; nível 3: $16 \leq U < 20$). O número de amostras ($N = 18$) refere-se as seis repetições de cada experimento vezes as três repetições de cada combinação dos níveis, como apresentado no Quadro 10 (experimentos 1, 4 e 7, por exemplo).

Pela Tabela 3, que contém a estatística descritiva para os valores das medições da rugosidade Ra, observa-se que ocorreram valores mínimos de rugosidade dentro de uma faixa

de 1,2 μm a 2,8 μm , aparentemente não ocorrendo diferenças entre as combinações dos níveis dos fatores, entretanto, analisando os valores da média e máximo observa-se menores valores de rugosidade para o nível 2 do fator A em comparação com o nível 1, o que pode ser observado também nos valores do desvio padrão para o nível 1 do fator A que são praticamente o dobro dos valores do desvio padrão no nível 2, deste fator. O coeficiente de variação demonstra que é baixa a homogeneidade do conjunto de dados para o nível 1 do fator A, pois seus valores são maiores que 50% o que sugere alta dispersão, indicando heterogeneidade dos dados.

Tabela 3 – Estatística descritiva para a rugosidade Ra.

	Fatores				mínimo (μm)	média (μm)	máximo (μm)	desvio padrão (μm)	coeficiente de variação (%)
	A	B	C	N					
Níveis	1	1	1	18	2,000	5,000	19,400	3,397	67,940
	1	1	2	18	2,400	7,079	25,200	5,894	83,260
	1	1	3	18	2,800	6,350	18,400	3,524	55,500
	1	2	1	18	1,600	5,281	20,200	4,346	82,300
	1	2	2	18	1,600	6,108	18,000	4,170	68,270
	1	2	3	18	2,400	6,787	31,000	4,673	68,850
	2	1	1	18	2,000	3,792	7,200	1,268	33,430
	2	1	2	18	2,200	4,175	10,000	1,694	40,580
	2	1	3	18	2,600	4,338	10,600	1,654	38,140
	2	2	1	18	1,200	3,375	9,200	1,875	55,560
	2	2	2	18	2,000	3,596	7,800	1,125	31,280
	2	2	3	18	2,400	4,054	6,600	0,912	22,500

Fonte: Autor.

Varasquim et al. (2012) trabalhando com a influência da velocidade de corte, granulometria da lixa e pressão no lixamento de *Eucalyptus grandis*, obtiveram valores médios de Ra um pouco acima de 2,3 μm para as melhores combinações dos fatores de entrada encontradas e muito próximo de 8 μm para as combinações com os piores resultados.

Santiago (2011) trabalhando com a caracterização da influência da velocidade de corte, pressão e granulometria da lixa no lixamento plano do *Pinus elliottii* obteve valores médios de Ra entorno de 2 μm para as melhores combinações dos fatores de entrada encontradas e valores entorno de 8,2 μm para as combinações com os piores resultados.

Bakar et al. (2013) analisando as propriedades de algumas espécies de madeira modificadas termicamente, usinadas por processo de lixamento, obtiveram, para as espécies red oak (*Quercus rubra*), eastern redcedar (*Juniperus virginiana*) e rubberwood (*Hevea brasiliensis*), rugosidades Ra de 1,26 μm , 0,8 μm e 0,5 μm , respectivamente, isto nas condições de 12 % de umidade e sem nenhum tipo de tratamento térmico.

Budacki et al. (2006) analisando o efeito do aplainamento na rugosidade, com ferramentas de corte composta por 2 e 4 facas, usinando amostras retiradas no sentido radial e tangencial da madeira de três espécies, scots pine (*Pinus sylvestris*), eastern beech (*Fagus orientalis L.*) e oak (*Quercus petraea L.*), obtiveram valores de rugosidades Ra que variaram de 4,260 a 4,920 μm para o scots pine, 5,77 a 6,77 μm para o eastern beech e 5,82 a 8,76 μm para o oak, nas combinações de número de facas na ferramenta e sentido das amostras analisadas (sentido radial ou tangencial).

Observa-se, pela Tabela 3, que a média dos valores de Ra para a melhor situação (fator A no nível 2) ficaram entre ,8 μm e 6,1 μm para a situação com os maiores valores de Ra (fator A no nível 1).

Pela Tabela 4, que contém a estatística descritiva para os valores das medições da rugosidade Rt, observa-se que ocorreram valores mínimos de rugosidade dentro de uma faixa de 12 μm a 2 μm , com uma distribuição aleatória dos valores entre as combinações dos níveis dos fatores, entretanto, analisando os valores da média e máximo observa-se uma tendência de que os valores de rugosidade sejam menores para o nível 2 do fator A em comparação com o nível 1. Esta tendência é observada nos valores do desvio padrão. Os valores do coeficiente de variação observados nesta tabela, para a rugosidade Rt, segue a mesma tendência dos valores apresentados na Tabela 3, para a rugosidade Ra, demonstrando que é baixa a homogeneidade do conjunto de dados para o nível 1 do fator A, pois seus valores são maiores que 50% o que sugere alta dispersão, indicando heterogeneidade dos dados.

Analisando os valores da média nas duas tabelas (Tabela 3 e 4), observa-se que existe uma leve tendência de aumento da rugosidade com o aumento do teor de umidade (representados por seus níveis 1, 2 e 3), este comportamento é mais evidente nos valores médios das rugosidades Rt (Tabela 4).

Tabela 4 - Estatística descritiva para a rugosidade Rt.

	Fatores				mínimo (μm)	média (μm)	máximo (μm)	desvio padrão (μm)	coeficiente de variação (%)
	A	B	C	N					
Níveis	1	1	1	18	18,000	41,490	90,000	18,560	44,730
	1	1	2	18	18,000	61,040	205,000	47,630	78,030
	1	1	3	18	23,000	64,000	182,000	40,650	63,520
	1	2	1	18	17,000	43,130	139,000	26,560	61,570
	1	2	2	18	16,000	50,930	132,000	25,800	50,660
	1	2	3	18	18,000	59,710	129,000	28,220	47,270
	2	1	1	18	22,000	37,710	70,000	12,070	32,020
	2	1	2	18	17,000	37,760	93,000	17,780	47,100
	2	1	3	18	20,000	41,110	144,000	24,400	59,360
	2	2	1	18	12,000	32,400	70,000	14,390	44,410
	2	2	2	18	15,000	33,560	77,000	11,880	35,400
	2	2	3	18	21,000	36,470	66,000	10,830	29,710

Fonte: Autor.

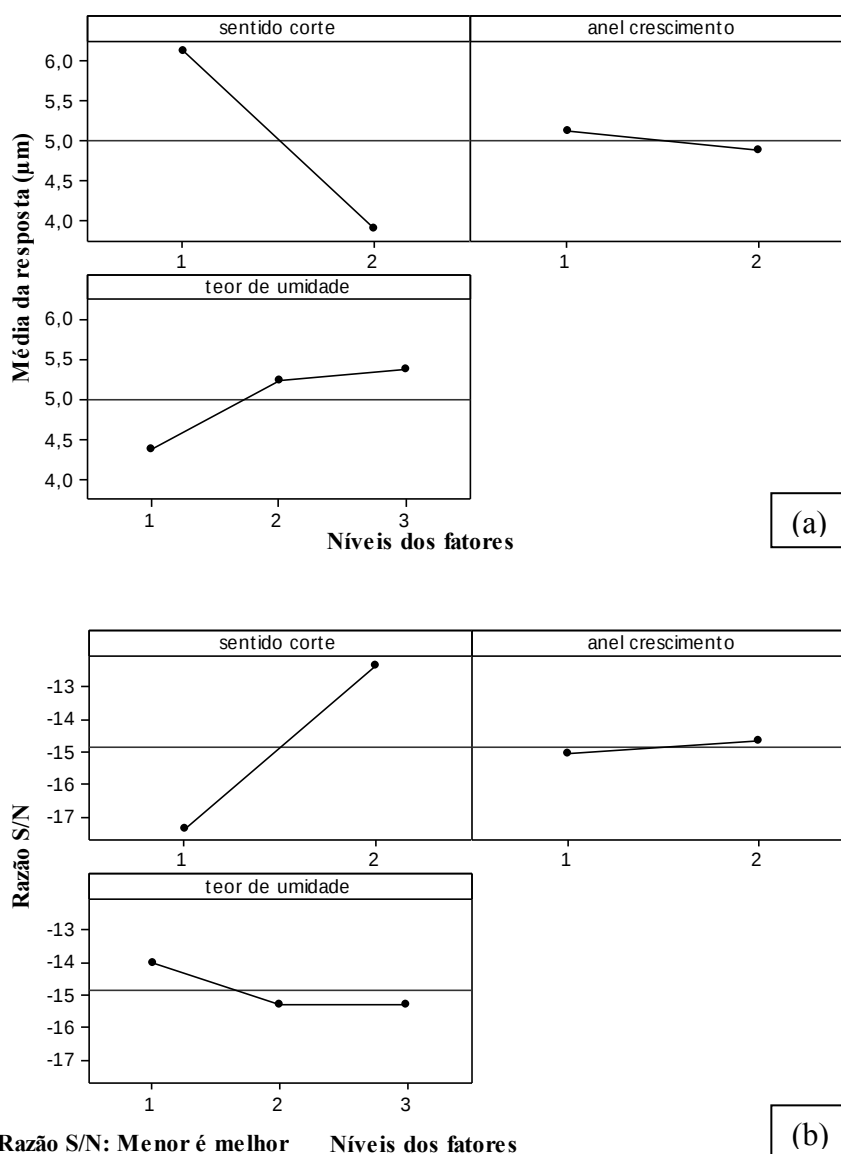
As afirmações apresentadas anteriormente são baseadas nas análises das tabelas de estatística descritiva e poderão ser confirmadas com o auxílio da análise de variância (ANOVA) realizada posteriormente, quanto ao nível significância dos resultados.

4.3 ANÁLISE DO EFEITO DOS FATORES NA MÉDIA E NA RAZÃO S/N PARA A RUGOSIDADE RA E RT.

Com base na metodologia de Taguchi foram obtidos os resultados de qualidade superficial em relação aos fatores: teor de umidade, anéis de crescimento (lenho inicial e lenho tardio) e sentido de usinagem da madeira (concordante e discordante). Com base na mesma metodologia experimental, foram obtidos também os resultados de potência consumida e emissão sonora em relação aos fatores sentido de usinagem da madeira e teor de umidade. Os resultados estão apresentados em forma de gráficos que tratam do efeito dos fatores e suas interações sobre as médias e razão sinal/ruído (S/N) para as rugosidades (Ra e Rt), para a potência e emissão sonora. A análise é completada com tabelas de análise de variância (ANOVA) para os casos descritos.

É possível notar, pela Figura 48 (a), que as condições que forneceram as menores rugosidades Ra foram: Fator A no nível 2 (discordante), Fator B no nível 2 (lenho tardio) e Fator C no nível 1 (teor de umidade menor que 12 %). E pela análise da razão S/N (Figura 48 (b)), nota-se que esta combinação resulta além dos menores valores de rugosidade, uma menor variabilidade, ficando evidente que para minimizar a variabilidade, os fatores devem ser colocados nos níveis: A2B2C1, a mesma combinação verificada pela análise das médias.

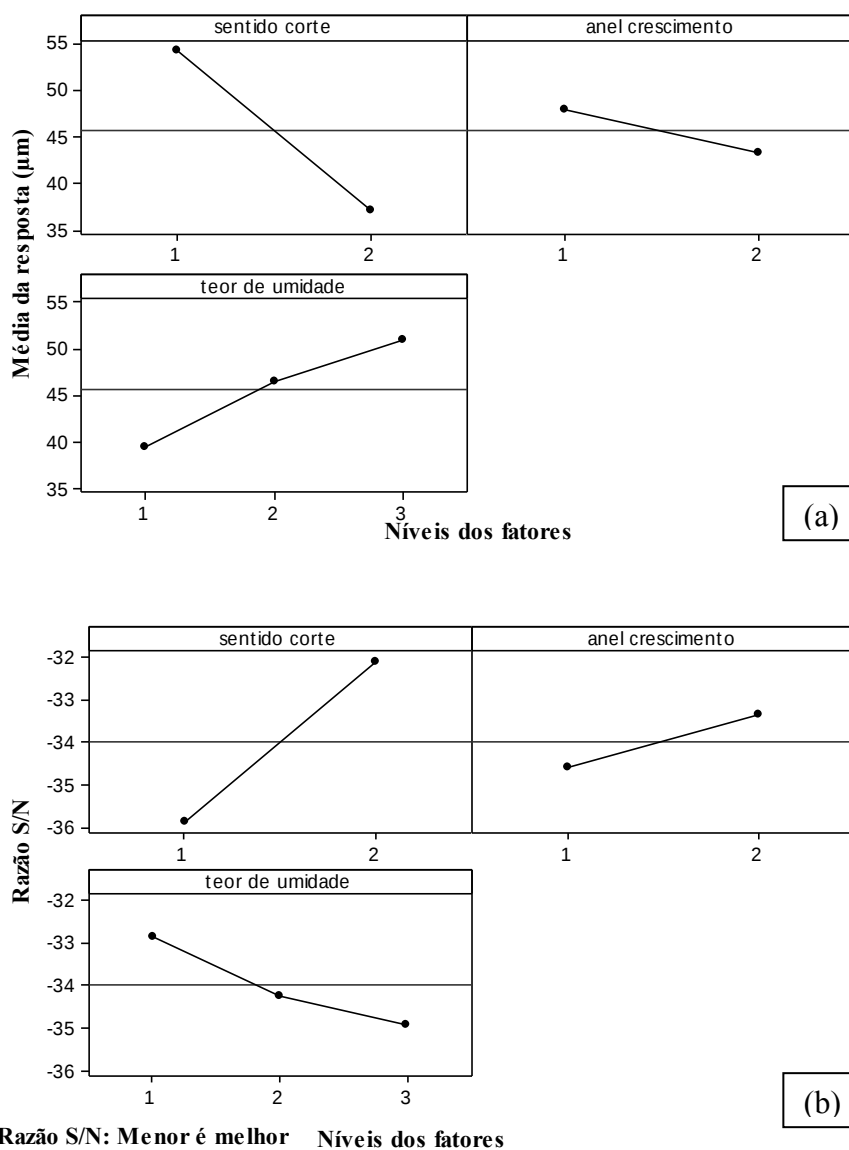
Figura 48 - Efeitos principais dos fatores sobre: (a) as médias e (b) a razão S/N, para a rugosidade Ra.



Fonte: Autor.

Em relação à rugosidade R_t , observando a Figura 49 (a), percebe-se que as condições onde R_t foi minimizado foram: Fator A no nível 2 (discordante), Fator B no nível 2 (lenho tardio) e Fator C no nível 1 (teor de umidade menor que 12 %). Os níveis dos fatores mencionados anteriormente foram novamente confirmados quando analisada a razão S/N (Figura 49 (b)), obtendo nesta combinação uma menor variabilidade.

Figura 49 - Efeitos principais dos fatores sobre: (a) as médias e (b) a razão S/N, para a rugosidade Rt.



Fonte: Autor.

A razão (S/N), segundo Phadke (1989), possui relação inversamente proporcional com a variação, ou seja, quanto maior o seu valor, menor será a variabilidade da condição experimental do processo é o que se observa na comparação dos pares de gráficos das Figuras 48 e 49. Para a rugosidade Ra (Figura 49 (a) e (b)), por exemplo, quando a resposta da razão S/N é maior tem-se um menor valor de rugosidade, observa-se com isto que as combinações que resultam em menor valor de rugosidade também conferem uma menor variabilidade.

Constata-se que tanto para a rugosidade Ra como para a Rt a melhor combinação para se obter melhor qualidade superficial é: A2B2C1, no entanto observa-se graficamente que

existe uma inclinação mais acentuada no gráfico da Figura 49 em comparação Figura 48, quando se trata dos fatores B e C. A rugosidade R_t é mais influenciada por estes fatores em comparação com a R_a .

Analisando a combinação dos níveis dos fatores que resultam uma melhor rugosidade, é visto que a rugosidade é maior para o sentido de corte concordante, este comportamento também foi observado por Goli et. al. (2002), eles trabalharam com fresamento periférico das madeiras de Douglas fir e Carvalho, constatando que a qualidade do fresamento concordante foi menor que o fresamento discordante, apesar de serem muito semelhantes. Estes autores ainda afirmam que o corte no sentido discordante é normalmente a melhor técnica de usinagem de madeira maciça.

Analisando o efeito do anel de crescimento na qualidade superficial, observa-se graficamente pelas Figuras 48 e 49 que o lenho tardio (fator B no nível 2), apresenta menores valores de rugosidade em comparação com o lenho inicial, apesar de ser visível também a pequena diferença entre ambos. Possivelmente pela menor densidade e maior flexibilidade do lenho inicial em comparação com o lenho tardio, a usinagem é dificultada, pois a aresta cortante não consegue efetuar o corte adequado das fibras, ocorrendo o amassamento e o rasgamento de boa parte das fibras.

Karinkanta et al. (2011) constataram que as superfícies usinadas provenientes do lenho tardio são sempre mais lisas do que as superfícies originárias do lenho inicial. Estes pesquisadores verificaram que superfícies usinadas no sentido longitudinal tangencial e radial apresentaram na seção de lenho inicial, uma grande quantidade de traqueídeos longitudinalmente quebrados que deixaram fendas verticais sobre a superfície, causando maiores irregularidades superficiais. Constataram que as superfícies do lenho tardio pareciam ser mais lisas do que as superfícies de lenho inicial. Eles acreditam que as paredes celulares grossas e de baixa compressibilidade relacionadas ao lenho tardio são provavelmente a principal razão pela quais apenas pequenas partículas são removidas da seção lenho tardio com a usinagem abrasiva.

Goli et. al. (2002), trabalhando com Douglas fir e Carvalho, constataram que a qualidade superficial sempre foi superior para o lenho tardio, obtendo menores irregularidades superficiais, independente do sentido de usinagem considerado (concordante ou discordante).

Silva et al. (2007) comentam que diversos autores afirmaram que madeiras com maiores densidades produzem superfícies lisas após a usinagem, sendo apreciadas como de boa qualidade.

Analizando o fator teor de umidade da madeira pelas Figuras 48 e 49, observa-se que para os dois parâmetros respostas de rugosidade analisados (R_a e R_t) ocorreu uma relação direta entre teor de umidade e rugosidade, com um acentuado aumento de rugosidade quando o teor de umidade passou do nível um para um teor de umidade no nível dois. Observa-se ainda que o parâmetro resposta R_t (Figura 49) obteve uma relação mais acentuada com a umidade em comparação com o R_a (Figura 48), isto para a mudança do nível de teor de umidade intermediário para o nível superior. O aumento do teor de umidade provavelmente diminui a resistência da madeira no momento do contato do gume de corte, deixando às fibras mais flexíveis a ação do gume cortante, isto faz com que o corte não seja realizado adequadamente, ocorrendo um esmagamento e/ou lascamento das fibras, que após a passagem do gume de corte retornam as posições iniciais proporcionando uma superfície com arrepiamento de algumas fibras.

Zhong et al. (2013) comentam que quando qualquer membro de madeira está exposta ao ambiente de umidade elevada, não só a sua superfície se torna áspera mas também modifica-se os esforços de corte para a usinagem.

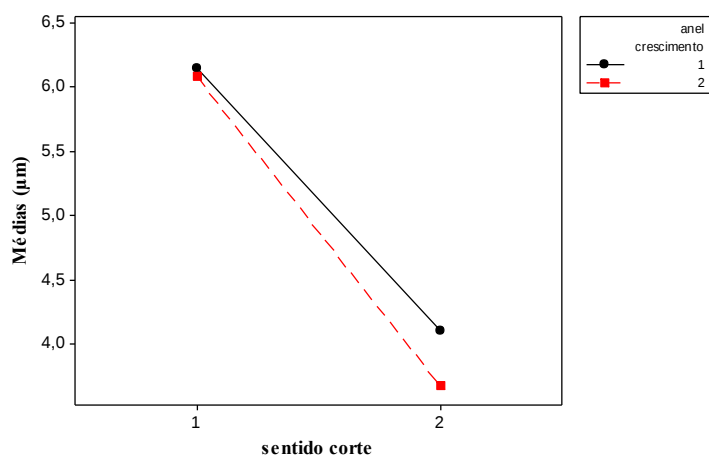
Aknouchea et al. (2009) estudando os desgastes das ferramentas para a usinagem do pinheiro de Alepo (*Pinus halepensis*) a 12 % de umidade, destacaram a necessidade de estudos que envolvam usinagem da madeira a diferentes umidades, para que se possa encontrar um ponto ótimo entre a qualidade de acabamento e desgaste da ferramenta.

4.4 ANÁLISE DO EFEITO DAS INTERAÇÕES DOS FATORES NA MÉDIA E NA RAZÃO S/N PARA A RUGOSIDADE R_a E R_t .

As Figuras de 50 a 55 apresentam as interações entre os fatores de entrada e seus efeitos nas médias das rugosidades R_a e R_t .

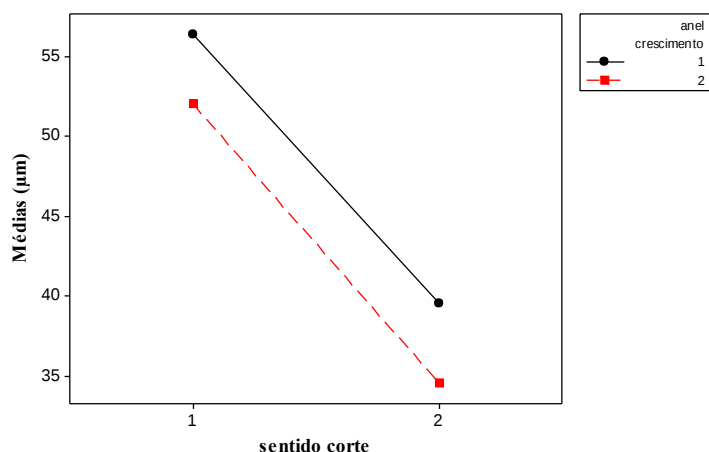
Analizando as Figuras 50 e 51 entre os fatores A (sentido de corte) e B (anel de crescimento) para as rugosidades R_a e R_t , evidenciamos que parece não haver interação entre os fatores, dado que as retas são aproximadamente paralelas. Observa-se que independente do anel de crescimento (1 ou 2), o efeito provocado pelo sentido de corte é o mesmo (desprezível). Assim, conclui-se que efeito do fator sentido de corte (1 e 2) é praticamente o mesmo nos dois níveis do fator anel de crescimento (1 e 2), o que caracteriza uma ausência de interação.

Figura 50 - Interação entre o sentido de corte e anel de crescimento para as médias da rugosidade Ra.



Fonte: Autor.

Figura 51 - Interação entre o sentido de corte e anel de crescimento para as médias da rugosidade Rt.

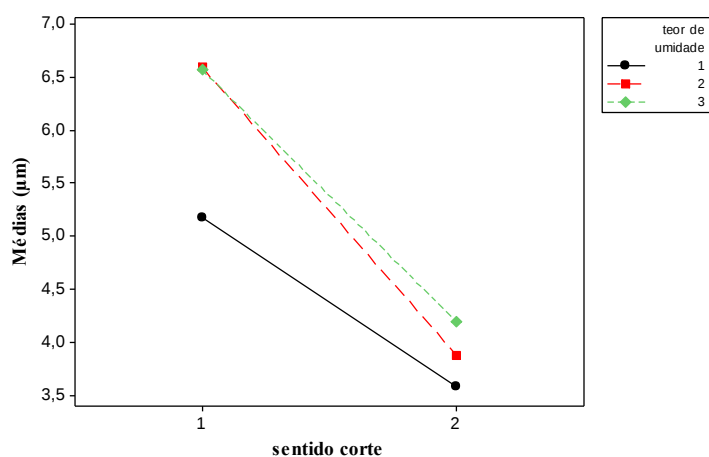


Fonte: Autor.

Analisando as Figuras 52 e 53 entre os fatores A (sentido de corte) e C (teor de umidade) para as rugosidades Ra e Rt, evidencia-se que pode ocorrer uma interação entre os fatores, dado que as retas não são paralelas. Observa-se que a interação é mais acentuada quando comparados o teor de umidade nos níveis 1 e 2 em relação as comparações entre os níveis 2 e 3 e 3 e 1 para a rugosidade Ra. Observa-se também o efeito sinérgico entre os fatores para a redução da rugosidade quando saímos do nível 1 para 2 do sentido de corte, fazendo com que a rugosidade diminua sequencialmente acompanhando em ordem decrescente os níveis do teor de umidade. Assim, conclui-se que efeito do fator sentido de corte (níveis 1 e 2) no teor de umidade (níveis 1, 2 e 3) é visualmente significativo, o que

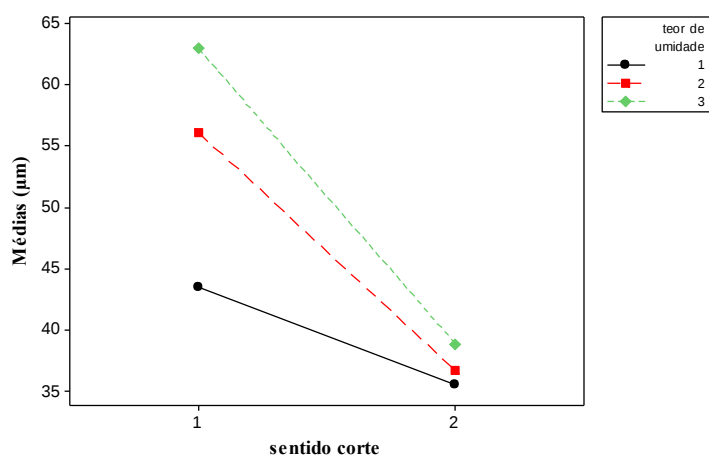
caracteriza uma possível interação que será avaliada, sendo confirmada ou não com a análise ANOVA.

Figura 52 - Interação entre o sentido de corte e o teor de umidade para as médias da rugosidade Ra.



Fonte: Autor.

Figura 53 - Interação entre o sentido de corte e o teor de umidade para as médias da rugosidade Rt.

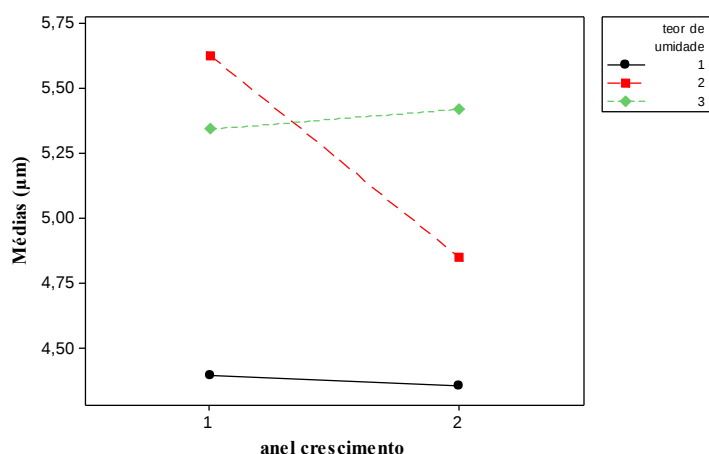


Fonte: Autor.

Analisando as Figuras 54 e 55 entre os fatores B (anéis de crescimento) e C (teor de umidade) para as rugosidades Ra e Rt, evidencia-se que pode ocorrer uma interação anti sinérgica entre os fatores em termos dos níveis 2 e 3 do teor de umidade da rugosidade Ra, dado que as retas se cruzam. Entretanto não se observa interação entre os fatores em relação aos níveis 3 e 1, pois as retas são praticamente paralelas. Observa-se também a ocorrência de uma interação sinérgica entre o teor de umidade no nível 2 quando passa-se do nível 1 para o 2 no anel de crescimento para a rugosidade Ra. Parece não existir interação entre os fatores quando analisamos a Figura 55 para a rugosidade Rt, dado que as retas são praticamente paralelas. Assim, conclui-se que efeito do fator anel de crescimento (níveis 1 e 2) no teor de

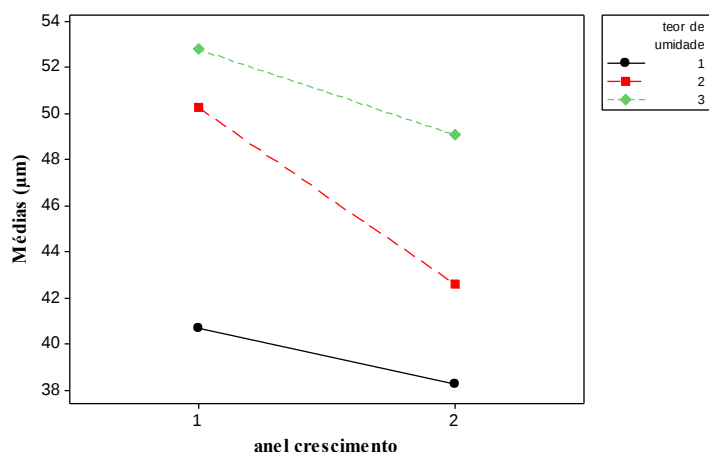
umidade (níveis 1, 2 e 3) é visualmente significativo, apenas quando analisamos a Figura 54 em termos dos níveis 2 e 3 do teor de umidade, o que caracteriza uma possível interação, que será confirmada ou não pela análise ANOVA.

Figura 54 - Interação entre o anel de crescimento e o teor de umidade para as médias da rugosidade Ra.



Fonte: Autor.

Figura 55 - Interação entre o anel de crescimento e o teor de umidade para as médias da rugosidade Rt.



Fonte: Autor.

Através destas análises gráficas nota-se que a interação entre o sentido de corte e teor de umidade pode ser significativa em termos a melhoria da qualidade superficial e que ocorre quando existe a combinação do sentido de corte discordante com o menor teor de umidade analisado (abaixo dos 12 %). Entretanto esta afirmação somente poderá ser confirmada com a utilização da análise de variância, que testará, com um nível de significância de 5 %, se os fatores e suas interações exercem realmente influencia significativa sobre a qualidade superficial.

4.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA OS EFEITOS DOS FATORES NA MÉDIA E NA RAZÃO S/N PARA A RUGOSIDADE RA E RT

A análise de variância para os efeitos dos fatores e suas interações sobre as médias e a razão S/N para a rugosidade, foi utilizada para verificar até que ponto as diferenças apresentadas graficamente, entre os diferentes níveis dos fatores e suas interações, foram realmente significativas.

Observando a Tabela 5 (ANOVA) para as médias das rugosidades Ra e Rt, conclui-se que para um nível de significância de 5 % que as diferenças entre os níveis do fator A (sentido de corte) foram estatisticamente significativas tanto para a rugosidade Ra como para a Rt. Já para o ângulo de crescimento, para um nível de significância de 5 %, ocorreu diferença estatisticamente significativa apenas para o Rt, o mesmo aconteceu para o teor de umidade que foi estatisticamente significativo para o Rt, apesar do valor de p do Ra (0,083) ter ficado muito próximo do limite de significância de 5 %. Analisando as possíveis interações significativas entre os fatores, vemos que a interação entre o sentido de corte e o teor de umidade apresentou uma interação significativa para a rugosidade Rt.

Tabela 5 - Análise de variância para as médias (Ra e Rt).

Fonte de variação	SQ		GL		SMQ		F		P	
	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt
A	14,829	882,650	1	1	14,829	882,653	138,670	334,140	0,007*	0,003*
B	0,180	63,600	1	1	0,180	63,595	1,680	24,080	0,324	0,039*
C	2,364	265,270	2	2	1,182	132,636	11,050	50,210	0,083	0,020*
A x B	0,099	0,280	1	1	0,099	0,280	0,930	0,110	0,438	0,776
A x C	0,661	137,600	2	2	0,330	68,799	3,090	26,050	0,245	0,037*
B x C	0,428	15,010	2	2	0,214	7,506	2,000	2,840	0,333	0,260
Erro residual	0,214	5,280	2	2	0,107	2,642				
Total	18,77	1369,69	11	11						

Fonte: Autor.

*valor significativo ao nível de 5% de significância.

Legenda: Soma dos quadrados dos efeitos (SQ), o número de graus de liberdade (GL), soma média quadrática (SMQ), estatística F (razão entre SMQ e a SMQ erro) e o resultado de p-valor.

Pela Tabela 6 (ANOVA) das razões S/N para as rugosidades Ra e Rt, observa-se que ao nível de significância de 5 %, ocorreu diferença significativa para os valores de Ra e Rt para fator A (sentido de corte). Para os fatores B e C, ocorreram diferenças estatisticamente significativas apenas para a rugosidade Rt. Não ocorreram diferenças significativas para as interações entre fatores para a razão S/N.

Tabela 6 - Análise de variância para as razões S/N (Ra e Rt).

Fonte de variação	SQ		GL		SMQ		F		P	
	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt
A	76,96	43,40	1	1	76,961	43,400	199,430	173,210	0,005*	0,006*
B	0,53	4,60	1	1	0,530	4,604	1,370	18,370	0,362	0,05*
C	4,39	8,81	2	2	2,196	4,404	5,690	17,580	0,149	0,054*
A x B	0,81	0,11	1	1	0,810	0,113	2,100	0,450	0,284	0,571
A x C	1,54	3,35	2	2	0,768	1,676	1,990	6,690	0,334	0,130
B x C	2,60	2,00	2	2	1,302	1,001	3,370	3,990	0,229	0,200
Erro residual	0,77	0,50	2	2	0,386	0,251				
Total	87,610		11	11						

Fonte: Autor.

*valor significativo ao nível de 5% de significância.

Legenda: Soma dos quadrados dos efeitos (SQ), o número de graus de liberdade (GL), soma média quadrática (SMQ), estatística F (razão entre SMQ e a SMQ erro) e o resultado de p-valor.

4.6 ANÁLISES DE RESULTADOS ESTATÍSTICOS DESCRITIVOS PARA A POTÊNCIA CONSUMIDA E EMISSÃO SONORA

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados valores resumo (mínimos, médios, máximos, desvio padrão e coeficiente de variação) da medição emissão sonora e potência consumida, respectivamente, para cada combinação dos níveis dos fatores de entrada analisados neste trabalho. Estas tabelas apresentam a combinação do fator A (sentido de corte) com os seus dois níveis (nível 1: concordante; nível 2: discordante), do fator B (teor de umidade) com os seus três níveis (nível 1: $8 \leq U < 12$; nível 2: $12 \leq U < 16$; nível 3: $16 \leq U < 20$). O número de amostras ($N = 18$) refere-se as seis repetições de cada experimento vezes as três repetições de cada combinação dos níveis, como apresentado no Quadro 11 (experimentos 1, 2 e 3, por exemplo).

Pela Tabela 7, que contém a estatística descritiva para os valores das medições da emissão sonora, observa-se que o sentido de corte no nível 2 (discordante) obteve menores valores de emissão sonora, com a média variando de 83,475 a 91,130 dB, em comparação com o nível 1, com a média variando de 97,600 a 102,600 dB, entretanto, analisando o desvio padrão e o coeficiente de variação verifica-se que apesar do nível 2 do fator A ter obtido menores valores de emissão sonora, ocorreu uma maior variação de seus valores em relação a média, praticamente o dobro dos valores do desvio padrão no nível 1, deste fator. O coeficiente de variação demonstra que o conjunto de dados é homogêneo para todas as combinações dos níveis dos fatores, pois seus valores são inferiores a 50%, sugerindo baixa

dispersão dos dados. Observa-se uma tendência de diminuição da emissão sonora com o aumento do teor de umidade, dado pelos níveis 1, 2 e 3 do fator B e isto ocorre para os dois níveis do fator A.

O baixo valor do coeficiente de variação e a evidente relação entre a emissão sonora e os fatores de entrada, abre a possibilidade de utilização do sinal da emissão sonora em estudos futuros, na determinação de possíveis correlações nas operações de usinagem da madeira, como por exemplo, monitoramento de desgaste de ferramenta de corte e o próprio controle da qualidade superficial após usinagem.

Tabela 7 - Estatística descritiva para a emissão sonora.

	Fatores		N	mínimo (dB)	média (dB)	máximo (dB)	desvio padrão (dB)	coeficiente de variação (%)
	A	B						
Níveis	1	1	18	97,100	102,600	106,900	2,950	2,880
	1	2	18	96,600	101,370	108,200	2,760	2,720
	1	3	18	93,600	97,600	101,500	2,455	2,520
	2	1	18	82,000	91,130	97,300	5,280	5,800
	2	2	18	80,300	88,090	96,500	5,190	5,890
	2	3	18	80,100	83,475	90,300	2,509	3,010

Fonte: Autor.

Pela Tabela 8, que contém a estatística descritiva para os valores das medições da potência consumida, observa-se que não ocorreram tendências com os valores, pois estes estão distribuídos aleatoriamente entre as combinações dos níveis dos fatores. Observa-se boa homogeneidade dos valores de potência consumida, pois estes ficaram abaixo de 50%, o que sugere baixa dispersão dos dados ao redor da média.

Tabela 8 - Estatística descritiva para a potência consumida.

	Fatores		N	mínimo (W)	média (W)	máximo (W)	desvio padrão (W)	coeficiente de variação (%)
	A	B						
Níveis	1	1	18	54,520	62,550	74,020	6,600	10,550
	1	2	18	42,250	64,120	80,590	12,090	18,850
	1	3	18	41,590	53,370	59,340	5,050	9,470
	2	1	18	45,530	56,820	69,420	6,500	11,440
	2	2	18	49,920	65,130	78,400	9,330	14,330
	2	3	18	49,920	62,110	73,360	10,050	16,190

Fonte: Autor.

Em uma primeira análise, parece não ocorrer diferenças significativas entre as combinações dos níveis dos fatores de entrada para a potência consumida.

As afirmações apresentadas anteriormente são baseadas nas análises das tabelas de estatística descritiva e poderão ser confirmadas com o auxílio da análise de variância (ANOVA) realizada posteriormente, quanto ao nível significância dos resultados.

4.7 ANÁLISE DO EFEITO DOS FATORES NA MÉDIA E NA RAZÃO S/N PARA A POTÊNCIA CONSUMIDA E EMISSÃO SONORA

As figuras 56 e 57 apresentam as respostas potência consumida e emissão sonora para o efeito dos fatores sobre as médias e sobre as razões S/N, respectivamente.

Através da análise da Figura 56 (a), observa-se que as médias de potência consumida ficaram abaixo da média geral para a combinação do sentido de corte concordante e teor de umidade no nível 1 e 3, sendo este o menor valor. Analisando a Figura 56 (b) percebe-se que a combinação dos fatores que confere a menor variabilidade é igual a da análise das médias de potência consumida. Percebe-se ainda um comportamento não linear da potência para o fator teor de umidade, para o nível de teor de umidade mais baixo (nível 1) a média da potência consumida é menor que a média geral, passando para o teor de umidade intermediário (nível 2) a média da potência consumida ficou bem acima da média geral e no teor de umidade mais alto (nível 3) a média da potência consumida diminui drasticamente ficando no nível mais baixo de todos.

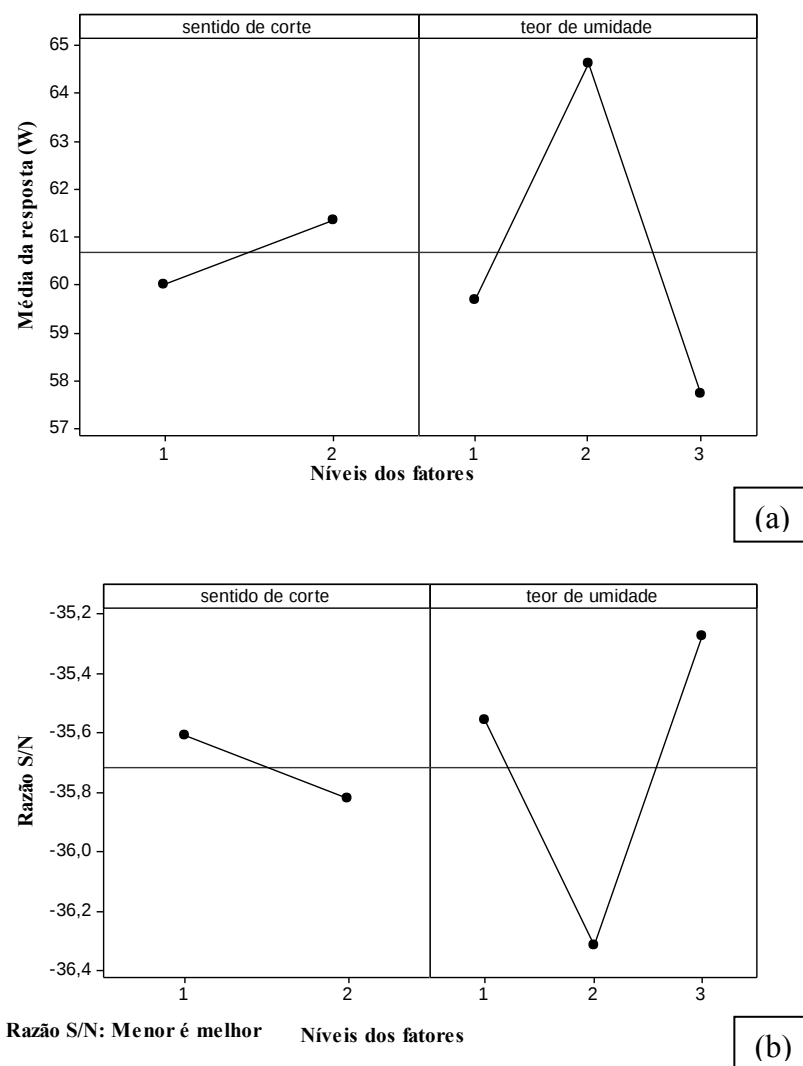
Analisando a emissão sonora, pela Figura 57 (a), observa-se que as médias de emissão ficaram abaixo da média geral para a combinação do sentido de corte discordante e teor de umidade no nível 3. Através da análise da variabilidade, utilizando a razão S/N (Figura 57 (b)), observa-se que a melhor combinação para a redução da variabilidade é o mesmo apresentado pela análise das médias da emissão sonora.

Através destas análises gráficas nota-se que a melhor combinação para a redução da potência consumida é o sentido de corte discordante com o teor de umidade no nível 1 ou 3, ficando a escolha da melhor combinação, a critério da qualidade superficial, que como foi apresentado, obteve as menores rugosidades no teor de umidade no nível 1.

No que se refere à emissão sonora a melhor combinação para a sua redução é o sentido de corte discordante e teor de umidade no nível 3. Entretanto, estas afirmações se baseiam na análise gráfica e precisam ser testadas com a utilização da análise de variância no nível de significância de 5 %, para a confirmação ou não da influência dos fatores sobre a potência consumida e emissão sonora.

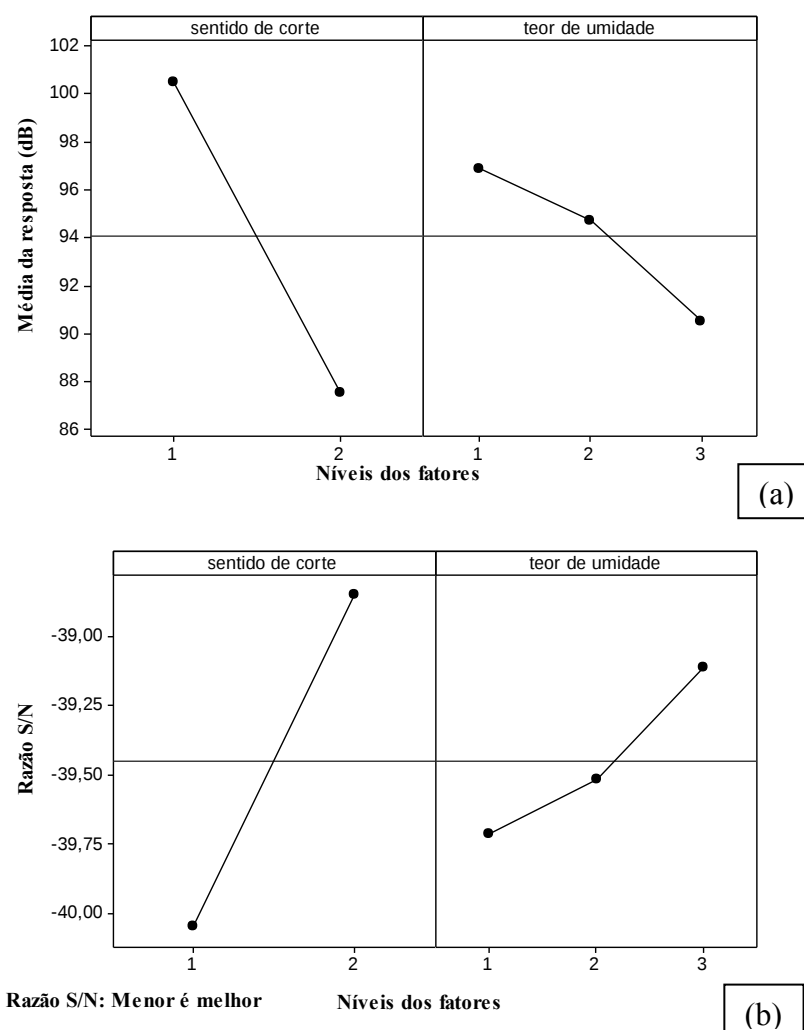
Deve ficar claro que, a resposta determinante para a escolha das melhores combinações dos níveis dos fatores, depende do nível de qualidade aceitável em termos de qualidade superficial, combinado com o que se deseja ou que se pode consumir em termos potência e do nível de emissão sonora aceitável.

Figura 56 - Efeitos principais dos fatores sobre: (a) as médias e (b) a razão S/N, para a potência consumida.



Fonte: Autor.

Figura 57- Efeitos principais dos fatores sobre: (a) as médias e (b) a razão S/N, para a emissão sonora.



4.8 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA OS EFEITOS DOS FATORES NA MÉDIA E NA RAZÃO S/N PARA POTÊNCIA CONSUMIDA E EMISSÃO SONORA.

A análise de variância para os efeitos dos fatores sobre as médias e a razão S/N para a potência consumida e emissão sonora, foi utilizada para verificar até que ponto as diferenças apresentadas graficamente, entre os diferentes níveis dos fatores, foram estatisticamente significativas.

Observando a Tabela 9 (ANOVA) para as médias da potência consumida e emissão sonora, conclui-se que para um nível de significância de 5 % que as diferenças entre os níveis do fator A (sentido de corte) foram estatisticamente significativas somente para a emissão sonora. O mesmo foi observado para o fator B (teor de umidade), para um nível de

significância de 5 %, ocorreu diferença estatisticamente significativa apenas para emissão sonora.

Tabela 9 - Análise de variância para as médias da potência consumida e emissão sonora.

Fonte de variação	SQ		GL		SMQ		F		P	
	Pot.	Emi.	Pot.	Emi.	Pot.	Emi.	Pot.	Emi.	Pot.	Emi.
A	2,689	251,986	1	1	2,689	251,986	0,100	274,870	0,779	0,004*
B	50,372	41,429	2	2	25,186	20,715	0,960	22,600	0,510	0,042 *
Erro residual	52,495	1,833	2	2	26,248	0,917				
Total	105,556	295,248	5	5						

Fonte: Autor.

*valor significativo ao nível de 5% de significância.

Legenda: Soma dos quadrados dos efeitos (SQ), o número de graus de liberdade (GL), soma média quadrática (SMQ), estatística F (razão entre SMQ e a SMQ erro) e o resultado de p-valor.

Pela Tabela 10 (ANOVA) das razões S/N para potência consumida e emissão sonora, conclui-se que as diferenças entre os níveis do fator A (sentido de corte) foram estatisticamente significativas somente para a emissão sonora. O mesmo foi observado para o fator B (teor de umidade), para um nível de significância de 5 %, ocorreu diferença estatisticamente significativa apenas para emissão sonora.

Tabela 10 - Análise de variância para as razões S/N para a potência consumida e emissão sonora.

Fonte de variação	SQ		GL		SMQ		F		P	
	Pot.	Emi.	Pot.	Emi.	Pot.	Emi.	Pot.	Emi.	Pot.	Emi.
Sentido de corte	0,067	2,143	1	1	0,067	2,143	0,110	150,530	0,773	0,007*
Teor de umidade	1,167	0,378	2	2	0,583	0,189	0,940	13,260	0,515	0,070*
Erro residual	1,238	0,028	2	2	0,619	0,014				
Total	2,472	2,549	5	5						

Fonte: Autor.

*valor significativo ao nível de 5% de significância.

Legenda: Soma dos quadrados dos efeitos (SQ), o número de graus de liberdade (GL), soma média quadrática (SMQ), estatística F (razão entre SMQ e a SMQ erro) e o resultado de p-valor.

5 CONCLUSÃO

As conclusões sobre os resultados podem ser analisadas, como se segue:

Melhor combinação: sentido de corte discordante, lenho tardio (se fosse possível) e teor de umidade entre 8 e 12 %, nestas condições Ra máximo $0,86 \mu m$ e Rt máximo de $0,12 \mu m$;

Pela (ANOVA) ao nível de significância de 5 %:

- ✓ Foram determinadas diferenças estatisticamente significativas entre os níveis dos três fatores de entrada analisados pelo parâmetro de rugosidade Rt .
- ✓ A interação entre o sentido de corte e teor de umidade tem influência significativa sobre a rugosidade Rt ;
- ✓ Através do parâmetro Ra foi determinada diferença estatisticamente significativa apenas para os níveis do fator sentido de corte.
- ✓ Pela emissão sonora, ocorreram diferenças estatisticamente significativas para os níveis dos dois fatores analisados.
- ✓ Não ocorreram diferenças estatisticamente significativas, quando analisados os dados de potência consumida.

Agrupando todas as informações para obter a combinação que proporcione o maior número de respostas positivas:

- ✓ Sentido de corte discordante, que proporciona as menores rugosidades e menores emissões sonoras, apesar de um consumo mais alto de potência;
- ✓ Teor de umidade no nível 1 (abaixo dos 12 %), pois resulta em menores rugosidades, uma média de potência consumida abaixo da média geral e como desvantagem uma maior emissão sonora.

A metodologia de Taguchi foi considerada um método experimental estatístico adequado e confiável para a análise da influência dos fatores.

Recomenda-se a utilização simultânea dois parâmetros de rugosidade (Ra e Rt), visto que o Rt é mais sensível na análise da rugosidade em usinagem de madeiras que o Ra .

Em trabalhos futuros podem ser inseridos a análise dos efeitos de algumas variáveis adicionais, tais como: diferentes espécies de madeira, velocidade de avanço da ferramenta, velocidades de corte, diferentes ângulos e geometrias da ferramenta.

6 REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Estudo setorial 2009**. Curitiba: 2009, 43p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília: 2013, 148p.

AKNOUCHE H., OUTAHYON, A., NOUVEAU, C., MARCHAL, R., ZERIZER, A., BUTAUD, J. C. Tool wear effect on cutting forces: In routing process of Aleppo pine wood, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 6, p. 2918–2922, Mar. 2009.

AGUILERA, A.; MUÑOZ, H. Rugosidad superficial y potencia de corte en el cepillado de acacia melanoxylon y sequoia sempervirens. **Maderas. Ciencia Y Tecnología**, Concepción, v. 13, n. 1, p.19-28, 2011.

S L N , S., COŞKUN, H., KILIÇ, M. The effect of the cutting direction, number of blades and grain size of the abrasives on surface roughness of Taurus cedar (Cedrus Libani A. Rich.) woods. **Building and Environment**, v.43, n.5, p. 696-701, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grandezas básicas em usinagem e retificação. Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte – Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos** ABNT (NBR ISO 3002-1). Rio de Janeiro: 2013, 70p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT (NBR ISO 513): Classificação e aplicação de metais duros para usinagem com arestas de corte definidas – designação dos grupos principais e grupos de aplicação**. Rio de Janeiro: 2013, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287: Especificações geométricas do produto (GPS)- Rugosidade: Método do perfil-Termos, definições dos parâmetros de rugosidade**. Rio de Janeiro: 2002, 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4288: Especificações geométricas do produto (GPS)- Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. Rio de Janeiro: 2008, 10p.

AYRILMIS, N., BENTHIEN, J.T., THOEMEN, H. Effects of formulation variables on surface properties of wood plastic composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 2 p. 325-331, 2012.

B H RO ĞLU M., NEMLI G., SARI B., BARDAK S., AYRILMIS N. The influence of moisture content of raw material on the physical and mechanical properties, surface roughness, wettability, and formaldehyde emission of particleboard composite. **Composites: Part B**, v. 43, p 2448–2451, 2012

BAKAR, B. F. A, HIZIROGLU, S., TAHIR, P. M., Properties of some thermally modified wood species. **Materials and Design**, v. 43, p. 348–355, 2013.

BARREIROS, R. M., **Notas de aula de Estrutura Morfológica da Madeira**, 2012. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, Itapeva.

BONETTI, I. **Notas de aula**. INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA Campus Joinville Rua Pavão, 1337.

BUDAKCI M, GURLEYEN L, CINAR H, KORKUT S. Effect of wood finishing and planing on surface smoothness of finished wood. **Journal of Applied Sciences**. v. 7, n. 16, p. 2300-2306, 2007.

CANDAN, Z., BÜYÜKSARI, U., KORKUT, S., UNSAL, O., ÇAKICIER, N. Wettability and surface roughness of thermally modified plywood panels. **Industrial Crops and Products**. v. 36, n. 1, p. 434-436, 2012.

CAMPATELLI, G. et al. Analysis of wood cutting mechanics with different grain orientation. **Advanced Manufacturing Technology**. Firenze, Italy, n. , p.1-6, 2010.

CARUSO, I. **Notas de aula de Tecnologia Mecânica**. Centro Federal de Formação Tecnológica- CEFET/SP.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: ABM, 2005.

COUTO, L. C., BARCELLOS, D. C. As relações água-madeira e sua influência nas suas propriedades Físicas. **Biomassa & Energia**, Viçosa-MG, v. 4, n. 2, p. 173-190, 2011.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. “**Tecnologia da Usinagem dos Materiais**”. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 2013. 272 p.

ELMAS, S., ISLAM, N., JACKSON, M.R., PARKIN, R.M. Analysis of profile measurement techniques employed to surfaces planed by an active machining system. **Measurement**, v. 44, p. 365-377, 2011.

FERNANDES, J. C., **Apostila de acústica e ruídos**, 2005. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, BAURU.

FERROLHO, C. A. P.. **Análise de rendimentos mássicos na indústria de mobiliário**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais Lenhocelulósicos, Departamento de Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher, p. 796, 1977.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKI, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo, Nobel, p. 112, 1985.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da Madeira**. Bauru, SP. 245p, 2000

GONÇALVES, R.; NÉRI, A. C., Orthogonal cutting forces in juvenile and mature pinus taeda wood. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p.310-318, ago. 2005.

GOLI G., BLERON L., MARCHAL R., UZIELLI L., NEGRI M. 2002 (2) - **Surfaces formation and quality in moulding wood at various grain angles. Initial results with Douglas fir and Oak**, Proceedings of the IUFRO Symposium: Wood Structure and Properties 2002 – Zvolen(SK) September 1-3rd 2002.

HIZIROGLU, S., ZHONG, Z.W, TAN, H.L. Measurement of bonding strength of pine, kapur and meranti wood species as function of their surface quality. **Measurement**, v. 46, p. 3198-3201, 2013.

ISLAM, N., PARKIN, R.M., JACKSON, M.R., KESY, Z. Development of a novel profile measurement system for actively planed surfaces. **Measurement**, v. 44, p. 466-477, 2011.

JANKOWSKY, I. P. **Fundamentos de secagem de madeiras**. Documentos florestais. Piracicaba, 1990.

JEYAPOOVANA, T., MURUGAN, M., Surface roughness classification using image processing. **Measurement**, v. 46, p. 2065–2072, 2013.

KARINKANTA, P., ILLIKAINEN M., NIINIMÄKI J. 2011- The effect of anisotropy of Norway spruce (*Picea abies*) during two-body abrasion. **Wear**, v. 272, p. 38 – 42, 2011.

KILIC, M., HIZIROGLU, S., BURDURLU. Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and Environment**, v. 41, p. 1074-1078, 2006.

KOCH, P. **Wood Machining Processes**. New York: Ronald Press Company, p. 530, 1964.

KLOCK, U. **Notas de aula sobre estrutura anatômica da madeira de coníferas, disciplina de química da madeira**, 2012. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, Curitiba.

LEITZ. **Herramientas de precisión Leitz**. Oberkochen, s.d.

LUCAS FILHO, F. C.. **Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis**. 2004. 176 f. Tese (Doutorado) - 2004.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, p.397, 2011.

NÉRI, A. C.. **Parâmetros de corte de usinagem de madeiras de reflorestamento**. 2003. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Construções Rurais e Ambiente, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

PIMENTA, C. D.; SILVA, M. B.; RIBEIRO, R. B.; CLARO, F. A. E. Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da descarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 7, nº 2, p. 97-108, jun/2012.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**, 1. ed., New York, Prentice Hall, p. 333, 1989.

ROSSO, S.. **Qualidade da madeira de três espécies de Eucalyptus resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional**. 2006. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Centro de Ciências Naturais, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Maria, 2006.

SALONI, D. E.; LEMASTER, R. L.; JACKSON, S. D. Process Monitoring Evaluation and Implementation for the Wood Abrasive Machining Process. **Sensors**, p. 10401-10412, 10/2010.

SANTIAGO, L. F. F. **Caracterização da Influência da Velocidade de Corte, Pressão e Granulometria de Lixa no Lixamento do *Pinus elliottii***. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

SANTOS, S.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: SP: Artliber, p. 246, 2007.

SARIKAYA, M., GÜLLÜ, A., Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. **Journal of Cleaner Production**. (2013).

SHIMIZU, J. Y.; MEDRADO, M. J. S. Cultivo do Pinus. **Embrapa Florestas**, versão eletrônica. Nov. 2005.

SILVA, J. R. M., COSTA JÚNIOR, J. S., MENDES, L. M., TRUGILHO, P. F. **Afiação de ferramentas para o setor madeireiro**. Lavras: UFLA/DCF, 1996. 37 p.

SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F. **Usinabilidade da madeira de Eucalyptus grandis em diferentes regiões da medula à casca**. Cerne, v.13, n.1, p.25-31, 2007.

SILVA, J. R. M.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. Preparação de superfícies de madeira e derivados para receber acabamento. **Boletim Agropecuário**, Lavras, v. 28, p.05-26, 1999.

SILVA, J.R.M., MUÑIZ, G. I. B., LIMA, J. T., BONDUELLE, A. F. Influência da morfologia das fibras na usinabilidade da madeira de Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.3, p.479-487, 2005

SOUZA, H. J. C.; MOYSES, C. B.; PONTES, F. J.; DUARTE, R. N.; SILVA, C. E. S.; ALBERTO, F. L.; FERREIRA, U. R.; SILVA, M. B. **Optimization Molecular assay optimized by Taguchi experimental design method for venous thromboembolism investigation**. Molecular and Cellular Probes, v.25, p. 231-237, 2011.

STEMMER, G. Erich. **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscas, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. Florianópolis: Ed. da UFSC, p.314, 1992.

TAN, P.L., SHARIF, S., SUDIN, I. Roughness models for sanded wood surfaces. **Wood Sci Technol**. 46(1):129-142, 2012.

TEIXEIRA, C. R., CASANOVA, C. A. M., FERREIRA FILHO, D., FERNANDES, J. A., BALZARETTI, N. M. **Influência da anisotropia da madeira no desgaste das ferramentas diamantadas**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6, 2011, Caxias do Sul: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas 2011.

VARASQUIM, F. M. F. A., ALVES, M. C. S., GONÇALVES, M. T. T., SANTIAGO, L. F. F., SOUZA, A. J. D.. **Influence of belt speed, grit sizes and pressure on the sanding of *Eucalyptus grandis* Wood**. Cerne, Lavras, v. 18, n. 2, p. 231-237, 2012.

WARCHOLINSKI, B., GILEWICZ, A., RATAJSKI, J. Cr₂N/CrN multilayer coatings for wood machining tools. **Tribology International**, v. 44, p. 1076-1082, 2011.

WEINIG. **Todo sobre herramientas**. Tauberbischofsheim, s.d.

WEISSENSTEIN, C. **Afiacão de ferramentas para usar madeira e seus derivados**. Bento Goncalves, SENAI/CETEMO, p. 370, 1997.

WOODSON, G. E.; Koch, P. **Tool forces and chip formation in orthogonal cutting of loblolly pine**. Department of Agriculture-Forest Service research paper SO-52, 1970.

WOOD HANDBOOK: WOOD AS AN ENGINEERING MATERIAL. Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. p. 508, 2010.

ZACARIAS, Demétrio. **Análise do processo de lixamento tubular da madeira de *Corymbia citriodora***. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ZENID, J. G. IPT (Org.). **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2 ed. São Paulo, 2009. 99 p.

ZHONG, Z.W. HIZIROGLU, S., CHAN, C.T.M. Measurement of the surface roughness of wood based materials used in furniture manufacture. **Measurement**, v. 46, p.1482-1487, 2013.