



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FERNANDO CARDOSO LUCAS FILHO

***ANÁLISE DA USINAGEM DA MADEIRA VISANDO A MELHORIA DE
PROCESSOS EM INDÚSTRIAS DE MÓVEIS.***

Tese apresentada à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, área de Concentração de Gestão do *Design* e do Produto da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito à obtenção do título de Doutor.

Orientador: **Prof. Dr. Lourival Boehs**

Florianópolis
Abril de 2004

FERNANDO CARDOSO LUCAS FILHO

**ANÁLISE DA USINAGEM DA MADEIRA VISANDO A MELHORIA DE
PROCESSOS EM INDÚSTRIAS DE MÓVEIS**

Esta tese foi julgada e aprovada para a obtenção do grau de Doutor em **Engenharia de Produção** no Programa de Pós-Graduação em **Engenharia de Produção** da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 16 de Abril de 2004

Prof. Edson Pacheco Paladini, Dr.
Coordenador do programa

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lourival Boehs, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador

Prof. Edv Oliveira Brito, Dr.
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Membro externo

Profa. Aline França de Abreu, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Eduardo Carlos Bianchi, Dr.
Universidade Estadual Paulista-UNESP
Membro externo

Prof. Carlos Alberto Szucs, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

DEDICATÓRIA

*À minha esposa **Claudia**,
aos filhos, **João, Victória e Marcos**,
pela compreensão, paciência, incentivo e carinho.
À minha mãe, **Maria de Lourdes**,
A meu Pai, **Fernando**,
cuja vida é um exemplo de
honestidade e integridade
às minhas irmãs, cunhadas, à minha sogra e ao meu sogro
Sebastião Nunes dos Santos (in memorium)
pelo carinho e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, Pai, Criador, símbolo de bondade e fonte de inspiração para a sustentabilidade e a cooperação.

Aos meus filhos, João Victor, Victória Caroline e Marcos Vinicius e, também, à minha esposa Cláudia, pelo apoio e carinho constante.

Aos meus pais, Fernando Cardoso Lucas e Maria de Lourdes, pelo carinho e amizade.

Ao Prof. Lourival Boehs, pela orientação, amizade, disponibilidade e parceria na realização do trabalho.

Aos colegas Ulisses, Valmir, Nabor e Tarcísio pelo espírito de cooperação, possibilitaram a realização deste trabalho.

Aos profs. Néri dos Santos, Aline França de Abreu, Carlos Alberto Szucs, por suas valiosas colaborações como integrantes da Banca Examinadora da qualificação.

Às Universidades Federais de Santa Catarina e do Amazonas, pela oportunidade oferecida.

À CAPES que por meio do PICDT financiou a pesquisa.

Às empresas filiadas ao SINDUSMOBIL de São Bento do Sul - SC, pela abertura, receptividade e apoio na realização da pesquisa de campo.

Aos estimados amigos Ulisses, Márcio, Alexandre que, mesmo distantes, contribuíram de forma especial na feitura do trabalho.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSC.

A todas as demais pessoas que de alguma maneira auxiliarem na concretização deste trabalho.

MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SIGLAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação da pesquisa	15
1.2 Contextualização e apresentação do problema de pesquisa	18
1.3 Objetivos	22
1.3.1 Objetivo geral	22
1.3.2 Objetivos Específicos	22
1.4 Premissas da pesquisa	23
1.4.1 Premissa básica	23
1.4.2 Premissas secundárias	23
1.5 Justificativa da Pesquisa	23
1.6 Relevância, ineditismo e originalidade do estudo.	25
1.7 Delimitação do assunto da pesquisa	27
1.8 Estrutura da tese	29
1.9 Benefícios da pesquisa	30
2 REVISÃO DE LITERATURA	32
2.1 Considerações ambientais e econômicas da industrialização da madeira.	32
2.2 Características da indústria de móveis	33
2.2.1 Qualidade e produtividade na indústria madeireira	33
2.2.2 Mercado de móveis de madeira: caracterização geral	33
2.2.3 Principais Características do Segmento de Móveis de Madeira no Brasil	34
2.2.4 Fatores de sucesso do produto	35
2.2.4.1 <i>A importância do design</i>	36
2.3 Propriedades da madeira	38
2.4 Processo produtivo e tecnologia de fabricação de móveis	40
2.4.1 Processo de fresamento	41
2.4.2 Processos de corte com serras circulares	43
2.4.3 Processo de Furação	46
2.5 Fatores relevantes para melhoria da usinagem da madeira.	47
2.5.1 Geometria da ferramenta	48
2.5.1.1 <i>Influência da geometria da ferramenta sobre as forças de corte</i>	50
2.5.2 Grandezas de avanço, de penetração e de usinagem.	51

2.5.3 Materiais das ferramentas de corte	54
2.6 Usinabilidade dos materiais	55
2.6.1 Desgaste da ferramenta durante a usinagem da madeira	58
2.7 Influência das propriedades da madeira na usinagem	60
2.8 Relação entre qualidade da superfície e as condições de usinagem.	64
2.9 Influência dos parâmetros da máquina na usinagem da madeira	71
2.10 Melhoria	73
3 METODOLOGIA	75
3.1 Classificação da pesquisa	75
3.2 Definição do instrumento de coleta de dados	76
3.2.1 Definição das variáveis em estudo	78
3.3 Métodos de análise dos dados	80
3.3.1 Identificação das causas da baixa eficiência na usinagem de madeiras.	80
3.3.2 Identificação das variáveis relevantes para a melhoria dos processos.	82
3.3.3 Melhores parâmetros para condições de corte e geometria da ferramenta.	83
3.3.4 Comportamento dos processos diante da alteração da espécie de madeira.	84
3.3.5 Efeito da usinabilidade da madeira sobre a eficiência dos processos.	85
3.4 Simulação dos processos de usinagem	86
3.5 Passos para a modelagem e simulação	86
3.6 Verificação e validação do modelo de simulação	87
3.7 Análise dos resultados da simulação	88
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
4.1 Considerações iniciais	90
4.1.1 Caracterização dos processos de usinagem da madeira.	90
4.2 Causas da baixa eficiência produtiva na usinagem da madeira	102
4.2.1 Sistema de controle do processo	111
4.2.2 Conhecimento das propriedades da madeira e dos parâmetros de usinagem.	113
4.3 Considerações sobre as estatísticas da análise quantitativa dos processos.	113
4.4 Fatores relevantes para melhoria dos processos de usinagem da madeira	114
4.4.1 Processo de fresamento	115
4.4.2 Processo de corte	118
4.4.3 Processo de furação	119
4.5 Identificação dos parâmetros ótimos de usinagem	120
4.5.1 Processo de corte	120
4.5.2 Processo de fresamento	127
4.5.3 Processo de furação	130
4.6 Comportamento dos processos em função da espécie de madeira	131
4.6.1 Modelos analíticos para previsão das variáveis de resposta	133
4.6.1.1 <i>Estimativa da vida da ferramenta</i>	134
4.6.1.2 <i>Estimativa do índice de rejeição</i>	136
4.6.1.3 <i>Estimativa do volume de madeira usinado</i>	137

4.7 Relação entre a usinabilidade da madeira e a eficiência dos processos	138
4.8 Validação dos resultados	145
5 CONCLUSÕES	149
5.1 Recomendações	151
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
BIBLIOGRAFIA	158
APÊNDICES	160

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da integração entre floresta, indústria e sociedade	16
Figura 2 – Exportação brasileira de móveis entre 1990 e 2002 (Fonte: MDICEx)	19
Figura 3 – Comércio mundial de móveis (Fonte: MDICEx)	19
Figura 4 – Diagrama ilustrando os fatores de sucesso para a competitividade na indústria de móveis (LUCAS FILHO, 2002)	20
Figura 5 – Variáveis que contribuem para a eficiência nos processos de usinagem da madeira (LUCAS FILHO, 2002)	21
Figura 6 – Esquema ilustrando a focalização e os limites da pesquisa dentro da cadeia produtiva madeira móveis. (LUCAS FILHO, 2002)	28
Figura 7 – Estrutura anatômica da madeira de angiospermas (<i>hardwoods</i>). Fonte: IAWA	38
Figura 8 – Perfis para serras circulares (TUSET, R; DURAN, F)	45
Figura 9 – Broca helicoidal: ângulo de incidência, (α_f), ângulo de saída (γ) ângulo do gume transversal (ψ). (STEMMER, 2001)	46
Figura 10 – Parâmetros fundamentais da geometria de broca helicoidal. (STEMMER, 1995)	47
Figura 11 – Elementos geométricos do gume da ferramenta. (BIANCHI, 1996).	48
Figura 12 – Avanço da ferramenta sobre a peça. (GONÇALVES, 2000)	52
Figura 13 – Esquema ilustrando a penetração de trabalho e profundidade de corte. (STEMMER, 1995).	53
Figura 14 – Pressão específica de corte para usinagem de aço ABNT1020 (Baseado em STEMMER, 2001)	53
Figura 15 – Deslocamento do gume em relação à face devido ao desgaste. (BONDUELLE, 2001)	58
Figura 16 – Etapas do desgaste do gume em função da distância percorrida. (BONDUELLE, 2001)	59
Figura 17 – Otimização do avanço por dente (f_z). (BONDUELLE, 2001)	60
Figura 18 – Sistemas de corte na seção transversal da madeira. (Baseado em KOCH, 1964)	62
Figura 19 – Características da topografia da madeira. Irregularidades anatômicas e rugosidade devida ao processo de usinagem (GURAU <i>et al.</i> , 2001)	65
Figura 20 – Comparação entre o escaneamento com apalpador e a triangulação com laser (GURAU <i>et al.</i> , 2001)	66
Figura 21 – Perfil de superfície usinada utilizado para determinação de R_z . (BET, 1999)	67
Figura 22 – Etapas da pesquisa (LUCAS FILHO, 2002)	76
Figura 23 – Esquema representativo da metodologia empregada na pesquisa. (LUCAS FILHO, 2002)	79
Figura 24 – Esquema de desenvolvimento da modelagem e simulação dos processos.	87
Figura 25 – Fluxo dos processos na usinagem de madeira em fábricas de móveis.	90
Figura 26 – Princípio construtivo de cabeçotes que utilizam pastilhas cambiáveis (a,b) e do balanceamento hidrodinâmico. Fonte: Leitz Ferramentas.	93
Figura 27 – pastilhas de metal duro utilizadas no fresamento de perfil e no aplainamento. Fonte: Frezite Ferramentas.	93
Figura 28 – Índice de falhas das ferramentas nos diferentes processos de usinagem da madeira.	104
Figura 29 – Frequência de ocorrência de defeitos de usinagem de acordo com o tipo.	105
Figura 30 – dispersão da vida da ferramenta em torno da média no processo de destopo.	114
Figura 31 – Variação da vida da ferramenta com o ângulo de saída para várias espécies de madeira.	122
Figura 32 – Variação da vida da ferramenta com o ângulo de incidência no processo de destopo.	123
Figura 33 – Variação do índice de rejeição com o ângulo de saída da ferramenta no processo de destopo.	123
Figura 34 – Variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte para o processo de destopo de madeiras de várias massas específicas.	125

Figura 35 – Variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte no processo de corte longitudinal.	126
Figura 36 – Variação da velocidade de avanço e do índice de rejeição com a velocidade de corte no corte longitudinal da madeira de Jequitibá.	127
Figura 37 – Variação do índice de rejeição com o ângulo de saída em várias velocidades de corte.	128
Figura 38 – Variação da vida da ferramenta com o ângulo de saída para várias velocidades de corte no processo de fresamento de perfil.	128
Figura 39 – Variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte no processo de fresamento de perfil de madeiras de várias densidades.	129
Figura 40 – Variação da vida da ferramenta e do índice de rejeição com a velocidade de corte.	130
Figura 41 – Variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte e a massa específica da madeira no processo de furação.	131
Figura 42 – Variação da vida da ferramenta com a massa específica da madeira no processo de destopo em três velocidades de corte.	133
Figura 43 – Valores estimados versus valores reais para estimativa da vida da ferramenta.	135
Figura 44 – Estimativa da vida da ferramenta em função da velocidade de corte e da massa específica da madeira.	136
Figura 45 – Processo de desgaste do gume, mostrando a marca de desgaste admissível.	142
Figura 46 – Relação entre a massa específica da madeira e a vida da ferramenta em vários processos de usinagem.	143
Figura 47 – Variação do volume de madeira usinado com a massa específica da madeira.	144
Figura 48 – Relação entre índice de rejeição e massa específica da madeira em vários processos	144
Figura 49 – Fluxo de processos usinagem para a produção de uma lateral de gaveta.	146
Figura 50 – Tela de resultados da simulação do modelo de sistema de transformação da madeira	147

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre profundidade de corte e o diâmetro do eixo da fresa	42
Quadro 2 – Ângulos de saída recomendados em função do tipo de madeira e de corte	45
Quadro 3 – Ângulos de incidência recomendados em função do tipo de corte e de madeira	46
Quadro 4 – Testes de usinagem com madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	69
Quadro 5 – Sistema de avaliação da qualidade da superfície (ASTM D1666-88)	82
Quadro 6 – Matriz de correlações entre os fatores em estudo e as respostas do sistema de manufatura.	83
Quadro 7 – Parâmetros de saída para diferentes combinações das variáveis em estudo	85
Quadro 8 – Ferramentas utilizadas no processo de corte da madeira	92
Quadro 9 – Exemplos de ferramentas utilizadas nos diferentes processos de fresamento	94
Quadro 10 – Ferramentas comumente utilizadas nos processos de furação da madeira	95
Quadro 11 – Rotação e potência das máquinas utilizadas nos processos de usinagem.	96
Quadro 12 – Aplicação de cada classe de metal duro	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa específica aparente das espécies de madeiras utilizadas na fabricação de móveis	99
Tabela 2 – Diferença entre desempenho de máquinas manuais e CNC no fresamento frontal	110
Tabela 3 – Exemplo de análise da distribuição de frequência para a vida da ferramenta.	114
Tabela 4 – Correlações entre as variáveis no processo de aplainamento (cepilhamento)	116
Tabela 5 – Correlações entre as variáveis no processo de fresamento frontal.	116
Tabela 6 – Correlações entre as variáveis nos processos de fresamento de perfil.	117
Tabela 7 – Correlações entre as variáveis no processo de destopo.	117
Tabela 8 – Correlações entre as variáveis para o processo de corte longitudinal	119
Tabela 9 – Correlações entre as variáveis no processo de furação.	119
Tabela 10 – Ângulos de saída e de incidência utilizados na usinagem das diferentes espécies.	121
Tabela 11 – Modelos matemáticos utilizados para estimativa dos indicadores de desempenho.	133
Tabela 12 – Equações ajustadas por regressão para a previsão da vida da ferramenta em função das velocidades de corte e avanço e da massa específica da madeira nos diversos processos de usinagem.	134
Tabela 13 – Equações ajustadas por regressão para a previsão do índice de rejeição do processo em função das velocidades de corte e avanço e da massa específica da madeira.	136
Tabela 14 – Equações ajustadas por regressão para estimativa do volume de madeira usinada em função das velocidades de corte e avanço e da massa específica da madeira em cada processo	137
Tabela 15 – Resultados da simulação quando são alterados os parâmetros de usinagem.	146

LISTA DE SIGLAS

ABPM – Associação Brasileira de Produtores de Madeira
ABIMÓVEL – Associação Brasileira da Indústria do Mobiliário
PCP – Planejamento e controle da produção
QFD – *Quality Function Development*
TQC (*Total Quality Control*)
CIMM – Centro da informação metal mecânica
MOE – Módulo de elasticidade
MOR – Módulo de ruptura
DCF/UFAM – Departamento de Ciências Florestais/Universidade Federal do Amazonas
PICDT/CAPES – Programa de incentivo e capacitação docente e técnica/Centro de apoio à pesquisa
MDICEX – Ministério do desenvolvimento, indústria e comércio exterior
IAWA – *International association of wood anatomist*
CBN – Nitreto de boro cúbico cristalino
PKD - Diamante policristalino
PSF – Ponto de saturação das fibras
ASTM – *American standart test materials*
CNC – *Command numeric control*
PME's- Pequenas e médias empresas
HSS – Sigla em inglês para aço rápido

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Ângulo de incidência da ferramenta	Graus
β	Ângulo de cunha da ferramenta	Graus
λ	Ângulo de inclinação do gume principal da ferramenta	Graus
γ	Ângulo de saída da ferramenta	Graus
ϕ_1	Ângulo de entrada da ferramenta	Graus
κ_r	Ângulo de direção do gume da ferramenta	Graus
ϕ_s	Ângulo de ataque	Graus
A_D	Seção transversal de usinagem	mm ²
a_e	Penetração de trabalho	mm
a_p	Profundidade de corte	mm
A_z	Seção transversal do cavaco	mm ²
B	Largura de corte	mm
C	Coefficiente linear da equação expandida de Taylor	-
D	Diâmetro da ferramenta	mm
f	Avanço	mm/rot
F_a	Força ativa	N
F_c	Força de corte	N
F_{cn}	Força normal de corte	N
F_f	Força de avanço	N
F_{fn}	Força normal de avanço	N
F_N	Força normal	N
f_z	Avanço por dente (gume)	mm/rot
H	Espessura de corte	mm
h_m	Espessura média do cavaco	mm
h_{max}	Máxima espessura de corte	Mm
$K_{c1.1}$	Força específica de corte	N/mm ²
L	Comprimento total de furação	mm
l_c	Percurso de usinagem	mm
l_{ctot}	Percurso de usinagem total	mm
l_f	Percurso de avanço	m
Me	Massa específica aparente básica da madeira	g/cm ³
N	Rotação da ferramenta	rpm
P_e	Potência específica	Kw/mm ²
r_c	Raio de cunha	mm
R_{max}	Rugosidade máxima da superfície	μ m
r_o	Raio do gume	μ m
SV_γ	Desgaste do gume da ferramenta	
T	Vida da ferramenta	Min.
U	Teor de umidade	%
V_B	Critério de fim de vida da ferramenta	-
v_B	Largura da marca de desgaste da ferramenta	
v_c	Velocidade de corte	m/s
Z	Número de gumes da ferramenta	-
v_f	Velocidade de avanço da peça	m/min

RESUMO

LUCAS FILHO, Fernando Cardoso. 2004. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, **Análise da usinagem de madeiras visando a melhoria de processos em indústrias de móveis**, UFSC, Florianópolis.

Devido à baixa competitividade no processamento industrial e da necessidade de gerar informações sobre o desempenho dos processos de fabricação de móveis aliados à compreensão e entendimento do sistema de produção e dos fatores de influência, torna-se premente o estabelecimento de parâmetros competitivos das variáveis envolvidas na usinagem da madeira. A distância entre os valores das variáveis que traduzem a qualidade, o custo e a velocidade de fabricação, esperados pelos clientes/usuários, e os valores efetivamente alcançados pelos sistemas produtivos para estas variáveis, indica a capacidade e o grau de competitividade dos processos e as áreas de melhoria. No caso da indústria de móveis de madeira, os atributos e valores considerados pelos clientes e percebidos por eles como representativos da qualidade do produto, orientam o estabelecimento de padrões mínimos de desempenho do processo de produção. Por isso a necessidade de conhecer o comportamento do sistema produtivo e prever as melhores condições de operação para se adequar a estas exigências. A adequação dos sistemas produtivos às necessidades dos clientes se dá com a captação de informações sobre as capacidades dos sistemas em cumprir os requisitos. O planejamento do processo procura antever o comportamento dos sistemas produtivos e propor alterações no mesmo para que sejam alcançados estes objetivos, fornecendo indicadores sobre as condições de operação necessárias a esta integração. Já existem vários estudos sobre a qualidade da madeira, suas propriedades e usos potenciais, mas ainda há a necessidade de estudar a melhoria do processo de fabricação, pois disso depende a utilização em regime de rendimento sustentado, e o posterior desenvolvimento de um *cluster* da madeira. O presente estudo busca abordar os aspectos levantados acima para que sejam entendidas as relações entre as propriedades da madeira, as propriedades das ferramentas e as condições de corte no sentido de contribuir para a utilização de máquinas e ferramentas adaptadas à usinagem de madeiras com diferentes propriedades e ainda pouco utilizadas e, assim, contribuir para a melhoria dos processos de transformação da madeira em peças e componentes de móveis e para a competitividade do setor. A compreensão da interação desses fatores e a disseminação dessas informações e a sua extrapolação para a realidade do processamento madeireiro da Amazônia irá conduzir a uma melhoria considerável na eficiência dos processos produtivos por usinagem e assim propiciar a utilização de madeiras duras até aqui pouco utilizadas, facilitando o uso sustentado da floresta. Os resultados da investigação foram comparados com os valores recomendados pela literatura sobre o assunto, buscando identificar os melhores parâmetros de variáveis como material e geometria da ferramenta e condições de corte de acordo com as características da madeira usinada. A melhoria dos rendimentos nos diferentes processos foi alcançada avaliando a interação entre a espécie de madeira e as propriedades das ferramentas e analisando os fenômenos envolvidos em cada operação.

Palavras-chave: melhoria, processos, fabricação, madeira, móveis.

ABSTRACT

LUCAS FILHO, Fernando Cardoso. 2004. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, **Análise da usinagem de madeiras visando a melhoria de processos em indústrias de móveis**, UFSC, Florianópolis.

Due to the low competitiveness in the industrial processing of wood furniture and of the need to generate information on the acting of the processes of machining of the wood, ally to understanding the production system and the influence factors, this research becomes important the establishment of competitive parameters of the variables involved in the process of wood. The distance among the values of the variables that translate the quality, the cost and the production speed, expected for the customers, and the values indeed reached by the productive systems for these you varied, it indicates the capacity and the degree of competitiveness of the processes and the improvement areas. In the case of the industry of wood furniture, the attributes and values considered by the customers and noticed by them as representative of the quality of the product, they guide the establishment of patterns of acting of the production process. Therefore the need to know the behavior of the productive system and to foresee the great conditions of operation to adapt these demands. The adaptation of the productive systems to the customers' needs feels with the reception of information about the capacities of the systems in accomplishing the requirements. The planning of the process tries to foresee the behavior of the productive systems and to propose alterations in the same so that these objectives are reached, supplying indicators about the necessary operation conditions the integration. Several studies already exist on the quality of the wood, your properties and potential uses, but there is still the need to study the improvement of the production process, because of that it depends the sustainable use, and the subsequent development of a cluster of wood. The present study search to approach the lifted up aspects above so that the relationships are understood among the properties of the wood, the properties of the tools and the cut conditions in the sense of contributing for the use of machines tools adapted to the machining of wood with different properties and still little used and, like this, to contribute for the improvement of the processes of transformation of the wood in pieces and components of pieces of furniture and for the competitiveness of the section. The understanding of the interaction of those factors and the dissemination of those information and your export for the processing lumberman's of the Amazonian reality will lead to a considerable improvement in the efficiency of the productive processes for machining and like this to propitiate the use of hard wood here little used facilitating the sustained handling of the forest.

Keywords: improvement, wood machining, process, furniture, performance

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação da pesquisa

O Departamento de Ciências Florestais da Universidade do Amazonas (DCF/UFAM), nos últimos anos vem desenvolvendo pesquisas no sentido de aprimorar técnicas de uso sustentado dos recursos florestais da Amazônia. Por um lado, já existem técnicas de manejo que permitem conciliar a exploração conduzida sob técnicas de baixo impacto ambiental com o fornecimento de madeira de acordo com as capacidades de manutenção da estrutura fitossociológica da floresta, ou seja, retirar apenas aquilo que a floresta produz, procurando aumentar o número de espécies exploradas e obter uma floresta remanescente o mais semelhante quanto possível da floresta original, reduzindo, assim, a exploração predatória de espécies de valor. Mas, por outro lado, ainda há muito a realizar nos aspectos sociais e econômicos quando se analisa a cadeia de valor, aspecto primordial para a sustentabilidade da exploração madeireira.

A sustentabilidade da atividade possui, além desse componente ambiental, outros dois componentes, o social e o econômico. Sem a consideração desses dois componentes a exploração madeireira não é sustentada ao longo do tempo. Para isso é necessário desenvolver atividades integradas à realidade do mercado e que visem agregar maior valor aos produtos (componente econômica) e geração de emprego e renda (componente social) aliadas ao atendimento das restrições ambientais. Em outras palavras, ações mitigadoras apenas dos problemas ambientais advindos da exploração madeireira não possuem suporte suficiente para que o mercado perceba o valor destas ações. Por exemplo, o mercado consumidor de madeira não está disposto a pagar mais caro pela madeira manejada, assim como as pessoas não pagam pela melhor qualidade do ar que respiram ou pela preservação de uma espécie de animal ameaçado pela exploração madeireira. A ordem mundial vigente ainda é traduzida na relação de valores estritamente tangíveis, na forma de bens ou serviços perceptíveis pelos consumidores, por isso essa abordagem puramente ambiental do manejo florestal não conduz à sustentabilidade da atividade, devendo para isso serem considerados os outros dois componentes.

Um questionamento recorrente sobre esta percepção de valor e o conceito de sustentabilidade é a dúvida levantada pela maioria das pessoas que vivem na floresta e se traduz na seguinte pergunta: Afinal, como a floresta e seus recursos podem contribuir para melhorar a qualidade de vida dessas pessoas? De que forma? Ou ainda porque manter a floresta manejada? Se a resposta for apenas baseada em conceitos ecológicos, então está justificada a substituição da floresta por outra atividade mais compensatória como a agricultura ou pecuária, destruindo a floresta por falta de alternativas econômicas, que é, na prática, o principal motivo do desflorestamento e dos maiores danos

ambientais. A Figura 1 ilustra, de maneira esquemática, a integração esperada entre os componentes social, ambiental e econômico advindos do uso racional da madeira.

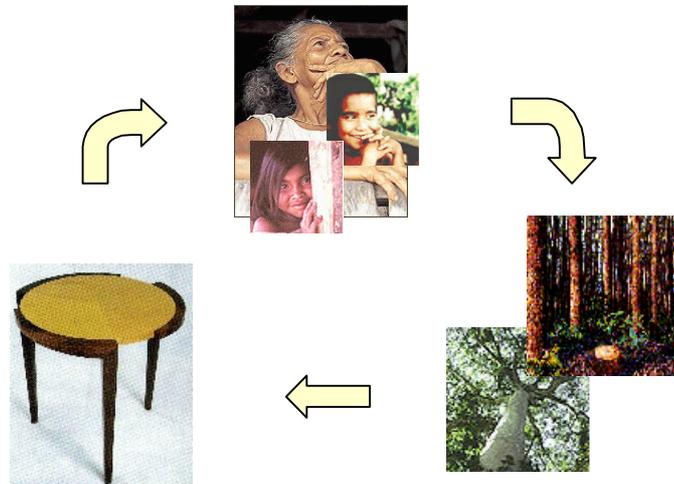


Figura 1 – Representação esquemática da integração entre floresta, indústria e sociedade. (LUCAS FILHO, 2002).

O papel do engenheiro florestal é justamente atender a estas demandas e responder a estes questionamentos apresentando alternativas viáveis de utilização dos recursos, de modo que a manutenção da floresta seja um bom negócio, tal como na época áurea da borracha, onde se buscava manter a floresta como fonte de renda, tornando factível a percepção de valor sobre a floresta, só então será possível alcançar a sustentabilidade, conciliando aspectos, ambientais, econômicos e sociais.

O manejo florestal nos moldes que vem sendo praticado é conduzido visando atender, apenas, a uma demanda de madeira serrada, produto o qual gera poucos benefícios sociais e possui baixo valor agregado, reduzindo a sua utilidade e sendo mais apropriado o uso do termo extrativismo madeireiro seletivo do que propriamente manejo sustentado. Quanto à industrialização o sistema de transformação pode ser classificado como artesanal baseado na utilização de poucas espécies e que, também, não contribui para o uso sustentado dos recursos, pois, é ineficiente, gera muitas perdas nos processos, produtos com baixa qualidade e altos custos e gera poucos benefícios sociais além do dano ambiental pela demanda à exploração seletiva de espécies sem as quais esse tipo de indústria não é viável.

Além disso, as pesquisas conduzidas na área de tecnologia de produtos florestais foram direcionadas para a classificação e identificação de madeiras e seus usos potenciais, não tendo havido a necessária preocupação em estudar a melhoria dos processos de industrialização e sua adaptação às condições necessárias ao uso correto de espécies desconhecidas. O quadro social que

se apresenta é de populações carentes de oportunidades de emprego e geração de renda, cercadas por uma “rica” floresta, mas que se apresenta sem nenhum valor perceptível aos olhos de quem nela vive, pois essas populações ainda não detêm a tecnologia para utilizar esses recursos de forma adequada e transformar a madeira em produtos de reconhecido valor pelo mercado. Por isso, a grande demanda que surge, é a identificação da melhor forma de industrializar a madeira, inclusive como suporte ao manejo florestal sustentado, onde, produtos de maior valor agregado, justificam a exploração com promoção social e equilíbrio ambiental.

Para a identificação das melhores formas de industrializar a madeira é necessário compreender a interação entre as propriedades da madeira e os recursos utilizados para sua transformação em produtos manufaturados. Por esse prisma, a indústria de móveis é a atividade que agrega maior valor à madeira durante sua industrialização. Dentro desse setor, algumas operações são fundamentais para avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de espécies de madeira ainda pouco utilizadas.

No Brasil, já há pólos industriais dedicados à produção de móveis de madeira de reconhecida capacidade tecnológica. Um deles é o pólo moveleiro de São Bento do Sul - SC, onde se localizam as maiores empresas exportadoras de móveis de madeira maciça para o segmento residencial. Mas, mesmo no pólo de São Bento do Sul, mesmo sendo um centro de referência industrial para o setor no Brasil, ainda há problemas relacionados à falta de eficiência produtiva, principalmente quando comparados aos grandes países exportadores de móveis como a Itália e a Alemanha (NAHUZ, 1999).

Segundo dados do MDICEx (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior) a Itália exporta cerca de U\$ 6 bilhões/ano em móveis. A sua vantagem competitiva é baseada principalmente no uso intensivo de moderna tecnologia de fabricação, o que permite altos ganhos em produtividade e qualidade, uma organização industrial desverticalizada baseada no associativismo e cooperação entre os elos da cadeia produtiva e a execução de um *design* diferenciado, mesmo sendo um país onde não há grandes florestas e sendo importador de madeira. Por isso, a necessidade de entender as relações entre as propriedades da madeira e propiciar avanços sobre a melhor forma de usiná-la, bem como a difusão desse conhecimento pelas cadeias produtivas de móveis que também utilizam madeiras de florestas tropicais, mas, principalmente, nas regiões onde é grande a defasagem tecnológica.

Isto permitiria um melhor aproveitamento do potencial econômico e o desenvolvimento de um *cluster* industrial da madeira na própria região, sem a necessidade, portanto, de transportar as madeiras para serem usinadas em outras regiões.

Deste modo, tentando redirecionar a mudança de rumos nos estudos relacionados à utilização racional da madeira, o DCF/UFAM como entidade de ensino, pesquisa e extensão, a qual tem o papel de produzir e difundir tecnologias e a promoção do conhecimento, através do programa PICDT/CAPES, decidiu priorizar pesquisas que viessem de encontro a esta realidade, fomentando o desenvolvimento do presente estudo visando conhecer o “*modus operandis*” de indústrias de móveis da região de São Bento do Sul, SC, de modo a permitir a melhor compreensão dos fatores relevantes para a melhoria dos processos de transformação da madeira em peças e componentes de móveis e assim contribuir para a disseminação deste conhecimento nas regiões carentes de tecnologia e a difusão de uma cultura industrial baseada nos exemplos de sucesso do pólo moveleiro da região de São Bento do Sul e dos modelos industriais adotados nos países mais competitivos do setor.

Os benefícios deste estudo, baseados na análise da eficiência de ambientes industriais representativos da realidade e dos problemas enfrentados por essas empresas, certamente vão de encontro ao atendimento da grande demanda de conhecimentos sobre a melhor forma de utilizar a madeira, o que tem desdobramentos sobre aspectos sociais e ambientais, além dos econômicos, uma vez que deste modo, se estabelecem de forma mais clara e definida as relações de dependência entre as respostas do sistema de manufatura e as variáveis que contribuem para a eficiência do mesmo, sendo possível identificar fatores tecnológicos responsáveis pela má utilização desses recursos e o seu melhor equacionamento visando atingir a competitividade e a sustentabilidade da atividade.

1.2 Contextualização e apresentação do problema de pesquisa

A indústria de móveis de madeira no Brasil vem apresentando crescimento ano após ano (ABIMOVEL, 2002), apesar do cenário macro-econômico e de dificuldades estruturais e conjunturais (Figura 2).

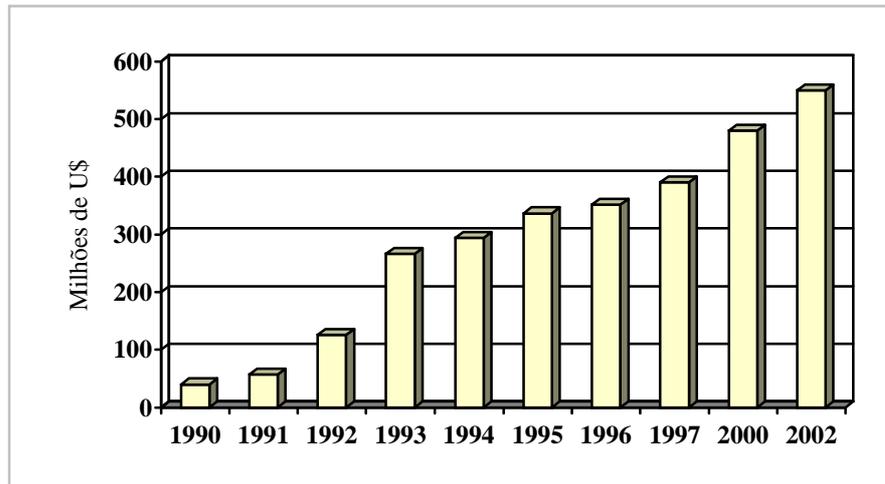


Figura 2 – Exportação brasileira de móveis entre 1990 e 2002. (Fonte: MDICEx, 2002)

Mas apesar desses índices favoráveis e de oferecer outras características como disponibilidade de mão-de-obra barata, abundância de matéria prima, e outros insumos para produção, a indústria de móveis do Brasil ocupa apenas cerca de 1% do comércio mundial de móveis de madeira que é estimado em cerca de U\$ 60 bilhões/ano. A Figura 3 ilustra esta estatística.

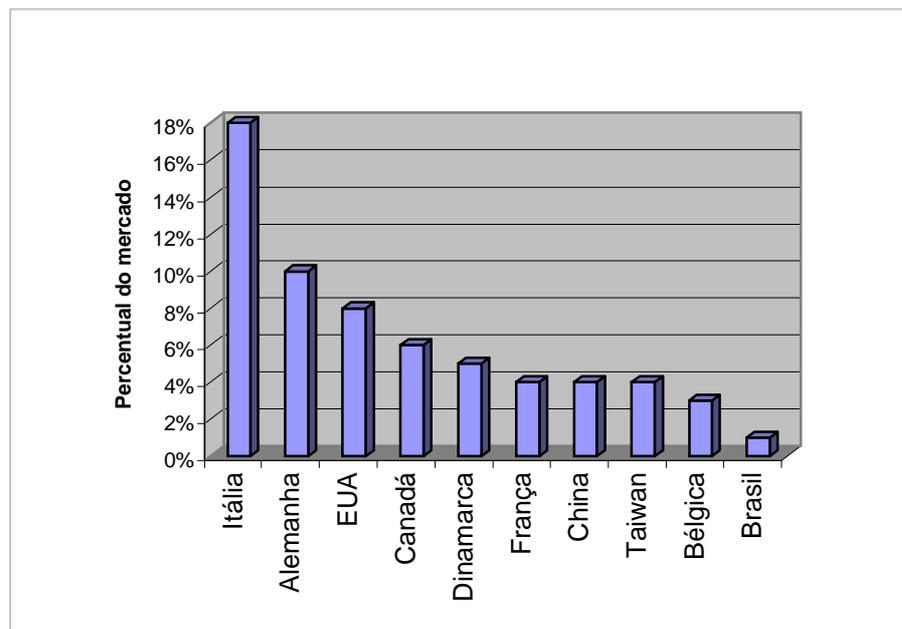


Figura 3 – Comércio mundial de móveis (Fonte: Adaptado de COUTINHO, 1999)

A falta de competitividade é mais evidente nos segmentos de móveis residenciais, confeccionados a partir da usinagem de madeira maciça. Segundo vários estudos desenvolvidos por NAUMANN (1998), COUTINHO (1999), NAHUZ (1999) e SOUZA (1999) essa pequena participação do setor no mercado externo pode ser atribuída a alguns fatores básicos como, ausência de um *design* próprio e mais atraente, organização industrial pouco desenvolvida, cultura industrial atrasada, ausência de certificação ambiental de origem da matéria-prima, ausência de estratégias comerciais competitivas e tecnologia de fabricação ineficiente, gerando maiores custos

de produção e altos índices de perdas na produção além do baixo nível da qualidade final. A Figura 4 mostra, de forma esquemática, os fatores de sucesso que contribuem para a competitividade do setor.

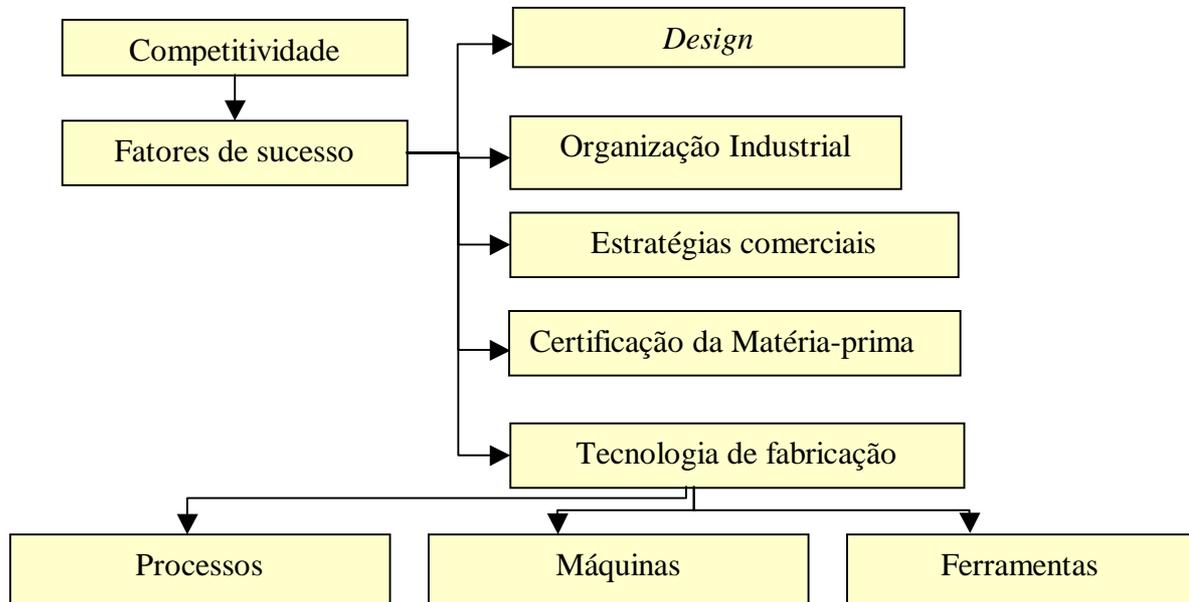


Figura 4 – Diagrama ilustrando os fatores de sucesso para a competitividade na indústria de móveis. (LUCAS FILHO, 2002).

Estes fatores críticos para a competitividade são também conhecidos num espectro mais amplo como fatores de influência do negócio e, por conseguinte, de suas operações. São conhecidos também como fatores ambientais, fatores empresariais, fatores setoriais e fatores organizacionais de sucesso. A obtenção de dados sobre o desempenho dos processos de fabricação e a sua correta interpretação e análise, pode resultar num suporte mais efetivo quando da seleção de alternativas de soluções para um determinado problema de projeto do sistema produtivo.

Essa abordagem de análise baseada no diagnóstico da eficiência do processo produtivo é comum em alguns segmentos industriais mais avançados, mas desconhecida ou pouco praticada em outros. No caso da indústria madeireira, o perfil é de uma atividade onde as práticas organizacionais e operacionais são menos conhecidas e claramente definidas, mas o resultado é bem conhecido e se traduz num alto índice de desperdício e rejeição, baixo valor agregado ao produto final, baixa eficiência produtiva o que se reflete na inexistência de uma estratégia direcionada para a melhoria do processo produtivo.

Para a ABPM (Associação Brasileira da Indústria do Mobiliário), é importante que as empresas avancem na capacidade de manufatura de forma a conseguirem produtos de menor custo, elevada qualidade e flexibilidade produtiva. Segundo a ABPM (1998) a indústria de transformação da

madeira apresenta deficiência competitiva causada, entre outros fatores, pela má gestão dos recursos produtivos, principalmente em empresas de pequeno e médio porte. Este cenário foi descrito também por ALMEIDA (1998), TOMASELLI (2000) e BONDUELLE (1997), segundo os quais há a necessidade da integração entre o projeto de produtos e um sistema de gestão do processo mais eficaz como forma de resolver o problema.

Devido a este cenário, os atores dessa cadeia produtiva começam a buscar metodologias no sentido de entender o comportamento dos fatores relevantes para a melhoria da eficiência do sistema de fabricação e garantir o bom desempenho dos processos. A figura 5 representa de forma esquemática as variáveis que contribuem para a eficiência da usinagem da madeira, mostrando os *inputs*, representados pelas propriedades da ferramenta, da madeira e condições de corte na usinagem, o processo de usinagem em si e os *outputs*, medidos em termos de medidas de qualidade e produtividade do processo.

Assim, buscando dar um primeiro passo na tentativa de "antever e compreender o comportamento dos processos e seus parâmetros envolvidos na usinagem de madeira" e propor soluções baseadas numa melhor resposta técnica e econômica, o objetivo desta proposta consiste na análise dos processos de fabricação, apoiada nos conhecimentos da engenharia industrial e da gestão dos processos de produção.

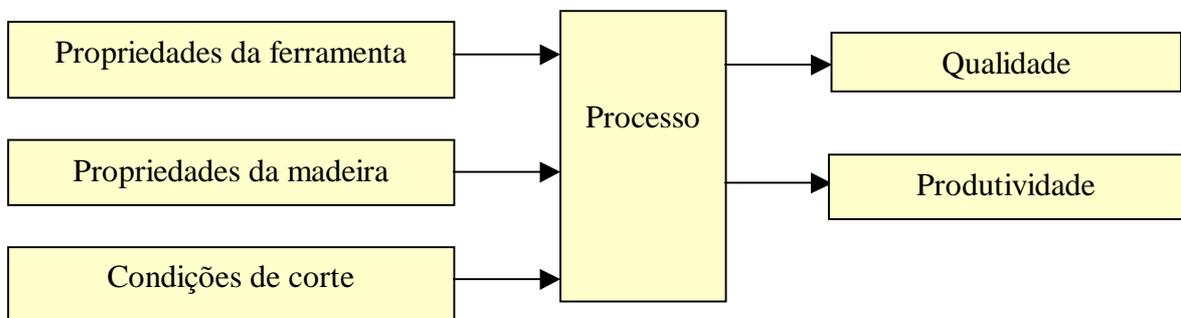


Figura 5 – Variáveis que contribuem para a eficiência nos processos de usinagem da madeira. (LUCAS FILHO, 2002).

Desta forma, espera-se contribuir para a criação de referenciais para a implementação das mudanças necessárias, no sentido de promover a competitividade, o que é fundamental à sobrevivência das empresas do setor, além de ser um elo importante para a auto-sustentabilidade da cadeia produtiva da madeira.

Por isso, a determinação da vida das ferramentas em cada combinação madeira-ferramenta-condição de corte têm efeitos sobre as respostas do sistema de fabricação, medidos em termos de

indicadores de produtividade e qualidade na usinagem de peças e componentes de móveis de madeira.

A usinagem da madeira e suas relações de causa e efeito com as variáveis envolvidas na melhoria dos processos e a definição dos melhores parâmetros para essas variáveis, são primordiais para o posicionamento perante a concorrência e para o desenvolvimento de um processo de fabricação mais eficiente.

1.3 Objetivos

Diante deste contexto e da necessidade de gerar informações que contribuam para a melhoria da eficiência dos processos de usinagem envolvidos na fabricação de móveis de madeira são propostos os seguintes objetivos:

1.3.1 Objetivo geral

A partir da análise do desempenho dos processos de usinagem da madeira de nove fábricas do pólo moveleiro de São Bento do Sul, SC, identificar os fatores relevantes e estabelecer as relações que contribuem para a melhoria da tecnologia de fabricação nas indústrias de móveis de madeira.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para suportar o cumprimento do objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as causas da baixa eficiência produtiva na usinagem da madeira;
- Identificar as variáveis relevantes para a melhoria dos processos de fresamento, corte e furação da madeira de diferentes espécies em ambiente fabril;
- Identificar os melhores parâmetros para a usinagem da madeira de várias espécies, compará-los com os efetivamente utilizados pelos usuários e com os valores recomendados pela literatura sobre os processos de fresamento, corte e furação;
- Prever o comportamento dos processos diante de alterações da matéria-prima;
- Estudar o efeito da usinabilidade das diferentes espécies sobre a eficiência dos processos.

1.4 Premissas da pesquisa

1.4.1 Premissa básica

Melhorar a compreensão dos sistemas de fabricação permite uma melhor orientação para a tomada de decisões na fase de planejamento do processo, oferecendo o suporte tecnológico necessário para o melhor dimensionamento dos processos de manufatura de móveis de madeira, visando a melhoria destes.

1.4.2 Premissas secundárias

As informações obtidas pela análise do processo de fabricação reduzem as incertezas e facilitam o correto dimensionamento dos recursos envolvidos na usinagem, permitem o monitoramento permanente do mesmo e melhoram os processos inadequados ou com baixo desempenho;

A adoção de valores de referência para as operações dos sistemas de manufatura permite o estabelecimento de padrões de desempenho operacional, próximos daqueles esperados pelo mercado, tendo em vista a competitividade deste mercado;

A compreensão dos sistemas de manufatura de móveis de madeira e as relações entre as variáveis envolvidas nos processos de usinagem permitem uma melhoria expressiva nos processos de produção e facilitam o planejamento do sistema produtivo.

1.5 Justificativa da Pesquisa

A exploração ilegal de madeiras de lei na Amazônia está relacionada ao avanço da fronteira agrícola. Esta atividade tem como base a falta de uma política que privilegie o uso racional dos recursos, a qual envolve aspectos econômicos, sociais e ambientais de forma indissociáveis.

Neste sentido, é necessário conduzir estudos para gerar informações que facilitem a compreensão dos cenários que orientem o estabelecimento de políticas públicas que privilegiem o uso racional dos recursos explorados. O conhecimento da melhor forma de utilização das potencialidades econômicas, entre elas a atividade madeireira, considerando toda sua cadeia produtiva, deve contemplar aspectos sociais, pelo desenvolvimento de projetos integrados e com grande potencial de replicação, promovendo a capacitação e a formação de iniciativas promissoras e mitigadoras dos problemas sociais, ambientais e econômicos, que agregue valor aos produtos e a partir disso, diminuam as pressões sociais e ambientais devidos à exploração ilegal da madeira.

A viabilidade dos projetos de manejo sustentado passa por esta análise multidisciplinar. Um dos seguimentos onde é possível adequar promoção social, equilíbrio ambiental e sustentabilidade econômica é o de produção de móveis de madeira, pois, o potencial de disseminação e de replicação da atividade é grande, gera produto de maior valor agregado, tem um grande impacto social, visto que exige uso intensivo de recursos humanos, envolve tecnologia de fácil acesso e de baixo custo, possibilita a utilização de espécies alternativas de madeira (o que é de mais difícil implementação para outros produtos de madeira) e existe a oportunidade de mercado visto que a demanda é crescente (ABIMOVEL, 2002).

Para implementar tais iniciativas, além do conhecimento das propriedades das madeiras utilizadas, é primordial melhorar o conhecimento sobre a melhor forma de industrializá-las, estudando os fatores que contribuem para a eficiência dos processos de transformação da madeira em peças e componentes de móveis. O problema em estudo propiciará uma avaliação dos sistemas de fabricação como forma de melhorar o planejamento do processo e a manufatura de móveis de madeira, onde a eficiência e o desempenho dos processos de usinagem como fresamento, corte e furação são considerados fatores decisivos para a utilização da madeira de forma sustentada (LUCAS FILHO, 2002).

A utilização de espécies alternativas de madeira para fabricação de móveis é uma forma de viabilizar a exploração sustentada da floresta. Aumentando o número de espécies exploradas há uma redução na demanda por espécies tradicionalmente comercializadas, reduz-se o tamanho da área de exploração para obtenção de um determinado volume de madeira e há a inclusão de espécies pouco conhecidas, mas com propriedades semelhantes às tradicionalmente exploradas para a fabricação de móveis. A rentabilidade por hectare aumenta quando comparada a outras atividades, pois além do maior número de espécies, há geração de um produto de maior valor agregado (LUCAS FILHO, 2002).

A utilização de espécies alternativas para produção de móveis é tecnicamente viável, pois o mercado de móveis é regido por fatores que independem menos da espécie de madeira utilizada, diferente do mercado de madeira serrada onde a espécie é o principal fator. O mercado de móveis exige, prioritariamente, a certificação da madeira no sentido de atender aos requisitos ambientais e sociais durante a sua exploração, o *design* e o preço do produto final. A definição das variáveis envolvidas no processo produtivo de transformação da madeira em móveis, bem como o estabelecimento de suas relações com os demais recursos envolvidos na produção permitirá dimensionar o processo no sentido de maximizar a produtividade e cumprir os padrões mínimos de qualidade para os produtos. A rentabilidade da atividade será maior quanto mais eficientes forem os

processos de transformação da matéria-prima e quanto mais ajustados ao mercado estiverem os padrões de qualidade dos produtos.

Existem vários estudos sobre a qualidade da madeira, suas propriedades e usos potenciais, mas ainda há a necessidade urgente de estudar a melhoria do processo de fabricação, pois disso depende a utilização em regime de rendimento sustentado, e o posterior desenvolvimento de um *cluster* industrial da madeira.

No entanto, quando se busca utilizar espécies alternativas de madeira, não se conhece o comportamento das ferramentas e das máquinas, durante o processo de usinagem, pois cada espécie possui características singulares. A madeira apresenta características anisotrópicas e diferentes propriedades físicas e mecânicas, o que dificulta a generalização do rendimento das operações de usinagem. O processo de transformação da madeira em móveis permite a agregação de grande valor ao produto, cabendo à usinagem grande parte desta “geração de valor”. É importante que a usinabilidade da madeira seja compatível com as necessidades de qualidade, custo e produtividade. Assim, faz-se necessário desenvolver estudos com a finalidade de caracterizar o efeito das propriedades das diferentes espécies utilizadas sobre a usinabilidade das mesmas.

Dentre os parâmetros que podem ser determinados, para essa otimização estão a seleção da melhor geometria de ferramenta, das melhores condições de corte, dos melhores materiais para cada operação e para cada espécie de madeira em função do desgaste de gume das ferramentas, da qualidade das peças e da produtividade.

FARIAS (2000), quando estudou o processo de fresamento da madeira de *eucalyptus*, já citava em suas recomendações a necessidade do desenvolvimento de pesquisa tecnológica na área moveleira visando gerar conhecimentos sobre os fatores inerentes ao processo que conduzem à otimização do fresamento de madeiras alternativas e suas influências sobre a qualidade e a produtividade.

1.6 Relevância, ineditismo e originalidade do estudo.

A caracterização tecnológica da usinabilidade é um dos indicadores do potencial de uso de novas espécies de madeira para fabricação de móveis. A determinação da usinabilidade de novas espécies de madeira para fabricação de móveis permite o desenvolvimento de ferramentas e máquinas adaptadas às características dessas novas espécies. Essas informações permitem o dimensionamento do processo produtivo e facilitam o planejamento e controle da produção mediante a avaliação e o monitoramento do desempenho dos processos. O conhecimento do desempenho do conjunto máquina-ferramenta para cada operação e para cada tipo de material da

peça propicia o estabelecimento de parâmetros competitivos para o processo de usinagem tais como, a melhor geometria para cada ferramenta, as melhores condições de corte e os materiais mais adequados para que se alcance o melhor desempenho no processo de transformação da madeira em móveis ou componentes.

Várias pesquisas têm abordado a análise de sistemas produtivos na industrialização da madeira, entre elas as desenvolvidas por BONDUELLE (1997), LIMA (1998), SILVA *et al.* (1999), TOMASELLI (2000) e FARIAS (2000). Estes estudos fazem o levantamento de indicadores das áreas de atuação para obter-se a melhoria dos processos produtivos. Porém, não estabelecem valores de referência para que orientem a manutenção das variáveis envolvidas na usinagem da madeira dentro dos limites de controle do processo.

Várias outras pesquisas foram direcionadas para os processos básicos de usinagem e seus avanços, incluindo estudos da interação entre material da ferramenta e material da peça, o desenvolvimento de máquinas utilizadas no processamento da madeira, os métodos de avaliação da qualidade da superfície usinada, utilizando mecanismos ópticos, o monitoramento e controle dos processos utilizando indicadores como potência consumida, emissão acústica e, por fim, a avaliação do efeito das propriedades da madeira sobre o desgaste.

Entre os principais estudos destes temas estão as pesquisas desenvolvidas por MOTE (1979), THUNELL (1982), McKENZIE (1993), KOMATSU (1993), HUBER (1997), BIKERLAND (1997), MÜNZ (1997), SCHAJER (1999), SZYMANI *et al.* (2001), MEAUSOONE (2001), TANAKA *et al.* (2001), LEMASTER *et al.* (2001). Porém, todas estão voltadas para a análise da interação ferramenta madeira buscando identificar relações para estimar a melhoria de algumas propriedades isoladas das ferramentas e condições de corte em laboratório, sem a devida avaliação dos resultados práticos destas interações em termos da melhoria da eficiência produtiva no ambiente fabril. Os estudos desenvolvidos nesta área do conhecimento não contemplam as diferentes combinações das variáveis envolvidas nestes processos e não mostram a sua importância para a melhoria dos mesmos num ambiente fabril. Mostram apenas as correlações de uma ou outra variável analisada isoladamente e em condições de laboratório, o que torna difícil a sua extrapolação visto que no ambiente fabril, há outras interações que não são consideradas e a escala de produção é maior e, nas condições de laboratório, as vezes não são reproduzíveis.

Por isso, baseado no atual estado da arte e da tecnologia sobre o assunto, justifica-se a importância deste estudo, o qual baseia-se na necessidade de gerar alternativas para a melhoria da qualidade dos produtos e da eficiência dos processos de transformação industrial da madeira, o que resultaria em menos desperdício de recursos produtivos, redução dos custos de produção e melhoria da qualidade dos produtos fabricados e uma melhor compreensão das relações de causa e efeito

entre as variáveis envolvidas na usinagem da madeira (condições de corte, espécie de madeira, geometria e materiais das ferramentas) necessárias para o correto dimensionamento e planejamento do sistema de fabricação em padrões competitivos de desempenho e eficiência.

O projeto do sistema produtivo e o estudo da viabilidade técnica e operacional de indústrias de móveis de madeira poderão identificar os fatores que contribuem mais intensamente para a efetiva utilização racional da madeira nesse segmento industrial.

A geração das informações sobre o desempenho do conjunto máquina-ferramenta-madeira para cada grupo de processos de fresamento, corte e furação em condições de fabricação, pode fornecer o suporte informacional importante e necessário à fase de planejamento do processo produtivo e a subsequente melhoria da eficiência da manufatura de móveis e componentes de móveis de madeira.

Em síntese, o presente estudo é considerado inédito, original e relevante porque:

1. Gera informações para a estruturação da atividade de planejamento do sistema produtivo e melhoria do sistema de manufatura de móveis de madeira, consideradas as principais causas da baixa competitividade do setor.
2. Possibilita a geração de parâmetros para “balizar” as operações de usinagem e que sirvam de referência à atividade de projeto do sistema produtivo. Para o setor, os padrões de desempenho para os processos em estudo, que sirvam de referência na elaboração de projetos de máquinas e ferramentas para usinagem de novas espécies de madeira, ainda não existem.
3. O estudo propicia melhores condições para o estabelecimento de limites de controle para os processos envolvidos na usinagem da madeira, fora dos quais o sistema de manufatura apresenta baixa eficiência produtiva e, portanto, baixa competitividade.
4. Como não há uma definição clara e sistematizada das relações de causa e efeito entre os fatores envolvidos na usinagem da madeira e a qualidade e eficiência do processo produtivo, é necessário entender melhor essas relações de modo a dimensionar os parâmetros pertinentes próximo a padrões que conduzam a melhoria da eficiência produtiva na transformação da madeira em peças e componentes de móveis.

1.7 Delimitação do assunto da pesquisa

Esta pesquisa analisa os processos de fabricação de indústrias de móveis de madeira no pólo moveleiro de São Bento do Sul, SC, buscando caracterizar os aspectos como qualidade do produto e eficiência produtiva e relacioná-los às variáveis envolvidas na usinagem (condições de corte, geometria e material das ferramentas de corte e espécie de madeira) para, a partir de resultados de

investigações teóricas e práticas, propor alterações e estabelecer procedimentos que busquem melhorar a produtividade do processo de manufatura e avaliar a utilização de determinadas propriedades das ferramentas de acordo com as espécies de madeira e condições de corte para conduzir à melhoria da eficiência do sistema produtivo. A Figura 6 ilustra a focalização do trabalho dentro da cadeia produtiva madeira-móveis.

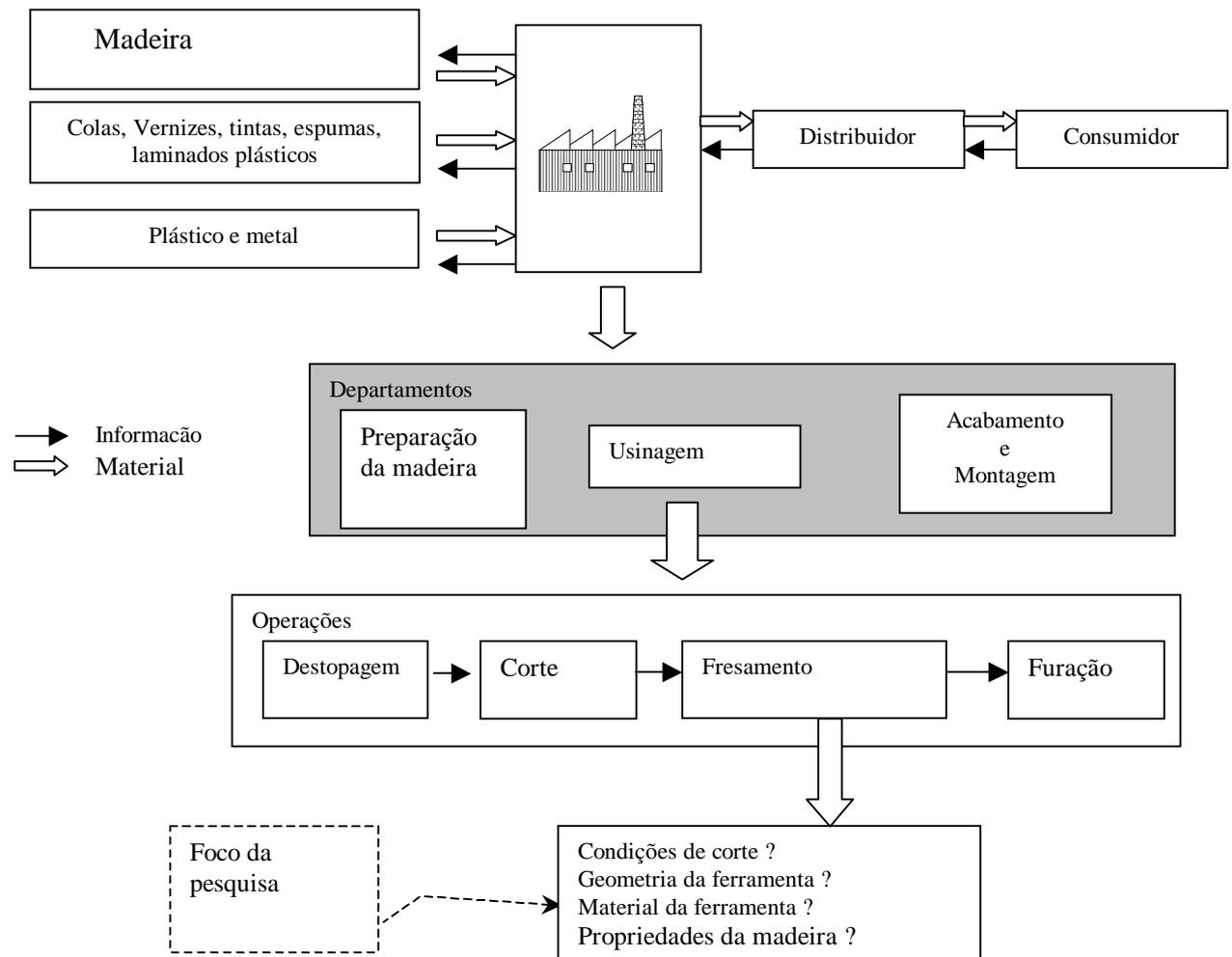


Figura 6 – Esquema ilustrando a focalização e os limites da pesquisa dentro da cadeia produtiva madeira móveis. (LUCAS FILHO, 2002).

A escolha do pólo moveleiro de São Bento do Sul para o desenvolvimento da pesquisa se deve ao fato deste ser o principal pólo exportador de móveis dentro do contexto da pesquisa apresentada no item 1.1 e, portanto, se enquadrando no segmento industrial onde há maior carência de informações sobre os fatores de melhoria do processo, visto que a competitividade no mercado externo é muito grande e os fatores da produção são decisivos para melhoria da competitividade, diferentemente de outros pólos especializados em linhas retas que utilizam, basicamente painéis de madeira reconstituída e que atuam no mercado nacional. Além disso, é um pólo onde as indústrias

têm maior controle sobre as variáveis dos processos em estudo e um melhor nível de organização industrial necessárias para o desenvolvimento deste tipo de estudo.

A focalização do estudo neste segmento da indústria de móveis facilitará, também, a utilização dos resultados para auxiliar na melhoria dos processos de transformação em regiões produtivas de madeira e que são ainda mais carentes de informações sobre as condições e os fatores que contribuem para melhoria do desempenho dos processos de produção em indústria de móveis como, por exemplo, a Amazônia onde é utilizada madeira maciça na confecção dos móveis. Como as análises são voltadas para os processos de usinagem e como neles são utilizadas madeiras de diferentes espécies, inclusive madeiras oriundas da floresta amazônica e que seguem, basicamente, os mesmos roteiros de fabricação independente da região onde a fábrica está localizada, será possível extrapolar a aplicação dos resultados da pesquisa para o uso de qualquer espécie alternativa de madeira e realizar a transferência desse conhecimento para melhorar a tecnologia de fabricação de móveis de madeira na Amazônia.

A pesquisa abordará apenas os processos de usinagem envolvidos na fase de beneficiamento final da madeira em indústrias do segmento de móveis residenciais e que disponham de registros históricos das variáveis a serem coletadas. Outras operações de corte envolvidas nas demais fases tais como abate, descascamento, desganhamento, seccionamento da tora, desdobro da tora em tábuas ou pranchas, laminação ou produção de partículas não serão abordadas nesta pesquisa.

No beneficiamento serão estudadas as capacidades das máquinas-ferramentas em produzir as peças e componentes de móveis de acordo com os padrões de qualidade e nas quantidades planejadas, observando os índices de falhas e rejeição dos produtos fabricados, ou seja, a eficiência nos processos de corte, furação, e fresamento de peças e componentes de móveis e as suas relações com as ferramentas, propriedades da madeira e condições de corte-peça.

Outros aspectos, também importantes, relacionados à certificação ambiental e ao *design* de móveis e propriedades das máquinas não serão abordados neste trabalho limitando-se apenas a breves considerações. O principal foco da pesquisa será a análise da eficiência dos processos de usinagem, o qual tem ligação direta com a qualidade e a produtividade.

1.8 Estrutura da tese

O trabalho se divide em 5 capítulos. No capítulo 1 são abordados aspectos relativos à contextualização e apresentação do problema de pesquisa, relevância, ineditismo, originalidade e contribuição científica do estudo e justificativa da pesquisa, bem como os resultados esperados,

seus avanços e contribuições para a atividade de planejamento de processo, seus desdobramentos para melhoria da atividade de projeto de produto e do planejamento do seu processo produtivo.

No capítulo 2 é apresentado um estado da arte sobre os assuntos envolvidos na pesquisa envolvendo as abordagens sobre o planejamento da estratégia produtiva, as variáveis envolvidas nessa atividade, seus métodos e ferramentas, os avanços até aqui alcançados, as especificações de máquina e ferramenta utilizadas, suas vantagens e desvantagens, dificuldades na implementação e limitações de aplicação na busca pela melhoria do desempenho do processo de transformação da madeira em móveis.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia para alcançar os objetivos propostos, um esboço do sistema de manufatura, estatísticas, métodos de coleta, armazenamento e análise dos dados. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos pela aplicação da metodologia, onde foi avaliada a eficácia do método em alcançar os objetivos propostos, suas virtudes e deficiências.

Finalmente no capítulo 5, são apresentadas as conclusões da pesquisa, como a síntese dos resultados e a adequação aos objetivos propostos e a confirmação ou negação das premissas do estudo, no capítulo 6 apresentadas recomendações para futuros trabalhos de pesquisa na área como forma de complementar os estudos aqui desenvolvidos.

1.9 Benefícios da pesquisa

O presente estudo traz vários benefícios para as atividades de planejamento e manufatura em indústrias de móveis de madeira, considerado fator fundamental para a melhoria da competitividade do setor. Entre os benefícios da pesquisa estão:

- A geração de informações necessárias para a melhoria dos processos de usinagem salientando as questões relacionadas com a manufatura de móveis de madeira a partir da análise do processo pelo qual o mesmo é produzido. Delimita as restrições da operação para auxiliar na definição das especificações do processo e na seleção de opções de projeto de ferramentas.
- A análise do desempenho das operações a partir de comparações com processos similares verificados no atual estado da tecnologia dos sistemas de fabricação e, a partir da definição das relações de causa e efeito entre as variáveis envolvidas na usinagem da madeira, propõe alterações que visam a melhoria do sistema. Avalia o impacto de mudanças. Identifica relações de dependência.
- Auxílio na identificação das operações que causam restrições de capacidade. Auxilia na tomada de decisão sobre o planejamento das políticas de capacidade e seus desdobramentos nos diversos aspectos de desempenho da manufatura.

- Orientação de estratégias que visem minimizar a probabilidade de ocorrência de falhas. Ajuda a eliminar, durante a fase de projeto, pontos de falhas potenciais na operação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Considerações ambientais e econômicas da industrialização da madeira.

A auto-sustentabilidade dos ecossistemas florestais está intimamente relacionada aos aspectos sócio-econômicos da utilização dos recursos naturais. Neste sentido, é necessário desenvolver indicadores que orientem o planejamento das atividades econômicas, visando reduzir as verdadeiras causas do desflorestamento. Um dos indicadores é a rentabilidade por área explorada, cabendo eleger-se atividades que gerem maior renda e causem menores impactos ao meio ambiente. Uma dessas atividades é a industrialização da madeira proveniente da exploração sob baixo impacto. Para que a atividade seja viável, é preciso conhecer, antes os fatores que contribuem mais intensamente para a eficiência do processo de transformação da madeira em produto semi-acabado ou acabado. Um desses fatores é a usinabilidade da madeira. Conhecendo-se melhor esta propriedade é possível melhorar os processos fabricação, otimizar os custos, aumentar a produtividade e a qualidade do produto, contribuindo, assim, para uma melhor rentabilidade da atividade.

Segundo BARBOSA *et al.* (1999) o sistema de produção em indústrias madeireiras está centrado no corte seletivo de poucas espécies ocasionando, com isso, um gradual empobrecimento da floresta e, talvez, a extinção de algumas espécies mais intensivamente exploradas.

No Brasil, o setor produtivo de madeiras e derivados enfrenta enormes dificuldades para tornar seus produtos competitivos. Problemas como parque tecnológico defasado, seletividade de espécies, mão-de-obra desqualificada e organização industrial precária contribuem para este quadro.

Neste aspecto, diversos estudos para melhorar a eficiência produtiva nas indústrias do setor têm sido desenvolvidos visando não somente reduzir a perda e o volume de resíduos gerados no beneficiamento, mas, também melhorar a gestão da empresa florestal a qual deve se empenhar em implementar uma estratégia para melhorar métodos e processos no sentido de agregar valor aos produtos e gerar produtos com padrão de qualidade e preços competitivos e simultaneamente, implementar iniciativas de controle da qualidade ambiental (ALMEIDA, 1998).

Como resultado dessas pesquisas foram identificadas espécies que necessitam de técnicas mais elaboradas para aumentar o rendimento e evitar falhas nas operações de aplainamento, fresamento, lixamento e furação (IBDF/LPF, 1981; SUDAM/IPT, 1981; INPA/CPFF, 1991; IWAKIRI, 1984, 1985 e 1990).

2.2 Características da indústria de móveis

2.2.1 Qualidade e produtividade na indústria madeireira

Num estudo sobre a competitividade da indústria brasileira desenvolvido por COUTINHO (1999) em convênio com o SEBRAE/FINEP/ABIMOVEL, foi constatado que a indústria de móveis de madeira apresenta deficiência competitiva devido a alguns fatores básicos: tecnologia defasada, excessiva verticalização, baixa cooperação entre as empresas, ausência de *design* próprio, estruturas empresariais acanhadas e mão-de-obra desqualificada.

Segundo a ABPM (1998) e NAUMANN (1998) este quadro pode ser alterado pela implementação de medidas como a especialização e reestruturação industrial na forma de *clusters*, modernização produtiva, melhorar a eficiência na extração e transformação da madeira, qualificação de mão-de-obra e políticas de incentivo à exportação. Da mesma forma, NAHUZ (1999) defende a utilização de tecnologia para adicionar componentes ou transformar a matéria-prima para obter um produto de alto desempenho e com melhor competitividade.

Para BONDUELLE (1997) a competitividade de empresas madeireiras está intimamente relacionada com a qualidade dos produtos e com a eficácia dos processos. Países desenvolvidos como Itália e Alemanha mantêm suas vantagens competitivas baseando-se no grau de modernização de suas máquinas e equipamentos, pois a indústria de máquinas para móveis nesses países é bem atualizada tecnologicamente. Esses países estão entre os líderes do comércio internacional de móveis e são caracterizados por sua organização industrial, com reduzida verticalização da produção, especialização das diversas etapas e tipos de produtos desenvolvidos, terceirização, subcontratação, padrão homogêneo e limitado número de modelos desenvolvidos por cada empresa.

ALMEIDA (1998) estudando a necessidade de mudanças de comportamento do setor perante a evolução do mercado consumidor citou que alavancou-se as pesquisas em silvicultura em detrimento do processo produtivo como forma de manter a competitividade pela alta produtividade biológica. Atualmente, há uma busca pelos ganhos de produtividade via qualidade de produtos e processos, visto que já estão quase esgotadas as possibilidades de manter a competitividade apenas com a vantagem da grande produtividade da matéria-prima, no caso a madeira.

2.2.2 Mercado de móveis de madeira: caracterização geral

Em 1999, o comércio mundial de móveis atingiu cerca de US\$ 60 bilhões (ABIMOVEL, 2002). O mercado consumidor de móveis concentra-se, basicamente, nos países desenvolvidos. Os países europeus somados com EUA, Canadá e Japão foram responsáveis por aproximadamente

85% das importações mundiais de móveis. O principal país importador de móveis é os EUA (21%), respondendo por 1/5 das importações mundiais, entretanto a principal região importadora é a Europa, que representa mais da metade das importações mundiais (52%).

Um ponto a ser destacado é a tendência de crescimento do comércio internacional de móveis, não apenas para produtos acabados, mas também para partes, peças e produtos semi-acabados. Assim como nas importações, as exportações também estão concentradas nos países desenvolvidos. A Europa participa com mais de 60% das exportações mundiais de móveis. Apenas a Itália, que exerce a liderança neste mercado, responde por 18%, sendo seguida por Alemanha (10%) e Dinamarca (5%). EUA e Canadá respondem por 14% das exportações mundiais. Apenas estes cinco países controlam quase metade das exportações mundiais de móveis.

Apesar de uma situação favorável em termos geográficos, de clima e de solo, o que se reflete numa alta produtividade de matéria-prima (madeira), uma estatística que reflete a falta de competitividade do Brasil no mercado internacional é o de que as Filipinas exportaram em 1998 US\$ 221 milhões em móveis de madeira para os EUA enquanto o Brasil participou com apenas US\$ 66,7 milhões (MALDONADO, 2001).

De acordo com levantamentos da ABPM (1998) a competitividade dos países exportadores de madeira e derivados no mercado norte americano está associada ao baixo custo da mão-de-obra (em torno de 7,5% do custo total). O trinômio valor-serviço-qualidade tem sido a exigência do mercado norte-americano de móveis de madeira. Com isso, o processo de produção exige velocidade de produção (redução do tempo de ciclo), qualidade (baixo índice de defeitos e alto padrão de acabamento), baixo custo (alta produtividade).

2.2.3 Principais Características do Segmento de Móveis de Madeira no Brasil

No Brasil, assim como em outros países, a indústria moveleira caracteriza-se pela organização em pólos regionais, sendo os principais os da grande São Paulo (SP), Bento Gonçalves (RS), São Bento do Sul (SC), Arapongas (PR), Ubá (MG), Votuporanga e Mirassol (SP).

O setor tem uma estrutura bastante fragmentada e conta com aproximadamente 13.500 empresas sendo que destas, cerca de 10.000 são microempresas (até 15 funcionários), 3000 são pequenas empresas (de 15 até 150 funcionários) e apenas 500 empresas são classificadas como de porte médio (acima de 150 funcionários). Na sua quase totalidade, são empresas familiares, de capital inteiramente nacional. Entretanto, nos últimos anos tem-se verificado a entrada de empresas estrangeiras no segmento de móveis de escritório, em geral via aquisição de fabricantes locais (LIMA, 1998).

A indústria moveleira de Santa Catarina está concentrada no Vale do Rio Negro, mais especificamente nos municípios de São Bento do Sul, Rio Negrinho e Campo Alegre. Este pólo moveleiro surgiu nos anos 50, da atividade dos imigrantes alemães, estando voltado inicialmente para produção de móveis coloniais de alto padrão. Nos anos 70, destacou-se na produção de móveis escolares e cadeiras de cinema. Atualmente, São Bento do Sul é o principal pólo exportador do país, respondendo por metade das vendas de móveis brasileiros no exterior (ABIMOVEL, 2002).

O pólo moveleiro de São Bento do Sul possui aproximadamente 170 empresas, com elevada participação de médias e grandes empresas. Estas empresas destinam cerca de 80% da produção para o mercado externo, composto quase exclusivamente por móveis residenciais.

Em contraste com os móveis retilíneos que são lisos, sem detalhes sofisticados de acabamento, com desenho simples de linhas retas, os móveis do segmento residencial apresentam muitos detalhes de acabamento, misturando formas retas e curvilíneas. O segmento de móveis residenciais pode ser dividido em dois subsegmentos, de acordo com as matérias-primas utilizadas: *a*) o de madeiras de lei, que é o mais defasado tecnologicamente, revelando um elevado grau de heterogeneidade tecnológica e cuja antiga vantagem competitiva representada pelas madeiras nativas parece ter perdido eficácia num mundo cada vez mais preocupado com questões ambientais (empresas que outrora exportavam atualmente destinam sua produção basicamente ao mercado interno); e *b*) o de madeiras de plantios florestais, que reúne a maior parte dos fabricantes de móveis torneados seriados, os quais destinam a maior parte de sua produção ao mercado externo (são empresas verticalizadas, que utilizam como principal matéria-prima a madeira de *pinus*).

2.2.4 Fatores de sucesso do produto

Segundo a ABIMOVEL (2002), em pesquisa sobre os fatores competitivos do setor de móveis, as empresas destacam, em primeiro lugar, o preço e depois a marca dos produtos como sendo os principais fatores que explicam o sucesso na comercialização. Em geral, as grandes empresas ressaltaram a marca de seus produtos, enquanto as pequena e média empresas (PME's) destacaram o preço, como fator competitivo mais importante. Portanto, a busca pela melhoria da eficiência produtiva, a qual tem efeito direto sobre os custos e a formação do preço, torna-se fator decisivo na busca pela competitividade. Além da melhoria dos processos de produção outro fator de competitividade destacado em todos os pólos moveleiros foi o *design* (apelo visual) dos produtos, representando em média 20% das indicações feitas pelos empresários.

2.2.4.1 A importância do design

[...] “*Design não é arte. Vai além. É uma síntese lógica, econômica, uso de materiais e estética. O que diferencia o design da arte é o fato do primeiro ter a responsabilidade de buscar o menor custo, melhor aproveitamento industrial e preocupar-se com a ecologia. Já a arte não. O artista não tem que estar preocupado com o mercado*”. [...]

A afirmação é de Paola Antonelli, curadora do Museu de Arte Moderna de Nova Iorque, citada por COUTINHO (1999), segundo a qual o termo “*design*” traduz a impressão inicial acerca de um produto quanto a sua forma, cor e textura. No entanto, a aparência física é o resultado de um processo amplo e envolve etapas de concepção do produto em função da facilidade de produção, manutenção e uso, apelo mercadológico, funcionalidade, competitividade e custo de produção e venda. No processo de produção, o *design* é uma atividade importante na estratégia empresarial, que visa fixar a marca do produto no mercado e estreitar o relacionamento entre empresa e consumidor.

O termo *design* surgiu da palavra latina *designium*, que significa intenção, plano, projeto. Segundo BONSIEPE (1983), CERQUEIRA (1994) e GUIMARÃES (1999) o *design* coordena aspectos relacionados a diversas áreas, como materiais, sistemas produtivos, tecnologia, mercado, cultura, e tem como objetivo a concepção e a materialização de um produto. Para os autores, o termo *design* representa mais do que anglicismo incorporado ao vernáculo da língua portuguesa, até mesmo pelas dificuldades de traduzir um termo que avance além dos conceitos de desenho industrial, gráfico ou criação.

Desse modo, o *design* constitui-se fator essencial para agregar valor e criar identidades visuais para produtos, serviços e empresas definindo, em última análise, a personalidade das empresas no mercado. Hoje é identificado como um elemento estratégico de diferenciação comercial das empresas, permitindo a “alavancagem” de vendas (ABIMOVEL, 2002).

TEIXEIRA *et al.* (2001) estudaram a relação entre a utilização dos materiais no *design* e a competitividade da indústria moveleira na região de Curitiba. Neste sentido os autores buscaram posicionar o *design* como estratégia competitiva, incorporando as estratégias competitivas desenvolvidas por PORTER (1986) que são liderança de custos, diferenciação e enfoque.

Segundo FERREIRA (1986) o *design* de móveis se ocupa do desenvolvimento de produtos que constituem a mobília no ambiente doméstico ou de trabalho. Para isso, muitos materiais foram utilizados ao longo dos tempos. Contudo, a madeira continua sendo o material mais utilizado na confecção de móveis.

TEIXEIRA *et al.* (2001) concluíram que os fatores que contribuem para a competitividade do segmento são a atualização dos equipamentos, a especialização produtiva, a estratégia de diferenciação e de *design* em detrimento do preço. Mas com relação ao uso de novos materiais, as empresas dependem de inovações tecnológicas oriundos de fontes externas.

A importância do *design* para a competitividade das empresas incentivou alguns países a desenvolverem ações governamentais, visando incentivar, promover e proteger a inovação. Para se conseguir produtos diferenciados, exclusivos e com preço competitivo é preciso contar com tecnologia adequada. As máquinas mais modernas contam com sistema de controle, definido a partir de uma programação que busca obter a melhor maneira de realizar certas tarefas. É a chamada "tecnologia inteligente", que funciona através de alimentação de dados, que pode ser feita através de um único computador, conectado em rede com a fábrica. O melhor é que tecnologias assim permitem a programação e controle para diferentes tarefas, podendo gerar produtos diferentes ao mesmo tempo. Com regulagem automática das máquinas o *lay-out* pode mudar a configuração de forma rápida e automática (MALDONADO, 2001).

No Brasil, ao lado do segmento de máquinas o de ferramentas também deve evoluir para acompanhar a tecnologia de fabricação utilizada nos países mais desenvolvidos no setor. Para isso, as ferramentas precisam ser flexíveis e possuir um elevado padrão de qualidade, as vezes feita sob medida para cada caso. Conscientes disso, os fabricantes deste segmento já estão criando sistemas modulares para a produção. A tendência é que no futuro uma única máquina possa produzir sozinha toda a peça. Neste sentido, já estão no mercado algumas ferramentas completas para produzir janelas. Elas economizam tempo, dispensando a parada para troca de ferramenta e ocupam menos espaço.

A evolução do *design* prevê, ainda, um crescimento na produção de máquinas com troca totalmente automáticas. As máquinas também tornam-se cada vez mais inteligentes. Hoje, o mercado já oferece algumas com *micro-chips* interno, no qual estão todas as informações sobre a ferramenta, que avisa quando sua vida já foi alcançada, quanto ainda resta, e a geometria, além de registrar quando foi a última afiação (MALDONADO, 2001).

O Brasil possui como grande vantagem competitiva no setor a grande produtividade das florestas plantadas, obtendo matéria-prima de baixo custo em relação aos concorrentes. Mas, somente a vantagem oriunda do baixo custo da matéria-prima não é suficiente para colocar o país numa posição mais competitiva no cenário internacional. Para isso, é necessário desenvolver outros aspectos como o *design* e melhorar o desempenho, a eficiência e a eficácia dos sistemas produtivos em toda a cadeia produtiva (COUTINHO, 1999).

2.3 Propriedades da madeira

O conhecimento das propriedades da madeira e de seu comportamento durante a usinagem é de fundamental importância para a sua correta utilização, assim como da melhor seleção de espécies e do bom dimensionamento de máquinas e ferramentas utilizadas na sua usinagem.

Vários estudos sobre a qualidade da madeira e suas propriedades têm sido desenvolvidos ao longo dos anos. Entre os mais importantes para os propósitos deste trabalho estão os de KOCH (1964), PANSIN & ZEEUW (1980), KOLLMANN; COTÊ (1984), TUSET e DURAN (1986).

A madeira é um produto do tecido xilemático dos vegetais superiores, localizados em geral no tronco e galhos das árvores, com células especializadas na sustentação e condução de seiva. O xilema é um tecido estruturalmente complexo composto por um conjunto de células com forma e função diferenciadas e é o principal tecido condutor de água nas plantas vasculares. Possui ainda as propriedades de ser condutor de sais minerais, armazenar substâncias e sustentar o vegetal SOUZA (1999).

Os principais tipos de células encontradas no xilema são fibras, elementos de vaso, raios, traqueídeos, parênquima axial e algumas estruturas especiais são características de determinadas espécies, gêneros ou famílias, como os canais resiníferos, canais secretores axiais, fibrotraqueídeos e outras. A Figura 7 ilustra a estrutura microscópica de uma madeira de folhosas, mostrando os principais elementos constituintes do lenho (KOLLMANN; COTÊ, 1984).

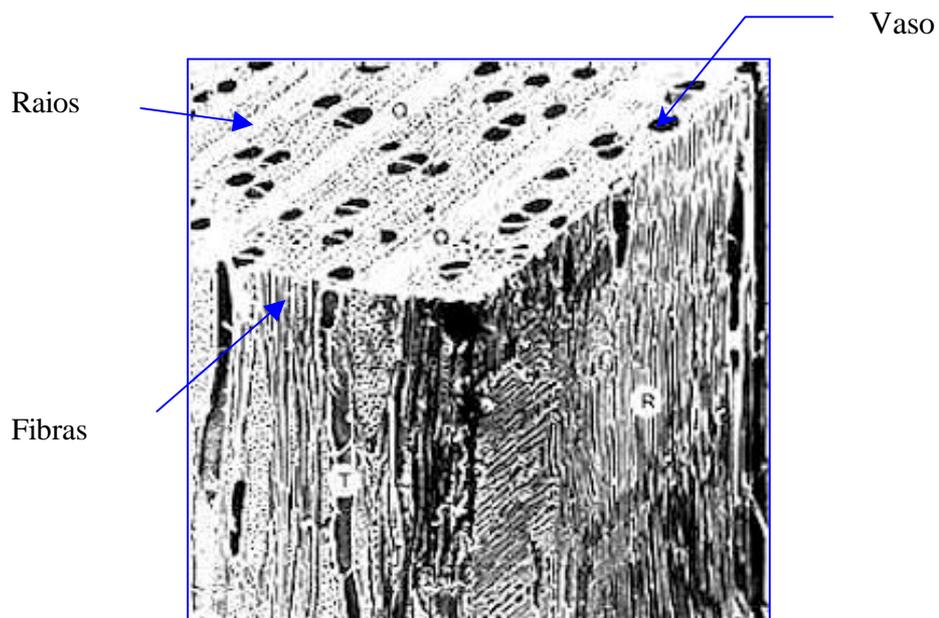


Figura 7 – Estrutura anatômica da madeira das angiospermas (*hardwoods*).
Fonte: IAWA – www.iawa.com¹

¹ IAWA – *International anatomist of wood association*

As propriedades mecânicas definem o comportamento da madeira quando submetida a esforços de natureza mecânica. Para sua classificação e definição da aptidão ao melhor uso industrial são determinadas a resistência à compressão axial (na direção paralela às fibras), à flexão estática, resistência a tração, cisalhamento nos sentidos paralelo e normal as fibras, compressão perpendicular às fibras, resistência à flexão dinâmica (impactos ou choques), elasticidade e, especialmente importante para a usinagem, a resistência a penetração localizada, ao desgaste e abrasão, é conhecida por dureza superficial (KOCH, 1964).

SILVA *et al.* (1999) afirmaram que o desenho dos móveis deve basear-se nas características técnicas da madeira utilizada e as dimensões de cada componente, por sua vez, devem estar adaptadas à resistência da madeira em questão e ao tipo de carga que o móvel deverá suportar em serviço. Ressaltam, ainda, a importância da massa específica e do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) na utilização da madeira para fabricação de móveis. Para madeiras utilizadas em componentes de móveis com elevado esforço, como peças de cadeiras, camas, mesas, estantes, bancos e sofás, os mesmos autores recomendaram um material que apresentasse valores próximos de 120.000 kgf/cm² de módulo de elasticidade e de 800 kgf/cm² de módulo de ruptura.

Outras características da madeira são capazes de serem percebidas pelos sentidos humanos tais como visão, olfato e tato e são conhecidas como propriedades organolépticas. Elas têm considerável influência sobre as características valorizadas na confecção de móveis. Entre elas estão a cor, o odor a resistência ao corte manual, peso específico, textura, direção das fibras (grã), figura e o brilho (KOLLMANN; COTÊ, 1984).

Do ponto de vista químico, o xilema é um tecido composto por vários polímeros orgânicos. A parede celular do xilema tem como estrutura básica a celulose que compõem cerca de 40-45% do peso seco da maioria das madeiras. Além da celulose está presente na madeira a hemicelulose, formada por muitas combinações de pentoses de açúcar (xylose e arabinose). O terceiro maior constituinte da madeira é a lignina, molécula polifenólica tridimensional, pertencente ao grupo dos fenilpropanos, de estrutura complexa e alto peso molecular. Confere à madeira a resistência característica a esforços mecânicos.

Outras substâncias químicas estão ainda presentes nas madeiras, como os extrativos (resinas, taninos, óleos, gomas, compostos aromáticos e sais de ácidos orgânicos).

Segundo SILVA (2002) a massa específica da madeira é o resultado de uma complexa combinação dos seus constituintes internos. É uma propriedade importante e fornece inúmeras informações sobre as características da madeira, devido a sua íntima relação com várias outras propriedades, tornando-se um parâmetro comumente utilizado para qualificar a madeira, nos diversos segmentos da atividade industrial.

Para PANSHIN & ZEEUW (1980), a massa específica pode variar entre gêneros, espécies do mesmo gênero, árvores da mesma espécie e, até mesmo, entre diferentes partes da mesma árvore. À medida que o peso específico aumenta, elevam-se proporcionalmente a resistência mecânica e a durabilidade e, em sentido contrário, diminuem a permeabilidade a soluções preservantes e a trabalhabilidade (usinabilidade).

SILVA *et al.* (1999) asseguraram que a massa específica é uma boa indicadora de qualidade da madeira, em função das várias correlações com outras propriedades tais como propriedades mecânicas e características anatômicas importantes para a definição da usinabilidade. Assim, a massa específica, quando analisada num ambiente de fábrica, representa o parâmetro mais prático para uma definição de usos e seleção da melhor solução de máquina ferramenta para a melhor usinagem.

O teor de umidade é uma propriedade física que tem grande influência na usinabilidade da madeira. A água na madeira pode estar presente preenchendo os espaços vazios dentro das células ou entre elas (água livre ou água de capilaridade), pode estar aderida à parede das células (água de adesão) ou pode estar compondo a estrutura química do próprio tecido (água de constituição). Esta última somente pode ser eliminada através da combustão do material. O ponto de saturação das fibras (PSF) é o teor de umidade no qual a madeira deixa de ter água livre e passa a ter somente água de adesão e água de constituição (KOLLMANN; COTÊ, 1984).

Alguns defeitos naturais presentes na madeira também têm influência sobre o desempenho dos processos de usinagem. Entre os principais defeitos da madeira para a sua utilização industrial estão a grã irregular, variações na largura dos anéis de crescimento, crescimento excêntrico, o lenho de reação, nós, tecidos de cicatrização, defeitos na forma do tronco, defeitos de secagem, defeitos de processamento e a influência de agentes físicos e bióticos.

Segundo LYPTUS (2002), da ARACRUZ PRODUTOS DE MADEIRA, os problemas decorrentes das variações de grã, cor, rachaduras superficiais, empenamentos leves e contrações podem ser corrigidos ou minimizados através de técnicas adequadas de processamento (desdobro e secagem), usinagem e acabamento.

2.4 Processo produtivo e tecnologia de fabricação de móveis

O padrão tecnológico da indústria brasileira de móveis é reconhecidamente muito heterogêneo, variando de pólo para pólo, e também de acordo com o porte das empresas.

Entretanto, antes da introdução do *design* próprio, é importante que as empresas avancem na capacidade de manufatura, de forma a conseguirem produtos de baixo custo, elevada qualidade e

flexibilidade produtiva. Para isso, é importante conhecer o comportamento dos processos de fresamento, corte e furação, que são considerados os principais processos de transformação da madeira em peças e/ou componentes de móveis e, também, é a atividade que agrega maior valor ao produto durante sua manufatura.

2.4.1 Processo de fresamento

Em seu livro sobre acabamento da madeira, GONÇALVES (2000) cita, entre as operações mais importantes, o fresamento periférico e o corte ortogonal. Os movimentos relativos entre peça e ferramenta, no caso do fresamento periférico, são classificados em fresamento discordante e concordante, classificação também adotada para usinagem de metais. Em todos os casos são importantes o conhecimento da velocidade de corte, da velocidade de avanço, do ângulo de direção efetiva e do ângulo de direção de avanço, além das grandezas de percurso.

O fresamento periférico, também chamado de aplainamento para processos de usinagem da madeira, envolve a remoção de cavaco em operação de desbaste ou acabamento da superfície. O conjunto do cabeçote, porta-ferramentas com lâminas de corte, mais suportes de fixação e quebra-cavacos é de uso universal em máquinas de beneficiamento de madeira nos processos de aplainamento e fresamento nas mais variadas formas (rasgos, rebaixos, chanfros, molduramento em perfis, etc). Vários estudos sobre o fresamento da madeira relacionam geometria e material da ferramenta, condições de corte e propriedades da madeira. Entre eles estão os trabalhos de KOCH (1964), KOLLMANN; COTÊ (1984) e GONÇALVES (2000).

O processo de fresamento é considerado, por vários autores de trabalhos sobre usinagem da madeira, a operação mais importante na confecção de peças e componentes de móveis de madeira. Entre eles estão as pesquisas de KOLLMANN; COTÊ (1984), BIANCHI (1996) e FARIAS (2000), sendo que o fresamento de perfil (perfilagem periférica e de topo), devido à diversidade de possibilidades de aplicações é considerado o mais importante no segmento moveleiro.

Segundo BIANCHI (1996), como o movimento da lâmina de corte em relação à peça apresenta as componentes de velocidade de giro da ferramenta e avanço da peça, a resultante é um ciclóide, em geral alongado, pois a velocidade tangencial da ferramenta é superior ao avanço da peça. Como no caso dos metais, a usinagem da madeira por fresamento pode ser concordante ou discordante. No primeiro caso, o acabamento final da peça é melhor e a potência de usinagem é maior, porém, o fresamento discordante continua sendo mais utilizado devido a menor periculosidade para o operador.

STEMMER (2001) no seu livro sobre usinagem de metais, chama a atenção para as características do processo de fresamento. Segundo o autor, comumente a peça efetua o movimento de avanço em baixa velocidade enquanto que a ferramenta gira a uma velocidade relativamente alta (da ordem de 10 a 150 m/s). Essa relação também é válida para madeira. (FARIAS, 2000). STEMMER (1995) classifica o fresamento em plano, circular, de forma de perfis e de geração. Em seu livro sobre ferramentas de corte, STEMMER (2001), mostra os métodos de fresamento empregados (periférica concordante e discordante e frontal), o grau de acabamento e suas relações com as condições de corte e geometria das ferramentas, os tipos de fresas suas formas geométricas, componentes e funções.

A tecnologia de fresamento em altas velocidades, devido sua grande produtividade, permite a produção de peças a custos menores e com padrões de acabamento comparáveis aos obtidos no processo de lixamento (FARIAS, 2000).

Para BIANCHI (1996) o fresamento de madeira, na linguagem da indústria madeireira, trata de uma operação de aplainamento lateral ou de topo. O fresamento apresentará características diferentes conforme a orientação das fibras da madeira em relação ao movimento da ferramenta.

Nas fresas para usinagem de madeira disponíveis no mercado, as lâminas de corte podem ser soldadas ou montadas sobre o corpo da ferramenta por meio de parafusos. Neste último caso, há maior facilidade para afiação das lâminas, porém, em contrapartida, há necessidade de um alinhamento preciso das lâminas quando da sua montagem sobre o corpo.

As operações de fresamento são realizadas utilizando fresas de perfil reto ou multiraios. Nas operações de fresamento de perfil, o desempenho das fresas depende, também, de algumas relações geométricas que têm influência na estabilidade e segurança da ferramenta. Para isso é importante conhecer as relações entre o diâmetro da fresa, a profundidade de corte e o diâmetro interno (diâmetro do eixo) para que a ferramenta opere sem problemas. No desenvolvimento do projeto da fresa a determinação do diâmetro externo é feita em função da profundidade de corte e do diâmetro do eixo. As empresas fabricantes de ferramentas adotam o Quadro 1 como referência, para dimensionar estes valores:

Quadro 1 – Relação entre profundidade de corte e diâmetros do eixo e da fresa.

	Profundidade de corte (a_p) (mm)								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Furo	Diâmetro da fresa (mm)								
30 mm	105	118	128	140	150	160	170	180	190
40 mm	120	132	142	153	165	175	185	195	205
50 mm	130	144	156	168	180	190	200	210	220

Em ferramentas para moldurar é necessário indicar a dimensão do furo para fixação da fresa no eixo árvore e o diâmetro da fresa. BIANCHI (1996) também observou que estas propriedades geométricas têm estreita relação com a estabilidade e a qualidade dos processos de fresamento.

Segundo GONÇALVES (2000) as fresas cilíndricas mais comumente utilizadas na usinagem da madeira são as fresas para ranhuras, fresas retas para rebaixos, fresas de chanfro, fresas de perfil, fresas para almofada, para emenda conjugadas ou de corpo único, fresas de perfil côncavo ou convexo e fresas para chanfrar ou arredondar cantos vivos, fresas para encaixes de caixilhos, para guarnição de esquadrias, de perfil e contra-perfil de molduras, entre outras, todas feitas de aço rápido ou metal duro.

Para que as velocidades de corte sejam elevadas, as fresas de aço média-liga, aço-rápido e metal duro apresentam diâmetros entre 100 e 180 mm, porém, com o desenvolvimento de máquinas de alta velocidade (na usinagem de madeiras valores acima de 100 m/s) e das ferramentas de CBN (nitreto de boro cúbico) e PKD (diamante policristalino), já é possível utilizar fresas com diâmetros inferiores a 80 mm, mais econômicas e de balanceamento dinâmico mais fácil. O número usual de gumes cortantes fica entre 2 e 8, havendo maior tendência ao uso de 2 ou 4 gumes (BIANCHI, 1996).

2.4.2 Processos de corte com serras circulares

Os processo de corte são realizados, principalmente, por serras circulares. As serras circulares apresentam uma grande variedade de diâmetros, espessuras, número de dentes e formatos dos dentes. Em regra geral, quanto maior o diâmetro do disco, maior sua espessura. São considerados discos finos aqueles que apresentam a espessura igual ou menor que o diâmetro dividido por 200 (GONÇALVES, 2000).

Quanto ao tipo, as serras podem ser classificadas em de dentes fixos e dentes postiços. As serras de dentes fixos são geralmente confeccionadas em aço carbono através do processo de estampagem, que define o formato dos dentes, os quais são posteriormente travados e afiados.

Quanto às serras de dentes postiços, vários modelos são fabricados para aplicações especiais, no entanto os mais comuns são os dentes com ponta de metal duro, conhecidos também como, ponta de carboneto de tungstênio, pastilhas de carboneto ou carboneto e pastilhas de *widia*.

Nas serras de dentes com metal duro, as pastilhas são soldadas em rebaixos preparados na superfície frontal dos dentes da lâmina e posteriormente afiados. O processo de fixação mais comum é a soldagem por indução com adição de lâmina de prata.

GONÇALVES (2000) apresenta alguns parâmetros de corte comumente empregados para serras de dentes fixos em aço carbono e serras de dentes soldados em carboneto de tungstênio. A velocidade de corte para aplicação geral em corte longitudinal de madeiras moles varia de 47 a 50 m/s. Para madeiras duras de 35 a 45 m/s.

O número de dentes é afetado pelo tipo de trabalho, acabamento ou desbaste, altura dos dentes, espécie de madeira, tipo de cavaco produzido, potência de corte necessária, velocidade de corte e velocidade de avanço.

O corte de madeira “verde” requer menor número de dentes do que para o corte de madeira seca em corte de acabamento. O corte transversal também requer um número de dentes maior que para o corte longitudinal. Para serras de corte longitudinal é recomendado o uso de discos com 32 a 42 dentes e para serras destopadeiras de pêndulo, de 60 a 78 dentes. Quanto mais moles e “verde” a madeira, menor o número de dentes. Para madeira de dicotiledôneas de média e alta massa específica e seca são utilizadas serras com 42 dentes.

A altura dos dentes depende do passo entre eles, a fim de garantir uma boa rigidez. Para isso, é recomendado manter a relação altura/ passo entre 0,35 e 0,50. Quanto à potência requerida, esta aumenta à medida que aumenta o número de dentes para o mesmo diâmetro de disco.

A velocidade de avanço, assim como outros parâmetros, também são afetados por fatores como tipo de madeira, teor de umidade, potência disponível e altura de corte.

GONÇALVES e RUFFINO (1989) estudando os processos e parâmetros de corte no serramento de madeiras, concluíram que, para discos de serras com dentes travados, velocidade de avanço entre 10 e 20 m/min, passos inferiores a 50 mm e cortes longitudinais de madeiras secas, há um decréscimo do número de dentes conforme cresce a altura de corte para diferentes diâmetros de disco. GONÇALVES (2000) apresenta diferentes perfis de dentes de serras de aço carbono (Figura 8) e são classificados como a seguir:

- a) Recomendado para corte longitudinal de desdobro, de refilamento e de resserra;
- b) Utilizado para corte transversal, em serramento de destopo;
- c) Utilizado em corte de até 35 mm de altura em corte longitudinal de acabamento e madeira seca;
- d) Utilizado em cortes longitudinais e transversais de acabamento fino;
- e) Com limitador de avanço de peças com elevada espessura, empregado em máquinas de avanço automático.

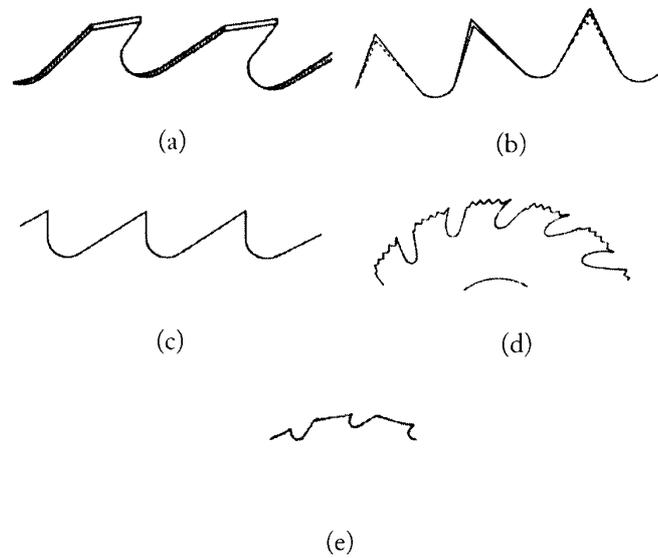


Figura 8 - Perfis para serras circulares (TUSET e DURAN, 1986)

A geometria do gume cortante dos dentes das serras também depende do tipo de madeira, teor de umidade, direção das fibras em relação à direção de corte e potência de corte. Para madeiras moles, geralmente são empregados ângulos de saída elevados. Para madeiras duras é necessário usar valores menores, os quais tendem a elevar a potência de corte. GONÇALVES (2000) afirma que, geralmente quanto maior o ângulo de saída, menor o esforço de corte necessário, porém, menor rigidez do gume e pior a qualidade da superfície da peça usinada.

GONÇALVES (2000) apresenta uma relação de valores recomendados para ângulos de saída e de folga das ferramentas em função do tipo de trabalho e de madeira empregadas (Quadro 2).

Quadro 2 – Ângulos de saída recomendados em função do tipo de madeira e de corte

Corte longitudinal	Madeira verde de baixa massa específica	Dentes travados	$\gamma = 15^\circ$ a 25°
		Dentes recalçados	$\gamma = 20^\circ$ a 25°
	Madeira seca, média e alta massa específica		$\gamma = 15^\circ$ a 20°
Corte transversal	Madeira verde de baixa massa específica		$\gamma = 15^\circ$
	Madeira seca, média e alta massa específica		$\gamma = 10^\circ$
	Destopamento pendular		$\gamma = 5^\circ$ a -5°

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2000).

Os ângulos de incidência recomendados são mostrados no Quadro 3:

Quadro 3 – Ângulos de incidência recomendados em função do tipo de corte e de madeira.

Corte longitudinal	Seccionamento e desdobro de madeiras moles	$\alpha = 20^\circ$
	Acabamento	$\alpha = 10^\circ$
	Serramento em geral de madeiras de média à alta massa específica	$\alpha = 15^\circ$
Corte transversal	Dentes de perfil a	$\alpha = 15^\circ$ a 18°
	Dentes de perfil b	$\alpha = 60^\circ$
	Dentes de perfil c	$\alpha = 45^\circ$

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2000).

2.4.3 Processo de Furação

No processo de furação da madeira são utilizadas brocas chatas e helicoidais. A furação é uma operação de desbaste, mas geralmente no caso de usinagens de madeira, não são necessárias operações subseqüentes para dar acabamento ou melhorar a precisão do furo.

Segundo STEMMER (1995) na furação são levados em consideração fatores como o diâmetro do furo, profundidade, tolerâncias de forma e de medidas, volume de produção. As operações de furação se realizam sempre sob condições relativamente severas. A velocidade de corte não é uniforme e varia desde zero no centro do furo até um máximo na periferia.

As brocas helicoidais são as mais utilizadas. Elas são formadas por canais helicoidais com dois gumes principais um gume transversal, guias e nervuras e haste. A Figura 9 mostra as principais propriedades geométricas de um broca helicoidal.

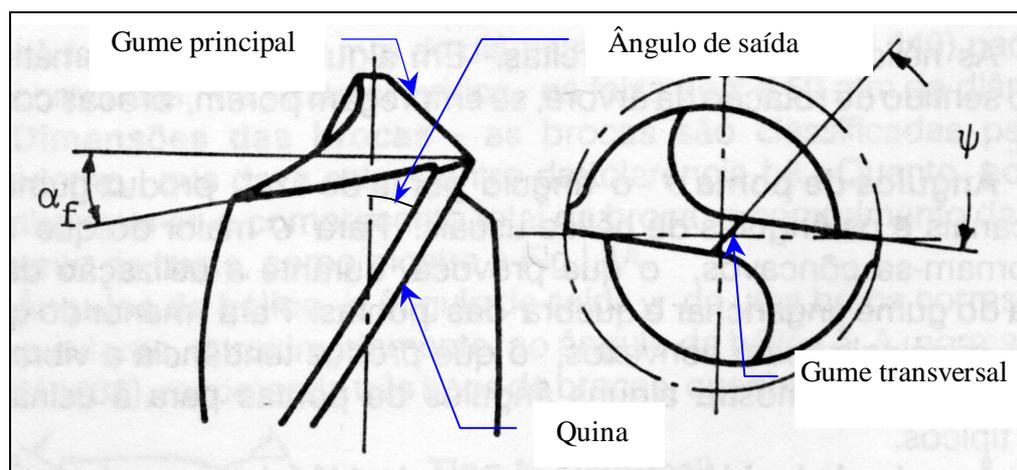


Figura 9 – Broca helicoidal: ângulo de incidência (α_f), ângulo de saída (γ) e ângulo do gume transversal (ψ). (STEMMER, 2001).

Entre os fatores que afetam o desempenho da ferramenta durante a usinagem estão os ângulos de hélice (ângulo de saída), de ponta e de incidência. Outros fatores como diâmetro e material da

ferramenta, tipo de afiação e as condições de trabalho (diâmetro do furo, profundidade, locação do furo, velocidade de corte, avanços e forças e momentos de corte) também têm papel decisivo na otimização da usinagem por furação.

Vários exemplos de condições de trabalho para brocas helicoidais são mostrados por STEMMER (1995) onde estas são determinadas para diferentes materiais usinados. Na furação de madeiras, a operação pode ser dividida em furação cilíndrica e furação de rasgos. Para furação cilíndrica são utilizados equipamentos como furadeiras vertical simples, horizontal simples e múltipla. Para furação de rasgos são utilizadas máquinas como furadeira oscilante, furadeira de corrente e furadeira alternativa.

Os parâmetros fundamentais da geometria da broca helicoidal são mostrados na Figura 10, onde d é o diâmetro do encabadouro, L o comprimento do encabadouro, D o diâmetro da broca, L_T o comprimento total, L_U o comprimento de corte e L_p comprimento da ponta.

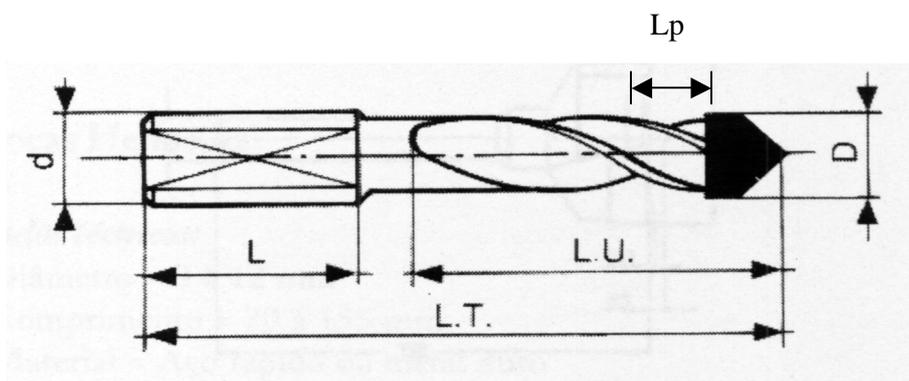


Figura 10 - Parâmetros fundamentais da geometria de broca. (STEMMER, 1995).

Para melhoria dos processos de fresamento e furação é fundamental a compreensão de variáveis de entrada do processo de transformação tais como as condições de corte nas quais as ferramentas irão atuar sobre a peça, a geometria e os materiais das ferramentas utilizados no processamento da madeira, as propriedades e a usinabilidade da madeira e suas interações com as características das ferramentas e as condições de corte e os resultados obtidos a partir dessas interações tais como qualidade da peça usinada e a produtividade destes processos.

2.5 Fatores relevantes para melhoria da usinagem da madeira.

Dependendo das características da ferramenta vários resultados são afetados, tais como vida da ferramenta, produtividade e qualidade da peça usinada. Essas características são, basicamente, a geometria e o material da ferramenta. Além disso, irão influir decisivamente as condições de corte para cada espécie de madeira.

No entanto, há carência de informações sobre os mecanismos de desgastes envolvidos nas diferentes combinações ferramenta-peça. A geração dessas informações facilitará a produção de ferramentas mais adequadas a cada necessidade, ou seja, orientam o desenvolvimento de parâmetros ótimos no desenvolvimento e uso de cada ferramenta para usinagem de determinadas espécies de madeira.

2.5.1 Geometria da ferramenta

Segundo STEMMER (2001) estudos desenvolvidos por diversos institutos de pesquisa sobre as relações entre as variáveis que influem na definição da geometria das ferramentas levaram a conclusão de que os conceitos e definições são aplicáveis a todos os processos de usinagem e as correlações entre essas variáveis são válidas para todos os processos e todo tipo de máquina-ferramenta utilizada.

Neste conceito genérico há uma definição das várias variáveis entre elas o ângulo entre a direção de avanço (φ), movimento resultante, direção resultante de corte e ângulo de direção resultante de corte (η).

Os ângulos, formados pelos elementos da geometria da parte ativa (cortante) da ferramenta, são definidos a partir de um sistema de referência a um ponto qualquer no gume chamado sistema de ferramenta na mão. A Figura 11 mostra os principais componentes de uma ferramenta necessários à definição das propriedades geométricas.

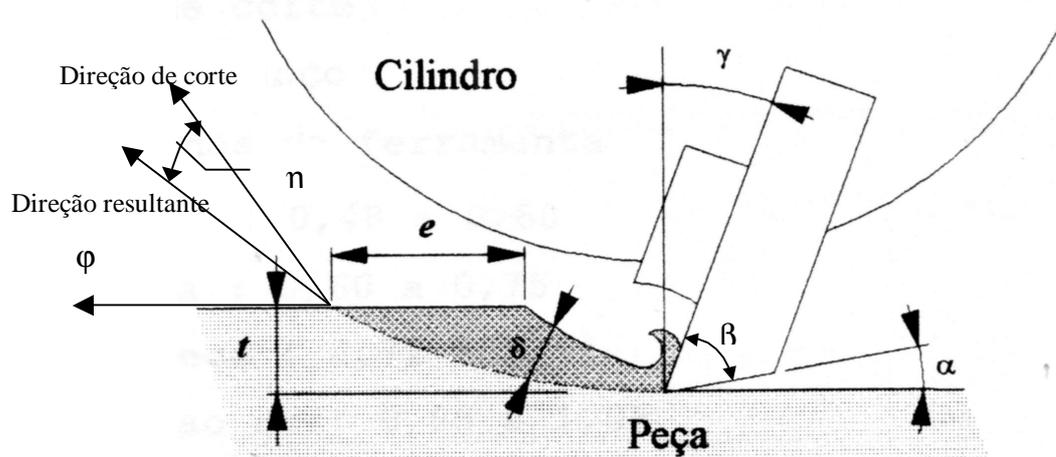


Figura 11 – Elementos geométricos do gume da ferramenta. (BIANCHI, 1996).

Para STEMMER (2001) os principais ângulos para definição da geometria da ferramenta são o ângulo de direção do gume (κ_r), o ângulo de direção do gume secundário (κ'_r), ângulo de quina

(ε_r), ângulo de direção complementar do gume (ψ_r), ângulo de inclinação do gume (λ_s), ângulo de saída (γ), ângulos de cunha (β) e ângulo de incidência da ferramenta (α).

Da mesma forma, KIVIMAA (1952), McKENZIE (1962), KOCH (1964), KOLLMANN; COTÊ (1984), FARIAS (2000), ressaltam que a geometria das ferramentas possui uma grande influência sobre o acabamento da superfície da peça usinada e sobre a vida da ferramenta. Por isso, a importância em desenvolver estudos com a finalidade de otimizar estas características. Para esses autores, entre outros, os ângulos de saída (γ), de cunha (β) e de incidência (α) possuem grande influência sobre o resultado do processo. Para definição desses valores, é necessário conhecer as relações com os materiais da ferramenta e da peça. A seleção do material implicará na capacidade de carga que o gume poderá suportar durante a solicitação no material da peça. A força passiva é diretamente influenciada pelo ângulo de inclinação do gume principal, que pode, por exemplo, implicar na força de compressão sobre uma superfície numa operação de fresamento periférico. Além disso, uma leve inclinação do gume causa um aumento na força de corte (GONÇALVES, 2000).

O ângulo de saída do cavaco (γ_n) é um dos ângulos mais importantes da ferramenta e influi decisivamente na força e na potência necessárias ao corte, na qualidade do acabamento da superfície e no calor gerado pelo processo de usinagem. O ângulo de saída do cavaco depende, da resistência do material da ferramenta, da resistência e dureza do material a usinar, da quantidade de calor gerada no corte e da velocidade de avanço. Para materiais com maior resistência e dureza será necessário adotar um ângulo de saída menor do que para materiais mais macios e menos resistentes evitando, contudo, a utilização de um ângulo em que a cunha penetre demasiadamente e enganche no material. Também para maiores velocidades de avanço são exigidos maiores ângulos de saída. Quanto maior o avanço, tanto maior pode ser o ângulo de saída. Os valores recomendados para os ângulos de saída podem ser obtidos para diferentes combinações de material a ser usinado - material da ferramenta, em diferentes condições de corte (STEMMER, 2001).

O ângulo de incidência (α) também é importante. Quando o valor deste ângulo é muito pequeno, o gume não pode penetrar no material de forma adequada e a ferramenta cega rapidamente, ocorre forte atrito, super aquecimento da ferramenta e mau acabamento da superfície. Quando o ângulo é muito grande o gume quebra ou solta pequenas lascas facilmente, aumentando a ocorrência de falhas devido a um apoio deficiente. A definição da melhor solução com relação ao ângulo de incidência principal depende das propriedades do material da ferramenta e da peça a ser usinada. Ferramentas fabricadas com material de alta resistência, isto é, tenacidade, podem utilizar ângulos de incidências grandes, sem perigo de quebra. Para a usinagem de peças de materiais

moles, é permitido, também, o uso de ângulos maiores do que na usinagem de peças de materiais duros (STEMMER, 2001).

Um dos critérios de definição da vida da ferramenta utiliza a medição do desgaste sobre o flanco principal. A vida da ferramenta é definida pela medição da altura de desgaste. À medida que esta altura cresce provoca um aumento progressivo do atrito e, com isso, maior aquecimento, aumento da força e potência de corte, mau acabamento da superfície. Por isso, quando é atingida uma determinada medida do desgaste, é necessário remover a ferramenta e reafiá-la. Ferramentas com ângulos de incidência menor apresentam desgaste admissível menor do que em ferramentas com ângulos de incidência maior. Porém, se o ângulo é excessivo, a ferramenta lasca ou quebra mais facilmente de modo que um excesso de ângulo de incidência é mais prejudicial. O ângulo de incidência secundário (α'_n) tem a mesma função que o ângulo de incidência principal e é afetado da mesma forma. Apenas como detalhe, no processo de torneamento, o ângulo de incidência secundário também é afetado pela montagem da ferramenta acima ou abaixo do centro da peça a ser usinada ou inclinado no porta-ferramenta em relação à peça (FERRARESI, 1970).

2.5.1.1 Influência da geometria da ferramenta sobre as forças de corte

A força que atua entre as ferramentas e a peça durante o processo de usinagem é uma força espacial, e pode ser considerada como uma resultante de suas componentes geométricas (decomposição vetorial) e físicas (devido a ações físicas específicas em certas direções de atrito, empuxo, cisalhamento, etc). Na realidade a força total de usinagem é decorrente da ação de várias forças que agem nas diversas áreas de contato entre a peça e a ferramenta. Isto dificulta a análise das correlações entre as várias componentes físicas da força total de usinagem. Considerando um caso particular de usinagem ortogonal em que um disco estreito é cortado por uma ferramenta de sangrar, mais larga que o disco e admitindo que a parte ativa do gume é reta e afiada sem gume posticho, o ângulo de direção do gume é 90° e o ângulo de inclinação λ_s igual a 0° , o cavaco seja contínuo, que não há forças atuantes sobre o flanco da ferramenta e que não ocorre deformação lateral do material, é possível analisar as correlações entre as componentes da força total de usinagem.

Na prática, são conhecidos ou mensuráveis o ângulo de saída, as componentes da força de usinagem atuantes sobre a ferramenta (força de corte e força de avanço), a espessura do cavaco, a velocidade de corte, ângulo de incidência, estado de afiação do gume, direção das fibras em relação ao corte, as características anatômicas da espécie, massa específica e teor de umidade da madeira (KIVIMAA, 1952; MCKENZIE, 1962; KOCH, 1964; GONÇALVES e RUFFINO, 1989).

No presente estudo a análise das forças e potência de corte e suas relações com as propriedades da madeira, condições de corte e geometria da ferramenta não será realizada, uma vez que não faz parte dos objetivos da pesquisa. Porém, muitos estudos nessa área foram desenvolvidos ao longo dos anos, os quais citam relações importantes para a melhoria do desempenho dos processos de fresamento, corte e furação. Entre eles estão os desenvolvidos por KIVIMAA (1952), KOCH (1964), DOI e YOKOYAMA (1977), GONÇALVES (2000), SZYMANI *et al.* (2001), CASTRO e GONÇALVES (2001) e LEMASTER *et al.* (2001).

BIANCHI (1996), FARIAS (2000) e STEMMER (2001), também relacionam velocidade de corte e forças de corte. Segundo FARIAS (2000), para a madeira, as velocidades de corte variam entre:

- a) 40 a 100 m/s para a operação de serramento;
- b) 40 a 90 m/s para o fresamento de madeira maciça;
- c) 30 a 80 m/s para o fresamento de chapas de aglomerado.

Ferramentas e máquinas para indústria de móveis produzidos na Itália e Alemanha já operam com velocidade de corte de até 100 m/s (6.000 m/minuto) e com os materiais de ferramenta de corte disponíveis no mercado seria possível trabalhar com velocidades de cortes de até 200 m/s (FISCHER, 1997).

2.5.2 Grandezas de avanço, de penetração e de usinagem.

A grandeza de avanço (f) é a relação da dimensão do movimento, expressa em mm, por rotação ou curso, medido no plano de trabalho (STEMMER, 2001). O avanço por dente f_z é o percurso de avanço por dente ou gume, medido no plano de trabalho. A Figura 12 mostra as variáveis relacionadas às condições de corte importantes para o controle dos processos de usinagem. O avanço por dente é, por conseguinte, a distância entre duas superfícies de corte consecutivas, medida na direção de avanço, assim:

$$f_z = f/z,$$

onde z é o número de dentes ou gumes.

O avanço de corte f_c é a distância entre duas superfícies de corte consecutivas, medida no plano de trabalho e perpendicular a direção de corte:

$$f_c = f_z \cdot \sin \varphi$$

Quando $\varphi = 90^\circ$, como no caso do torneamento e aplainamento, $f_c = f_z = f$.

O avanço efetivo f_e é a distância entre duas superfícies de corte consecutivas, medida no plano de trabalho e perpendicular a direção efetiva:

$$f_e = f_z \cdot \sin(\varphi - \eta)$$

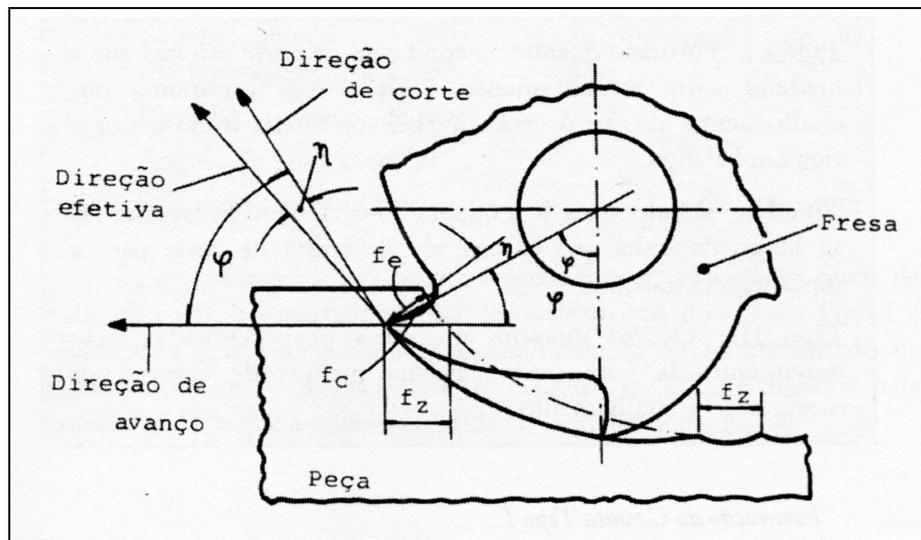


Figura 12 – Avanço da ferramenta sobre a peça. (GONÇALVES, 2000).

Outra grandeza importante é a penetração da ferramenta. Ela pode ser medida no plano de trabalho. A penetração pode ser passiva, de trabalho e de avanço. A penetração passiva a_p é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No fresamento e retificação frontal corresponde à profundidade de corte. No fresamento periférico corresponde à largura de corte. Na furação corresponde à metade do diâmetro da broca.

A penetração de trabalho (a_e) é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço (Figura 13). A penetração é importante nas operações de fresamento e retificação.

A penetração de avanço (a_f) é a grandeza de penetração da ferramenta, medida na direção de avanço.

A grandeza de penetração pode também ser medida em relação a um gume isolado. Neste caso recebe o índice S. No caso da penetração do gume ser idêntica à da ferramenta este índice pode ser obtido.

A penetração de trabalho do gume (a_{se}) é a quantidade que o gume penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular a direção de avanço. A penetração de avanço do gume (a_{sf}) é a quantidade que o gume penetra na peça, medida na direção de avanço.

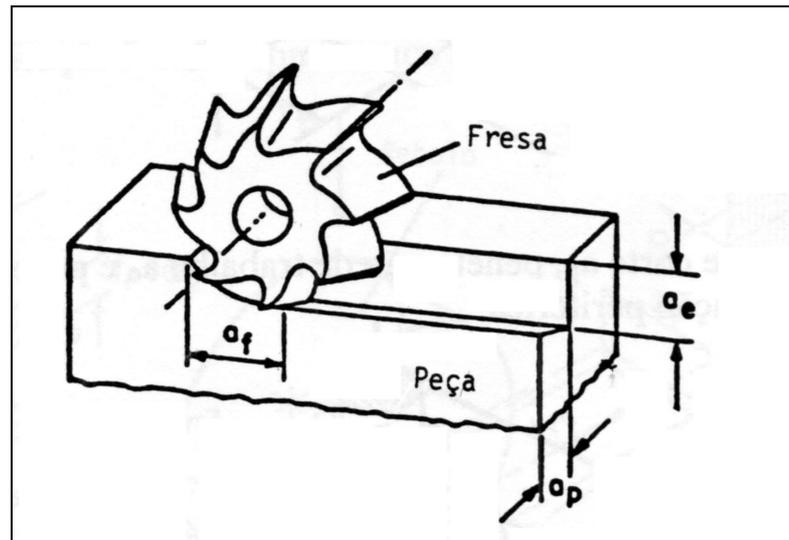


Figura 13 – Esquema ilustrando a penetração de trabalho e profundidade de corte. (STEMMER, 1995).

Para STEMMER (2001) a dimensão do corte é o fator preponderante na força e na potência necessária à usinagem. Segundo o autor, a pressão específica de corte diminui com as dimensões do cavaco, sendo que esta diminuição é mais acentuada para um aumento do avanço do que para um aumento da profundidade de corte. Esta relação é ilustrada na Figura 14.

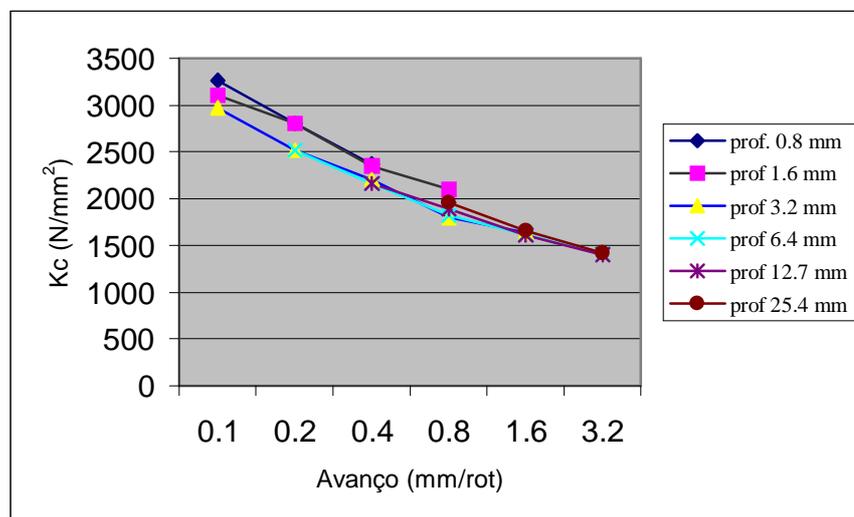


Figura 14 – Pressão específica de corte para usinagem de aço ABNT1020 ($\gamma = 17^\circ$). (Baseado em STEMMER, 2001).

Devido à pequena influência da profundidade de corte na pressão específica, foi sugerida pela norma alemã uma tabela onde aparecem apenas o tipo de material e o avanço como variáveis para determinação dos valores de K_c .

Quando a penetração da ferramenta é referente ao eixo da ferramenta ela pode ser, no caso de ferramentas rotativas (ex. brocas), medidas em relação aos eixos de rotação da ferramenta. É o caso das penetrações axial (a_a), radial (a_r) e tangencial (a_t).

Segundo STEMMER (2001) as grandezas de usinagem descrevem as dimensões da camada de material a ser removido da peça. Elas são obtidas a partir do perfil do gume ativo, das grandezas de penetração e dos avanços.

Segundo GONÇALVES (2000) no corte ortogonal a espessura de corte corresponde à espessura do cavaco não deformado. KOCH (1964), além de outros pesquisadores, observou que numa dada situação de corte, alterando-se a espessura do cavaco, são geradas dois tipos de curvas de forças paralelas. Uma para cavacos de pequenas dimensões e outra para maiores espessuras de cavaco, com a curva apresentando uma forma aproximada de função linear de “h”. Dados experimentais obtidos por MACKENZIE (1964) e DOI e YOKOYAMA (1977) conduziram a essas mesmas conclusões.

2.5.3 Materiais das ferramentas de corte

Segundo STEMMER (2001) e BOEHS (1988) citado por FARIAS (2000) as ferramentas de corte necessitam possuir uma série de propriedades para atender às diferentes solicitações a que estão sujeitas. No caso da usinagem da madeira, são de particular interesse a resistência à abrasão, a tenacidade, a rigidez e a estabilidade química devido à possibilidade de oxidação da ferramenta. Mas, segundo os mesmos autores, no atual estado da tecnologia, nenhum dos materiais disponíveis no mercado cumpre todos esses requisitos simultaneamente, tornando-se necessário, portanto, uma solução de compromisso quando da seleção do material de uma ferramenta para uma determinada operação de usinagem. Para isso, é necessário identificar as exigências primordiais e quais as secundárias, de modo a escolher o material mais adequado a cada caso. No caso da usinagem da madeira, para cada tipo de operação existirão diferentes solicitações em diferentes graus de importância.

Para a operação de fresamento, por exemplo, as interrupções de corte no processo significam solicitações dinâmicas alternantes para a ferramenta, que eventualmente podem levar a formação de fissuras devido à fadiga e que podem levar a quebra do gume. Por isso, os materiais da ferramenta para fresamento, devem ter alta resistência do gume, resistência à abrasão, uma tenacidade elevada resistência interna de ligação e um comportamento de desgaste reproduzível (FARIAS, 2000). BONDUELLE (2001) cita, ainda, a necessidade de uma boa resiliência para resistir aos choques particularmente repetitivos durante a usinagem (resistência à fadiga) e uma estrutura metálica

suficiente para não se lascarem devido às inclusões, naturais ou não, encontradas na madeira ou seus derivados (resistência à abrasão).

Os materiais de corte, segundo STEMMER (2001), podem ser agrupados em aços ferramenta, aços rápidos comuns, aços rápidos com cobalto, ligas fundidas, carbonetos sinterizados, cerâmicas, diamantes, nitreto de boro cristalino. Destes, as cerâmicas prestam-se muito pouco para a usinagem de madeiras e de seus compostos, pois são comparativamente frágeis, e a sua vantagem principal na usinagem de metais, a sua relativa resistência térmica, não se faz necessária na usinagem da madeira. As ferramentas à base de nitreto de boro cúbico (CBN) apresentam aproximadamente o mesmo preço de ferramentas de diamante policristalino, mas devido à instabilidade química quando em presença de vapor d'água, não são empregadas na usinagem de madeiras. Por isso, para a usinagem da madeira, os materiais empregados se restringem a ferramentas de aços rápidos (HSS), de metal duro e as ferramentas de diamante policristalino (PKD) (BIANCHI, 1996; FARIAS, 2000; BONDUELLE, 2001).

A seleção do material tem influência na produtividade e na qualidade da usinagem da madeira, uma vez que o material da ferramenta permite a definição das propriedades geométricas da ferramenta, sua vida e as condições de corte onde a ferramenta irá operar (FARIAS, 2000).

2.6 Usinabilidade dos materiais

Os diversos materiais apresentam diferentes graus de usinabilidade. Dentre os problemas que ocorrem devido ao grau de dificuldade na usinagem dos materiais estão o desgaste rápido da ferramenta, o superaquecimento, o lascamento do gume, mau acabamento da peça, necessidades de grandes forças de corte (FARIAS, 2000).

Muitos fatores podem influir na usinabilidade entre eles estão variáveis dependentes da máquina, variáveis dependentes da ferramenta, variáveis dependentes da peça e variáveis dependentes do processo.

Para avaliar o grau de usinabilidade de um material são utilizadas, com frequência, a vida da ferramenta, que corresponde ao tempo de usinagem decorrido entre duas afiações sucessivas, as forças que atuam sobre a ferramenta e a potência consumida pela máquina, qualidade do acabamento da superfície obtida pela usinagem (STEMMER, 2001). Estes critérios também influem decisivamente no custo do trabalho de usinagem realizado na fabricação de uma determinada peça.

A força e potência de usinagem determinam as dimensões máximas de corte e, portanto, o volume de material removido por hora-máquina. Os valores obtidos para cada critério dependem

das combinações de material da peça, da ferramenta e das condições de corte. A importância destes valores é tanto maior quanto mais exata forem indicadas as variáveis peça-máquina-ferramenta-processo sob as quais os dados foram obtidos (FARIAS, 2000).

A vida da ferramenta depende da ocorrência de falhas e do desgaste na ferramenta de corte durante o processo de usinagem. A falha pode ocorrer pela quebra e lascamento do gume e os desgastes são o desgaste no flanco, formando uma marca de desgaste e o desgaste na face sob a forma de uma cratera. Para evitar lascamentos recomenda-se utilizar ângulos de incidência e de saída adequados, empregar material da ferramenta adequado para cada operação e para cada material da peça, utilizar condições de corte adequadas a cada processo (SILVA, 1994; STEMMER, 2001).

A marca de desgaste, que é um dos modos de medir a vida da ferramenta, é a faixa desgastada no flanco da ferramenta. A largura da marca de desgaste é que exprime o grau de desgaste.

Para aumentar a vida das ferramentas é importante identificar as causas do desgaste. Na usinagem de madeiras praticamente somente a abrasão e a solitação mecânica são os fatores que contribuem para o desgaste da ferramenta (FARIAS, 2000).

Para a determinação das grandezas de influência no desgaste da ferramenta são decisivos as combinações entre o material da ferramenta e da peça com suas respectivas características específicas, tais como dureza do material da ferramenta de corte, massa específica e teor de sílica e inclusões minerais na peça. Além disso, o desgaste da ferramenta aumenta com a elevação da velocidade de corte e de avanço, bem como da profundidade de corte.

A fixação do ponto representativos do fim de vida de uma ferramenta é fundamental no estudo da usinabilidade. São utilizados na prática, diversos critérios para determinar este ponto, dependendo a escolha, em grande parte, das exigências da usinagem (precisão e grau de acabamento) e do material da ferramenta.

Na prática fabril, existem métodos de especificação da vida de uma ferramenta de corte entre duas afiações sucessivas. Para isso são utilizados os tempos de máquina, tempo efetivos de corte, volume de material removido e número de peças usinadas.

Segundo BONDUELLE (2001) o único critério para o cliente final é a qualidade das superfícies das peças usinadas. Na indústria madeireira, a substituição da ferramenta de corte (fresa, broca, serra circular) ocorre quando a mesma já não consegue apresentar a qualidade mínima determinada, em geral de maneira subjetiva, pela indústria. Sabe-se que, quanto maior o tempo de utilização de uma ferramenta sem afiar, melhor, pois menor será o número de afiações e, portanto, maior será a sua vida. Entretanto, existe um limite, pois uma ferramenta com um desgaste excessivo irá requerer uma maior perda do material de corte na afiação. O critério usado nas indústrias brasileiras para

determinar a troca da ferramenta de corte geralmente é a quantidade em metros lineares de madeira usinada ou, ainda pior, o número de horas de usinagem.

Para evitar enganos de interpretações quanto à definição do fim de vida da ferramenta, BONDUELLE (2001) sugere dois critérios a serem cuidadosamente respeitados para otimizar o trio “usinagem, qualidade e custo”. O primeiro critério, diretamente ligado à qualidade, é relativamente bem conhecido da profissão madeireira, mas pouco aplicado. Existem duas razões fundamentais para isso. A primeira é por falta de conhecimento dos valores a serem utilizados e a segunda é a impossibilidade de aplicar esses valores nas máquinas antigas. O segundo critério, ligado à vida da ferramenta, não é conhecido, mas é fundamental para otimizar o compromisso da “qualidade da superfície usinada versus o desgaste do gume”.

No fresamento, por exemplo, o critério ligado à qualidade de usinagem está fortemente relacionado com o avanço por dente, o qual irá determinar o estado da superfície, quanto menor o avanço melhor será o acabamento. Porém, maior será o desgaste da ferramenta. Sempre existe essa correlação entre qualidade da superfície e desgaste dos gumes.

Para BONDUELLE (2001) um avanço por dente recomendado para operações de aplainamento ou fresamento deve estar entre $1 \text{ mm} < f_z < 1,8 \text{ mm}$. Esse intervalo corresponde ao melhor compromisso “qualidade/desgaste”. Fica claro que o valor de 1 mm gera um acabamento melhor do que o valor 1,8 mm.

Para se garantir que o avanço por dente calculado seja igual ao passo das marcas realmente mensuráveis na superfície da madeira, deve ser desconsiderado o número de dentes para a maioria dos equipamentos disponíveis no mercado brasileiro. Isso quer dizer, ao contrário do que é praticado na indústria, que não adianta aumentar o número de dentes para melhorar, de maneira sensível, a qualidade da superfície usinada.

BONDUELLE (2001) mostrou também que para os processos de corte de acabamento e de precisão com serra circular, os valores recomendados do avanço por dente devem estar entre $0,05 \text{ mm} < f_z < 0,10 \text{ mm}$, para corte transversal (destopamento) e $0,08 \text{ mm} < f_z < 0,25 \text{ mm}$, para corte longitudinal (refilamento). Sob este mesmo princípio, baseado na qualidade da superfície, os valores recomendados para o avanço por dente (f_z) para as operações de fresamento frontal (tipo centro de usinagem), devem estar entre $0,10 \text{ mm} < f_z < 0,20 \text{ mm}$. Da mesma maneira que para as operações de aplainamento e fresamento, esses intervalos correspondem às melhores correlações entre a qualidade e o desgaste, observando-se que não são valores normativos.

O critério ligado à vida da ferramenta é baseado na distância percorrida por esta dentro da madeira, até o limite do desgaste admissível da ferramenta antes que este afete a qualidade da superfície usinada. Este critério é o que vai determinar o tempo de vida da ferramenta e permitir a

otimização do custo. Diferentemente da forma tradicional de comparação, que considera apenas o comprimento linear usinado, neste critério outros fatores são considerados, o que garante a medição do efetivo trabalho de cada dente (distância percorrida dentro a peça).

2.6.1 Desgaste da ferramenta durante a usinagem da madeira

Segundo FARIAS (2000) durante a usinagem de madeiras a cunha é submetida a um desgaste que depende da forma de solicitação e da duração de utilização da ferramenta. A forma de desgaste mais freqüente na ferramenta no processo de fresamento é o deslocamento do gume em relação à face, por isso, é o critério mais utilizado para determinar a vida da ferramenta. A Figura 15 ilustra o deslocamento do gume em relação à face à medida que aumenta o desgaste.

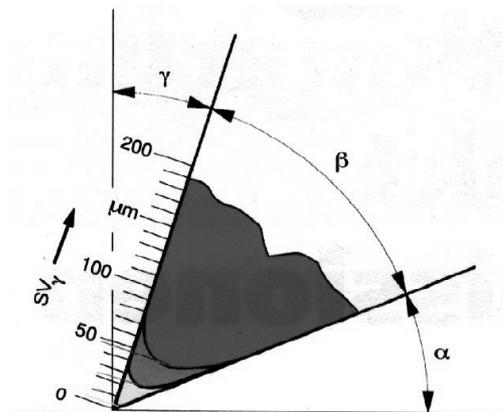


Figura 15 – Deslocamento do gume em relação à face devido ao desgaste. (BONDUELLE, 2001).

Para BONDUELLE (2001) em função da distância percorrida na usinagem, o desgaste do gume, caracterizado pela grandeza $SV\gamma$, apresenta-se em três etapas distintas, conforme mostra a Figura 16. A etapa A corresponde ao arredondamento do gume logo após alguns metros de usinagem pelo fenômeno de abrasão devido ao atrito na face. A etapa C é a etapa principal, onde o desgaste é relativamente estável devido, quase que exclusivamente à abrasão, pode ser considerado constante no caso de um gume diamantado. Na etapa D o desgaste aumenta de maneira exponencial com a distância percorrida durante a usinagem por causa dos fenômenos combinados de fadiga, abrasão e eventualmente, de corrosão.

Para manter a qualidade da superfície é imperativo parar a usinagem antes de alcançar a etapa D. A fim de otimizar o custo de usinagem é necessário conhecer com precisão, para cada condição de corte, este limite entre as etapas C e D. Um desgaste excessivo irá requerer uma perda

exponencial do material de corte na afiação e, conseqüentemente, da vida da ferramenta. Ao contrário, uma parada antecipada durante a etapa C limitará a distância de usinagem potencial e reduzirá também, mas em menor proporção, a vida da ferramenta.

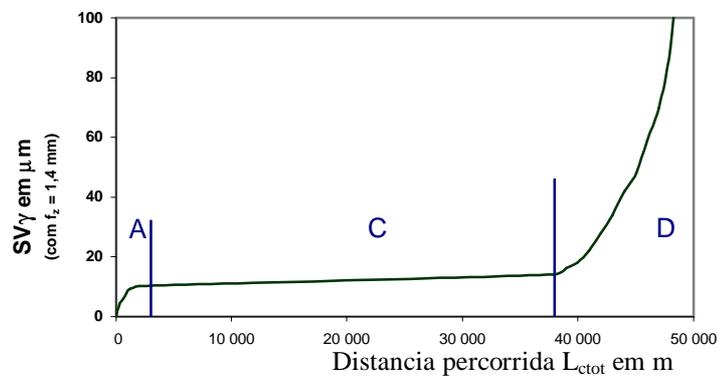


Figura 16 – Etapas do desgaste do gume em função da distância percorrida (BONDUELLE, 2001).

Para BONDUELLE, (2001) a vida das ferramentas, para uma dada velocidade de corte, é influenciada, também, pela profundidade e largura de corte. A influência da qualidade do gume tem ação sobre os desgastes que ocorrem na ferramenta.

O mesmo autor afirma que o material da ferramenta também tem grande influência na determinação da velocidade admissível de corte. Os valores da velocidade de corte admissíveis dependem do tipo de material da peça usinada e de cada ferramenta utilizada no processamento e são obtidos experimentalmente para cada combinação peça-ferramenta.

A vida da ferramenta é mais longa quando é realizado um corte contínuo. Numa operação de corte interrompido há um impacto da ferramenta o que causa uma maior probabilidade de falha da ferramenta nessas condições. A situação é em geral mais severa se os ângulos da ferramenta e as condições de início de corte determinam um impacto do gume afiado ou na quina da ferramenta.

Outra condição que influi na determinação da vida da ferramenta é a variação das condições de corte no processo de fresamento. O corte intermitente (não contínuo) explica uma menor vida da ferramenta neste tipo de usinagem. O desgaste da ferramenta, decorrente da ação abrasiva do material da peça pode ser atribuído, na usinagem de madeiras, às inclusões e pontos duros presentes na microestrutura da madeira. São partículas muito duras, com grau de dureza semelhante aos cristais de sílica e provocam um rápido desgaste da ferramenta de corte. Existe uma correlação, ainda não muito bem definida, entre a dureza da madeira e a vida da ferramenta, observando-se a tendência de uma maior dureza do material da peça determinar um maior desgaste na ferramenta.

Para completar o entendimento da otimização da usinagem, a Figura 17 representa o comportamento do desgaste do gume (SVg) com a variação do avanço por dente. Na zona I, o desgaste é realizado por atrito e compressão do gume sobre a madeira sendo cortada com perda de dureza por aquecimento excessivo. Na zona II não há muito atrito nem choques e ação abrasiva, por isso abrasão há uma diminuição do desgaste até um de f_z valor próximo a 1,5, a partir do qual o desgaste volta a crescer. Na zona III, desta vez, o desgaste é provocado principalmente pelos choques e esforços importantes ocasionando um desgaste abrasivo. Para cada tipo de máquina e ferramenta, esta curva deve ser conhecida a fim de otimizar a qualidade e, conseqüentemente, o custo de usinagem.

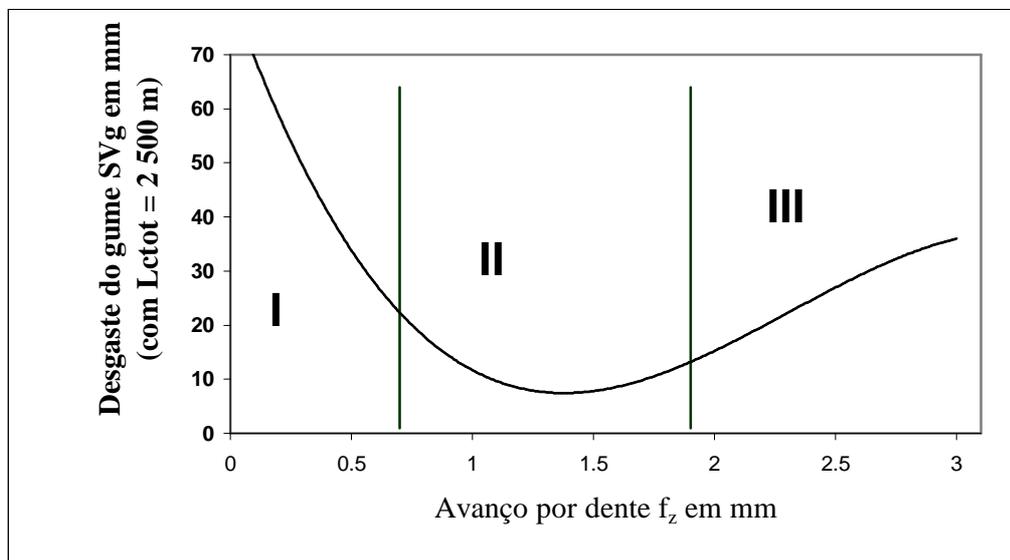


Figura 17 - Otimização do avanço por dente (f_z). (BONDUELLE, 2001).

2.7 Influência das propriedades da madeira na usinagem

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 dos gumes de corte das ferramentas em relação às dimensões das fibras. As fibras apresentam dimensões, geralmente, menores que os raios dos gumes das ferramentas utilizadas na usinagem, principalmente quando são utilizados materiais que não permitem a confecção de gumes muito “vivos”. 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. Em geral a presença de sílica (cristais de óxido de silício) confere certa resistência à madeira, mas possui efeito negativo quanto ao desgaste das ferramentas de corte.

Madeiras com grã irregular apresentam superfície áspera nas regiões nas quais a ferramenta corta em sentido contrário à direção normal dos tecidos.

A presença de substâncias especiais tais como canais celulares, resinas e células oleíferas, presentes em certas espécies, dificulta as operações de desdobro e de beneficiamento por processos de fresamento, corte e furação quando são danosas à saúde ou aderem as ferramentas.

Na usinagem de compostos de madeira, o principal mecanismo de desgaste é a abrasão. Segundo Gottlob, citado por FARIAS (2000), existem poucos trabalhos sobre a relação da vida da ferramenta com os mecanismos de desgastes envolvidos, sobretudo para as várias combinações ferramenta-peça-máquina-ferramenta. Entre os estudos desenvolvidos para correlacionar as propriedades da madeira e os mecanismos de desgastes das ferramentas de corte estão os desenvolvidos por KIVIMAA (1952), McKENZIE (1964) e CHARDIN (1977) que citam, sobretudo, a influência do teor de sílica na madeira como fator preponderante para a vida da ferramenta.

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. KIVIMAA (1952) determinou uma considerável influência do sentido de corte sobre as forças de usinagem. Inicialmente, definiu o corte ortogonal como sendo a situação onde o gume 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. McKENZIE (1964) 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 o gume 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 18), 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 trabalho de serra-fita é um típico

90-90 (direção tangencial – corte perpendicular às fibras). O corte 0-90 ocorre na direção radial – corte perpendicular às fibras.

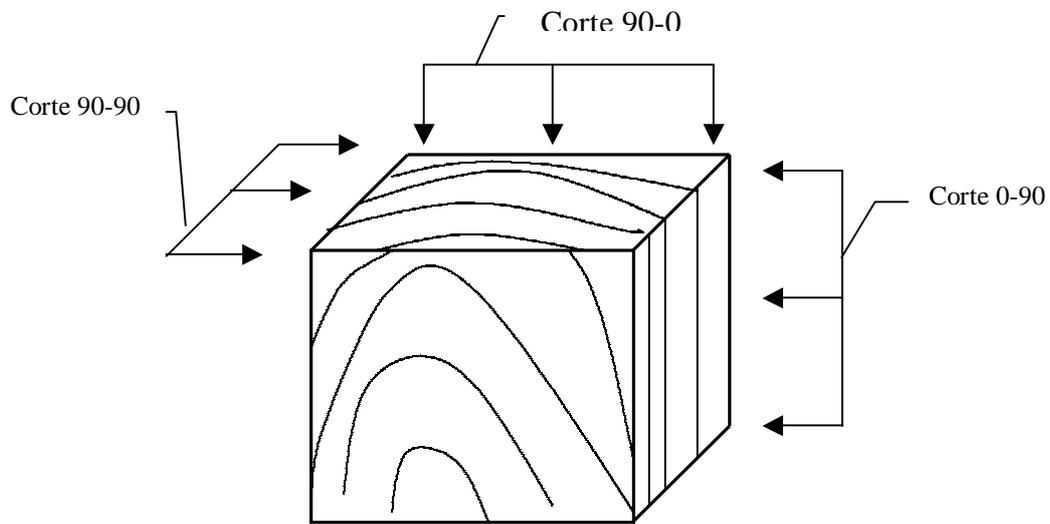


Figura 18 – Sistemas de corte na seção transversal da madeira (Baseado em KOCH, 1964).

Segundo KIVIMAA citado por FARIAS (2000), as maiores forças de usinagem aparecem no sentido radial, as menores no sentido transversal.

Alguns trabalhos sobre usinagem da madeira relacionam, também, as condições de corte sobre a vida da ferramenta para várias espécies de madeiras, entre eles estão os desenvolvidos por KIVIMAA (1952), TUSET (1986) e GONÇALVES (2000). Em todos os casos foi observado que à medida que aumenta a velocidade de corte diminui a vida da ferramenta, mas de forma não linear e com taxas diferentes para as diferentes espécies.

DOI e YOKOYAMA (1977) apresentaram uma outra forma de classificação, combinando a direção de corte com a direção de penetração do gume em função dos sentidos do crescimento radial e axial da madeira.

O fresamento periférico, também chamado de aplainamento para processos de usinagem da madeira, envolve a remoção de cavaco em operação de desbaste ou acabamento. Vários estudos sobre o fresamento da madeira relacionam geometria e material da ferramenta, condições de corte e propriedades da madeira.

A determinação da força e potência de corte também é outro fator importante para a otimização das condições de corte. Para isso, é comum utilizar a pressão específica de corte para diferentes espécies de madeira, conhecendo-se as características geométricas da ferramenta, principalmente o ângulo de saída (γ), a constante específica do material ($K_{c1.1}$) e o coeficiente adimensional ($1-mc$) da equação de Kienzle (FARIAS, 2000).

Outro fator importante para a compreensão da usinabilidade da madeira e suas propriedades é o efeito da direção das fibras em relação ao corte. Muitas pesquisas sobre forças de usinagem levaram à conclusão de que no corte ortogonal, a direção 90-0 combinada com a direção ($Z \pm, \theta$) do método sugerido por KIVIMAA (1952), minimiza o efeito dos anéis de crescimento e variações na massa específica. KIVIMAA (1952) concluiu, por exemplo, que para remover um cavaco com 0,1 mm de espessura precisava de 8,6% a mais de força paralela usando uma outra orientação quando comparado com a orientação sugerida acima (direção de corte axial e direção de penetração tangencial). Outra pesquisa sobre o efeito da direção das fibras em relação ao corte foi feita por AMEMIYA citada por GONÇALVES (2000). Nessa pesquisa, os autores concluíram que as componentes de força paralela e normal variam com o ângulo da fibra em relação à direção de corte. A força de corte paralela aumenta com o ângulo das fibras quando este aumenta de 0° para 90° e de 180° para 270° e decresce quando o ângulo das fibras aumenta de 90° para 180° e de 270° a 360° . O valor absoluto da força normal foi máximo para valores de ângulo de 45° , 135° , 225° e 315° e mínimo para 90° e 180° .

A massa específica é a propriedade física mais representativa da qualidade da madeira. Para representar as forças de corte envolvidas na usinagem da madeira não é diferente. Na ausência de qualquer informação empírica a respeito das forças envolvidas numa dada condição de usinagem para uma determinada espécie, pode-se fazer uma aproximação, comparando-se às informações sobre duas outras espécies de massa específica conhecida através de uma proporcionalidade linear de forças e massa específica. Entretanto, este procedimento seria uma primeira aproximação, 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 (KOLLMANN; COTÊ, 1984).

Em vista das grandes variações nas propriedades físicas entre as espécies, não é surpresa que algumas espécies não sigam a relação baseada na massa específica. Entre os fatores que causam essas diferenças estão a presença de sílica ou outros depósitos de minerais abrasivos nas células, teor de resina, porosidade, dimensões das fibras, orientação da grã e a presença de nós, os quais, segundo diversos autores como KOCH (1964), KOLLMANN; COTÊ (1984), PANSHIN & ZEEUW (1980), LUCAS FILHO (1997) e SILVA (2002), tem grande influência na qualidade da superfície e na eficiência dos processos de transformação da madeira.

Entre as diversas relações tentando representar a variação das forças de corte com a massa específica da madeira estão as realizadas por KIVIMAA (1952) e KOCH (1964). Nelas a influência da massa específica sobre as forças de corte é algo, ainda, obscuro e sem clara definição, apresentando uma grande dispersão dos dados em torno da curva que representa a relação.

Outra relação importante é a influência do teor de umidade da madeira. Segundo KOCH (1964) e KOLLMANN; COTÊ (1984) geralmente as forças de corte para o corte ortogonal na direção 90-0, permanece aproximadamente constante na madeira seca até 8% de umidade, e então cai para aproximadamente $\frac{1}{4}$ ou metade desse valor quando o teor de umidade na madeira se aproxima do ponto de saturação das fibras.

KOCH (1964) apresenta alguns resultados da influência do teor de umidade, considerando determinados ângulos de saída, espessura de cavaco e espécies de madeira. Neles, basicamente, as forças de corte diminuem quando o teor de umidade é aumentado, ou seja, uma relação inversamente proporcional.

Segundo LUCAS FILHO (1997) esse efeito pode ser justificado pela adsorção de água na parede celular, aumentando os espaços intermicelares e reduzindo a resistência mecânica da madeira quando é aumentando o teor de umidade. De modo inverso, quando a madeira é seca a teores de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), há uma redução dos espaços sub-microscópicos entre as microfibrilas formadoras da parede celular, aumentando a rigidez da mesma e com isso, aumentando a resistência mecânica de modo exponencial.

No entanto, na prática da usinagem da madeira para fabricação de móveis, o teor de umidade é geralmente fixo, pois há necessidade do controle dimensional das peças durante o processo de fabricação devido à anisotropia dimensional da madeira que ocorre juntamente com o processo de perda ou ganho de umidade. Por isso, dificilmente, a madeira é usinada com teores de umidade diferentes da umidade de equilíbrio. A madeira é previamente seca e acondicionada antes da sua usinagem. Portanto, o efeito do teor de umidade não é tão relevante, pois o mesmo pouco varia durante o processo de usinagem de peças ou componentes de móveis de madeira (LUCAS FILHO, 1997).

Por fim, alguns estudos relacionam o efeito da temperatura da madeira sobre a sua usinabilidade. Segundo GONÇALVES (2000) existe limitada informação experimental a respeito da influência da temperatura. KOCH (1964) relata que é provável que existam fortes interações entre temperatura da peça, teor de umidade, ângulo de saída e espessura de cavaco, o que limita a verificação experimental isolada deste fator.

2.8 Relação entre qualidade da superfície e as condições de usinagem.

Os estudos da rugosidade da superfície como uma propriedade dos materiais iniciaram antes de 1939 e foram aplicados inicialmente à indústria metal mecânica, enquanto os estudos sobre a rugosidade da madeira seguiram-se após 1950 (STRUMBO, 1963). HANN (1957) citou a

necessidade de um controle de qualidade para indicar a rugosidade de superfícies de madeiras usinadas e que mostrasse conformidade aos padrões prescritos, assim como nos metais.

Comparada a materiais homogêneos, a madeira é anisotrópica e possui sua especificidade devido sua constituição anatômica. Durante os processos de usinagem, as células da madeira são cortadas pelas ferramentas, as quais abrem as cavidades dos diferentes tipos de células constituintes do tecido lenhoso. O tamanho dessas cavidades depende da espécie, do tipo de lenho (tardio ou inicial) e direção do corte (radial, transversal ou tangencial). Irregularidades causadas pela anatomia da madeira são independentes do tipo da usinagem (Figura 19).

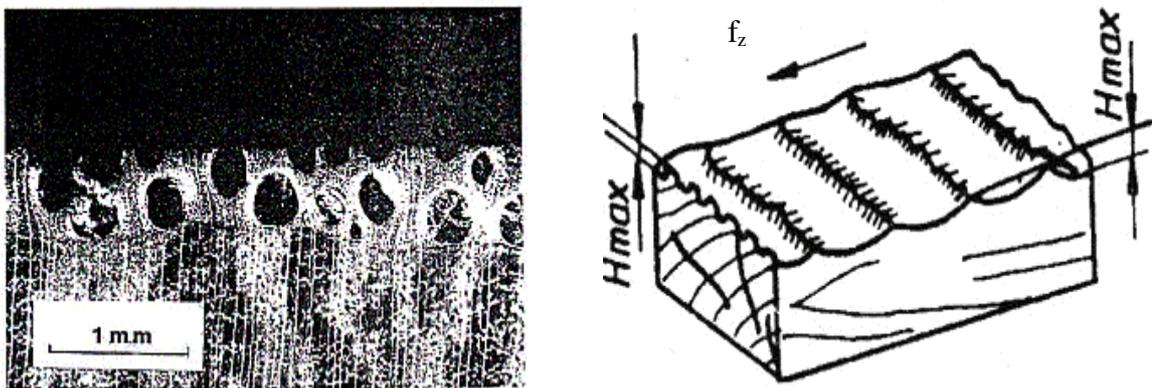


Figura 19 - Características da topografia da madeira. Irregularidades anatômicas e rugosidade devida ao processo de usinagem. (GURAU *et al.*, 2001).

No entanto, o progresso que foi obtido na usinagem de metais não foi o mesmo na usinagem da madeira. Embora alguns padrões tenham sido definidos para materiais homogêneos, eles não seriam aplicáveis à madeira e, até então, nenhum parâmetro foi desenvolvido para avaliar a qualidade das superfícies de madeira usinada (FUNCK *et al.*, 1992; KRISH E CSIHA, 1999). Entre as pesquisas dedicadas a avaliação da qualidade das superfícies de madeiras usinadas podem ser citadas as de PETERS E CUMMING (1970), BONAC, (1975; 1979), MARCHAL (1983), LAVERY *et al.* (1995), LUNDBERG e PORANKIEWICZ (1995), HIZIROGLU (1996), LEMASTER (1982; 1996; 1997; 1999), KRISCH e CSIHA (1999) FUJIWARA *et al.* (1999), MAGROSS e SITKEI (1999) e GURAU (2001). Este último desenvolveu um estudo da rugosidade de superfícies de madeiras, visando melhorar o entendimento de como as variáveis do processo influenciam na rugosidade utilizando um método preciso e aplicável ao monitoramento do processo e que removeu os valores subjetivos da intervenção humana.

Na sua pesquisa GURAU (2001) desenvolveu um método que quantificava de modo preciso a “topografia” de uma área com o intuito de avaliar a qualidade da superfície da peça de madeira usinada. Esse método incluía um modelo analítico de processamento de dados tal que a rugosidade

devida ao processo pudesse ser diferenciada da rugosidade devido à anatomia da madeira. Com isso, foi possível estabelecer correlações entre as variáveis de processo (avanço, espécies de madeira, vida da ferramenta e direção de corte) e os valores de rugosidade devido ao processo de usinagem. A compreensão destas variáveis de processo permitiu a otimização das operações de usinagem. Esta otimização pode levar a futuros estudos sobre a adequação dos processos à diferentes espécies de madeira de acordo com as mudanças nas condições de usinagem.

Para determinar os parâmetros de rugosidade foram utilizadas a varredura por apalpador (método com contato) e a triangulação por *Laser* (sem contato). O “escaneamento” com apalpador revelou marcas regulares de usinagem e forneceu informações mais detalhadas sobre a topografia da madeira, mas demorou mais que o escaneamento com laser (Figura 20).

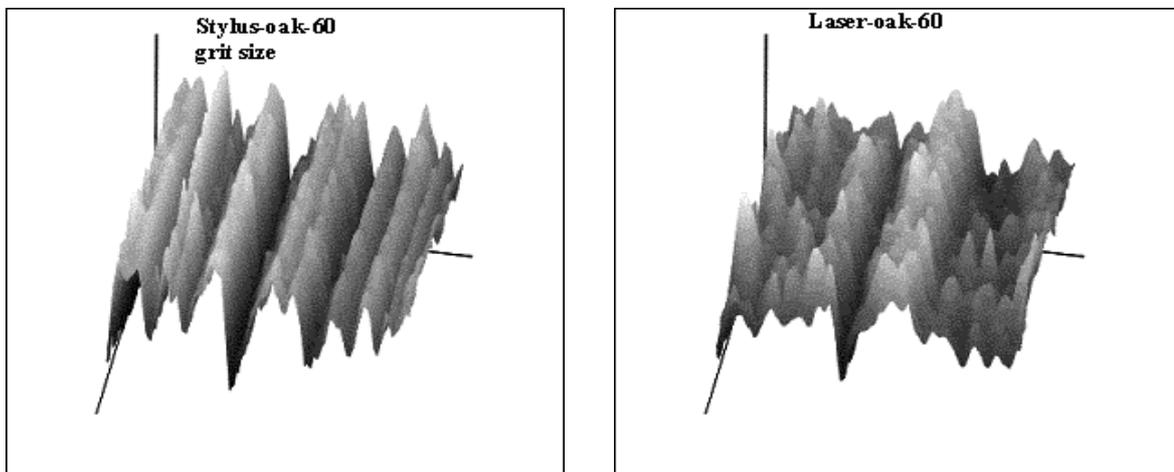


Figura 20 - Comparação entre o escaneamento com apalpador e a triangulação com laser. (GURAU *et al.*, 2001).

Alguns estudos preliminares nos parâmetros dos perfis e áreas obtidas no escaneamento mostraram que este último parâmetro é mais importante para avaliar a qualidade da superfície da madeira. (GURAU *et al.*, 2001).

Segundo BET (1999) a avaliação do acabamento da superfície usinada é usualmente levado em conta no monitoramento das condições de usinagem nos processos de fabricação. Compreender as relações entre a qualidade da superfície e as condições de corte é uma forma de análise com vistas à melhoria do processo de usinagem. BET (1999) estudou a medição da textura de superfícies metálicas utilizando rugosímetros com sondas baseadas no apalpamento mecânico e sondas baseadas no apalpamento óptico. Nessa pesquisa, o autor levanta os problemas relativos à quantificação da textura de superfícies usinadas e o entendimento de certos comportamentos dos processos de usinagem com relação à qualidade das superfícies usinadas. Essa metodologia pode

ter grande potencial para avaliação da qualidade da superfície da madeira usinada em indústrias de móveis, se feitos ajustes para sua aplicação neste segmento industrial. BET (1999) na usinagem de metais e FARIAS (2000) na usinagem de madeiras utilizaram para essa quantificação parâmetros como a profundidade média de rugosidade (R_z), que representa os desvios medidos nos perfis da superfície (figura 21).

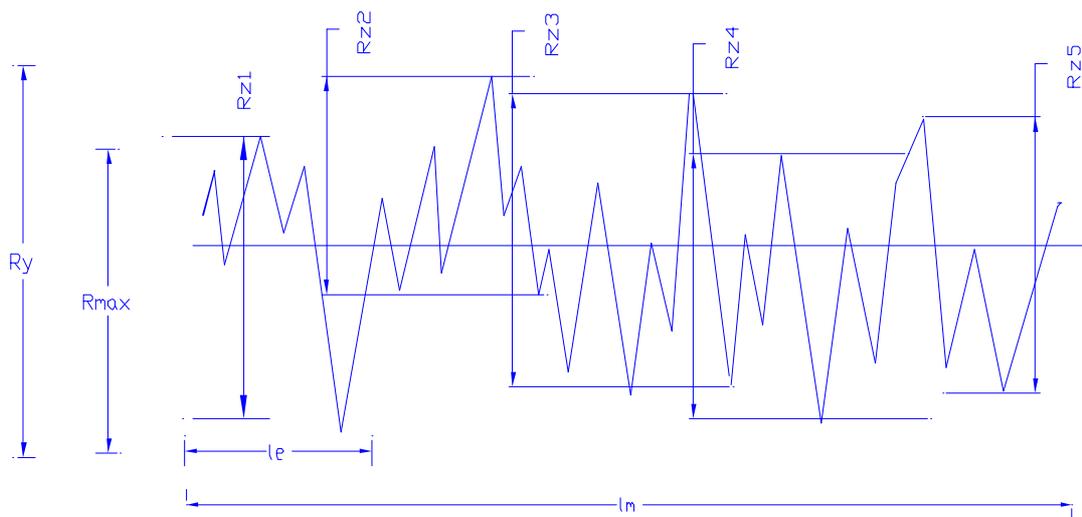


Figura 21 – Perfil de superfície usinada utilizado para determinação de R_z . (BET, 1999).

O acabamento será tanto melhor quanto mais próximos forem os picos de rugosidade resultantes dos movimentos cicloidais descritos pelos gumes de corte. Para plainamento de desbaste uma distância entre picos de 4-5 mm é suficiente, enquanto que para acabamento fino, esta distância não deve ultrapassar 1,5 mm. Aparentemente, ao elevar-se o número de lâminas a distância entre picos de rugosidade fica menor, porém, na prática, observa-se que não há grande melhora no acabamento, pois o gume necessita retirar uma certa espessura de cavaco. Além disso, o acabamento final da peça depende ainda de muitos outros fatores (BIANCHI, 1996).

No ambiente fabril, em países líderes no setor de tecnologias de usinagem da madeira, tais como Alemanha e Itália, já existem dispositivos automáticos acoplados às máquinas para avaliação da textura da superfície utilizando raio laser para captação de dados e posterior confecção dos perfis e levantamento destes parâmetros. No Brasil, a técnica utilizada em laboratório ainda é baseada na norma ASTM D1666, que é essencialmente subjetiva baseada na análise qualitativa e na

experiência do analista da qualidade. No ambiente fabril, o controle da qualidade da superfície ainda é pior, baseado apenas na avaliação visual e no tato.

Vários outros estudos foram dedicados a avaliação das relações entre os parâmetros de corte e qualidade da superfície usinada. Entre os principais para, os objetivos do presente estudo, podem ser citados os desenvolvidos por BIANCHI, 1996; FARIAS, 2000; GONÇALVES, 2000, os quais relacionam velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, geometria da ferramenta e propriedades da madeira com a qualidade da superfície.

No processamento da madeira, a estrutura da superfície da peça usinada é considerada como uma das mais importantes características da qualidade. A função, deste acabamento, diferente da usinagem dos metais, é principalmente estética com exceção para a usinagem de perfis utilizados em juntas coladas onde a qualidade da superfície tem uma função técnica e onde a precisão geométrica é fundamental. A função estética está relacionada ao cumprimento das formas especificadas nos projetos dos móveis e à obtenção de superfícies lisas, sem ondulações ou defeitos como manchas por superaquecimento devido ao atrito ferramenta-peça e que gerem, durante a usinagem da madeira, superfícies que permitam a adesão de tintas e vernizes utilizados em acabamentos superficiais.

Outro método utilizado para avaliação da qualidade da superfície é a análise do cavaco formado durante a usinagem da madeira. Este método de análise da qualidade foi utilizado por McKENZIE citado por KOCH (1964) que observou os tipos de falhas na formação do cavaco e relacionou-as com as condições de corte, geometria da ferramenta, potência de corte e propriedades da madeira.

As falhas estão relacionados às fendas, farpas, problemas de qualidade, geometria e precisão na superfície da madeira usinada e flutuações da força e potência de corte e que podem, dependendo das dimensões da falha, prejudicar a qualidade da superfície. Outro tipo de falha é a separação das fibras por cisalhamento acima do plano de corte, resultando numa má qualidade da superfície (GONÇALVES, 2000).

Estudos semelhantes foram desenvolvidos por VALARELLI e GONÇALVES (2001), CASTRO e GONÇALVES (2001) visando relacionar a qualidade da superfície com parâmetros de corte para a madeira de *Araucária angustifolia* e chapas de MDF, respectivamente.

No chão de fábrica, a avaliação da qualidade da superfície usinada, geralmente, é feita manualmente, ou seja, pela avaliação do grau de “aspereza” por meio da sensibilidade ao tato e por exames visuais baseados na experiência do responsável pelo controle de qualidade, os quais não podem fornecer resultados compatíveis e reproduzíveis. A avaliação da quantidade de verniz aplicado na superfície usinada, o arrancamento, esmagamento ou levantamento de fibras na região

do corte, marcas de superaquecimento também podem indicar anormalidades importantes no processo e que, se corrigidas, podem melhorar significativamente a qualidade da superfície usinada.

SILVA (2002) apresenta alguns testes de usinagem para avaliação da qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, cujos resultados estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4– Testes de usinagem com madeira de *Eucalyptus grandis*

OPERAÇÃO	ROTAÇÃO (rpm)	AVANÇO (m/min)	PROFUNDIDADE DE CORTE (mm)	% de PEÇAS APROVADAS
Aplainamento	5.000	10	1,6	77
Cópia de perfil	6.000	Manual	8,0	88
Fresamento longitudinal	8.000	10	42,2	100
Fresamento transversal	8.000	10	42,2	77
Furação para espiga	8.000	Manual	-	100
Respigamento	6.000	-	-	100
Ranhura em tupia superior	18.000	Manual	10,0	82
Furação	3.600	Manual	-	84
Torneamento	3.300	Manual	-	52

Fonte: SILVA (2002)

A ARACRUZ PRODUTOS DE MADEIRA, através do documento LYPTUS (2002), faz algumas recomendações para obtenção da qualidade da superfície nas principais operações de usinagem da madeira sólida de *Eucalyptus grandis*:

Aplainamento/desengrosso – utilizar ferramentas com quatro ou mais facas, preferencialmente de metal duro fixadas por parafuso ou soldadas, com rotação do eixo árvore de 5.000 rpm e com velocidade de avanço de 10 m/min. A espessura de corte deve ser de, no máximo, 1,6 mm. O ângulo de direção do gume deve ficar entre 10° e 25°, o ângulo de saída entre 7° e 20° e o ângulo de cunha, entre 45° e 73°. A qualidade da superfície é determinada pelo ângulo de ataque, passo de corte e profundidade de corte. O passo de corte, por sua vez, é determinado pelo número de facas, velocidade de avanço e pela rotação do eixo. Os valores aceitáveis do passo são de 1,5 a 1,7 mm e, quanto menor o passo, melhor a qualidade. A profundidade de corte para molduras, considerada de média qualidade, deve ser de 0,03 a 0,05 mm e a profundidade de corte para móveis, considerada de alta qualidade, deve ser de 0,03 a 0,05 mm. Para peças de grã reversa, é necessária uma diminuição da rotação do alimentador de avanço. O levantamento de fibras poderá ocorrer em peças de médias e altas massa específica, que são submetidas a facas sem afiação.

Fresamento – deve-se usar tupia de mesa, com fresa de metal duro, com os seguintes ajustes: rotação do eixo árvore acima de 8.000 rpm, avanço de 10,4 m/min e profundidade de corte de, no máximo, 2,2 mm. Para arredondamento mínimo das bordas da peça, recomenda-se uma rotação de

23.000 rpm. Os problemas de usinagem, como arpejamento, arrancamento de fibras, lascas ou queima de superfície aparecem quase sempre na operação perpendicular às fibras. Não se encontram problemas maiores na usinagem do lado paralelo às fibras.

Furação – utilizar brocas de metal duro ou de aço rápido, com rotação de 8.000 rpm. A espessura do furo não deve ser maior do que 1/3 da espessura da peça. As brocas de aço rápido, com duas quinhas e duas canaletas de saída, resultam num melhor acabamento da borda de furos de grande diâmetro. O diâmetro dos furos deve ser 0,2 mm superior ao diâmetro da cavilha. Deve-se usar brocas com duas arestas cortantes para evitar a rachadura nas bordas.

Corte transversal – as destopadeiras com serras de 60 dentes de metal duro, com rotação de 3.500 rpm, apresentam um bom resultado, cortando a madeira sem dobrar as fibras. Para a madeira de média a alta massa específica, o ângulo de direção do gume deve ser de 0° a 10° e o ângulo de incidência deve ser de 15° a 18°. Se a madeira apresentar grã reversa, a velocidade de avanço deverá ser reduzida.

STEMMER (2001) afirma que as modificações dos ângulos da ferramenta e da forma da quina estão entre os fatores que, na prática, são utilizados para corrigir um mau acabamento da peça. Esta relação, que foi constatada na usinagem de metais, segundo GONÇALVES (1993) e FARIAS (2000), também é válida para a usinagem da madeira.

Outro fator importante para a qualidade da superfície da madeira usinada é a dimensão do raio do gume ou estado de afiação expresso pelo grau de arredondamento ou agudez do gume da ferramenta devido ao desgaste. Um gume com a ponta muito arredondada dificulta o corte das fibras da madeira, aumenta os esforços de corte, ocorrendo freqüentemente, o arrancamento ou esmagamento das fibras e lascamento da peça, contribuindo para a perda de qualidade da superfície (SILVA, 2002).

No entanto, gumes muito agudos apresentam pequena rigidez e gumes muito arredondados requerem grandes esforços nas operações de corte. KIVIMAA (1952) utilizou uma ferramenta aguda e recém afiada para usinagem de madeiras e identificou micro-fraturas no gume quando do início da usinagem. Estas fraturas continuaram a ocorrer até o gume tornar-se mais rígido devido ao arredondamento do gume. Em função dos critérios adotados para o desgaste da ferramenta, é possível estabelecer uma agudez crítica da cunha cortante onde seja possível usinar sem aumentar significativamente os esforços de corte e ao mesmo tempo manter as condições de corte do gume.

2.9 Influência dos parâmetros da máquina na usinagem da madeira

Segundo HEISEL (1995) o mercado de produtos de madeira requer eficiência econômica e produtividade das máquinas-ferramentas para promover a melhoria do processo de usinagem. Por isso, o conjunto máquina-ferramenta deve exercer duas funções básicas, a realização do movimento relativo entre a ferramenta e a peça a ser usinada e a força necessária para realizar o corte sem erros ou danos. Como as forças de corte para madeiras são relativamente baixas, quando comparada aos metais, e a precisão dimensional exigida na usinagem de madeira é menor do que nos metais, da ordem de 0,1 mm a 0,5 mm, tornou-se possível o desenvolvimento de estruturas de máquinas rígidas e relativamente leves. Por isso, as máquinas podem apresentar uma construção leve e mesmo assim, uma elevada velocidade de avanço.

Os componentes básicos de uma máquina-ferramenta são a base, as guias, sistema de comando e acionamento, sistema de fixação da ferramenta e sistema de fixação da peça.

A base é a estrutura de suporte das guias, da árvore de acionamento e seus mancais e tem a função de fornecer rigidez estática e dinâmica para a estrutura da máquina-ferramenta. O material de construção da base é um fator importante para a rigidez do conjunto. Utilizando-se na maioria dos casos o ferro fundido. Sobre a base são montadas, segundo o comprimento da máquina, as colunas onde são montados os agregados com três ou mais eixos móveis. Os dispositivos de transporte da peça a ser usinada são fixados na base ou nas colunas da máquina.

As guias são elementos fundamentais e constituem uma parte delicada de uma máquina-ferramenta. Sua função é guiar a ferramenta na região de corte. Novamente a rigidez é um fator primordial para evitar variações de forma, devido à ação de forças estáticas e dinâmicas provenientes dos esforços de corte, prejudicando a exatidão geométrica e dimensional, além da qualidade.

O sistema de controle e acionamento é o centro de comando para controle da posição, velocidade, rotação e direção dos movimentos dos elementos das máquinas, sendo normalmente compostos de sensores e um controle numérico de boa resolução (FARIAS, 2000). A contribuição deste sistema para o aumento do rendimento é maior para o fresamento estacionário do que para o fresamento contínuo, devido à necessidade neste último caso, de movimentos mais rápidos e descontínuos. Com base na eficiência dos comandos numéricos e das técnicas de controle digital, é possível obter maiores velocidades de avanço, além da melhoria da precisão e conforto da operação. A diferença fundamental entre as técnicas de controle analógico e digital é a de que neste a comunicação entre comando e controle de acionamento ocorrem através de mensagens codificadas

digitalmente. Assim, os motores atuam de forma uniforme e podem se posicionar de forma precisa (HUG citado por FARIAS 2000).

O acionamento principal determina, efetivamente, o rendimento em um processo de usinagem. Para o fresamento em máquinas automáticas de aplainar e moldurar são empregados fusos acionados por correias e em alguns casos por motoárvores. Os primeiros possuem preços mais acessíveis. As desvantagens são a maior área para alojá-los, a rotação constante e a necessidade que o eixo árvore seja lentamente acelerada ou parada.

A motoárvore, ao contrário, apresenta árvore integrada ao motor de acionamento, oferece a vantagem da construção compacta, rotação variável e elevada dinâmica.

Segundo FARIAS (2000), para fresadoras de usinagem da madeira, geralmente, são utilizados eixos árvore com mancais de elementos rolantes, principalmente porque a faixa atual de até 20000 rpm existente comercialmente oferece reservas mais do que necessárias.

Segundo BONDUELLE (2001), a frequência de rotação do motor é, em geral na indústria madeireira brasileira, baixa demais para se garantir uma velocidade de corte suficiente, principalmente no caso das operações de aplainamento. Deve-se aproximar da rotação máxima da ferramenta definida pelo fabricante. A título de exemplo, um cabeçote de diâmetro padrão de 140 mm pode girar, conforme o fabricante, até 8500 rotações por minuto. Isso quer dizer que a velocidade de corte será de 60 m/s. Se o motor da máquina dispõe de uma rotação de 6000 rpm, a velocidade de corte será somente de 43 m/s. Este valor é baixo demais para garantir um padrão mínimo de qualidade. Foi demonstrado que, para um mesmo avanço por dente (f_z), maior é a velocidade de corte, portanto, melhor é o acabamento. As demonstrações foram feitas até 200 m/s. No entanto, não se pode usar velocidade superior a 100 m/s nas máquinas encontradas no mercado porque elas não foram concebidas para estas condições de funcionamento (estrutura, rolamentos,...) e poucas são as ferramentas que permitem essas altas velocidades (balanceamento,...). Deve-se, na medida do possível, se aproximar dos 100 m/s, e não dos 40 m/s como é o caso geralmente utilizado.

BONDUELLE (2001) cita que as ferramentas e os equipamentos devem apresentar um padrão de qualidade mínimo. Isto significa que as ferramentas devem estar bem balanceadas, afiadas, e para alguns casos, corretamente tensionadas (serras circulares e serras fitas). Os equipamentos com seu sistema de fixação devem estar com a precisão conhecida. Esta precisão deve ser observada ao longo da vida do equipamento.

Para FARIAS (2000) o sistema de fixação da ferramenta é importante porque esse sistema é a interface entre o eixo árvore e a ferramenta e é neste ponto que se situa o fluxo de força entre a ferramenta e a máquina-ferramenta. A configuração deste sistema influi decisivamente no

desempenho e na qualidade da peça usinada. O sistema também tem influência na concepção de dispositivos de troca rápida de ferramenta o que reduz o tempo de troca de ferramenta e aumenta a produtividade. Para que a sua função seja desempenhada com sucesso é necessário que o sistema de fixação possa transferir força e momento sem sofrer deformações estáticas ou dinâmicas, a troca de ferramenta não deve influir na qualidade da usinagem, elevada precisão de rotação (balanceamento).

Vários tipos de máquinas comandadas por CNC são utilizadas para trabalho com madeiras, entre elas fresadoras, tornos, copiadoras, tupias, fresadoras moldureiras, aplainadoras e desempenadeiras. São máquinas usadas para trabalhos em compensados, aglomerados, madeira maciça e proporcionando diversos contornos e acabamento com um grande número de recursos, produzir peças com uma gama variada de detalhes e perfeição na usinagem.

Para a ABPM (1998) o uso de máquinas com tecnologia CNC apresentam vantagens como aumento na produtividade, acabamentos de alta qualidade, redução da mão de obra, segurança, facilidade de operação, relação custo-benefício favorável quando comparada a outras máquinas, alta capacidade de produção. Mas, segundo BIANCHI (1996), há algumas barreiras tecnológicas a serem vencidas na indústria moveleira brasileira. Apenas empresas de grande porte do setor já adquiriram máquinas CNC, sendo que estas se tratam de destopadeiras otimizadoras de corte e centros de usinagem importados. A programação destas máquinas é, na maior das vezes, manual o que é aceitável considerando-se que as peças são produzidas em grandes lotes. A aquisição de máquinas CNC na grande maioria das vezes se deve à maior reprodutibilidade obtida nas peças produzidas e, principalmente no caso de fresamento, ao uso de altas velocidades de corte. Deste modo, as máquinas CNC para madeira são utilizadas no Brasil como copiadoras que proporcionam uma peça melhor acabada, que necessita pouco ou nenhum lixamento posterior. No entanto, vários recursos de flexibilidade não são dominados por boa parte dos fabricantes.

2.10 Melhoria

Para avaliar a competitividade PALADINI (1997) cita que é preciso estabelecer um conjunto de indicadores que utilizem como referência variáveis de desempenho, capacitação e estratégia. Os indicadores de desempenho referem-se à avaliação do sistema produtivo, envolvendo fragilidades e potencialidades da organização mediante a avaliação da eficiência da empresa. Os indicadores de capacitação referem-se à organização como um todo, atuando como mediadores das ações de apoio ao processo produtivo. Os indicadores estratégicos abrangem procedimentos de gestão estratégica que acompanham as mudanças de mercado com a medição da eficácia.

Segundo SLACK *et al.* (1999) a melhoria do desempenho pode ser agrupada em melhoria da produção, a prevenção e recuperação de falhas e a administração da qualidade. Para a melhoria da produção é fundamental estabelecer métodos de avaliação da operação produtiva. Entre as medidas do desempenho são citadas, entre outras, o número de defeitos por unidade, índice de rejeição (refugo), tempo médio entre falhas, o *lead-time* de pedido, o tempo de ciclo, tempo de *setup*, capacidade de produção, custo por hora de operação, valor agregado, utilização de recursos. Os padrões de desempenho podem balizar os valores mínimos/máximos para cada medida de desempenho em função das metas estabelecidas no planejamento estratégico, limite este que, fora dos quais, as operações inviabilizam a produção ou a tornam pouco competitiva. Entre os padrões podem ser utilizados padrões de desempenho alvos, padrões estabelecidos da concorrência, padrões absolutos, tal como a meta de defeitos zero e o *benchmarking* (comparação das medidas de desempenho entre duas ou mais empresas) para, deste modo, eleger as prioridades de melhorias e as áreas de melhoria em cada prioridade.

As técnicas para a melhoria do desempenho, mais comumente utilizadas, são a análise I/O (*input/output*), a análise de efeito e modo de falha (FMEA), as cartas de controle estatístico dos processos, os fluxogramas, os diagramas de relacionamento, diagramas de causa e efeito e diagramas de pareto. Neste estudo foram utilizadas as relações I/O para avaliar a melhoria dos indicadores de desempenho dos processos de usinagem.

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da pesquisa

Este capítulo apresenta a forma como foi executada a pesquisa e a metodologia adotada. A presente pesquisa é classificada, sob o ponto de vista de sua natureza, como pesquisa aplicada, uma vez que objetivou gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigida à solução de problemas específicos envolvidos no processamento industrial da madeira. Quanto à forma de abordagem do problema a pesquisa pode ser classificada como qualitativa, a qual buscou a interpretação dos fenômenos pelo uso de uma metodologia baseada na análise do sistema de fabricação de móveis de madeira. Do ponto de vista do seu objetivo, o presente estudo pode ser classificado como pesquisa explicativa, a qual visou identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, aprofundou o conhecimento da realidade porque buscou explicar a razão, o “porquê” das coisas e permitiu a definição das relações de causa e efeito entre os fatores inerentes à usinagem da madeira envolvidos no seu processamento e a eficiência do processo de produção.

Os procedimentos técnicos envolveram o estado da arte, baseado em pesquisa bibliográfica sobre o tema do estudo, juntamente com pesquisa documental (capítulo 2), o levantamento de dados sobre o comportamento do fenômeno que se desejava conhecer e a seleção de variáveis que influem no objeto de estudo, a forma de controle e a análise dos efeitos que as variáveis produziram no objeto de estudo, no caso o desempenho dos processos de usinagem da madeira.

A figura 22, ilustra os passos da pesquisa, mostrando as diferentes fases desenvolvidas na mesma, a metodologia de coleta dos dados, as variáveis medidas e analisadas em cada fase e as técnicas de análise dos dados empregadas para alcançar os objetivos propostos.

O planejamento da pesquisa se baseou na confirmação ou negação das premissas levantadas. Os métodos científicos adotados foram o fenomenológico e o hipotético-dedutivo. O método fenomenológico não é dedutivo nem indutivo. Preocupa-se com a descrição direta da experiência tal como ela é. O método hipotético-dedutivo consiste na adoção da seguinte linha de raciocínio: “quando os conhecimentos disponíveis sobre um determinado assunto são insuficientes para a explicação de um fenômeno, surge o problema. Para tentar explicar as dificuldades expressas no problema, foram formuladas as premissas para a resolução do problema de pesquisa”.

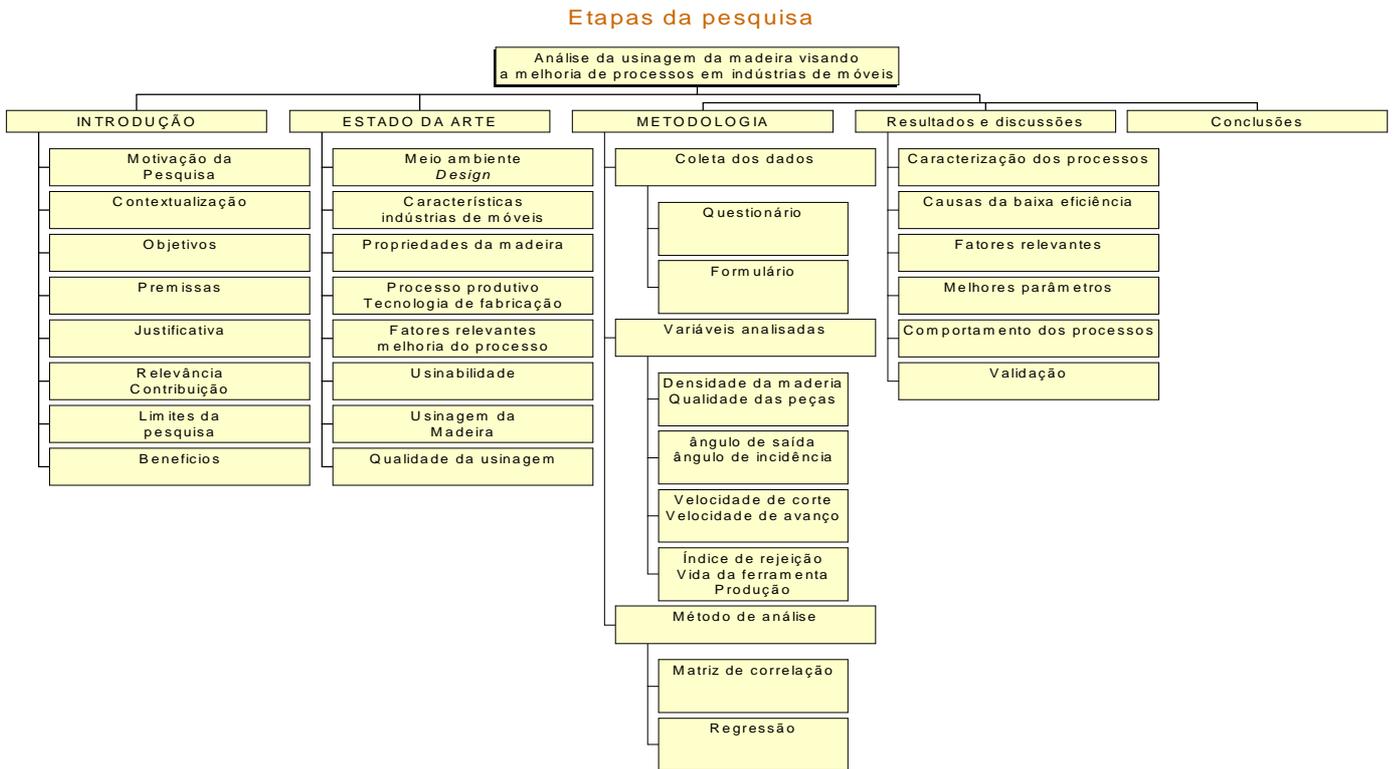


Figura 22 – Etapas da pesquisa. (LUCAS FILHO, 2002).

3.2 Definição do instrumento de coleta de dados

Para a análise do sistema de manufatura foram coletados dados referentes aos processos de usinagem obtidos em nove fábricas do pólo moveleiro de São Bento do Sul - SC. Para a coleta dos dados foi aplicado um questionário (Apêndice 1) com o intuito de levantar informações qualitativas sobre os processos de usinagem e três formulários (Apêndices 2 e 3) para captura de informações quantitativas que iriam subsidiar a análise das variáveis envolvidas nos processos de usinagem da madeira.

Com o auxílio de entidades de classe como ABIMAQ e ABIMOVEL, os questionários e os formulários foram distribuídos a seus afiliados com a finalidade de obter a maior representatividade possível dos segmentos envolvidos na pesquisa. Buscando, assim, estreitar e melhorar o relacionamento entre fabricantes de ferramentas e usuários das mesmas como forma de resolver problemas no processo de usinagem da madeira.

A seleção das empresas fabricantes de móveis foi baseada em critérios como interesse pelos resultados da pesquisa, disponibilidade de dados com registros históricos sobre as variáveis em estudo, controle dos processos de usinagem, tamanho, tecnologia de fabricação utilizando diferentes recursos de transformação, utilização de diferentes espécies de madeira, buscando cobrir a variação

existente entre as empresas do setor, mas dedicadas ao mesmo segmento, no caso móveis residenciais fabricados a partir de madeira maciça destinados ao mercado externo. As empresas participantes da pesquisa tiveram seus nomes mantidos em sigilo devido o fornecimento de informações estratégicas e que não poderiam ser divulgados tais como medidas de desempenho e práticas de gestão da qualidade e da produtividade.

O questionário foi construído em blocos temáticos obedecendo a uma ordem lógica na elaboração das perguntas. A redação das perguntas buscou ser objetiva e estabelecer uma linguagem compreensível ao informante mas limitada em extensão e seguiu acompanhado de instruções evitando a possibilidade de interpretação dúbia, sugerir ou induzir a resposta. Cada pergunta focalizou apenas uma questão para ser analisada pelo informante. O questionário continha apenas as perguntas relacionadas aos objetivos da pesquisa. Foram evitadas perguntas que, de antemão, já se sabe que não seriam respondidas com exatidão. As instruções esclareceram o propósito de sua aplicação, ressaltando a importância da colaboração do informante de modo a facilitar o seu preenchimento.

Nas instruções foi apresentada uma contextualização do problema de pesquisa, inserindo o papel das empresas nesse contexto, a importância e justificativa da pesquisa, os objetivos, sua metodologia e os benefícios esperados com a sua conclusão como forma de melhorar a percepção do tema de pesquisa e a importância da colaboração das empresas no sentido de contribuir com a mesma, fornecendo dados e respondendo aos questionários de avaliação, aplicados tanto à gerência como aos operadores de máquinas e desenvolvedores de ferramentas.

Os dados incluem informações sobre as variáveis envolvidas na melhoria do processo de usinagem da madeira e foram obtidos nos setores de engenharia, programação e controle da produção (PCP), controle de qualidade e manutenção das fábricas de móveis.

Os dados foram obtidos, também, dos fornecedores de ferramentas para as fábricas de móveis, buscando determinar o grau de relacionamento e afinidade quanto aos parâmetros de usinagem praticados, os recomendados pelos fabricantes de ferramentas e o desempenho dos processos de transformação da madeira..

O instrumento de coleta de dados proporcionou uma interação efetiva entre o ambiente, o informante e a pesquisa. Para facilitar o processo de tabulação de dados por meio de suportes computacionais, as questões e suas respostas foram codificadas e armazenadas em banco de dados.

3.2.1 Definição das variáveis em estudo

Os dados foram obtidos a partir de pesquisa documental junto aos departamentos de PCP, controle de qualidade e manutenção de cada fábrica, buscando identificar registros históricos sobre o desempenho de cada processo em estudo (fresamento, corte e furação). Em cada processo foram buscadas informações sobre as configurações de ferramentas e máquinas, condições de operação, e espécies de madeira para, assim, correlacioná-las com os respectivos indicadores de qualidade e de produtividade. Para isso, foram utilizados os formulários apresentados nos apêndices 2 e 3. Nestes formulários são descritas todas as variáveis que foram coletadas para a análise dos processos de usinagem.

Inicialmente foram realizadas pesquisas documentais preliminares com o intuito de facilitar e sistematizar a coleta de dados relevantes, tais como operações envolvidas na fabricação de móveis de madeira, recursos de transformação, configurações desses recursos, desempenho do conjunto máquina-ferramenta, variáveis e atributos que influem no desempenho de cada recurso de transformação. Os dados levantados junto a gerência de produção incluíram os tempos decorridos entre as falhas de equipamento, vida da ferramenta, o *lead time* do sistema, tempos de operação, volumes de produção, número de *setup*, roteiros de fabricação, capacidades e limitações dos recursos produtivos.

Para estabelecer medidas de desempenho do sistema de manufatura foram levantados dados para as seguintes variáveis:

1. Variável indicadora da qualidade: Índice de rejeição, levantado para cada processo de usinagem e expresso em percentual do número total de peças produzidas;
2. Variáveis indicadoras de produtividade: Vida da ferramenta até a primeira afiação expressa em minutos, volume de madeira usinada (capacidade de produção) para cada operação durante a vida da ferramenta (até a primeira afiação).

A figura 23 ilustra o método de coleta e construção do banco de dados com as informações necessárias à análise do sistema de fabricação.

Os requisitos necessários ao desenvolvimento de ferramentas mais ajustadas às necessidades dos usuários das mesmas foram obtidos a partir da investigação e síntese das necessidades e expectativas dos usuários das ferramentas para usinagem da madeira (fabricantes de móveis) em termos do atendimento aos objetivos estratégicos para o produto e, conseqüentemente, para o processo de manufatura. Isso foi possível a partir da interpretação das respostas fornecidas pelos fabricantes de móveis aos questionários. A partir daí, foi possível quantificar a lista de requisitos para o processo e a lista de parâmetros de controle do processo, compará-los com os resultados até

aqui encontrados na bibliografia para, então, definir e caracterizar o modelo de operação e fazer inferências buscando a melhoria dos parâmetros estudados.

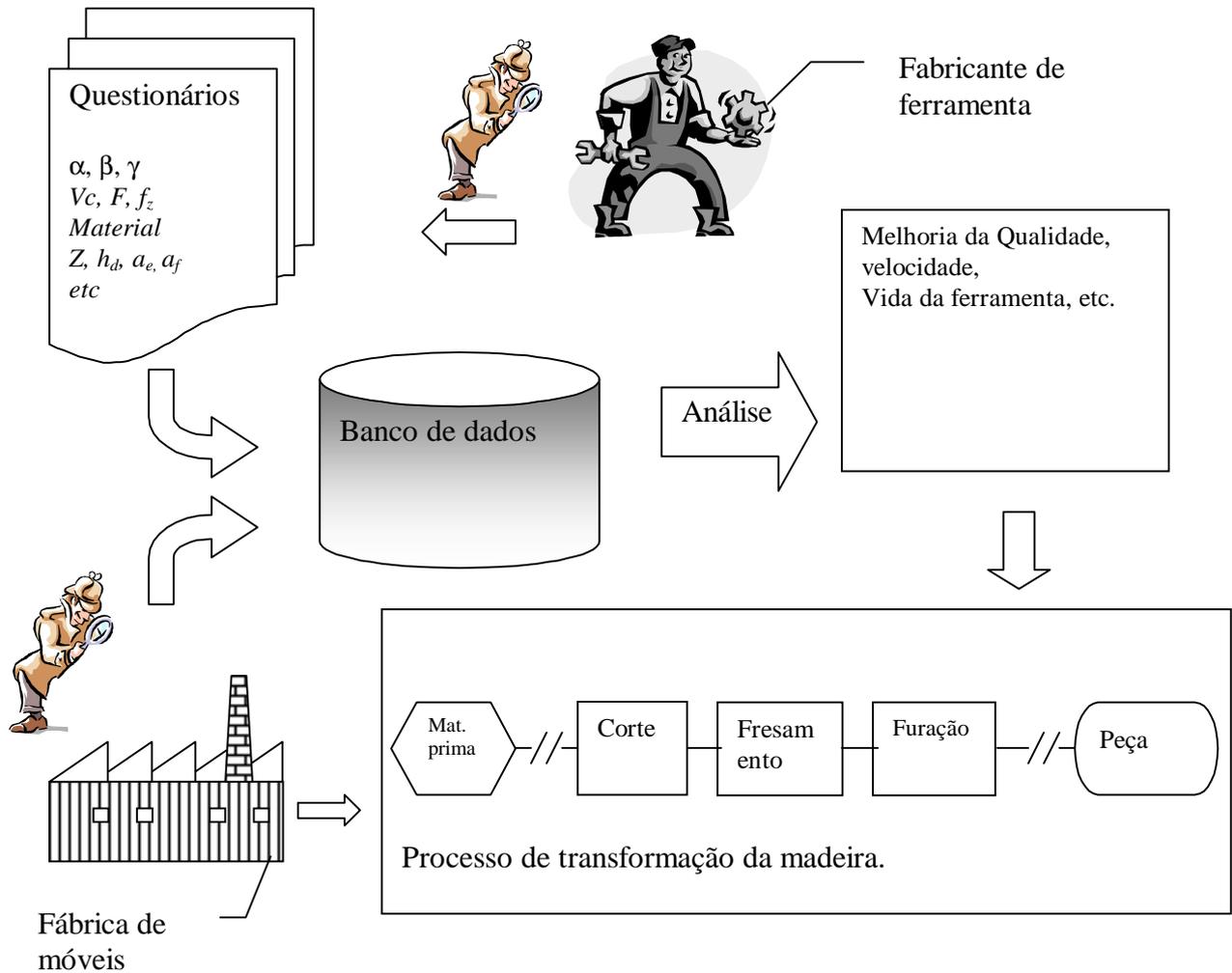


Figura 23 – Esquema representativo da metodologia empregada na pesquisa.(LUCAS FILHO, 2002).

Assim que o banco de dados com as informações foi completado foram gerados gráficos relacionando o desempenho de cada processo de transformação com as propriedades das ferramentas, condições de corte e espécies de madeira como forma de auxiliar na gestão da produção e orientação para melhoria do processo. Os gráficos gerados mostram a tendência da variação das medidas de desempenho em função dos parâmetros de usinagem obtida em cada processo de transformação da madeira e orientam as mudanças nos fatores relevantes de modo a alcançar a melhoria do desempenho pelo monitoramento dos processos de corte, fresamento e furação.

O levantamento de dados buscou cobrir toda a variação envolvida nas operações e nos eventos associados ao sistema para, desse modo, configurar parâmetros de entrada (geometria e material da ferramenta, espécies de madeira, condições de corte) e suas relações com as respostas do sistema de manufatura (vida da ferramenta, índice de rejeição, produtividade dos processos de corte, fresamento e furação) com respeito a alterações nos parâmetros de entrada.

3.3 Métodos de análise dos dados

As análises dos dados coletados foram direcionadas para o atendimento dos objetivos específicos da pesquisa. As formas de tabulação e apresentação de dados utilizaram tabelas e gráficos e os meios (os métodos estatísticos e os instrumentos computacionais) usados para facilitar a interpretação e análise foram a análise de correlações e análise de variância geradas pelo *software statistica*².

As análises tomaram como base os indicadores de desempenho dos processos. Os critérios mínimos de desempenho do processo foram obtidos para cada objetivo estratégico e refletem os valores estabelecidos pelos usuários do conjunto máquina-ferramenta efetivamente praticados nas fábricas.

Para o tratamento dos dados foram utilizadas ferramentas de estatística descritiva como médias e desvio padrão e histogramas para caracterizar a forma da distribuição e os valores dos parâmetros pertinentes, bem como matrizes de correlação e análises regressão e de variância com delineamento fatorial para verificar a interação entre os parâmetros de entrada e as respostas do sistema de manufatura, buscando, com isso, compreender o comportamento do sistema mediante alterações nas condições de corte, geometria e materiais das ferramentas e espécies de madeira para os processos de corte, fresamento e furação e identificar os fatores mais relevantes para melhoria dos processos de transformação da madeira.

Para caracterizar a forma de distribuição dos dados e determinar as médias para a vida da ferramenta e para o índice de rejeição foram levantados, 10 valores (repetições) dos registros dessas variáveis em cada empresa as quais foram, posteriormente, correlacionadas com os respectivos fatores em estudo (geometria da ferramenta, condições de corte, espécie de madeira).

3.3.1 Identificação das causas da baixa eficiência na usinagem de madeiras.

A identificação das causas da baixa eficiência produtiva na usinagem da madeira, comparativamente à usinagem de metais, foi feita a partir da interpretação e análise das respostas ao

² *Software* para análise estatística de dados - <http://www.statsoftinc.com>

questionário aplicado aos fabricantes de móveis. No questionário buscou-se identificar os critérios de definição da vida da ferramenta utilizados pelos usuários das ferramentas e os recomendados pelos fabricantes assim como a potência de corte requerida. Foram, também, estabelecidas relações entre a geometria da ferramenta, o acabamento da superfície usinada e a vida da ferramenta.

O questionário buscou identificar as espécies de madeira utilizadas para, a partir dos bancos de dados de classificação de madeiras, correlacionar a massa específica da madeira com o desempenho na usinagem e definir, sob o ponto de vista do fabricante de móveis, as causas da baixa eficiência produtiva na usinagem da madeira quando comparada à usinagem de metais.

As respostas aos questionários permitiram identificar critérios de fim de vida nas fábricas de móveis. A marca de desgaste admissível, estabelecida pelo fabricante da ferramenta, para medir a vida da ferramenta, e comparar com os efetivamente empregados nas fábricas de móveis. Além disso, foi perguntado qual o critério para determinação da vida da ferramenta (até a primeira afiação) e, no formulário, foram determinados esses valores para cada processo em estudo. Com essa informação foi possível relacionar a vida da ferramenta com os parâmetros de usinagem. O critério baseado na qualidade das superfícies das peças realizadas é definido de forma subjetiva, pela indústria. O questionário teve o papel de externalizar o conhecimento implícito baseado na experiência do operador na classificação das peças.

Outro critério usado nas indústrias brasileiras para determinar a troca da ferramenta de corte é a quantidade em metros lineares de madeira usinada ou o número de horas de usinagem.

A qualidade de uma usinagem deve determinar a aceitação ou não de um estado de superfície gerado para essa usinagem. A qualidade do processo foi avaliada pela aquisição de dados sobre o índice de peças com defeitos e refugo, os tipos de defeitos e o número de falhas por quebra de ferramenta para cada processo. A presença de muitas peças defeituosas indicou que havia algum problema na usinagem. A matriz de correlação buscou mostrar a influência dos vários fatores sobre o índice de rejeição.

A avaliação da qualidade da superfície das peças de madeira usinadas foi realizada segundo uma adaptação da norma ASTM D 1666-88 às condições de fabricação.

Os processos onde foram coletados os dados foram o fresamento frontal e de perfil, a furação (passante e não passante), o corte paralelo às fibras e o corte transversal às fibras. Os principais defeitos de usinagem foram descritos com base na norma ASTM D1666-88. São eles o arrancamento de fibras, queima de superfície, marcas de maravalha (termo comumente usado na usinagem de madeiras para representar a distância equivalente ao avanço por dente), lascamento, levantamento de fibras, “arrepimento” da superfície, aspereza de superfície e esmagamento das fibras em lugar de corte. Os defeitos e sua intensidade sobre as peças foram analisados pelos

avaliadores de qualidade de cada fábrica, sob um caráter puramente subjetivo, mas de forma conjunta e consensual, segundo critérios padronizados e definidos. O Quadro 5 mostra o sistema de classificação empregado para avaliação da qualidade da superfície usinada.

Quadro 5- Sistema de avaliação da qualidade da superfície (ASTM D1666-88).

NOTA	SIGNIFICADO	GRAU
1	Excelente	Sem defeitos
2	Bom	< 50% com defeitos
3	Regular	50% com defeitos
4	Ruim	> 50% com defeitos
5	Muito ruim	100% com defeitos

Neste método de avaliação da qualidade da superfície são consideradas aprovadas para a utilização no setor moveleiro as peças que obtiverem notas 1 (ausência de defeitos) e 2 (peça com menos de 50% da superfície com defeitos), apresentando conceitos excelente e bom, respectivamente. O índice de rejeição foi obtido a partir da divisão do número de peças reprovadas pelo total de peças aprovadas medidos em cada processo de usinagem.

Um fator importante para avaliação da qualidade da superfície é a determinação da velocidade de avanço da peça. Porém, na prática fabril, esta variável é de difícil obtenção em máquinas manuais. Por isso, foram levantados, junto aos operadores e por intermédio da gerência de produção, os valores praticados para as velocidades de avanço das peças em cada processo e comparados com valores sugeridos pelos fabricantes de ferramentas e os calculados a partir de uma estimativa baseada, nas dimensões das peças usinadas e no tempo médio de usinagem para assim, determinar um valor numérico para o avanço e correlacionar com as variáveis que influem na qualidade da usinagem.

3.3.2 Identificação das variáveis relevantes para a melhoria dos processos.

A identificação das variáveis relevantes para a melhoria dos processos de fresamento, corte e furação foi realizada a partir de uma análise das correlações entre as propriedades geométricas das ferramentas, as condições de corte e a massa específica da madeira e os indicadores de desempenho (vida da ferramenta, índice de rejeição, volume de madeira usinada). Para a seleção das variáveis relevantes para a melhoria do processo de usinagem foram estabelecidas as matrizes de correlações entre as variáveis que traduzem essas propriedades a partir do banco de dados construído com informações fornecidas por fabricantes de ferramentas e usuários das mesmas (Quadro 6). O critério de seleção das variáveis mais relevantes foi o maior coeficiente de correlação entre as

variáveis de entrada ou fatores de controle nos seus diferentes níveis e as respostas do sistema medidas na forma de indicadores de qualidade e de produtividade.

Quadro 6– Matriz de correlações entre os fatores em estudo e as respostas do sistema de manufatura. (LUCAS FILHO, 2002).

Respostas	Condições de corte			Geometria da ferramenta				Prop. da madeira
	v_c	v_f	f_z	γ	α	D	Z	Me
Vida da ferramenta (K_1)	R_{11}	R_{22}	.	.	.	.	.	.
Índice de rejeição (K_2)	R_{21}	.	.	.	.	.	.	.
Produção (K_3)	R_{31}	.	.	.	.	.	.	.

R = Coeficiente de correlação entre os fatores de influência e as respostas do sistema de fabricação

Foram levantados dados referentes ao ângulo de saída (γ), , ângulo de incidência (α), vida da ferramenta, índice de rejeição, a massa específica da madeira (Me) e velocidade de avanço (v_f). A velocidade de corte (v_c) foi calculada em função do diâmetro e do giro da ferramenta conforme mostra a equação 1.

$$V_C = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad \text{eq. 1}$$

onde:

v_c = velocidade de corte (m/s)

D = Diâmetro da ferramenta (m)

n = Rotação do eixo árvore (rpm)

Outros dados necessários à análise foram coletados tais como, informações sobre o tipo de máquina, número de gumes e material da ferramenta, velocidade de avanço, rotação do eixo árvore e profundidade de corte. A qualidade de acabamento foi avaliada através da rugosidade da superfície, contando-se o número de marcas das facas contidas num espaço de uma polegada, arrancamento de fibras, presença de superfície felpuda, esmagamento e aspereza de corte quanto à presença de lascamento ou arrancamento das fibras, para os diferentes processos.

3.3.3 Melhores parâmetros para condições de corte e geometria da ferramenta.

A identificação dos parâmetros otimizados para as condições de corte se deu com a análise do desgaste produzido, nas ferramentas durante a usinagem das diferentes espécies de madeira em

vários processos, do índice de rejeição e do volume de madeira usinado durante a vida da ferramenta. A definição dos parâmetros ótimos de usinagem foi obtida pela solução que apresentou a maior vida da ferramenta e, simultaneamente, o maior volume de madeira usinado (maior taxa de remoção de cavaco) com o menor índice de rejeição.

A comparação desses parâmetros com os sugeridos pela literatura e os praticados pelos usuários se deu por contraste. A diferença entre os valores praticados e os sugeridos pela literatura mostra o grau de incerteza sobre o comportamento da usinagem da madeira de diferentes espécies.

Com o auxílio de um banco de dados com estas informações foi possível determinar os parâmetros de usinagem (v_c , a_p , v_f , etc.), a vida da ferramenta, a máquina-ferramenta e a velocidade e qualidade do processamento para diferentes espécies de madeira. Estes dados são válidos para cada combinação específica de materiais (peça-ferramenta).

3.3.4 Comportamento dos processos diante da alteração da espécie de madeira.

A previsão do comportamento dos processos de usinagem diante de alterações da matéria prima foi realizado através do ajuste de modelos matemáticos aos dados levantados. Com a posse de dados sobre o desempenho do sistema de fabricação e das variáveis envolvidas na usinagem da madeira foi possível estabelecer as relações de dependência entre essas variáveis e as respostas do sistema, e puderam ser representadas de forma genérica por uma função que foi ajustada de acordo com a tendência dos dados compilados. Essa relação foi representada por:

$$K_n = f\left(X_{z=1}^n\right)$$

onde K representa as respostas do sistema de manufatura, n um índice de K para identificar a variável de resposta (índice de rejeição, vida da ferramenta, etc), X as propriedades da ferramenta, da madeira e as condições de corte que variam de um índice $z=1$ até aos n correspondentes pares de respostas K_n .

O Quadro 7 mostra as variáveis de resposta representadas no modelo matemático por K , com os respectivos significados e as variáveis de entrada dos modelos a serem ajustados. A identificação da função que melhor representaria esta relação foi feita por análise de regressão, utilizando como critério para seleção da função que melhor se ajustou aos dados, por ordem de importância, em

primeiro lugar a função que apresentou o menor erro padrão da estimativa, em seguida a que apresentou a melhor distribuição do resíduo e por último a que apresentou o maior coeficiente de determinação.

Quadro 7– Parâmetros de saída para as diferentes combinações das variáveis em estudo. (LUCAS FILHO, 2002).

K	SIGNIFICADO	Indicador	X
K ₁	Vida da ferramenta	Produtividade	v_{c1}, γ_1, Me_1
K ₂	Volume de madeira usinada	Produtividade	v_{c2}, γ_2, Me_2
K ₃	Índice de rejeição	Qualidade	v_{c3}, γ_3, Me_3

Os parâmetros de entrada investigados foram os fatores de controle, ou seja, aqueles cujos quais conhecemos suas propriedades e valores e podemos alterá-los para obter melhores resultados no processamento da madeira e referem-se à geometria e material da ferramenta, às condições de corte e à espécie de madeira. Os níveis de cada fator foram os valores que estes parâmetros assumem e podem variar de acordo com as especificações de cada ferramenta, das condições de corte utilizadas nos processos de usinagem e das propriedades de cada espécie de madeira utilizada para confecções das peças. Os resultados afetados foram a vida da ferramenta, volume de madeira usinada durante a vida da ferramenta (produtividade) e o índice de rejeição (medida de qualidade do processo) com a finalidade de otimizar os valores de entrada em função dos resultados verificados em cada processo.

3.3.5 Efeito da usinabilidade da madeira sobre a eficiência dos processos.

A avaliação do efeito da usinabilidade das diferentes espécies sobre a eficiência dos processos foi feita a partir da análises da variação da vida da ferramenta, do índice de rejeição e do volume de madeira usinada sobre a massa específica da madeira das espécies em estudo. Para mostrar as diferenças de desempenho devido a alteração da madeira foram comparadas a vida da ferramenta, o índice de rejeição e o volume de madeira usinado. Para estabelecer uma medida física, foi desenvolvido um modelo de simulação onde foram comparados os resultados obtidos em função da alteração das condições de corte, geometria da ferramenta e espécie de madeira como método de validação dos resultados.

3.4 Simulação dos processos de usinagem

Para a simulação do sistema real foram coletados dados referentes ao processo de manufatura. Inicialmente foram realizadas observações preliminares com o intuito de facilitar e sistematizar a coleta de dados relevantes para o modelo, tais como identificação dos tipos de entidades, eventos associados e atributos das entidades. Os dados coletados incluíram os tempos decorridos entre as falhas de equipamento, o *lead time* do sistema, tempos de operação, volumes de produção, número de *setup*, roteiros de produção, capacidades e limitações dos recursos produtivos.

O levantamento de dados buscou cobrir a variação dos fatores de entrada e as respostas do sistema medidas para cada operação e nos eventos associados ao sistema. Considerando que a variação segue um padrão de distribuição normal, foram levantados os valores médios para cada variável para, assim, representar o sistema real.

3.5 Passos para a modelagem e simulação

Na literatura sobre o processo de simulação há um consenso sobre os passos a serem seguidos para formulação de um estudo envolvendo modelagem e simulação como pode ser visto em BANKS & CARSOM (1984), PEDGEN *et al.* (1990) e LAW e KELTON (1991). Segundo estes autores os procedimentos para solução de um problema utilizando a modelagem e simulações de sistemas seguem os passos estruturados em quatro etapas: a etapa de planejamento, etapa de modelagem a etapa de experimentação e, finalizando, a tomada de decisão e conclusão do projeto. Em cada etapa são desempenhadas diversas atividades relacionadas à resolução do problema em estudo. A figura 24 ilustra os passos a serem seguidos para a estruturação de um estudo envolvendo modelagem e simulação.

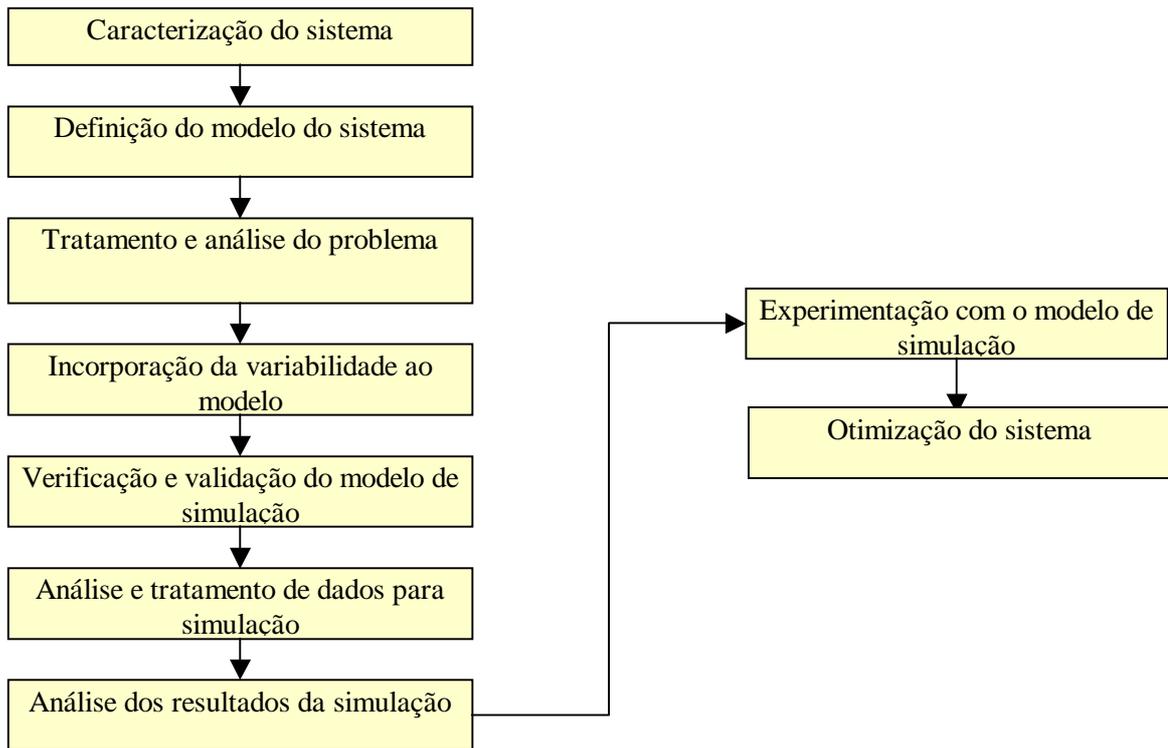


Figura 24 - Esquema de desenvolvimento da modelagem e simulação dos processos.

3.6 Verificação e validação do modelo de simulação

O objetivo da verificação e validação do modelo é garantir que o modelo computacional esteja isento de erros de sintaxe e/ou de lógica e tenha um comportamento semelhante ao do sistema real para permitir inferências a partir de modelos confiáveis. A validade de um modelo é medida pela proximidade entre os resultados obtidos a partir do modelo e aqueles oriundos do sistema real. Portanto, qualquer decisão baseada em inferências sobre o modelo deve observar estes pressupostos.

Para realizar a verificação do modelo foram utilizadas técnicas que envolvem métodos de correção de programas (*debugging*) e procedimentos relacionados ao desenvolvimento de modelos de simulação. Uma técnica é o uso de modelos determinísticos para eliminar a variabilidade das respostas devido ao comportamento estocástico das variáveis aleatórias. Outra técnica de verificação utilizada será a variação dos dados de entrada com a finalidade de verificar se as respostas do modelo são adequadas e consistentes. Será utilizada, também, uma rotina de rastreamento (*trace*) existente no programa de simulação, a qual permite a visualização da lista de eventos ocorridos, ordenados pelo tempo de sua ocorrência facilitando a identificação de erros de lógica da modelagem. Serão aplicados, ainda, testes de continuidade, testes de degenerescência e testes de consistência.

A validação do modelo de simulação foi realizada através do teste das premissas envolvidas no estudo, ou seja, evitar a aceitação de resultados de experimentos baseados em hipóteses falsas. Estes testes consistem em comparar resultados da simulação com os observados no sistema real.

Segundo JAIN (1997), a validação consiste em assegurar que os pressupostos dos modelos testados e as simplificações adotadas no seu desenvolvimento sejam razoáveis e produzam resultados compatíveis com os verificados na prática. A validação tem por objetivo comprovar as premissas da pesquisa, ou seja, verificar, no ambiente fabril, a melhoria ou não do desempenho dos processos de corte, fresamento e furação da madeira de acordo com as mudanças propostas pelo modelo de operação, otimizado em função da relação das propriedades geométricas e dos materiais das ferramentas, das condições de corte utilizadas e das espécies de madeira usinadas com os indicadores de qualidade e de produtividade.

Para validação foram levantadas estatísticas sobre o desempenho dos processos antes das mudanças propostas nas configurações das ferramentas, nas condições de corte para cada espécie de madeira processada e comparadas com os valores de desempenho do processo simulado após as mudanças. A diferença entre esses dois valores mostra a dimensão da melhoria, expressa em termos de medidas relativas para cada variável de resposta, no caso, o índice de rejeição (percentual de peças reprovadas), a vida da ferramenta e a produtividade.

Os modelos testados e o sistema foram analisados a partir de uma macro-visão, ou seja, foram vistos como uma espécie de “caixa-preta”. Para fins de observação não foram considerados o comportamento interno, nem do sistema e nem dos modelos, mas apenas e tão somente, os resultados produzidos.

A realização dessas comparações, nas quais foi utilizado teste t, permitiu comprovar as influências de cada variável na eficiência do processo de usinagem e, a partir deste ponto, estabelecer padrões de desempenho para cada conjunto madeira-ferramenta, fora dos quais, as operações de fresamento, corte e furação não são competitivas em termos de qualidade e produtividade.

3.7 Análise dos resultados da simulação

As análises dos resultados da simulação foram baseadas nos dados obtidos a partir dos experimentos com os modelos computacionais. O objetivo da experimentação foi realizar inferências e previsões sobre o comportamento e o desempenho do sistema real. Para tanto, os dados obtidos da simulação sofreram o mesmo tratamento estatístico que foi empregado nos sistemas reais.

O objetivo da experimentação é facilitar a compreensão do comportamento do sistema, medida por uma ou mais variáveis de interesse (variáveis de resposta), e como este sistema é afetado por uma ou mais variáveis controláveis e suas interações (fatores).

Com a experimentação foi possível determinar: quais são as variáveis que têm maior influência sobre as respostas; quais são os valores associados a estas variáveis, de forma que as respostas permaneçam próximas aos valores nominais estabelecidos; quais são os valores associados a estas variáveis, de forma que a variabilidade das respostas fosse mínima e; determinar quais são os valores associar a estas variáveis, de modo que a influência dos fatores não controláveis fosse minimizada.

Para concluir sobre o desempenho do sistema foi observado o comportamento das variáveis de resposta, a partir deste ponto, feitas inferências sobre o comportamento do sistema, buscando minimizar os erros e definindo a confiança estatística.

A seleção das variáveis de resposta foi feita em função do tipo de desempenho medido no sistema. Entre as variáveis de resposta estão contadores de ocorrência de tempo no sistema, tempo de espera nas filas, número de entidades nas filas, utilização de recursos, volume produzido, entre outros.

O número de replicações dos experimentos simulados foi definido de acordo com o intervalo de confiança ($\alpha=0,05$), ou seja, os limites de erros aceitáveis, da dispersão dos dados obtidos do sistema real e do tipo de sistema modelado .

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações iniciais

4.1.1 Caracterização dos processos de usinagem da madeira.

As indústrias de móveis de São Bento do Sul possuem estrutura produtiva verticalizada, com produção seriada de móveis do segmento residencial destinados aos mercados externo e interno. A pesquisa buscou cobrir os processos de usinagem em empresas de pequeno, médio e grande porte, para, assim, caracterizar o leque de problemas enfrentados durante a usinagem de madeira independente do porte das empresas.

Um dos problemas presente na coleta de dados foi a ausência, em algumas empresas, de registros históricos das variáveis envolvidas no estudo. Variáveis de resposta como índice de rejeição e vida da ferramenta foram de difícil obtenção por não haver nenhuma estatística e controle destas variáveis. Da mesma forma, alguns parâmetros de corte também não estavam claramente definidos em algumas empresas e dependiam quase que exclusivamente da experiência dos operadores de máquinas. Mas, com o levantamento de dados da produção e manutenção e entrevistas com alguns desses operadores foi possível levantar informações relevantes e que contribuíram muito para a realização deste trabalho.

A atividade de usinagem da madeira nas fábricas de móveis pesquisadas se caracteriza, basicamente, por diversos tipos de processos, como o corte, fresamento e a furação da madeira, diferenciando-se de acordo com a função que a peça ou componente exercerá na montagem dos móveis.

As operações básicas de usinagem são representadas pela Figura 25, onde é apresentado um fluxo genérico dos processos de usinagem, observados em todas as empresas visitadas.

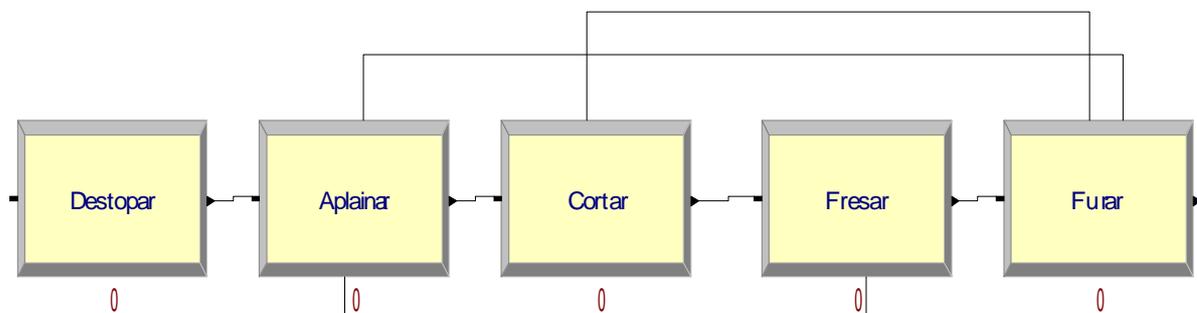


Figura 25 – Fluxo dos processos na usinagem de madeira em fábricas de móveis.

A seqüência de operações varia de acordo com a rotina de operações estabelecida para a produção de cada peça e não segue necessariamente a mesma seqüência apresentada na Figura 25. Uma determinada peça pode ser executada com apenas três operações, destopo, fresamento e furação, sem necessariamente passar pelas operações de corte e perfilagem. O seqüenciamento das operações depende da estrutura do produto, do modelo de organização utilizado (*layout*) e da programação da produção, dimensionada de acordo com as capacidades dos recursos produtivos.

Mas, mesmo assim, é possível estabelecer uma ordem lógica para as operações. Os processos de corte verificados nas diferentes unidades fabris foram o destopo, o corte perpendicular às fibras ou angular e o corte longitudinal (paralelo às fibras) e são executados com o uso de diferentes tipos de máquinas, equipadas com serras circulares que executam as operações sob diferentes condições de corte e com diferentes configurações de acordo com o material usinado, com as características das máquinas e com o projeto da peça.

A operação inicial é o destopo, que se caracteriza por um corte transversal às fibras nas tábuas de madeira serrada, utilizando seccionadoras múltiplas ou de pêndulo. As peças de madeira serrada, com espessuras que variam de 2,54 cm a 5 cm, larguras que variam de 25 a 40 cm e comprimentos que variam de 2 a 2,5 m, são classificadas de acordo com o número de nós e outros defeitos naturais. Peças com excesso de nós são recortadas em pedaços menores para reaproveitamento em *finger jointing*³. A finalidade do destopo é a de otimizar o aproveitamento das madeiras com nós e, nas tábuas sem nós, cortar o comprimento para dimensionar a peça para as operações subseqüentes de colagem lateral para confecção de painéis e/ou usinagem de acordo com o projeto da peça. Em madeiras sem grande presença de nós, as operações de *finger* de topo são dispensáveis uma vez que, há o aproveitamento total da tábua.

As operações de corte longitudinal e transversal são realizadas para dimensionar as peças em termos de largura e comprimento para, a partir daí, serem realizadas as operações de fresamento, furação e montagem. Nestas operações são utilizadas serras circulares perfiladeiras e esquadrejadeiras. Os tipos de serras variam de acordo com a madeira e as condições de corte empregadas. O Quadro 8 mostra as ferramentas freqüentemente utilizadas nos processos de corte.

³ Corte de sulcos em formato de “dedos” para facilitar a colagem de peças.

Quadro 8 – Ferramentas utilizadas no processo de corte da madeira.

Operação	Ferramenta	Função	Exemplo
Corte transversal	Serra circular	Dimensionar o comprimento da peça	
Corte longitudinal	Serra circular	Dimensionar a largura da peça	

A operação de cepilhamento (desengrosso) são as operações seguintes. Elas são realizadas com plainas desengrossadeiras e/ou desempenadeiras e tem a finalidade de melhorar a qualidade da superfície nas quatro faces das peças. É considerada uma operação de desbaste, por isso, a precisão dimensional não é tão importante, mesmo porque a peça passará por operações de acabamento da superfície em processos de fresamento e lixamento, onde atingirão suas dimensões nominais. Nesta operação as ferramentas utilizadas são cabeçotes com 3 a 4 facas retas em aço rápido ou desintegradores com múltiplas pastilhas de metal duro calçadas no corpo do cabeçote.

O grupo de operações de fresamento tem por finalidade dar forma aos perfis de madeira que serão utilizados na montagem de peças conjugadas e melhorar o acabamento da superfície. São utilizadas, para isto, uma grande variedade de máquinas, entre elas, tupias, plainas moldureiras, centros de usinagem e tupias superiores que utilizam fresas de diversas formas com pastilhas de diferentes perfis, selecionadas de acordo com a função que o perfil usinado irá desempenhar para a construção e o *design* do móvel.

As configurações de ferramenta, principalmente nas operações de fresamento, variam bastante de acordo com a função que a peça ira exercer na confecção e montagem dos móveis. Nos processos de aplainamento e fresamento de perfil são utilizados, além de pastilhas soldadas no corpo da ferramenta, cabeçotes porta-facas que dão suporte às pastilhas recambiáveis de metal duro ou aço rápido, calçadas sobre um suporte onde as mesmas são parafusadas no corpo da ferramenta. Em alguns casos, são utilizados cabeçotes hidrocentrantes de balanceamento dinâmico para reduzir as vibrações, permitir maiores velocidades de corte, maior estabilidade e reduzir ruídos e riscos de acidentes. A Figura 26 mostra o princípio construtivo destes cabeçotes.

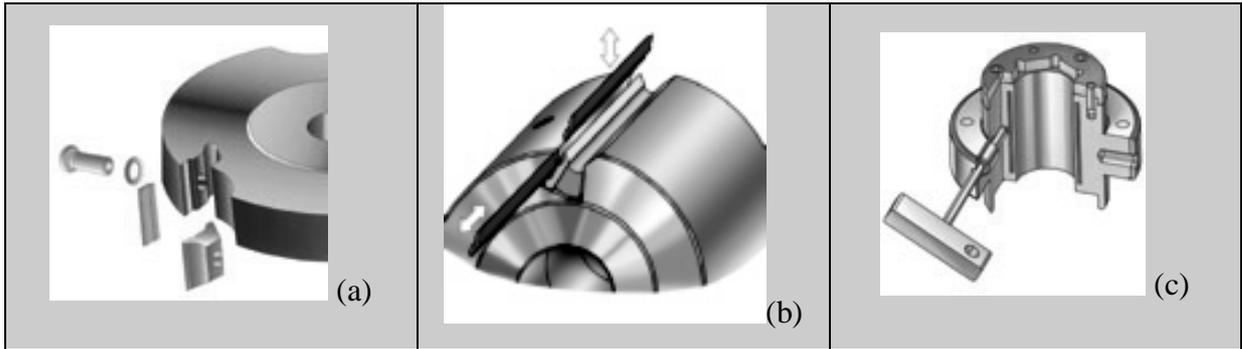


Figura 26 – Princípio construtivo de cabeçotes que utilizam pastilhas cambiáveis (a, b) e do balanceamento hidrodinâmico (c). Fonte: Leitz ferramentas.

Para obtenção dos perfis são utilizados vários tipos de pastilhas recambiáveis com diversos formatos de acordo com a função que a peça usinada irá desempenhar na montagem dos móveis. A Figura 27 mostra um exemplo dos diferentes tipos de pastilhas (retas e molduradas) utilizadas para geração destes perfis fresados.

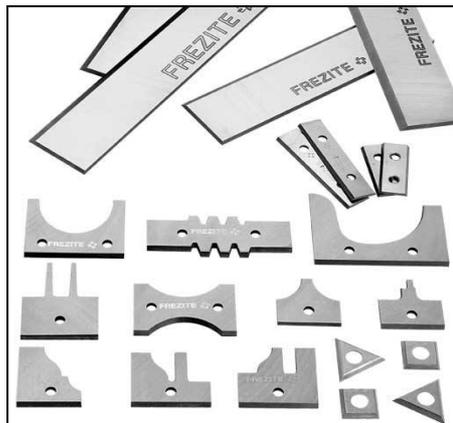
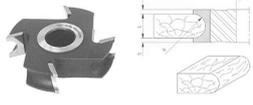


Figura 27 – Pastilhas de metal duro utilizadas no fresamento de perfil e no aplainamento. Fonte: Frezite ferramentas.

Em resumo, os processos de fresamento observados em todas as rotinas de fabricação foram o cepilhamento ou desengrosso, como operação inicial de desbaste visando a obtenção de uma superfície lisa, isenta de irregularidades e defeitos utilizando, para isso, ferramentas com três ou quatro gumes cortantes e o fresamento para abertura de canais, execução de rebaixas, quebra de cantos vivos e geração de perfis para diversas aplicações utilizando fresadoras equipadas com ferramentas de diferentes configurações, dependendo do tipo da espécie de madeira, das condições de corte e do projeto da peça.

O Quadro 9 apresenta, de forma genérica, as ferramentas utilizadas nas diferentes operações de fresamento.

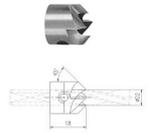
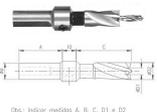
Quadro 9– Exemplos de ferramentas utilizadas nos diferentes processos de fresamento.

Operação	Ferramenta	Função	Exemplo
Aplainamento	Cabeçotes com facas retas e cabeçotes desintegradores	Eliminar irregularidades superficiais e dimensionar a espessura da peça	
Fresamento	Fresas cilíndricas: Ranhura, rebaixo, chanfro, perfil, almofada, emenda, multiraio, perfil conjugado, tarugos, etc.	Gerar perfis de diversas formas com funções de junção e encaixe	
	Fresas para tупia superior (fresamento de topo)	Abrir rasgos, canais e gerar superfícies com diversas formas.	

Por fim, o último grupo de operações de usinagem que utilizam ferramentas com geometria definida são os processos de furação. Estes processos têm por finalidade abrir furos passantes e não passantes para a conexão entre peças componentes dos móveis e de acessórios como puxadores e dobradiças. Para esta operação, são utilizadas máquinas como furadeiras manuais horizontais, verticais e angulares, furadeiras múltiplas e furadeiras oscilantes, equipadas com brocas e escareadores selecionados em função do tipo de furo a ser executado (função do furo), do material usinado e das características da máquina.

Os processos de furação observados nas rotinas de fabricação são, basicamente, furação transversal e paralela às fibras executadas em furadeiras horizontais ou verticais, múltiplas ou axiais de acionamento automático e manual e que utilizam como ferramentas de corte brocas helicoidais e, muito raramente, brocas chatas. Assim como nas demais operações de usinagem, a configuração da broca depende do tipo de material a ser usinado, das especificações de projeto da peça e das condições de corte nas quais a ferramenta irá operar. O Quadro 10 mostra as ferramentas mais utilizadas nos processos de furação da madeira.

Quadro 10 – Ferramentas comumente utilizadas nos processos de furação da madeira.

Operação	Ferramenta	Função	Exemplo
Furação	Brocas helicoidais	Realizar furos passantes e não passantes	
	Escareadores	Escarear superfícies	
	Brocas para dobradiças e puxadores	Abrir furos para dobradiças e puxadores	
	Brocas conjugadas	Abrir furos com diferentes diâmetros (furos escalonados)	
	Brocas de movimento pendular	Abrir rasgos para montagem de tarugos e encaixes.	

As máquinas e ferramentas utilizadas na usinagem para a confecção das peças variaram bastante entre as empresas pesquisadas e, até mesmo, dentro da mesma empresa, pois havia máquinas com diferentes características técnicas que eram usadas para realizar as mesmas operações. Por exemplo, numa mesma empresa na operação de furação conviviam furadeiras manuais e furadeiras múltiplas automáticas para realização das mesmas tarefas. De modo similar algumas operações de fresamento e furação eram realizadas simultaneamente em centros de usinagem e conviviam com operações semelhantes realizadas em máquinas manuais. Esta grande variabilidade do padrão tecnológico do processamento da madeira foi observada também nos estudos desenvolvidos por COUTINHO (1999), NAHUZ (1999), FARIAS (2000) e BONDUELLE (2001).

O Quadro 11 apresenta a variação das características técnicas das máquinas ferramentas utilizadas nos processos de usinagem das nove fábricas pesquisadas.

Quadro 11 - Rotação e potência das máquinas utilizadas nos processos de usinagem.

Operação	Máquina utilizada	Potência (Cv)	RPM
Aplainamento	Plaina desengrossadeira	3 a 7,5	4200 a 7500
Corte transversal	Serra circular	2 a 7,5	2500 a 4400
Aplainamento	Desempenadeira	2 a 5	3600 a 5500
Fresamento	Tupia	3 a 7,5	4200 a 10000
Corte longitudinal	Serra circular	3 a 7,5	2500 a 3650
Furação	Furadeira múltipla	1,5 a 2,25	3400 a 4200
Perfilagem	Plaina moldureira	5 a 7,5	5500 a 7500
Fresamento	Fresadora superior	3 a 7,5	9000 a 18000
Fresamento	Centro de usinagem	7,5	3000 a 18000
Furação	Centro de usinagem	1,8	3400
Corte	Centro de usinagem	1,5	3400
Furação	Furadeira Horizontal	2	2500 a 3500

É possível verificar que a potência e a velocidade de giro do eixo árvore varia muito. Isto tem uma grande influência sobre o desempenho das ferramentas, pois influi nas condições de corte e na seleção da geometria da ferramenta mais adequada para cada espécie de madeira a ser usinada. Resultados semelhantes foram obtidos por KOCH (1964), KOLLMANN; COTÊ (1984), FARIAS (2000) e GONÇALVES (2000).

Da mesma forma, a variedade de ferramentas utilizada é muito grande e depende, basicamente, do projeto do produto, das condições de corte e das configurações das máquinas para as quais elas foram dimensionadas, além do tipo de trabalho a ser realizado (operação de desbaste ou acabamento fino).

As condições de corte utilizadas e os resultados de qualidade e produtividade em cada processo dependem, também, das configurações das máquinas utilizadas, principalmente da potência transmitida ao eixo árvore, da rigidez e estabilidade do conjunto máquina-ferramenta e da velocidade de giro do eixo árvore. Essas características têm influência sobre a velocidade de corte das ferramentas, a profundidade de corte admissível e sobre o avanço da peça, para que sejam mantidos os padrões mínimos de qualidade e produtividade. BIANCHI (1996) LEMASTER (2001), SZYMANI et al (2001) e BONDUELLE (2001) também citam essas condições para alcançar melhorias no desempenho dos processos de usinagem da madeira.

Segundo NAHUZ (1999) nos países líderes do setor em nível mundial, tais como Itália e Alemanha, a tecnologia de fabricação, baseadas na avançada tecnologia de máquinas e ferramentas, permite obter ganhos significativos em qualidade e produtividade. Mas, na opinião dos fabricantes de móveis, as máquinas e ferramentas para usinagem de madeiras desenvolvida no Brasil, também

estão capacitadas para competir em nível de igualdade com a tecnologia de fabricação utilizada nestes países, não sendo para eles um fator de diferenciação e competitividade. Diferente do que concluíram MALDONADO (2001) e TEIXEIRA *et al.* (2001) segundo os quais, a atualização dos equipamentos é um fator de competitividade.

Com relação à força e potência necessária a usinagem de diferentes espécies de madeira, a maioria das empresas pesquisadas afirmou que as máquinas utilizadas nos processos de fresamento, corte e furação estão capacitadas a fornecer força necessária para realizar as operações, independente das características da madeira, mas respeitando as orientações sobre as limitações quanto às condições de corte. Este resultado diverge dos estudos desenvolvidos por KOCH (1964), McKENZIE (1964) e GONÇALVES (2000) segundo os quais, muitas falhas e perdas na produção são originadas pelo uso de máquinas com potência menor que a necessária e pela desconsideração das características físicas, mecânicas e anatômicas da madeira, principalmente na usinagem de madeiras desconhecidas e de maior massa específica.

Para analisar o efeito somente das variáveis que atuam sobre as ferramentas a variação das características das máquinas foram desconsideradas, comparando resultados apenas de máquinas com características técnicas semelhantes, ou seja, mesma potência, giro do eixo árvore e profundidade de corte admissível.

A influência da espessura dos discos de serra, da largura das fresas e do comprimento das brocas foram propositadamente desconsideradas devido a largura de corte ser uma variável que possui pouca influência sobre o desempenho dos processos de usinagem da madeira, conforme referências já citadas na revisão bibliográfica. Da mesma forma, o tipo do perfil do dente, o ângulo de bisel (perfis chanfrados), o passo dos dentes e a altura dos dentes nas operações de corte e destopo foram desconsiderados devido não ser objetivo do estudo a comparação destas variáveis sobre o desempenho dos processos. O teor de umidade da madeira também foi desconsiderado neste estudo devido não ser uma fonte de variação, uma vez que as peças usinadas estavam previamente secas, não havendo, portanto, variação significativa no teor de umidade.

Outro fator que tem influência sobre os resultados da análise é o tipo de trabalho e grau de acabamento para o qual a máquina-ferramenta está dimensionada. O tipo de trabalho é classificado em termos da qualidade do acabamento da superfície. Se o corte é classificado como corte simples, a qualidade da superfície não tem tanta importância, por isso as condições de corte e a geometria são diferentes de um corte para acabamento fino, onde a qualidade da superfície é de grande interesse. O avanço por dente (f_z) determina a qualidade de acabamento. As indústrias de móveis utilizam os seguintes valores como referência:

Usinagem de acabamento: $f_z = 0,3$ a $0,7$ mm

Usinagem média: $f_z = 0,8$ a $2,0$ mm

Usinagem de desbaste: f_z acima de $2,1$ mm.

Estes valores estão próximos aos citados por GONÇALVES (2000) e FARIAS (2000), quando estudaram as condições de corte nos processos de usinagem da madeira.

Mas este fator também não foi considerado nesta pesquisa, comparando apenas o desempenho da ferramenta para um corte normal de acordo com a função de cada processo. Por exemplo, o processo de cepilhamento é uma operação de desbaste. Por isso, o avanço por dente pode ser acima de $2,1$ mm. Mas esta condição de corte exige maior potência no eixo árvore, além de materiais e geometrias das cunhas cortantes mais apropriadas, diferentemente de uma usinagem de acabamento, como o fresamento, onde o avanço por dente pode ser de, no máximo, $0,7$ mm, exigindo menor potência e permitindo maiores velocidades de corte.

Do mesmo modo, foram descartadas as análises de operações que envolvem corte de chapas de fibra, MDF⁴, aglomerados e folheados, pois o objetivo deste estudo está focado na análise de processos de usinagem de madeira maciça.

O tipo, o tamanho e o patamar tecnológico das indústrias afetam significativamente os resultados deste tipo de estudo. A presente pesquisa limitou-se a analisar os processos de usinagem, independente do porte da empresa. O efeito do tipo e tamanho da empresa pode ser obtido analisando seus processos de fabricação, o tipo de máquina, as condições de corte, as matérias – primas utilizadas e correlaciona-los com os respectivos indicadores de desempenho em qualidade e produtividade. Deste modo, é possível prever o desempenho dos processos de usinagem para qualquer porte de empresa.

Para análise dos resultados, inicialmente, foram identificadas e classificadas as espécies de madeiras em função da massa específica aparente básica (densidade) para, depois, correlacioná-las ao desempenho dos processos de usinagem.

As espécies de madeiras utilizadas na confecção de peças e componentes dos móveis produzidos nas nove fábricas pesquisadas são mostradas na Tabela 1. As características anatômicas e as propriedades físicas e mecânicas variam muito de uma espécie para outra, o que dificultou a análise das correlações do desempenho dos diversos processos de usinagem com as propriedades da madeira. De certa forma, a generalização dos rendimentos das operações de corte, fresamento e furação só pode ser feita para grupos de espécie de madeiras com características similares. Assim, para obter um resultado satisfatório e avaliar a melhoria dos processos de usinagem, é importante conhecer a estrutura anatômica, as propriedades físicas e mecânicas, principalmente a dureza e a

⁴ MDF = *Medium density fiberboard*.

resistência ao corte, para classificar as espécies e distribuí-las em grupos para, assim, estabelecer a usinabilidade para os grupos de espécies com características similares.

Um fator importante, quanto ao desempenho dos processos de usinagem é a presença de nós. Madeiras com grande quantidade de nós mostraram que há necessidade de fazer uma classificação prévia e realizar uma operação específica para retirada dos nós e outra para juntar as peças (*finger jointing*) e realizar os demais processos, como corte, fresamento e furação. Com isso, os custos e a velocidade de transformação da madeira em peças componentes de móveis aumentam. Em madeiras com grã reta, sem nós estas operações adicionais são dispensadas. SILVA (2002) e LYPTUS (2002) também observaram a necessidade do controle destes fatores naturais como forma de melhorar o desempenho dos processos.

Tabela 1– Massa específica média das espécies de madeiras utilizadas na fabricação de móveis.

Massa específica (g/cm ³ -12%)	Espécie	Nome científico	Classe de massa específica
0,41	Pinus	<i>Pinus elliotti</i>	Baixa massa específica
0,48	Cedro	<i>Cedrela fissilis</i>	Baixa massa específica
0,68	Amapá	<i>Brosimum parinarioides</i>	Média massa específica
0,61	Curupixá	<i>Micropholis venulosa</i>	Média massa específica
0,78	Jequitibá rosa	<i>Canniana sp</i>	Alta massa específica
0,75	Muiracatiara	<i>Astronium lecointei</i>	Alta massa específica

A separação das espécies em classes de massa específica é importante para facilitar a identificação da melhor configuração das variáveis envolvidas nos processos de usinagem. No ambiente fabril é praticamente impossível configurar essa grande quantidade de variáveis para atender às especificidades de cada espécie de madeira, além do que as variações de massa específica são muito grande mesmo dentro de uma única peça. Este resultado confirma os dados obtidos por KOLLMANN; COTÊ (1984) que também alerta para a necessidade de classificação da madeira para obter ganhos de qualidade e produtividade na usinagem.

Caso contrário, seria contraproducente dimensionar os recursos de transformação para cada espécie de madeira usinada. Neste caso, o processo de fabricação seria comprometido pelas constantes trocas de ferramentas toda vez que fosse alterada a espécie de madeira. O importante para a melhoria do sistema de fabricação é conhecer o desempenho dos processos de corte, fresamento e furação para grupos de espécies com propriedades similares, e assim, selecionar as melhores alternativas para cada situação.

Segundo os fabricantes de móveis envolvidos nesta pesquisa, a propriedade da madeira mais importante para a fabricação de móveis é a grã, pois ela tem influência sobre a qualidade do acabamento, facilidade de aplicar pintura e a facilidade em usinar e secar. Para os fabricantes, a dureza, a presença de nós e desvios de grã podem afetar o desempenho e a vida das ferramentas e necessitam de máquinas mais potentes e com maior estabilidade e rigidez. As condições de corte também são afetadas. Madeiras mais duras são usinadas utilizando menores profundidades de corte, sendo necessário, por isso, passar várias vezes a mesma peça até atingir as dimensões projetadas. Este resultado difere da recomendação de PANSHIN & ZEEUW (1980), TUSET e DURAN (1986) e SOUZA (1999), segundo os quais as principais características da madeira para a melhoria dos processos de usinagem são a dureza da superfície, o teor de sílica (óxido de silício) a resistência mecânica e propriedades físicas como a massa específica e o teor de umidade.

O teor de sílica tem grande influência sobre o desgaste das ferramentas e sobre a produtividade dos processos, sendo por isso, o principal fator na seleção e introdução de uma nova espécie de madeira na fabricação de móveis.

No entanto, para a seleção e introdução de uma nova espécie de madeira para produção de móveis, de acordo com os fabricantes, as propriedades mais importantes a serem consideradas nesta seleção são a facilidade de secar e usinar. Em seguida, foi citada a resistência e, por último, a abundância da espécie. Todas essas propriedades têm relação direta com os custos de fabricação e com a qualidade da peça usinada. Propriedades como brilho, cor e textura não foram citadas como características importantes na seleção de novas espécies para produção de móveis.

Como a madeira é um material anisotrópico, a direção do corte também foi citada pelos fabricantes de móveis como uma fonte de variação adicional e que tem influência sobre o desempenho dos processos de usinagem. Porém, esta variável está relacionada com o tipo de operação, e por isso, já está sendo considerada quando se faz a análise para diferentes processos de usinagem. Por exemplo, na operação de destopo, pressupõe-se o corte na direção perpendicular as fibras e na operação de corte longitudinal pressupõe-se o corte na direção paralela às fibras. Assim, essa fonte de variação está sendo considerada nas diferentes operações de fresamento (tangencial e de topo) e furação. Este fator também foi citado por KIVIMAA(1952), KOCH (1964) e GONÇALVES (2000).

Diferente das análises de experimentos conduzidos em laboratórios, onde é possível controlar os fatores de influência, na pesquisa em ambiente fabril os resultados devem atender, antes de tudo, o compromisso com os custos de produção, com a qualidade dos produtos e com a velocidade de produção, de modo a permitir ganhos de escala.

Contudo, este tipo de análise é dificultado pelo grande número de variáveis que tem influência sobre os resultados, mas que não estão sob controle. Por isso, é necessário minimizar os efeitos das possíveis fontes de variações sobre os resultados para que sejam evidenciados os resultados apenas devidos à variação dos fatores em estudo, no caso, a interação entre propriedades das ferramentas, da madeira e seus índices de qualidade e produtividade. LEMASTER *et al* (2001) e SZYMANI *et al.* (2001) também chamam a atenção para o grande número de fatores envolvidos na usinagem da madeira e que contribuem, de uma forma ou de outra, num maior ou menor grau, para a melhoria dos processos.

A relação entre as propriedades geométricas e materiais das ferramentas, as condições de corte utilizadas e o indicador de produtividade, aqui medido em termos de número de peças produzidas durante a vida da ferramenta, foi de difícil estabelecimento devido ao fato de que, nas diferentes fábricas de móveis existem várias famílias de produtos com milhares de peças componentes com diferentes dimensões e feitas de diferentes materiais.

Para calcular o número de peças produzidas durante a vida das ferramentas em cada processo de usinagem e, assim poder estabelecer uma correlação válida com as propriedades das ferramentas e condições de corte, foi necessário desconsiderar a variação devido às dimensões das peças. Por isso, foi necessário estabelecer uma relação genérica baseada no processo de fabricação de uma peça de dimensão L (dimensão medida na direção do corte) para cada tipo de madeira usinada.

Durante a vida da ferramenta são usinadas um volume V de material removido na forma de cavacos, que correspondem a uma quantidade H de horas de processamento nas várias operações de usinagem, para diferentes condições de corte e para diferentes espécies de madeira. Como a capacidade de produção de cada operação é calculada em função dos tempos de processamento (manual e de máquina) e da vida da ferramenta (aqui desconsideramos os *setups* devido ao *mix* de produtos), essa capacidade de produção pode ser estimada também em termos de volume de cavaco removido e, conhecendo as dimensões de cada peça, o número de peças produzidas. Assim, pode ser estabelecida uma relação genérica para estimativa do número de peças produzidas durante a vida da ferramenta para uma peça de dimensão qualquer (L) na direção de corte.

Conhecendo os valores da profundidade de trabalho (a_e), da profundidade de corte (a_p) e da velocidade de avanço é possível determinar a taxa de remoção de cavaco para aquelas condições de corte e para cada espécie de madeira. Conhecendo, ainda, a vida da ferramenta (entre duas afiações sucessivas) é possível determinar o volume de madeira removido durante este período. Assim, é possível associar parâmetros de usinagem a um indicador de produtividade.

No presente estudo, para efeito de análise, foi estabelecido esse indicador em todos os processos para, deste modo, obter uma medida de desempenho da produtividade e correlaciona-los com os parâmetros dos processos.

4.2 Causas da baixa eficiência produtiva na usinagem da madeira

A partir das respostas dos questionários e dos formulários foi possível realizar uma avaliação qualitativa e outra quantitativa sobre o desempenho dos processos de usinagem. Na avaliação qualitativa foram levantadas informações sobre os problemas enfrentados na usinagem de madeiras, o posicionamento e as estratégias das empresas para superar estes problemas.

Inicialmente foi perguntado aos entrevistados sobre a estratégia competitiva da empresa, visando identificar, sob o ponto de vista das empresas, as áreas prioritárias de atuação na busca pela competitividade. Os resultados mostram que a maioria das empresas está preocupada, primordialmente, com a qualificação da mão-de-obra e com as estratégias comerciais e de *marketing*. Para eles, a qualificação dos recursos humanos na manufatura e a solidificação da marca são os principais pontos chaves para um melhor desempenho do segmento perante a concorrência. Diferente dos resultados obtidos por BONDUELLE (1997) e COUTINHO (1999) para os quais a falta de competitividade está associada a fatores como o sistema de gestão do processo e a ineficiência produtiva. Segundo a maioria dos entrevistados, a desqualificação da mão-de-obra está relacionada a altos índices de perdas na produção e baixos índices de qualidade e produtividade. Para a maioria dos fabricantes, muitas perdas no processo produtivo estão associadas à desqualificação dos recursos humanos no momento do processamento da madeira.

Um dos principais problemas enfrentados pelos fabricantes de móveis é a baixa liquidez dos investimentos devido à elevada imobilização de capital em máquinas, equipamentos e estoques de matéria-prima e produtos semi-acabados ou em processo. Por isso, a redução dos tempos desperdiçados com paradas por quebras de ferramentas ou para trocas muito frequentes pode contribuir para redução do *lead time* produtivo, aumentando a velocidade de produção e reduzindo os estoques em processo.

No entanto, a qualidade das peças e a produtividade dependem do grau de envolvimento dos operadores quanto à observação e cumprimento de procedimentos e rotinas que visam reduzir as falhas (quebras de ferramentas), o desgaste prematuro das ferramentas, os índices de acidentes de trabalho.

Procedimentos básicos como a limpeza, ajuste e calibração de máquinas e ferramentas e o cumprimento de medidas de higiene e segurança no trabalho, além do uso de parâmetros de

usinagem adequados a cada espécie de madeira contribuem pra a melhoria dos índices de qualidade e produtividade. Além disso, a seleção e utilização do material e da geometria da ferramenta para cada combinação ferramenta-peça podem aumentar a vida da ferramenta e melhorar a produtividade. Porém, na maioria das empresas, há desconhecimento dos melhores parâmetros e não existe nenhuma estimativa destes valores para usinagem de madeiras, principalmente quando são introduzidas novas espécies.

A organização industrial foi o segundo item mais citado, principalmente com relação ao grau de verticalização da produção. Este fator também foi citado pela ABIMÓVEL (2002) como causa da baixa competitividade dos móveis fabricados no Brasil no mercado externo. O *design* do produto, a certificação da matéria-prima e a tecnologia de fabricação utilizada na confecção das peças e componentes foram considerados de importância secundária para a melhoria da competitividade. Mas para MALDONADO (2001) e TEIXEIRA *et al.* (2001) o *design* ocupa papel importante na busca pela competitividade, porém, essa ainda não é a opinião da maioria dos fabricantes de móveis segundo os quais há poucas iniciativas que buscam mudar este cenário, entre elas o PROMÓVEL que busca promover o *design* como fator de competitividade na indústria moveleira.

Quando foi analisada a cadeia de operações envolvidas na transformação da madeira em peças componentes de móveis foi possível obter informações básicas para o planejamento e dimensionamento dos processos. Na análise do fluxo de fabricação, foi possível constatar que, dentre as operações aqui estudadas, o fresamento foi considerado pelos fabricantes de móveis, como a operação que causa a maior limitação de capacidade, ou seja, esta operação é considerada o gargalo porque é a operação que tem o maior número de paradas para troca de ferramentas. Por isso, é importante dimensionar as propriedades de ferramentas e condições de corte para que sejam minimizados as paradas para a troca de ferramentas causadas por desgaste e quebra de ferramentas neste grupo de operações. Este resultado está de acordo com os obtidos por FARIAS (2000) quando estudou a usinagem da madeira do gênero *Eucalyptus*.

A operação de corte aparece em segundo lugar como a operação que causa restrição de capacidade. Os mesmos cuidados dedicados ao fresamento devem ser dados com relação ao dimensionamento desta operação para, assim, alcançar a melhoria no fluxo e evitar a formação de filas e a formação de grandes estoques de materiais em processo. A operação que causa a menor restrição de capacidade é a furação, mas mesmo nesta operação é necessário conhecer as capacidades e limitações para otimizar a utilização dos recursos e reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas.

Estatísticas levantadas sobre o fluxo do processo mostram que a operação que teve a maior frequência de parada para troca de ferramentas foi o fresamento. Em seguida a operação de corte.

Este dado confirma que é na operação de fresamento que ocorrem os maiores desgastes mesmo porque é nesta operação que são utilizadas as maiores velocidades de corte. Estes resultados ratificam as conclusões obtidas por BIANCHI (1996), GONÇALVES (2000) e FARIAS (2000) sobre a importância do processo de fresamento. Além disso, as operações que apresentaram a maior frequência de falhas das ferramentas foram o fresamento, a perfilagem e o aplainamento ou desgrosso. Por outro lado o corte na direção longitudinal e a furação foram as operações que apresentaram os menores índices de quebras de ferramentas. A Figura 28 mostra, numa escala de 1 a 5, a frequência de quebra de ferramentas de acordo com o processo de usinagem.

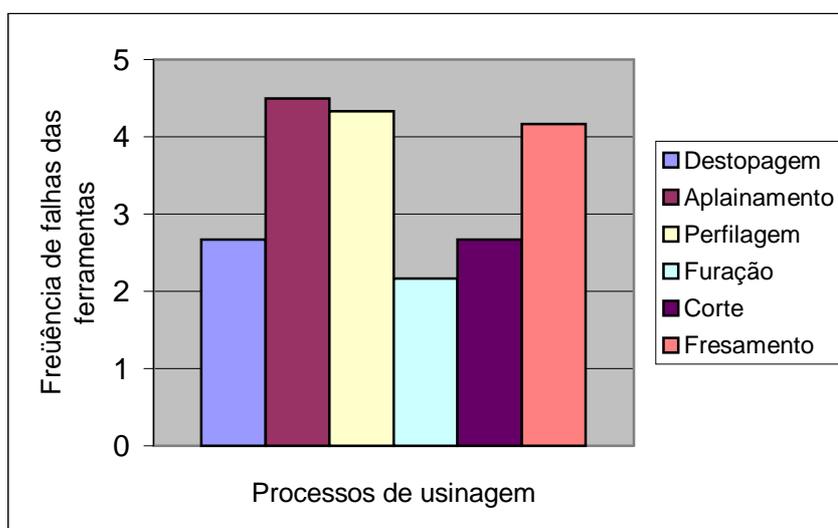


Figura 28 – Índice de falhas das ferramentas nos diferentes processos de usinagem da madeira.

A principal falha nas operações de usinagem está relacionada à quebra ou lascamento do gume devido, principalmente, à utilização de geometrias e condições de corte impróprias para as diferentes espécies de madeira. A utilização de geometria com gume muito vivo propiciou um aumento da frequência de falhas. As falhas aumentaram devido à baixa rigidez do gume, principalmente quando usinam madeiras duras com profundidades de corte incompatíveis com a geometria do gume. O desgaste na face aparece em segundo lugar como a causa de paradas para troca de ferramentas. Em terceiro, foi citado o desgaste no flanco.

Para os fabricantes, vários fatores contribuem para o aumento da ocorrência destas falhas. Entre eles, os mais citados são a ausência do conhecimento sobre a melhor geometria da ferramenta para as espécies de madeiras e condições de corte utilizadas nos diferentes processos de usinagem, a falta de conhecimento do operador sobre estas características e sobre as rotinas de operação e manutenção mais adequadas, além da indefinição do melhor ponto de troca das ferramentas. Os fabricantes de móveis ainda não estão preocupados com a geometria das ferramentas e sua correta utilização porque poucos trabalhos de pesquisa quantificam os ganhos econômicos da gestão de

ferramentas, o que dificulta a percepção da importância deste conhecimento para a melhoria dos processos. BONDUELLE (2000) já chamava a atenção para a necessidade de atender a esta demanda e definir mais claramente os parâmetros de usinagem e suas relações com a melhoria dos processos de transformação da madeira, mas pouco foi realizado neste sentido até então. Além disso, os resultados das pesquisas desenvolvidas nesta área do conhecimento não estão chegando às indústrias e ainda não estão sendo colocadas em prática, porque elas ainda não estão direcionadas ao atendimento das reais necessidades da indústria.

O tipo de defeito mais freqüente nos processos de usinagem, de acordo com as respostas dos fabricantes de móveis ao questionário, foi o “arrepimento” da superfície, caracterizado pela formação de cavaco do tipo III (KOCH, 1964) durante os processos de usinagem, resultado que está de acordo com a classificação utilizada por e GONÇALVES (2000). Para reduzir a freqüência deste tipo de defeito é necessário aumentar os ângulos de saída para diminuir o atrito entre a superfície de saída e o cavaco e verificar o grau de arredondamento do gume (raio do gume) evitando ultrapassar o limite de desgaste admissível para, deste modo, manter o “fio” de corte. Além disso, utilizar madeiras com grã reta e direcionar o corte de acordo com a orientação da grã.

A Figura 29 mostra, numa escala de 1 até 8, a ocorrência de defeitos de usinagem de acordo com o tipo. Com o conhecimento do tipo de defeito é possível identificar, mais facilmente as possíveis causas e os fatores que estão correlacionados com essa ocorrência e, assim, controlar os fatores dentro de limites aceitáveis para reduzir a freqüência dos mesmos.

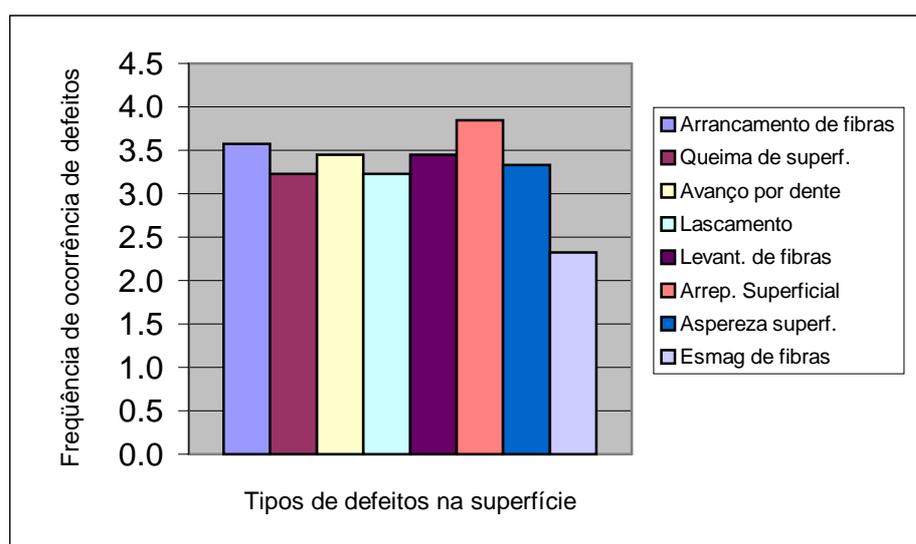


Figura 29 – Frequência de ocorrência de defeitos de usinagem de acordo com o tipo.

Questionados sobre a especificação da vida das ferramentas e suas determinações por parte dos fabricantes de ferramentas, a metade dos fabricantes de móveis afirmou que aqueles não fornecem a especificação do desempenho esperado da ferramenta, mas outra metade afirmou que estas

especificações, de modo genérico, são fornecidas pelos fabricantes de ferramentas, desde que conhecidas as condições de operação, a máquina e a espécie de madeira usinada. Isto significa que a relação entre fabricante de ferramenta e usuários ainda não está direcionada para o estabelecimento de padrões que possam orientar a definição de procedimentos operacionais ou rotinas que visem minimizar a ocorrência de falhas e o desgaste precoce das ferramentas, bem como treinar e capacitar os operadores para que os mesmos mantenham os processos sob controle, pois estes limites de controle não estão claramente definidos.

Por exemplo, no caso de uma empresa desejar reduzir o tempo de máquina e o número de *setups* para aumentar sua capacidade produtiva e utilizar uma nova espécie de madeira, os limites de controle para os parâmetros de corte não são conhecidos, o que torna, tanto a programação e controle da produção quanto à própria operação mais propícia a erros. Neste caso, a determinação destes limites é realizada a partir de um método de tentativa e erro, fato este que contribui para o aumento dos custos de produção, do índice de rejeição, da probabilidade de quebra de ferramentas, e dos riscos de acidente.

Um dos motivos para este quadro, segundo a maioria dos fabricantes de móveis, é falta de pesquisas sobre o assunto. Para eles, a determinação do ponto de troca, a pesquisa de novos materiais para ferramentas, a determinação das melhores condições de corte para cada grupo de espécie de madeira são áreas fundamentais para a melhoria do desempenho dos processos de usinagem. Porém, uma minoria ainda crê que o produto não justifica avanços na tecnologia de fabricação, o que é, na prática, um retrato da diversidade de pontos de vistas sobre a melhoria do desempenho dos processos de usinagem e depende da estratégia de cada empresa para enfrentar as questões relativas à competitividade.

Para determinar o desempenho dos processos de usinagem, inicialmente foi perguntado aos fabricantes de móveis quais as medidas utilizadas para avaliar a qualidade dos processos de usinagem. O índice de rejeição foi o mais citado na maioria das empresas. O tempo médio entre falhas foi também utilizado, mas em menor proporção. Numa das empresas, não há nenhuma medida de desempenho utilizada para avaliar a qualidade e a eficiência dos processos de usinagem. A partir da determinação do índice de rejeição é possível estabelecer medidas de controle do processo. Porém, estas medidas ainda não são relacionadas com as propriedades das ferramentas, condições de corte e espécies de madeira utilizada, o que facilitaria a identificação das causas dos defeitos e falhas na produção.

Para avaliar as capacidades físicas do sistema de transformação da madeira em peças componentes de móveis, o principal indicador utilizado pela maioria das empresas foi o tempo de

ciclo. A aderência à programação também foi citada e uma outra empresa não utiliza nenhum indicador para avaliar a capacidade física do sistema.

Determinando o tempo de ciclo, ou seja, o tempo gasto para usinagem de cada peça, em cada operação, é possível dimensionar o número de peças produzidas por turno de trabalho ou durante a vida da ferramenta. Mas para o planejamento do processo é necessário, também, que seja conhecida a demanda esperada para o mesmo período. A velocidade de corte tem grande influência sobre o aumento ou redução do tempo de ciclo, uma vez que aumentando a velocidade de corte, é diminuído o tempo de máquina e, conseqüentemente, o tempo necessário para usinar uma peça, ou seja, o tempo de ciclo. Por outro lado aumenta o número de *setups* para troca de ferramentas, uma vez que o desgaste é maior.

A ausência de um método padronizado e normatizado, baseado na avaliação de parâmetros quantitativos para avaliação da qualidade também foi citada como causa da baixa eficiência na usinagem de madeiras. Esta necessidade já era descrita por HANN (1957) mas, embora, a realidade tecnológica hoje seja bastante diferente, poucos avanços foram alcançados neste sentido. No Brasil não é diferente. Na maioria das fábricas pesquisadas a avaliação da qualidade da superfície das peças usinadas é utilizado o método visual. A identificação do padrão de qualidade aceitável, que aqui é puramente subjetivo e depende da acuidade visual do analista da qualidade, inclui muitos erros e dificulta a análise dos processos. Mesmo utilizando este critério para avaliação da qualidade foi possível correlacionar os índices de rejeição em cada processo com os parâmetros de usinagem.

Nos estudos desenvolvidos em condições de laboratório, entre eles podem ser citados como exemplo os realizados por FARIAS (2000), LEMASTER et al (2001) e GURAU *et al.* (2001), não são consideradas as realidades tecnológicas vividas em cada empresa, por isso, muitos dos avanços sugeridos por estes estudos não são praticados nas indústrias, devido entre outros fatores, às limitações tecnológicas e financeiras para a montagem de laboratórios sofisticados com equipes dedicadas ao monitoramento e controle dos processos de usinagem.

Várias características da madeira influem no desempenho dos processos de usinagem. Para os fabricantes de móveis a textura da madeira e a direção da grã são as características da madeira que têm maior influência sobre o desempenho dos processos de usinagem. Em seguida, foram citados o teor de sílica e o teor de goma e resina como características que também interferem na qualidade e produtividade dos processos. Estas informações confirmam os estudos de CHARDIN (1977) e SILVA *et al.* (1999) que mostram a influência de algumas propriedades anatômicas da madeira sobre o desempenho dos processos de usinagem.

Comparando o desempenho dos processos de fresamento praticados nos países europeus, líderes no setor, é possível constatar que, no Brasil, ainda há muito espaço para avanços na

tecnologia de usinagem. Naqueles países já é possível obter superfícies acabadas apenas com a operação de fresamento, utilizando, para isso, altas velocidades de processamento. No pólo de São Bento do Sul, todas as fábricas pesquisadas realizam o lixamento como operação de acabamento da superfície. Portanto, naqueles países, a tecnologia de fabricação permite que o processo de lixamento se torne desnecessário devido a excelência do acabamento já obtido no fresamento. Mas, como citado por FARIAS (2000), a obtenção de superfícies com este padrão de qualidade só é possível com o uso de altas velocidades de corte o que, neste estudo, não foi observado em nenhum processo dentre as empresas pesquisadas. No Brasil, esta tecnologia ainda é pouco utilizada porque a escala de produção ainda pequena para justificar os altos investimentos em máquinas e ferramentas apropriadas a execução destes processos.

Sobre o critério utilizado para determinação da vida das ferramentas, a maioria das empresas pesquisadas afirmou que utilizam a perda da qualidade e precisão de corte além do raio do gume como critério para definição do fim de vida da ferramenta nos processos de usinagem. No entanto, este critério não foi uma unanimidade. Algumas empresas utilizam a identificação de falhas ou defeitos nas superfícies das peças usinadas e vibrações do conjunto peça-máquina-ferramenta como critério de fim de vida. A falta de um critério padronizado e definido, baseado em variáveis mensuráveis, contribui para a indefinição de um ponto de troca comum, o que dificulta a análise das respostas medidas em termos de qualidade e produtividade para as diferentes combinações dos parâmetros de entrada, ou seja, das diferentes interações entre máquina-ferramenta-peça. Este quadro já era constatado por BONDUELLE (2000), mas ainda continua indefinido, pois ainda não há uma norma que oriente e padronize a definição da vida das ferramentas para cada combinação ferramenta-madeira-condições de corte como já é comum na usinagem de metais.

Para confirmar esta necessidade, quando perguntados sobre quais são os valores limites para definição da vida da ferramenta, dentro dos critérios utilizados, as empresas foram unânimes em responder que eles não existem ou não estão claramente definidos, mas há necessidade de estabelecê-los como forma de definir com mais clareza o ponto de troca de ferramentas para cada espécie de madeira e para cada configuração de ferramenta e condição de corte praticada, mesmo porque a avaliação desses limites é puramente subjetiva baseada apenas na avaliação visual.

Para melhorar o desempenho das ferramentas são utilizadas, em algumas operações, ferramentas diamantadas. Perguntados sobre os resultados da utilização deste tipo de ferramenta, a maioria dos fabricantes de móveis (60%) não sabe dizer se os custos diminuem ou aumentam com a utilização de ferramentas confeccionadas com este material. Os demais consideram que os custos com a usinagem são reduzidos com a utilização deste tipo de ferramenta devido ao aumento da vida, alta produtividade e elevado padrão de acabamento da superfície. Mas alertam para o uso

destas ferramentas apenas na usinagem de chapas e painéis muito abrasivos. Na usinagem de madeiras maciças a utilização deste tipo de ferramenta é muito restrita devido à anisotropia da madeira e a presença de incrustações de óxido de silício (sílica), o que causa quebras precoces das ferramentas, inviabilizando a produção. Na opinião unânime dos usuários, a utilização de ferramentas mais caras e mais resistentes ao desgaste e à quebra é viável, desde que a empresa trabalhe com produção seriada e numa escala de produção que justifique os investimentos neste tipo de recurso, de forma a diluir os custos unitários de usinagem.

Em termos de qualidade do produto, no caso a peça de madeira usinada, também é justificável a utilização de ferramentas mais caras e mais resistentes ao desgaste. Para os usuários, a utilização deste padrão de ferramenta propicia melhoria significativa na qualidade da superfície das peças usinadas, permitindo cumprir padrões rígidos de rugosidade da superfície e realizar *designs* e formas diferenciadas.

No entanto, quando questionados sobre a determinação das correlações entre os custos de fabricação e a qualidade de uma peça componente de móvel com as propriedades das ferramentas utilizadas na usinagem, particularmente sua vida, os usuários foram unânimes em afirmar que não há nenhuma estatística na empresa que correlacione estas variáveis. Mas é considerada uma informação importante para a melhoria dos processos e redução dos custos de usinagem. Desde os trabalhos de KOCH (1964) até os mais recentes, como os desenvolvidos por SILVA (2002), essa necessidade ainda não foi atendida, principalmente quando busca contemplar às necessidades de melhoria da qualidade, redução dos custos, aumento da produtividade e escala de produção com dados oriundos dos processos industriais e não em escala piloto, como nos estudos desenvolvidos em laboratório.

A melhoria dos indicadores de eficiência na produção como, por exemplo, o percentual de peças aprovadas em cada operação de usinagem depende, primeiramente, do correto dimensionamento das propriedades das ferramentas. As características e propriedades das diferentes espécies de madeira e as características das máquinas foram citadas como aspectos secundários para melhoria desses índices. Na opinião dos fabricantes de móveis, as máquinas já fornecem a potência e a velocidade necessária e suficiente para a obtenção de um bom acabamento da superfície e uma produtividade satisfatória. Portanto, a busca por novos materiais de ferramentas que permitam conciliar ganhos de qualidade com o aumento da vida da ferramenta se torna uma meta a ser alcançada nas pesquisas que visam melhorar o desempenho dos processos de usinagem.

A utilização de máquinas CNC é o grande diferencial na busca por melhoria do desempenho, quando se analisa a tecnologia de máquinas. A sua utilização é justificada devido, principalmente, à grande facilidade em executar tarefas mais complicadas, com formas de difícil realização e com

maior agilidade, além da precisão e baixo *setup*. Os ganhos obtidos com o uso de tecnologia CNC na usinagem de madeiras, também foram citados por BIANCHI (1996) e FARIAS (2000). Porém, a elevada imobilização de capital, e a pequena escala de produção, segundo a maioria dos fabricantes, não justifica o investimento neste tipo de tecnologia.

Nas operações básicas de usinagem o índice de rejeição (percentual de peças rejeitadas) variou de 3% a 15 % para o fresamento, entre 5 e 13% para o corte, e entre 1% e 5% para a furação. Isto confirma que a operação de fresamento é a mais sensível a variações nas condições de corte e geometria da ferramenta dentre todos os processos de transformação da madeira.

Visando compreender a posição do consumidor no momento da decisão sobre a compra de um móvel, foi perguntado aos fabricantes qual a opinião deles sobre qual o principal critério de decisão na escolha de móvel por parte dos consumidores. As respostas indicam que, segundo os fabricantes, o consumidor está preocupado primeiramente com o preço e com o *design* do produto. Isso mostra a necessidade dos fabricantes em ouvir a “voz” do cliente nas etapas de desenvolvimento do produto desenvolvimento do produto e do planejamento dos processos, o que na maioria das empresas ainda não ocorre. Na maioria dos casos o desenvolvimento do produto é realizado pelos importadores. Em seguida com questões ambientais derivadas da utilização da madeira. A espécie de madeira não foi citada como critério de escolha, indicando que é possível utilizar espécies alternativas de madeira na confecção de móveis, desde que apresentem *design* e custos atraentes. Mais uma vez a necessidade de conhecer os parâmetros de corte ideais para novas espécies é evidenciado, uma vez que, conhecidos estes parâmetros é possível obter *design* diferenciado, com elevado padrão de qualidade e baixos custos de produção.

Nos processos de usinagem, a maioria dos gumes cortantes das ferramentas é confeccionada a partir de pastilhas de metal duro. Muito raramente, ainda se utilizam PKD, para usinagem de chapas e painéis e aço rápido para usinagem de algumas peças que exigem melhor acabamento da superfície. As ferramentas de aço rápido oferecem um melhor acabamento da superfície quando comparadas às ferramentas de metal duro, mas têm sua utilização limitada devido a sua pequena vida. Na pesquisa de BONDUELLE (2001), são citados o uso de metal duro e aço rápido como os principais materiais de ferramenta, mas a melhor qualidade da usinagem com aço rápido não é citada, nem o efeito das diferentes classes de metal duro sobre a produtividade. Cabe, portanto, o uso de ferramentas de aço rápido quando são priorizadas vantagens competitivas baseadas na qualidade da peça (produção em escala artesanal) e o uso de metal duro quando é priorizada a escala de produção.

Sobre a relação entre a qualidade e a produtividade nos processo de usinagem, a geometria da ferramenta e as condições de corte, a maioria dos entrevistados afirmou que as velocidades de corte

e de avanço são as variáveis mais importantes para o controle e/ou melhoria dos processos. O ângulo de saída da ferramenta foi citado em seguida como a segunda propriedade mais importante para melhorar o desempenho da usinagem.

4.2.1 Sistema de controle do processo

Uma das principais causas da baixa eficiência produtiva das ferramentas para usinagem de madeiras, quando comparada a usinagem de metais, é a ausência de um sistema de controle que permita o monitoramento e o ajuste das condições de corte para as diferentes combinações peça-ferramenta na maioria das máquinas utilizadas. O controle de parâmetros como a velocidade de corte e os seus respectivos avanços, profundidade de corte e geometria da ferramenta poderia flexibilizar a produção e reduzir a ocorrência de falhas e desgastes precoces, com resultados sobre a qualidade e a produtividade. FARIAS (2000) cita que o sistema de controle flexibiliza as condições de corte porque permite uma grande gama de velocidades de corte e de avanço, além do controle destas variáveis.

Com exceção dos centros de usinagem que utilizam sistemas CNC para controle das condições de corte, a maioria das máquinas utilizadas nos processos de transformação da madeira são manuais, o que dificulta o controle e a manutenção dos parâmetros do processo dentro de limites específicos. Além disso, para a maioria das combinações madeira-ferramenta, esses limites não são conhecidos e dependem das estratégias produtivas de cada empresa, onde sempre é buscada uma solução de compromisso entre a qualidade e a escala de produção.

As máquinas manuais oferecem, na maioria dos casos, apenas duas ou três opções de velocidades do eixo, restringindo e limitando a utilização da capacidade das ferramentas a velocidades de corte e avanço muito abaixo das verificadas nas máquinas com dispositivos de controle CNC. Com isso, os indicadores de qualidade e produtividade apresentam números muito inferiores aos verificados em máquinas CNC. Esse resultado está de acordo com o obtido por BONDUELLE (2000).

Para ilustrar essa diferença, a Tabela 2 apresenta valores comparativos de duas máquinas, uma manual e outra CNC, que executam a mesma tarefa, no caso uma operação de fresamento, sob as mesmas condições de corte. Neste exemplo, é utilizada uma ferramenta (fresa de metal duro) com as mesmas características geométricas, usinando a madeira de Jequitibá, a qual opera numa profundidade de corte de 0.5 mm, o número de gumes (Z) é igual a 2, o diâmetro da fresa (D) é de 20 mm.

Tabela 2– Diferença entre desempenho de máquinas manuais e CNC no fresamento frontal.

Máquina	a_c (mm)	Z	D (mm)	Rotação (rpm)	v_c (m/s)	v_f (m/min)	Vida (min)	Produção (m)
Manual	0,5	2	20	6000	6,28	6	600	3600
CNC	0,5	2	20	18000	18,84	18	300	5400

Nestas condições, é possível verificar que o giro do eixo árvore da máquina CNC (18000 rpm) gerou uma velocidade de corte de cerca de 19 m/s, bem acima da velocidade de corte da máquina manual (6,28 m/s). Com isso, para a mesma profundidade de corte, é possível aumentar a velocidade de avanço e, conseqüentemente, a produtividade. Mesmo apresentando um desgaste maior (vida de 300 minutos contra 600 minutos da máquina manual), a máquina CNC, produziu, cerca de 5400 metros de madeira usinados contra 3600 metros da máquina convencional durante a vida da ferramenta.

Esta diferença tem implicações sobre as medidas de desempenho em produtividade, pois afetam o tempo de máquina e o número de *setups* e, por conseguinte o tempo de ciclo, além dos indicadores de qualidade, uma vez que a qualidade da superfície obtida em velocidades de corte mais altas é superior que a obtida em velocidades mais baixas, reduzindo, com isso a rejeição de peças devido a defeitos de usinagem ou fora de padrões de acabamento.

Os tempos improdutivos, na usinagem de madeiras, são maiores do que na usinagem de metais. Os tempos de parada para troca de ferramentas, na maioria dos casos são muito maiores, pois muitas das máquinas não possuem dispositivos de troca rápida de ferramentas.

O monitoramento contínuo dos parâmetros do processo também é uma prática na usinagem de metais, mas que ainda é pouco praticada na usinagem da madeira, o que dificulta o controle dos processos. Esse monitoramento fornece informações importantes para a gestão de operações, muitas vezes orientando medidas que busquem alcançar a redução das perdas e a ocorrência das falhas.

Através do monitoramento dos processos é possível conhecer o comportamento de cada operação e a identificação das causas das falhas e perdas na qualidade e na produtividade. Assim, é possível prevenir a ocorrência de eventos que contribuam para a redução da eficiência produtiva.

A explicação para a não utilização do monitoramento dos processos na indústria moveleira nos mesmos níveis que os praticados na indústria metal mecânica é a de que, na indústria madeireira e moveleira, muitas das práticas de gestão que visam a melhoria da qualidade e da produtividade ainda estão associadas a questões culturais e à falta de informações que subsidiem a tomada de decisão e que justifiquem adoção dessas técnicas.

A ausência de um melhor controle da qualidade da madeira também é um fator que contribui para a baixa eficiência produtiva. Medidas como a classificação da madeira, em função de propriedades físicas e mecânicas, limpeza para retirada de pedras, objetos metálicos e outras incrustações advindas da exploração reduzem a probabilidade de quebra e/ou desgaste excessivo das ferramentas.

4.2.2 Conhecimento das propriedades da madeira e dos parâmetros de usinagem.

A utilização de espécies com ausência de defeitos naturais também contribui para a melhoria do desempenho da usinagem. O controle dos processos preliminares tais como o desdobro e a secagem da madeira reduzem a ocorrência de defeitos de precisão dimensional das peças usinadas.

O desconhecimento das relações de causa e efeito entre os parâmetros do processo e as respostas do mesmo na introdução de novas espécies de madeira, dificulta o planejamento e o controle da usinagem.

A utilização de geometrias e condições de corte impróprias contribui para a redução da eficiência, pois estas condições estão associadas ao aumento nas falhas nas operações de usinagem.

Finalmente outros fatores citados são a precária organização industrial e os aspectos culturais quanto à aceitação de inovações e que dificultam a implantação de medidas que visam melhorar os índices de desempenho na maioria das empresas do setor. Isto confirma avaliação feita por BARBOSA *et al.* (1999) os quais chegaram a conclusões semelhantes.

4.3 Considerações sobre as estatísticas da análise quantitativa dos processos.

As estatísticas das variáveis de respostas, representadas pela média da vida e do índice de rejeição, apresentaram grande variação em torno dos valores médios. Essa dispersão é justificada, em parte, pelo fato da madeira ser um material heterogêneo, onde mesmo dentro de uma mesma peça de uma mesma espécie sendo usinada sob as mesmas condições, há variações da vida da ferramenta e do índice de rejeição. Além disso, outros fatores como diferença entre pequenos ajustes, manutenção e limpeza de máquinas e diferentes capacidades e habilidades dos operadores influem na dispersão desses dados, mesmo quando estão operando em condições semelhantes.

Os apêndices 4 a 9 apresentam algumas das tabelas com parte dos dados coletados para cada operação de usinagem em estudo. Nelas é possível observar o desvio padrão da vida da ferramenta e o índice de rejeição para cada combinação espécie–ferramenta–condições de corte, bem como os valores estimados para o volume de madeira usinado durante a vida da ferramenta para condições de corte conhecidas. Os dados seguiram a tendência de uma distribuição normal, tanto para a vida

da ferramenta como para o índice de rejeição em todos os processos. Por exemplo, a vida média (até a primeira afiação) de uma serra para destopo da madeira de jequitibá foi de 1500 minutos, com desvio padrão de 201 minutos para as condições de corte especificadas na tabela. A condição de homogeneidade de variância, necessária para a comparação das médias e análise do desempenho do processo, foi satisfeita uma vez que as variáveis de resposta seguiram a mesma tendência de distribuição, a qual foi verificada pelo teste de Bartlett.

A Figura 30 mostra um exemplo de distribuição de frequência para a vida da ferramenta utilizada no processo de destopo, com média 1500 minutos e desvio padrão igual a 201 minutos.

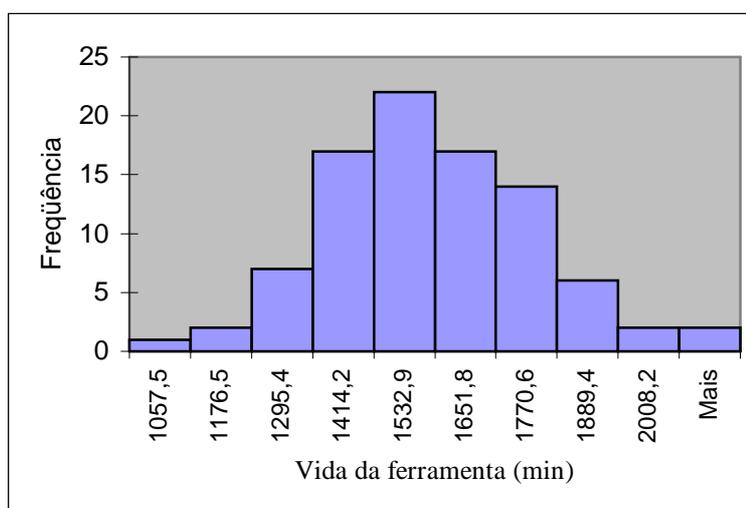


Figura 30 – Dispersão da vida da ferramenta em torno da média no processo de destopo.

A identificação da distribuição de probabilidade foi verificada a partir dos testes de aderência, *chi quadrado* e K-S, os quais apresentaram valores similares para a probabilidade dos dados serem normalmente distribuídos em torno da média (Tabela 3).

Tabela 3– Exemplo da análise da distribuição de frequência para a vida da ferramenta.

Vida Média (min)	Desvio padrão	Número de observações	Chi-quadrado	Teste K-S
1500	201	90	10,6	0,0817

4.4 Fatores relevantes para melhoria dos processos de usinagem da madeira

Após a identificação das causas da baixa eficiência produtiva na usinagem de madeiras, em comparação a usinagem de metais, foi possível concluir que um dos fatores responsáveis pela ineficiência é a indefinição sobre quais variáveis são as mais importantes para a melhoria deste

quadro de modo a permitir o controle de seus parâmetros e obter a melhoria nos índices de desempenho.

A identificação das variáveis relevantes para a melhoria dos processos de usinagem de diferentes espécies de madeira em ambiente fabril, depende, entre outros, do conhecimento das propriedades geométricas das ferramentas, das condições de corte nas quais essas ferramentas operam e das propriedades físicas e anatômicas de cada espécie de madeira usinada. Esses fatores são componentes importantes neste tipo de análise. KOCH (1964), KOLLMANN; COTÊ (1984) e FARIAS (2000) já chamavam a atenção para a importância desta identificação para a análise dos processos de usinagem.

As respostas do sistema, medidas em termos de vida da ferramenta, índice de rejeição e volume de material removido durante a vida da ferramenta foram relacionadas a estes fatores e são apresentadas nas matrizes de correlações para cada processo de usinagem em estudo.

A partir da análise das correlações foi possível determinar o grau de importância de cada fator sobre essas respostas. Coeficientes de correlações maiores indicam maior influência de um determinado fator sobre o desempenho do processo. Por outro lado, menores coeficientes de correlações indicam que o fator tem pouca ou nenhuma influência sobre as medidas de desempenho. Assim, identificando estas variáveis, fica mais fácil o controle dos processos.

4.4.1 Processo de fresamento

A identificação dos fatores relevantes para a melhoria dos processos de usinagem foi realizada a partir da definição dos coeficientes de correlação entre as medidas de desempenho (vida da ferramenta, produção e índice de rejeição) e os parâmetros dos processos.

A Tabela 4 mostra a matriz de correlação entre esses fatores e as medidas de desempenho para o processo de aplainamento. A partir da análise dos valores dos coeficientes de correlação é possível concluir que a vida da ferramenta depende, principalmente, da definição das melhores velocidades de avanço (v_f) e do avanço por dente (f_z) e, depois, da definição do diâmetro da ferramenta (D) e da velocidade de corte (v_c). Porém, estas variáveis estão intimamente relacionadas. Para que a distância entre os picos originados pelos movimentos cicloidal dos gumes na peça seja mantida constante, quando é alterada a velocidade de corte, a velocidade de avanço da peça também deve ser alterada. Deste modo, a otimização da vida da ferramenta dependerá primordialmente da definição do giro do eixo árvore, do diâmetro da ferramenta, da espessura de cavaco e do número de dentes que conduzam ao par de valores de velocidade de corte e velocidade de avanço responsáveis pelo menor desgaste. Este resultado confirma os estudos desenvolvidos por

LEMASTER *et al.* (2001), SZYMANI *et al.* (2001) e FARIAS (2000). Para estes autores o uso de condições de corte impróprias para cada espécie de madeira é a principal causa de desgastes precoces, falhas da ferramenta e perdas do padrão da qualidade da superfície usinada.

Tabela 4 – Correlações entre as variáveis no processo de aplainamento (cepilhamento).

Variáveis	α	γ	f_z	v_f	D	v_c	Me
Vida da ferramenta	-0,34	0,37	0,74	0,74	-0,49	-0,49	-0,32
Produção	-0,22	0,26	0,84	0,84	-0,33	-0,33	-0,20
Índice de rejeição	0,56	-0,59	0,39	0,39	-0,52	-0,52	0,69

A massa específica da madeira (Me) não é um fator muito importante para a melhoria da vida da ferramenta. Muitos trabalhos dedicados ao estudo da industrialização da madeira se preocupam somente em estudar as propriedades da madeira como forma de melhorar a qualidade dos produtos e o desempenho dos processos (SILVA *et al.*, 1999; SILVA, 2002). Porém, este resultado mostra que a qualidade depende, primeiramente do controle do processo de transformação e dos parâmetros de usinagem empregados. Da mesma forma, a produção (volume de madeira usinado durante a vida da ferramenta) depende essencialmente da velocidade de avanço (v_f), uma vez que a taxa de remoção de cavaco depende da velocidade de avanço e das profundidades de corte e de trabalho.

Por outro lado, o índice de rejeição é afetado principalmente pela massa específica da madeira, pelo ângulo de saída da ferramenta e pela velocidade de corte. Monitorando e estabelecendo valores otimizados para essas variáveis é possível obter melhorias no índice de rejeição.

A análise da matriz de correlações para o processo de fresamento frontal (Tabela 5) mostra que a vida da ferramenta foi influenciada, principalmente, pela velocidade de corte (v_c) e pelo diâmetro da ferramenta (D), pois as duas variáveis apresentaram as maiores correlações com a vida da ferramenta. O sinal negativo indica que com o aumento da velocidade de corte (e do diâmetro) diminui a vida da ferramenta. Portanto, o principal fator a ser monitorado para controlar o desgaste da ferramenta neste processo é a velocidade de corte. Para isso, deve ser escolhido o diâmetro da ferramenta ou a rotação que propicie a velocidade de corte ideal para cada espécie de madeira.

O volume de madeira usinada (produção) durante a vida da ferramenta e o índice de rejeição também foram significativamente influenciados pela velocidade de corte (v_c). Além disso, a massa específica (Me) contribui, de maneira menos intensa, para a variação do índice de rejeição. Assim, estabelecendo a velocidade de corte ideal para cada espécie de madeira é possível manter sob controle o desgaste da ferramenta e a qualidade da peça usinada.

Tabela 5 – Correlações entre as variáveis no processo de fresamento frontal.

Variáveis	α	γ	f_z	v_f	D	v_c	Me
Vida da ferramenta	-0,29	0,29	-0,36	-0,36	-0,73	-0,73	-0,30
Produção	-0,32	0,33	-	-	-0,82	-0,82	-0,33
Índice de rejeição	0,42	-0,44	0,53	0,53	-0,52	-0,52	0,55

No fresamento para geração de perfis, considerada por muitos autores o principal processo de usinagem da madeira na fabricação de móveis, os fatores mais relevantes para a melhoria do desempenho do processo foram a velocidade de avanço (v_f) e o avanço por dente (f_z), que tiveram grande influência sobre a vida da ferramenta. A massa específica da madeira e os ângulos de saída e incidência da ferramenta, influenciaram significativamente o volume de madeira usinado. A velocidade de corte (v_c) e a massa específica da madeira (Me) influenciaram, numa menor escala, o índice de rejeição, contribuindo, portanto, para a melhoria da qualidade do processo. A Tabela 6 mostra os coeficientes de correlação entre as variáveis.

O efeito combinado da velocidade de corte e velocidade de avanço da peça sobre a vida da ferramenta potencializa o desgaste, pois o desgaste é maior quando são utilizadas maiores profundidades de corte e maiores avanços por dente, promovendo uma maior taxa de remoção de cavaco. Quando as velocidades de avanço são baixas, o volume de cavaco retirado por giro da ferramenta é menor, gerando cavacos finos e, as vezes, não atua sobre a peça, atuando apenas no espaço vazio. Quando é alterada a velocidade de avanço, a velocidade de corte também deve ser alterada para manter a qualidade da superfície usinada dentro de padrões aceitáveis. O controle do avanço por dente depende do controle da velocidade de avanço e do controle da velocidade de corte simultaneamente.

Tabela 6 – Correlações entre as variáveis nos processos de fresamento de perfil.

Variáveis	α	γ	f_z	v_f	D	v_c	Me
Vida da ferramenta	-0,41	0,42	-0,81	-0,81	-0,22	-0,22	-0,42
Produção	-0,84	0,86	0,01	0,01	-0,45	-0,45	-0,87
Índice de rejeição	0,41	-0,55	0,25	0,5	-0,56	-0,56	0,62

A baixa correlação entre a produção (volume de madeira usinada) e a velocidade de avanço (v_f) é explicada pela pequena variação da velocidade de avanço nesta operação, o que pouco contribuiu para a alteração da produção, a qual variou, principalmente, em função da vida da ferramenta.

A partir da análise dos resultados das correlações para o grupo de processos de fresamento, como descrito também por HEISEL (1995), MUNZ (1997) e FARIAS (2000), ficou evidenciada a grande influência das condições de corte sobre a vida da ferramenta e, por conseguinte, das

capacidades de cada operação. A velocidade de avanço depende da profundidade de corte, a qual tem grande influência sobre a vida da ferramenta. Neste caso, a seleção e o controle da melhor combinação velocidade de corte e velocidade de avanço, para cada espécie de madeira são primordiais para aumentar a vida da ferramenta e manter o padrão de qualidade da usinagem.

4.4.2 Processo de corte

Para o processo de destopo a matriz de correlação, apresentada na Tabela 7, mostra a importância relativa de cada variável analisada sobre o desempenho do processo, medidos em termos de vida da ferramenta, produção (quantidade de metros lineares usinados durante a vida) e o índice de rejeição.

Tabela 7– Correlações entre as variáveis no processo de destopo.

Variáveis	α	γ	f_z	Z	v_f	D	v_c	Me
Vida da ferramenta	0,42	-0,85	0,42	-0,93	-0,28	-0,86	-0,86	-0,45
Produção	0,91	-0,08	0,94	-0,45	0,62	-0,11	-0,11	-0,91
Índice de rejeição	-0,67	-0,60	-0,60	-0,29	-0,82	-0,58	-0,58	0,62

Os coeficientes de correlação mostram que no processo de destopo, a vida da ferramenta foi influenciada, principalmente pelo número de dentes da serra (Z), pela velocidade de corte (v_c) e pelo ângulo de saída da ferramenta (γ). Essas são consideradas as variáveis onde são necessários maiores cuidados para alcançar a melhoria dos indicadores de desempenho (vida da ferramenta, índice de rejeição e produção). O número de dentes (Z), particularmente neste processo, teve grande influência nos resultados devido às variações da massa específica (Me). Madeiras mais duras requerem maior número de dentes no serramento por destopo, o que tem implicações sobre a vida da ferramenta e sobre as capacidades das ferramentas. A qualidade não foi significativamente afetada pela alteração do número de dentes, como afirmam também, GONÇALVES (2000) e BIANCHI (1996).

A correta seleção de ângulo de saída e o uso de velocidade de corte apropriadas, além do uso de serras com o número de dentes adequados a cada espécie de madeira irão, contribuir mais intensamente, para o controle do desgaste da ferramenta e melhoria dos índices de rejeição neste processo.

Por outro lado, o volume de madeira usinada (produção) foi mais influenciado pelo avanço por dente (f_z), pela massa específica da madeira e pelo ângulo de incidência (α). A definição de valores otimizados para essas variáveis irá conduzir a melhorias nas capacidades de produção. Um maior

avanço por dente permitirá uma maior velocidade de processamento e um menor tempo de ciclo. Mas maiores massas específicas significam menores capacidades de produção ao longo da vida da ferramenta. Ângulos de incidência maiores também significam menor resistência ao corte, propiciando maiores velocidades de avanço e de corte e maiores taxas de remoção de cavaco, apesar da menor resistência ao desgaste e maior probabilidade de falha da ferramenta. Isto mostra que os princípios da teoria de usinagem de metais estudada por BET (1999) e STEMMER (2001), também são válidos para a análise dos processos de usinagem de madeiras.

Na análise da matriz de correlações, mostrada na Tabela 8, é possível identificar que a vida da ferramenta foi influenciada, principalmente, pela velocidade de avanço da peça (v_f) no processo de corte longitudinal. Portanto, o controle desta variável e, por conseguinte, da profundidade de corte e do avanço por dente, contribuiu significativamente para a melhoria da vida da ferramenta. Os demais fatores contribuíram de uma forma pouco expressiva para o desgaste da ferramenta.

Quanto ao volume de madeira usinada durante a vida da ferramenta, neste processo praticamente todas as variáveis contribuíram com uma pequena parcela de influência, apresentando baixos valores de coeficiente de correlação, sendo a mais importante a velocidade de corte. Assim, a melhoria da capacidade produtiva deve ser feita em função do monitoramento e controle de todas as variáveis em estudo.

Tabela 8 – Correlações entre as variáveis para o processo de corte longitudinal.

Variáveis	α	γ	f_z	v_f	D	v_c	Me
Vida da ferramenta	-0,45	0,45	-0,67	-0,84	-0,47	-0,47	-0,49
Produção	0,04	0,20	-0,12	-0,20	-0,48	-0,48	-0,24
Índice de rejeição	0,43	-0,56	0,28	0,17	-0,52	-0,52	0,67

O índice de rejeição no processo de corte longitudinal foi significativamente afetado pela massa específica da madeira. Depois, em segundo plano, surgem como variáveis de interesse o ângulo de saída e a velocidade de corte. Deste modo, para alcançar melhorias no desempenho em termos de qualidade do processo é necessário considerar, primordialmente o controle da massa específica da madeira e, em seguida estabelecer os melhores ângulos de saída e velocidades de corte para cada espécie de modo a reduzir o índice de rejeição de peças.

4.4.3 Processo de furação

A análise da matriz de correlações para o processo de furação (Tabela 9) mostra que a velocidade de corte (v_c) e a massa específica da madeira (Me) são as principais variáveis a serem controladas, tanto em termos da melhoria dos indicadores de produtividade (vida da ferramenta e

produção) como em termos da melhoria da qualidade do processo (índice de rejeição). A velocidade de avanço (v_f), particularmente neste processo, não variou. Como a velocidade de avanço (v_f) é função do número de gumes (Z), do avanço por dente (f_z) e do giro do eixo árvore e, neste processo, esses valores foram constantes em todas as empresas (as brocas utilizadas tinham dois gumes), independente da espécie de madeira usinada, a variação deste parâmetro não foi computada, não sendo possível estabelecer uma correlação com os indicadores de desempenho do processo.

Assim, a melhoria dos indicadores de desempenho no processo de furação, está associada, principalmente a definição da melhor velocidade de corte para cada espécie de madeira.

Tabela 9 – Correlações entre as variáveis no processo de furação.

Variáveis	α	γ	f_z	v_f	D	v_c	Me
Vida da ferramenta	0,56	0,64	--	--	-0,69	-0,69	-0,68
Produção	0,56	0,64	--	--	-0,69	-0,69	-0,68
Índice de rejeição	-0,30	-0,40	--	--	-0,50	-0,50	0,42

4.5 Identificação dos parâmetros ótimos de usinagem

Após a definição dos fatores relevantes para a melhoria dos processos, o próximo passo é a identificação dos parâmetros ótimos para essas variáveis (melhores condições de corte e geometria das ferramentas). Mas a identificação desses parâmetros depende do conhecimento da usinabilidade de cada espécie de madeira e da qualidade da peça obtida no processo de usinagem.

Cada empresa tem uma política que busca o equilíbrio entre a manutenção da qualidade e o ganho de escala. Dependendo dessa política, a velocidade de produção será alterada em função das limitações impostas pela manutenção do padrão de qualidade e por características da espécie de madeira e das ferramentas, além das condições de corte.

A seguir são propostos alguns parâmetros em função dessas condicionantes para cada processo de usinagem e comparados com os propostos por outros estudos na área e com os efetivamente praticados pelas indústrias.

4.5.1 Processo de corte

Os processos de corte analisados foram o destopo, perpendicular às fibras, e o corte longitudinal, paralelo às fibras da madeira. Os dados para análise incluíram parâmetros de entrada e variáveis de saída. Os parâmetros de entrada foram os ângulos de incidência e de saída, a rotação do eixo árvore, o avanço por dente (f_z) utilizado, o número de dentes, o diâmetro da ferramenta (D)

e a velocidade de avanço da peça (v_f) praticada pelo operador. A velocidade de corte (v_c) foi calculada em função do diâmetro do disco de serra e da rotação. As variáveis de saída levantadas junto à gerência de produção das empresas foram estatísticas da vida e do índice de rejeição correspondentes às variáveis de entrada. A produção foi calculada em função da vida da ferramenta e da velocidade de avanço da peça.

A rotação utilizada para cálculo da velocidade de corte foi de 3500 rpm. O número de dentes variou conforme o diâmetro da serra, mantendo o mesmo passo (distância entre dentes) selecionado de acordo com a espécie de madeira. Para madeiras duras, foram utilizados discos de serras com maior número de dentes do que para o corte de madeiras de baixa massa específica como o *pinus* e o cedro.

Os diâmetros variaram de 200 mm até 400 mm. Deste modo foi possível analisar a influência da variação da velocidade de corte sobre o desempenho do processo de destopo. O número de dentes para corte de madeiras de baixa massa específica (*pinus* e cedro) variou de 40 para discos com 200 mm de diâmetro até 72, para discos com 400 mm de diâmetro. Para o corte de madeiras duras eram utilizadas serras com 48 dentes para discos com 200 mm de diâmetro até 96 dentes para discos de serra com 400 mm de diâmetro. Assim, juntamente com a variação do avanço por dente, o qual foi de 0,05 mm para madeiras duras e de 0,1 mm para madeiras de baixa massa específica, utilizado nas diferentes combinações madeira-ferramenta, foi possível avaliar o efeito da variação velocidade de avanço da peça (8,4 m/min até 25,2 m/min) sobre os indicadores de desempenho do processo (vida da ferramenta, índice de rejeição e produção).

Na operação de corte transversal ou destopamento, a maioria das cunhas cortantes eram feitas de metal duro. Raramente eram utilizadas ferramentas de aço rápido, geralmente apenas em pequenas empresas e em máquinas mais antigas onde a escala de produção não é grande e a qualidade do corte é priorizada, visto que o corte com serra de aço rápido produzia um corte com melhor qualidade da superfície.

A vida das ferramentas de metal duro nas operações de destopo foi cerca de cinco vezes maior que para as ferramentas de aço rápido trabalhando nas mesmas condições de corte e usinando as mesmas espécies de madeira.

Os ângulos de incidência (folga) e de saída variaram de acordo com a espécie de madeira e são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Ângulos de saída e de incidência utilizados na usinagem das diferentes espécies.

Espécie de madeira	Massa específica (g/cm ³)	γ	α
Jequitibá	0,78	2° a 5°	10°
<i>Pinus</i>	0,41	2° a 5°	15°
Muiracatiara	0,75	2° a 5°	10°
Curupixá	0,61	2° a 5°	12°
Amapá	0,68	2° a 5°	10°
Cedro	0,48	2° a 5°	15°

Os valores do ângulo de saída variaram de 2 a 5 graus, sendo utilizados os maiores valores para maiores velocidades de corte, independente da massa específica da madeira. A variação da vida da ferramenta com o ângulo de saída da ferramenta para as diferentes espécies de madeira é ilustrada pela Figura 31, onde é apresentada esta relação para o processo de destopo. Os demais processos apresentaram esta mesma tendência.

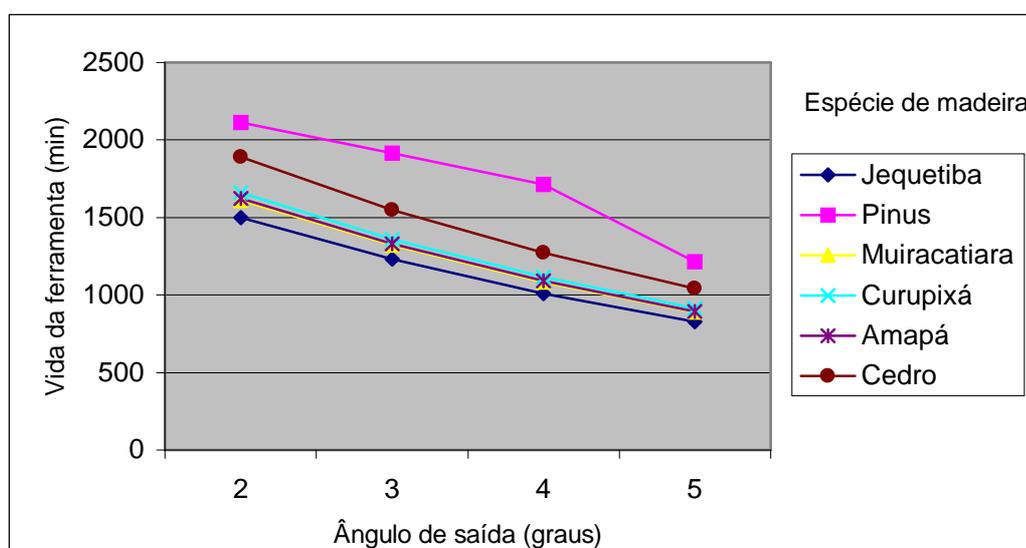


Figura 31 – Variação da vida da ferramenta com o ângulo de saída para várias espécies de madeira.

Os ângulos de incidência foram maiores para madeiras com a menor massa específica e variaram de 12 a 15 graus e menores quando eram cortadas madeiras mais duras (vide Figuras 32, 33 e 34). Neste caso os ângulos utilizados eram, na maioria dos casos, de 10 graus. Com essas geometrias, as cunhas cortantes teriam maior resistência e menor probabilidade de quebra. Estes valores estão próximos aos recomendados por GONÇALVES (2000) e SILVA (2002).

A variação da vida da ferramenta com o ângulo de incidência no processo de destopo (Figura 32) mostra que à medida que cresce o ângulo de incidência diminui a vida da ferramenta, numa

proporção linear. Esse efeito é mais pronunciado para madeiras de maior massa específica, visto pela comparação da inclinação das curvas.

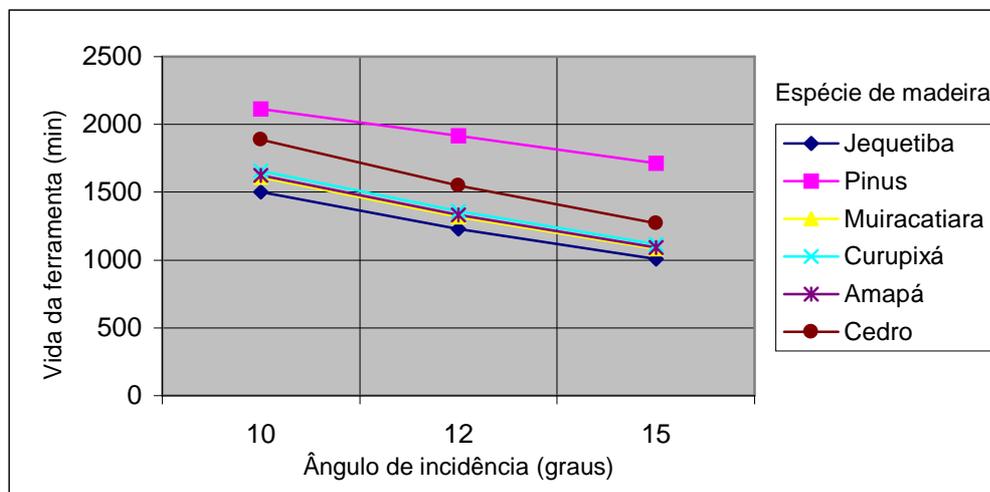


Figura 32 – Variação da vida da ferramenta com o ângulo de incidência no processo de destopo.

O índice de rejeição no processo de destopo apresentou a mesma tendência (Figura 33), ou seja, melhoria da qualidade com o aumento do ângulo de saída, sendo que o ganho foi mais significativo para as espécies de menor massa específica.

A geometria que apresenta o melhor desempenho em termos de vida útil da ferramenta são as que apresentam os menores ângulos de saída e de incidência.

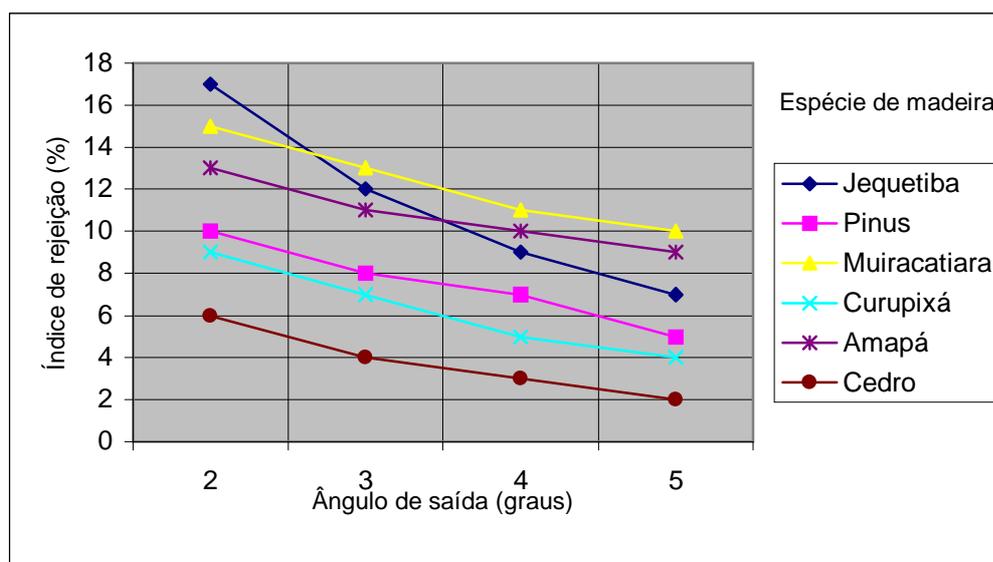


Figura 33 – Variação do índice de rejeição com o ângulo de saída da ferramenta no processo de destopo.

A grande influência da geometria da ferramenta ocorre sobre as forças e potências necessárias ao corte e sobre o acabamento da superfície usinada. No entanto, como o objetivo desta pesquisa não inclui a análise das forças nos processos de usinagem a análise buscou identificar apenas os efeitos da geometria sobre a qualidade da superfície.

Neste sentido foi verificado que, quanto maior os ângulos de saída e de incidência, melhor a qualidade do corte, pois menor o índice de rejeição. Porém, maior a probabilidade de quebra e maior o desgaste da ferramenta (menor a vida da ferramenta). No processo de corte longitudinal o ângulo de incidência variou entre 10 e 12 graus para madeiras de baixa massa específica e foi, na maioria dos casos, igual a 15 graus para madeiras de alta e média massa específica. O ângulo de saída variou entre 20 e 25 graus para madeiras de baixa massa específica e entre 15 e 18 graus para madeiras de alta e média massa específica.

Em função dos indicadores de desempenho do processo foi possível estabelecer valores de referência para essas propriedades geométricas. A partir da análise dos gráficos apresentados nas figura 32 e 33 é possível, de acordo com a estratégia de cada empresa, definir os ângulos de incidência e de saída de acordo com os padrões de qualidade estabelecidos pela gerência para alcançar a melhoria nos processos de usinagem de cada espécie de madeira. Esses valores podem ser obtidos para madeiras de várias massas específicas, em função da melhoria do índice de rejeição e da vida da ferramenta.

As condições de corte utilizadas nos processos de corte transversal (destopamento) e longitudinal, variaram muito e dependem da madeira utilizada, da velocidade de produção que o processo deve desempenhar e do padrão de qualidade aceitável estipulados por cada empresa.

Na prática, a decisão envolve uma solução de compromisso, como em todos os processos, onde é buscada conciliar a melhor qualidade possível, ou seja, o menor índice de rejeição e de perdas com a máxima velocidade de produção, buscando obter ganhos de escala.

Estes objetivos de qualidade e produtividade estão relacionados com a escolha das melhores geometrias, ângulos de saída e de incidência, os melhores valores para os avanços por dente (f_z), as melhores profundidades de corte, os melhores avanços e as melhores velocidades de corte.

O acabamento da superfície na operação de destopo não tem tanta importância, visto que é considerada uma operação de desbaste e preparação para posteriores usinagens da peça de madeira. Por isso, neste processo são priorizados a velocidade de produção e o controle das variáveis envolvidas na obtenção dos melhores índices de produtividade.

No destopo, os avanços por dentes utilizados variaram de 0,05 mm para madeiras de média e alta massa específica, até 0,1 mm para madeiras de baixa massa específica. Com isso, a velocidade de avanço, para madeiras de menor massa específica pode ser maior, do que para madeiras de

média e alta massa específica. Isso tem reflexos sobre a velocidade de produção. Portanto, madeiras mais duras admitem menores velocidades de avanço do que madeiras mais moles.

O diâmetro e o número de dentes das serras utilizadas nas operações de destopo das diferentes espécies de madeira, também tiveram influência sobre a velocidade de produção. Para madeiras de baixa massa específica são utilizados discos de serras com menor número de dentes do que para madeiras de média e alta massa específica. Aumentando o número de dentes, no corte de madeiras duras, é possível aumentar a velocidade de avanço e obter maiores velocidades de produção. Da mesma forma, diâmetros de serras maiores proporcionam maiores velocidades de corte e maior produtividade. Porém, apresentam maior desgaste das ferramentas. A avaliação do ponto ótimo depende de uma análise econômica da operação de modo a obter a máxima produção com o menor desgaste da ferramenta, evitando assim, paradas muito frequentes para troca. Para a melhoria do desempenho do processo de transformação da madeira, de modo geral, todos os demais processos devem passar por essa análise.

A Figura 34 ilustra a variação da vida da ferramenta em função da variação da velocidade de corte no processo de destopo de madeiras de várias massas específicas.

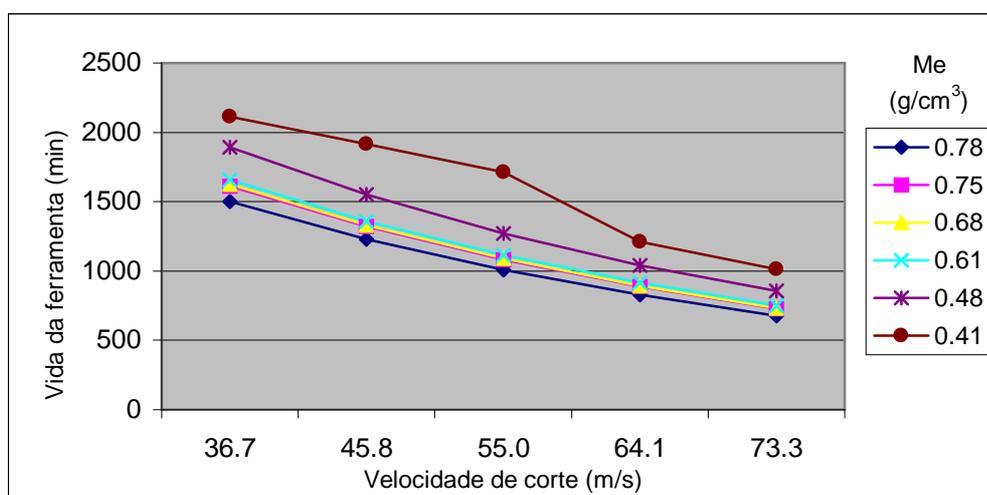


Figura 34 – Variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte para o processo de destopo de madeiras de várias massas específicas (Me).

No processo de corte longitudinal, as condições de corte adotadas variaram da mesma forma que no processo de destopo. Porém, aqui, além do controle das variáveis em função da manutenção dos indicadores de produtividade, a qualidade do corte também deve ser privilegiada para alcançar melhoria do desempenho do processo. Nesta operação a qualidade do corte também é indicador importante para alcançar a melhoria do desempenho. Por isso, é importante conciliar a melhor condição de corte de modo a obter velocidade de produção com a manutenção dos padrões de

qualidade. A Figura 35 ilustra a variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte para o processo de corte longitudinal de madeiras com diferentes massas específicas. A variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte no processo corte longitudinal segue a mesma tendência que as curvas obtidas por KOCH (1964), MEAUSOONE (2001) e LEMASTER *et al.* (2001).

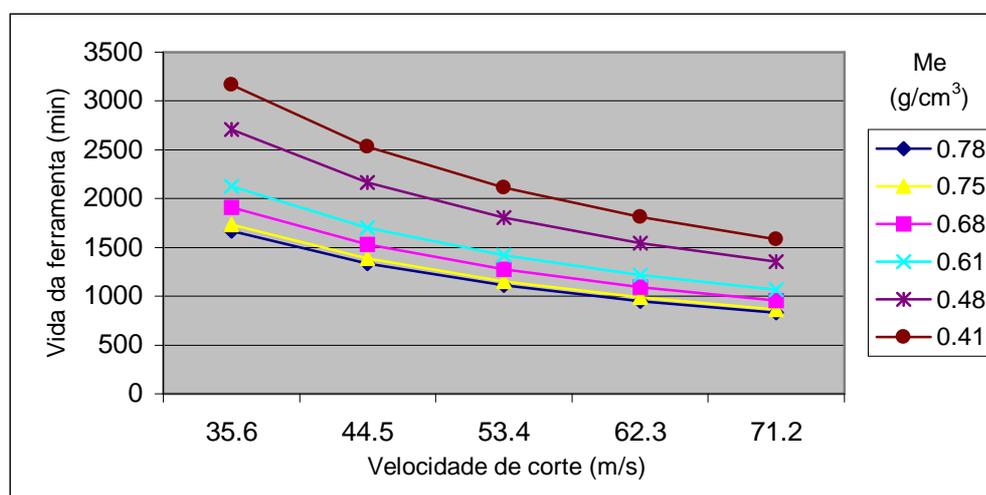


Figura 35 – Variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte no processo de corte longitudinal.

Tanto no processo de destopo como no de corte a produtividade dos processo é maior com maiores velocidades de corte, apesar do maior desgaste da ferramenta. Essa tendência foi verificada em todos os demais processos estudados.

Os padrões de qualidade são alcançados pela manutenção dos índices de rejeição dentro dos limites aceitáveis. Neste caso, é importante a definição dos melhores valores para a velocidade de avanço, profundidade de corte e velocidade de corte de modo a obter, simultaneamente, a melhor velocidade de produção e o menor índice de rejeição.

Os valores de velocidade de avanço adotados variaram de 6,8 até 30,6 m/minuto, variando conforme o número de dentes da serra e o avanço por dente. O número de dentes variou de 20 até 36 dentes para madeiras de média e alta massa específica e de 14 a 20 dentes para madeiras de baixa massa específica. O avanço por dente variou de 0,1 mm até 0,25 mm. Para madeiras mais duras foram utilizados menores valores de avanço por dente do que para madeiras moles. Os diâmetros das serras utilizados nas operações de corte longitudinal na maioria das empresas variaram entre 200 e 400 mm. Analogamente ao processo de destopo, a utilização de serras com diâmetros maiores propiciaram maior velocidade de corte. Porém, neste caso, além da maior velocidade de produção, foi constatado também menor índice de rejeição, ou seja, melhor qualidade do corte. Porém, o uso de diâmetros maiores pode causar maiores problemas de estabilidade e balanceamento do processo, sendo por isso, recomendável obter maiores velocidades de corte pelo

aumento do giro do eixo árvore e a utilização de serras com menores diâmetros. A Figura 36 ilustra a variação da velocidade de avanço (v_f) e do índice de rejeição com a velocidade de corte (v_c) no processo de corte longitudinal da madeira de Jequitibá.

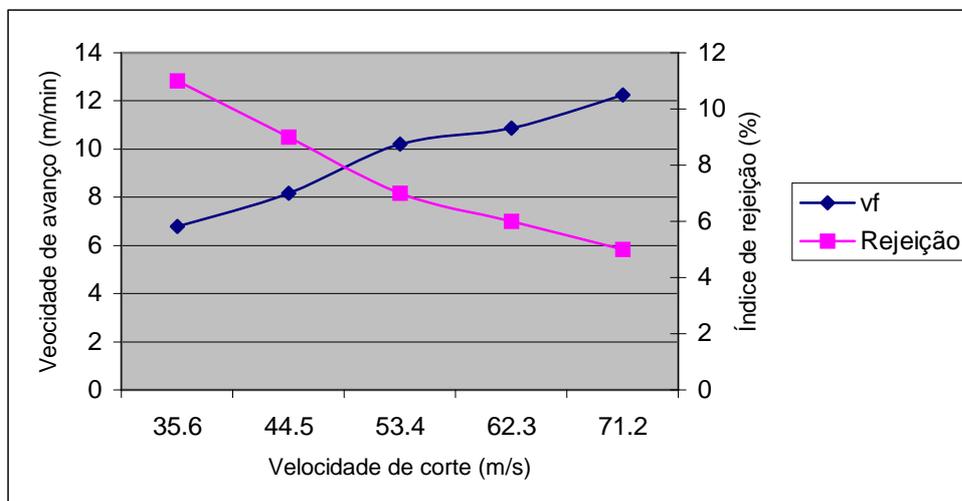


Figura 36 - Variação da velocidade de avanço e do índice de rejeição com a velocidade de corte no corte longitudinal da madeira de Jequitibá.

A partir da análise das figuras 34, 35 e 36, é possível selecionar os parâmetros de corte mais adequados a cada espécie de madeira de modo a atender aos requisitos mínimos de qualidade e produtividade estabelecidos por cada empresa.

4.5.2 Processo de fresamento

O ângulo de incidência das ferramentas no processo de aplainamento (cepilamento) foi de 15 graus para madeiras de alta e média massa específica e variou entre 10 e 12 graus para madeiras de baixa massa específica. O ângulo de saída variou entre 20 e 25 graus para madeiras de baixa massa específica e entre 15 e 18 graus para o aplainamento de madeira de alta e média massa específica. A Figura 37 mostra o efeito do ângulo de saída sobre índice de rejeição para várias velocidades de corte.

Nela é possível constatar que o índice de rejeição diminuiu com o aumento do ângulo de saída até um valor próximo a 18 graus, a partir do qual o aumento do ângulo de saída praticamente não influenciou o índice de rejeição. Essa mesma tendência foi observada para diferentes velocidades de corte. Porém, o efeito do aumento da velocidade de corte sobre o índice de rejeição é mais significativo do que o aumento do ângulo de saída.

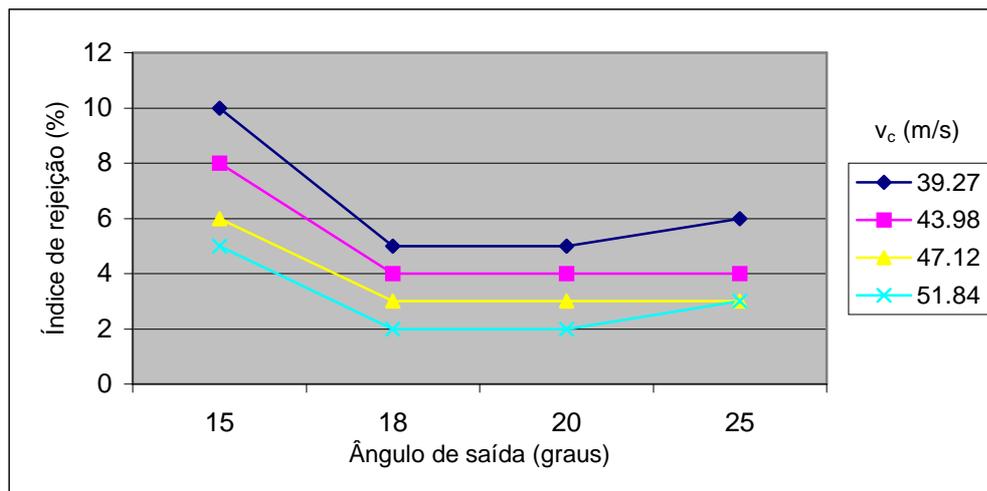


Figura 37 – Variação do índice de rejeição com o ângulo de saída em várias velocidades de corte.

Nos processo de fresamento frontal e de perfil, os ângulos de incidência e de saída utilizados foram semelhantes aos utilizados nas operações de aplainamento e corte. A diferença de acabamento da superfície foi obtida pela modificação da penetração de trabalho, das velocidades de avanço e de corte. A vida da ferramenta também foi influenciada pela alteração do ângulo de saída. A Figura 38 mostra a variação da vida da ferramenta com o ângulo de saída para várias velocidades de corte.

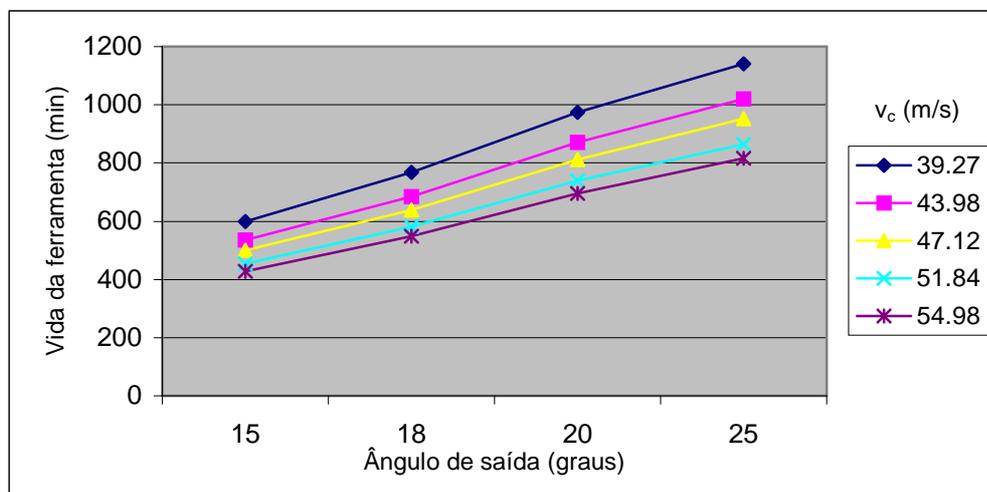


Figura 38 – Variação da vida da ferramenta com o ângulo de saída para várias velocidades de corte no processo de fresamento de perfil.

A partir da análise dos resultados do índice de rejeição e da vida da ferramenta e em função das propriedades geométricas das ferramentas, ilustrados nas figuras 37 e 38, é possível propor valores para os ângulos de incidência e de saída para madeiras de diferentes massas específicas. Para conciliar a seleção da geometria que conduza ao menor índice de rejeição e maior vida da ferramenta será necessário tomar uma decisão que depender da estratégia produtiva e da política de

capacidade, além do padrão de qualidade estabelecido pela gerência de produção de cada empresa. De toda forma, essa relação facilita a identificação desses parâmetros quando da introdução de novas espécies de madeiras, cujas propriedades físicas e anatômicas sejam conhecidas. SOUZA (1999) já levantava a necessidade de estabelecer estas relações como forma de orientar a seleção dos melhores parâmetros de usinagem e o dimensionamento dos recursos produtivos quando da introdução de espécies desconhecidas na fabricação de móveis.

Nos processos de fresamento de perfil, um fator complicador para a determinação da relação da velocidade de corte com os resultados de qualidade e produtividade foi o fato de que os diâmetros são variáveis devido ao formato do perfil dos gumes. Com isso, a velocidade de corte varia na mesma proporção e o desgaste não se dá de forma homogênea no gume. Nesta situação, na periferia do gume o desgaste é maior do que na parte mais interna. Assim, para relacionar a velocidade de corte com os seus respectivos desgastes durante o fresamento de perfil, foi tomado um ponto médio do gume para representar a velocidade de corte, pois na prática a ferramenta só é trocada quando esse desgaste atinge o ponto médio. Caso contrário, o número de trocas de ferramentas seria mais precoce e freqüente. A Figura 39 mostra a variação da vida da ferramenta de acordo com a velocidade de corte para madeiras de várias massas específicas .

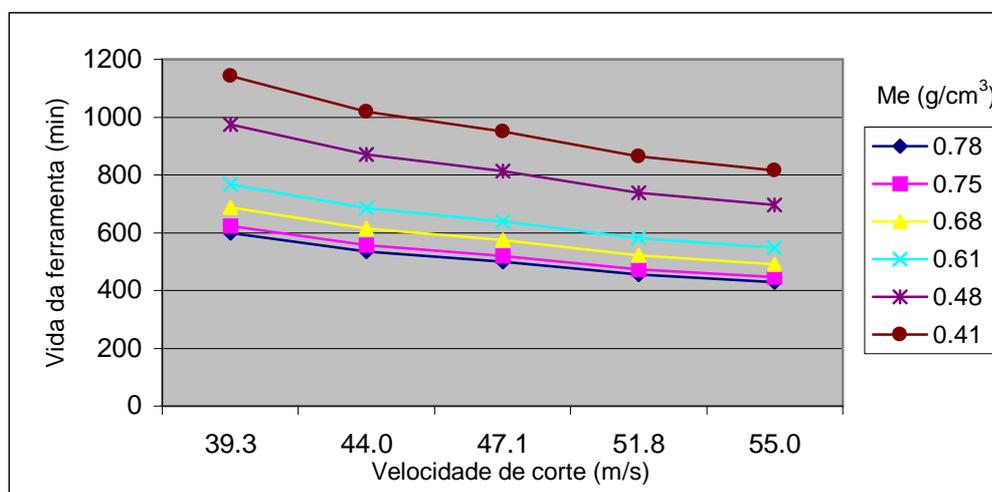


Figura 39 – Variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte no processo de fresamento de perfil de madeiras de várias massas específicas.

Porém, na prática, este ponto é determinado em função das políticas de capacidade e de padrões de qualidade estabelecidos pela gerência. Às vezes, o desgaste admissível é ultrapassado para diminuir o número de *setups*.

Outra dificuldade é a reafiação deste tipo de ferramenta. A retificação das propriedades geométricas é dificultada pelo fato do desgaste não ser homogêneo ao longo do gume. Por isso, é

buscada a obtenção de uma geometria que proporcione a retificação subsequente sem alterar significativamente os ângulos e as dimensões da cunha.

A seleção da melhor velocidade de corte e melhor velocidade de avanço irá depender da melhor relação entre o desgaste e índice de rejeição para cada espécie de madeira, buscando, conciliar os aspectos da manutenção das variáveis de controle dentro dos limites aceitáveis de qualidade e produtividade estabelecidos por cada empresa. A Figura 40 ilustra essa relação para o processo de fresamento de perfil da madeira de Jequitibá. Mas esta relação apresenta a mesma tendência para as diferentes espécies de madeiras aqui estudadas na maioria dos processos.

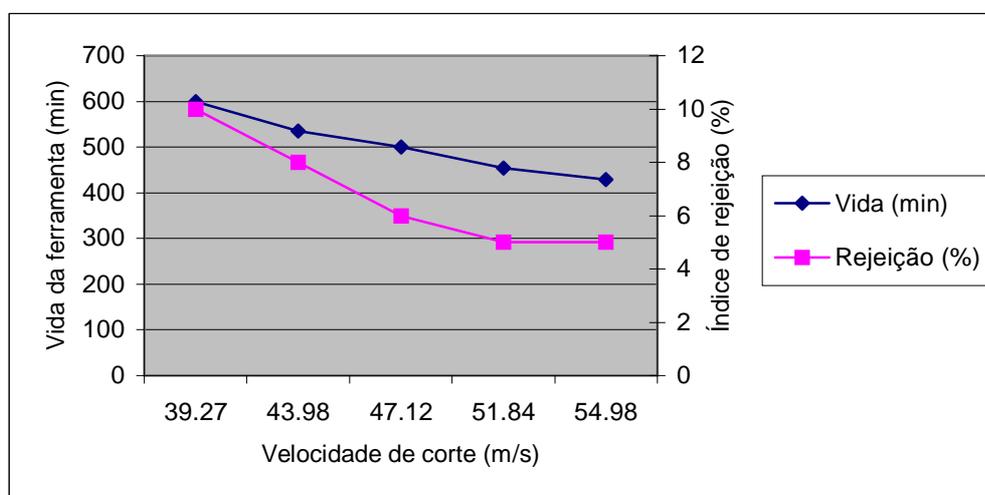


Figura 40 – Variação da vida da ferramenta e do índice de rejeição com a velocidade de corte.

4.5.3 Processo de furação

Nos processos de furação o ângulo de incidência utilizado foi de 15 graus para madeiras de baixa massa específica e de 12 graus para madeiras de alta e média massa específica. O ângulo de saída foi de 30 graus para madeiras de baixa massa específica e variou entre 20 e 25 graus para madeiras de alta e média massa específica. Essas geometrias são utilizadas em brocas de metal duro. Brocas de aço rápido, já são pouco utilizadas em processos industriais devido, principalmente, ao rápido desgaste quando comparada às brocas de metal duro.

No processo de furação, a condição de corte que influenciou significativamente os indicadores de desempenho, foi a velocidade de corte. A vida da ferramenta diminui com o aumento da velocidade de corte de forma acentuada e não linear. Para madeiras de menor massa específica o efeito do aumento da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta é maior do que na furação de madeiras mais duras. A medida em que aumenta a velocidade de corte a taxa de desgaste diminui, mostrando que alterando a velocidade de corte para valores acima 2,49 m/s, o desgaste não cresce na mesma proporção. A Figura 41 ilustra a variação da vida da broca com a velocidade de corte

para madeiras de várias massas específicas. A velocidade de avanço (v_f) e o número de gumes (Z) pouco variam nesse processo. O giro do eixo árvore também apresenta pouca variação, pois a velocidade de giro do eixo nas máquinas utilizadas para esse processo foi praticamente a mesma em todas as empresas, não havendo grandes diferenças. A profundidade de furação utilizada, também variou muito pouco, sendo alterada em função do tipo de madeira a usar.

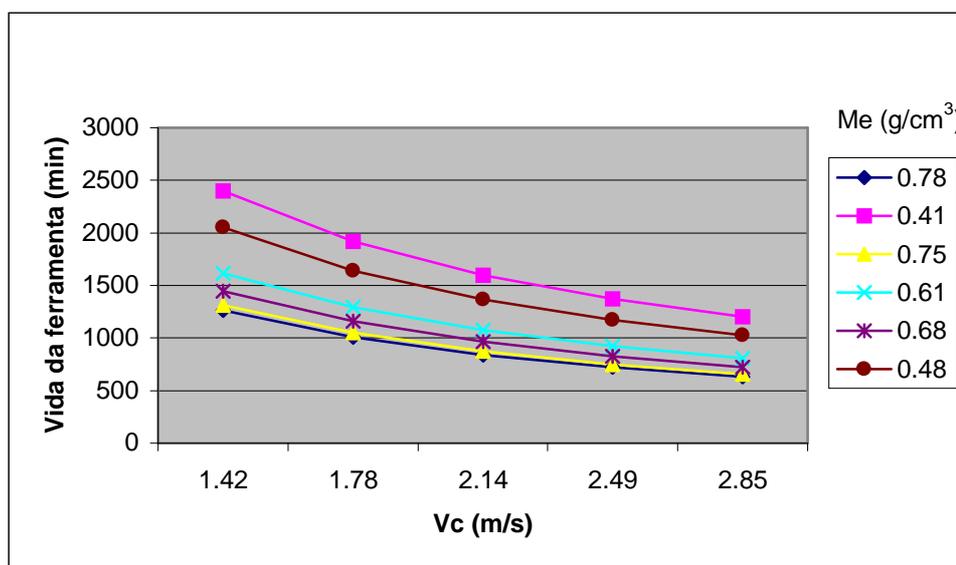


Figura 41 – Variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte e a massa específica da madeira no processo de furação.

O volume de madeira usinada durante a vida da ferramenta segue a mesma tendência, pois é um valor que depende da vida da ferramenta, ou seja, quanto maior a vida da ferramenta, maior o volume de madeira usinada.

O índice de rejeição foi pouco influenciado pelas condições de corte e, nesse processo, depende muito mais da profundidade do furo, da geometria da ferramenta e da massa específica da madeira do que da velocidade de corte. Aumentando a velocidade de corte, para todas as espécies de madeira, o índice de rejeição não apresentou melhorias significativas, diferentemente de outros processos de usinagem, onde este índice é diretamente afetado pelas condições de corte.

4.6 Comportamento dos processos em função da espécie de madeira

Para as empresas que utilizam madeiras de média e alta massa específica os principais problemas encontrados na usinagem desse tipo de matéria-prima são: quebras e desgaste excessivos quando comparada a usinagem de madeira de *pinus*; restrições ambientais quanto a certificação de origem da madeira; a receptibilidade do mercado, devido principalmente a falta de certificação da madeira e dos processos de fabricação; a baixa produtividade e maiores custos. Porém, o preço e a

qualidade do móvel fabricado com este tipo de madeira são maiores em relação ao móvel de *pinus*, compensando a baixa produtividade e os custos de produção. Comparando o desempenho dos processos de usinagem de madeiras tropicais de média e alta massa específica com o desempenho destes mesmos processos para usinagem de *pinus*, todos foram unânimes em afirmar que os resultados dependem do processo utilizado, mas comparando dois processos semelhantes, a baixa produtividade e os custos na usinagem de madeiras tropicais, devido a quebra e desgaste mais freqüentes, são maiores, porém não inviabilizam nem técnica e nem financeiramente a produção de móveis com aquele tipo de madeira.

Com a crescente diminuição da oferta da madeira de *pinus*, os fabricantes estão buscando identificar novas espécies para a fabricação de móveis, entre elas algumas espécies de *eucalyptus* e espécies nativas fornecedoras de madeiras de média e alta densidade ainda pouco utilizadas na fabricação de móveis, mas com potencial para o aproveitamento industrial.

A previsão do comportamento dos processos de usinagem diante da alteração das espécies de madeira pode ser representada pelas relações entre os fatores relevantes, determinados na análise da matriz de correlações, e as respostas de cada processo. Assim, baseado na seleção de um modelo matemático que apresente uma boa estimativa das variáveis de respostas em função da variação da massa específica da madeira é possível prever o comportamento dos processos para grupos de espécies de madeira com propriedades semelhantes.

No processo de corte, a influência da massa específica sobre o desempenho dos processos foi significativa até um determinado ponto próximo a massa específica de $0,68 \text{ g/cm}^3$, a partir do qual a vida da ferramenta apresentou tendência a estabilizar. A Figura 42 ilustra esta tendência. Isso significa que, para o processo de corte de madeiras mais duras, com massa específica acima de $0,68 \text{ g/cm}^3$, os parâmetros de corte recomendados são praticamente os mesmos, e o desempenho esperado do processo é pouco alterado. Isto é importante para a introdução de novas espécies de madeira, muitas com massas específicas acima de $0,68 \text{ g/cm}^3$ e que não são ainda utilizadas na fabricação de móveis devido ao desconhecimento dessas relações.

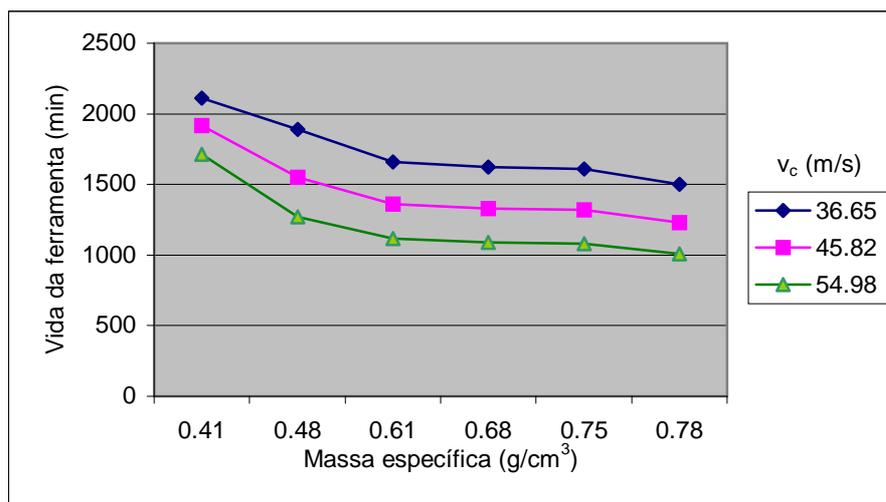


Figura 42 – Variação da vida ferramenta com a massa específica da madeira no processo destopo em três velocidades de corte.

Esta tendência foi verificada para todos os processos de usinagem em estudo. A análise do gráfico mostrado na Figura 42 pode gerar informações úteis à seleção da velocidade de corte e da vida da ferramenta em função da massa específica da madeira. Muitas relações semelhantes foram estabelecidas entre a potência de corte e a vida da ferramenta tais como as obtidas por KOLLMANN; COTÊ (1984) e FARIAS (2000). Mas poucos resultados envolvem a estimativa da vida da ferramenta em função da massa específica da madeira.

4.6.1 Modelos analíticos para previsão das variáveis de resposta

O objetivo da análise de regressão foi determinar o melhor modelo matemático para realizar estimativas da vida da ferramenta, do índice de rejeição e do volume de madeira usinado em função dos fatores relevantes para a melhoria dos processos.

Para isso, foram utilizados os modelos de equações apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Modelos matemáticos utilizados para estimativa dos indicadores de desempenho (vida da ferramenta, índice de rejeição e volume de madeira usinado).

Equação	Modelo
1	$K = b_0 + b_1 * v_c + b_2 * v_f + b_3 * Me$
2	$K = C + \exp (b_0 + b_1 * v_c + b_2 * v_f + b_3 .*Me)$
3	$K = b_0 + b_1 * v_c^x + b_2 * v_f^y + b_3 * Me^z$

Onde:

K = variável dependente (vida da ferramenta, índice de rejeição e volume de madeira usinado)

b_0, C, X, Y e Z = constantes

v_c = velocidade de corte (m/s)

v_f = velocidade de avanço da peça (m/min)

Me = massa específica da madeira (g/cm^3).

A proposição destes modelos aditivos foi baseada na análise de tendência de variação dos dados e nos modelos utilizados na construção de bancos de dados de usinagem mas diferem dos modelos multiplicativos comumente utilizados na elaboração dos bancos de dados de usinagem de metais como o CINFUS desenvolvido por BOEHS (1988) e citado por STEMMER (2001).

O erro padrão da estimativa foi escolhido como critério de seleção dos modelos por este representar o desvio médio dos valores estimados pelo modelo matemático em relação aos valores reais e não ser afetado pelo número de parâmetros. Este valor é tradução numérica dos resíduos gerados pela regressão, portanto, quanto menor for o erro padrão da estimativa, maior será a acuracidade do modelo matemático obtido a partir da regressão.

A análise dos resíduos gerados pelo modelo matemático mostrou graficamente a diferença entre os valores estimados e os valores observados.

4.6.1.1 Estimativa da vida da ferramenta

Para a estimativa da vida da ferramenta o modelo número 2 foi o que apresentou o menor erro padrão da estimativa para a maioria dos processos, com exceção do processo de destopo, onde o modelo 3 se apresentou com o melhor ajuste aos dados reais. A tabela 12 apresenta os parâmetros obtidos por regressão para os modelos selecionados para representar a vida da ferramenta em função das condições de corte e da massa específica da madeira.

Tabela 12 – Equações ajustadas por regressão para previsão da vida da ferramenta em função das velocidades de corte e avanço e da massa específica da madeira nos diversos processos de usinagem.

Processo	Equação ajustada	Erro	R^2
Destopo	$K = -57616 + 64374 * v_c^{0,023} + 13,05 * Me^{4,16}$	97,02	0,94
Corte longitudinal	$K = 447,34 + \exp(9,36 - 0,015 * v_c - 0,16 * v_f - 0,66 * Me)$	113,16	0,95
Aplainamento	$K = -1331,53 + \exp(10,06 - 0,023 * v_c + 0,021 * v_f - 1,43 * Me)$	612,66	0,97
Fresamento frontal	$K = 37,07 + \exp(8,70 - 0,14 * v_c - 0,24 * v_f - 2,11 * Me)$	13,98	0,98
Fresamento de perfil	$K = 85,78 + \exp(9,58 - 0,25 * v_c - 0,04 * v_f - 2,11 * Me)$	20,88	0,99
Furação	$K = 233,62 + \exp(9,43 - 0,62 * v_c - 2,16 * Me)$	36,71	0,99

A análise gráfica dos resíduos das estimativas (Figura 43) mostra a relação entre os valores estimados e os valores observados para a vida da ferramenta no processo de fresamento de perfil. A análise dos resíduos mostra que não houve tendenciosidade nas estimativas. O gráfico dos valores observados “versus” valores estimados mostra que, apesar de existirem *outliers*⁵ os modelos podem ser úteis para avaliar a tendência de variação da vida da ferramenta com a variação das condições de corte e da espécie de madeira.

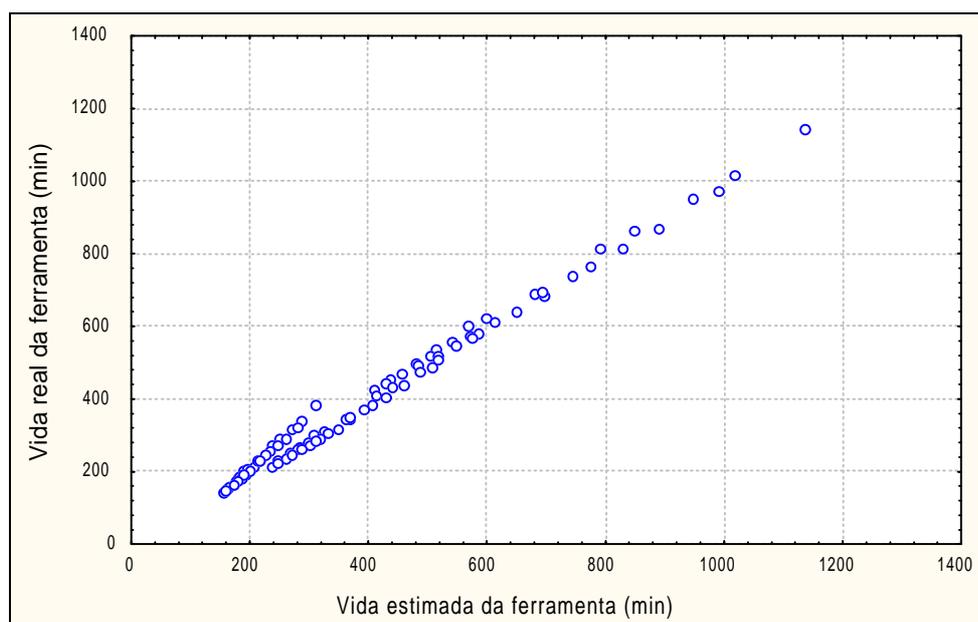


Figura 43 – Valores estimados versus valores reais para estimativa da vida da ferramenta.

A partir da análise do gráfico mostrado na Figura 43, é possível observar o quão estão próximos os valores estimados para a vida da ferramenta e os valores reais coletados nas fábricas.

Para ilustrar a aplicação do modelo matemático, a Figura 44 mostra a estimativa da vida da ferramenta no processo de fresamento periférico em função da velocidade de corte e da massa específica aparente da madeira. Portanto, conhecendo a velocidade de corte (v_c) e a massa específica da madeira (Me) é possível estimar a vida da ferramenta.

Este gráfico foi gerado a partir da equação obtida pelo processo de regressão e permite, em se conhecendo a velocidade de corte e a velocidade de avanço, estimar a vida da ferramenta até a sua primeira afiação ou, de outra forma, estabelecer uma estimativa do ponto de troca da ferramenta.

⁵ *Outliers* – termo em inglês utilizado para representar pontos com desvios acima de 3 vezes o desvio-padrão.

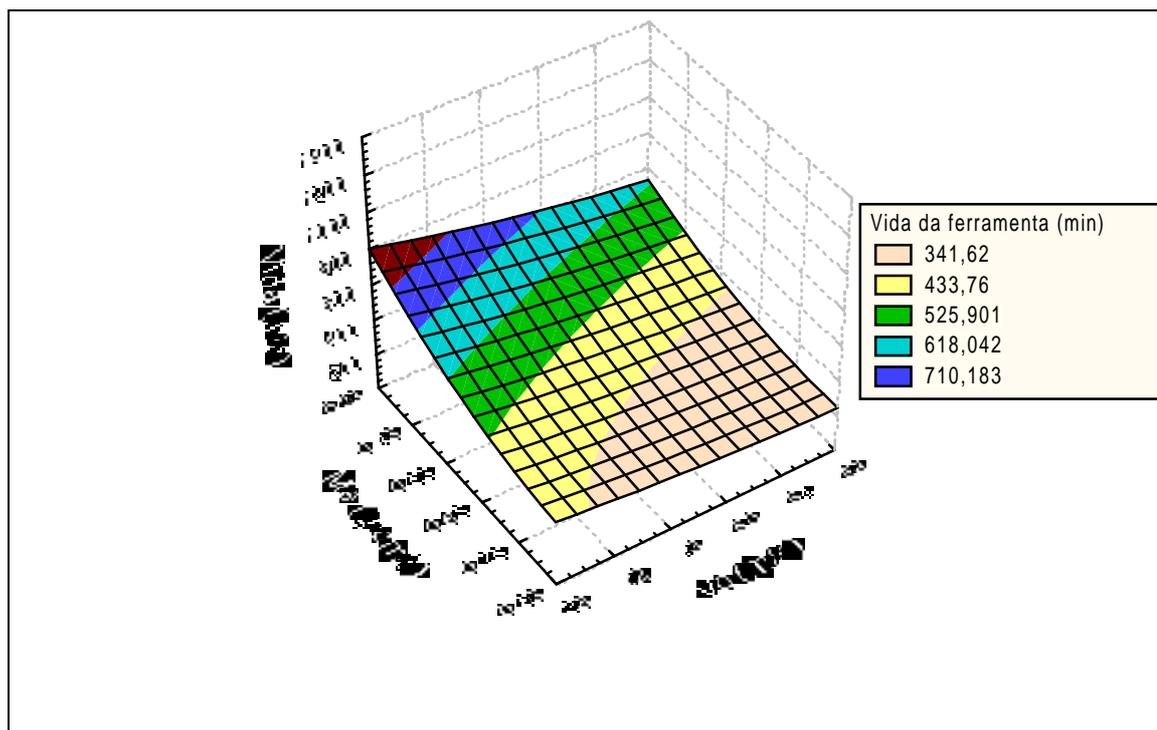


Figura 44 – Estimativa da vida da ferramenta em função da velocidade de corte e da massa específica da madeira.

4.6.1.2 Estimativa do índice de rejeição

A estimativa do índice de rejeição seguiu os mesmos procedimentos utilizados na estimativa da vida da ferramenta, utilizando os mesmos modelos matemáticos. A diferença é que, como as correlações entre o índice de rejeição e os parâmetros de usinagem não foram altos, a estimativa do índice de rejeição não foi tão precisa quanto à estimativa da vida da ferramenta, apresentando um erro padrão da estimativa bem maior. Essa pequena correlação entre os parâmetros de usinagem e o índice de rejeição pode ser explicada, como já citado, pelos fatores que não estão sob controle e que não foram incluídos neste estudo ou, ainda, pela subjetividade do método de avaliação da qualidade e ausência de um método padronizado da avaliação da qualidade das peças e que sejam utilizados por todas as empresas, o que implica em erros que não podem ser estimados e que influem no estabelecimento de uma correlação mais precisa. Além disso, a qualidade da peça depende, também das características anatômicas de cada espécie de madeira, efeito que não pode ser controlado, mas apenas minimizado. Esta pequena correlação entre os parâmetros de usinagem e as irregularidades resultantes do processo de usinagem está de acordo com os resultados obtidos por GURAU *et al.* (2001).

Apesar disso, foi possível estimar o índice de rejeição a partir dos parâmetros de usinagem e da massa específica da madeira utilizando os modelos ajustados aos dados coletados. A Tabela 13

apresenta os resultados do processo de regressão para o ajuste e seleção dos modelos matemáticos utilizados para estimativa do índice de rejeição.

Tabela 13 – Equações ajustadas por regressão para previsão do índice de rejeição do processo em função das velocidades de corte e avanço e da massa específica da madeira.

Processo	Equação ajustada	Erro	R ²
Destopo	$K = 401711 + 496,25 * v_c^{(-1,22)} - 117,42 * v_f^{(-161,43)} + 11,42 * Me^{(4,38)}$	0,98	0,90
Corte longitudinal	$K = 532,65 - 136,55 * v_c^{(0,037)} - 372,54 * v_f^{(-0,002)} + 38,20 * Me^{(8,78)}$	0,96	0,92
Aplainamento	$K = 5,34 - 0,15 * v_c + 0,063 * v_f + 16,00 * Me$	1,21	0,93
Fresamento frontal	$K = -1,08 + \exp(0,042 - 0,034 * v_c + 0,16 * v_f + 2,04 * Me)$	1,40	0,94
Fresamento de perfil	$K = -671,11 + 618,06 * v_c^{(-0,02)} + 98,12 * v_f^{(0,013)} + 15,76 * Me^{(5,09)}$	1,06	0,90
Furação	$K = -2348,86 + 3,04 * v_c^{(-2,75)} + 2351,14 * Me^{(0,0005)}$	0,52	0,68

4.6.1.3 Estimativa do volume de madeira usinado

Na estimativa do volume de produção, a precisão dos modelos matemáticos foi maior (Tabela 14). O volume de madeira usinado durante a vida da ferramenta depende basicamente da taxa de remoção do cavaco e da vida da ferramenta. Para maior velocidade de avanço e profundidades de trabalho e de corte, maiores serão a taxa de remoção de cavaco, porém, menor a vida da ferramenta e pior a qualidade da peça usinada. Portanto, para processos de desbaste (por exemplo, aplainamento), onde é necessária uma alta taxa de remoção de cavaco, é preferível obter uma maior taxa de remoção de cavaco. Já para processos de acabamento é aconselhável o uso de menores taxas de remoção de cavaco. Para alcançar este objetivo sem reduzir a velocidade de transformação e a vida da ferramenta é possível reduzir a penetração de trabalho e aumentar a velocidade de corte e a de avanço até um limite onde o desgaste não aumente significativamente o número de *setups*.

Tabela 14 – Equações ajustadas por regressão para estimativa do volume de madeira usinada em função das velocidades de corte, de avanço e da massa específica da madeira em cada processo.

Processo	Equação ajustada	Erro	R ²
Destopo	$K = 0,54 + \exp(2,07 - 0,04 * v_c + 0,10 * v_f - 4,74 * Me)$	0,06	0,98
Corte longitudinal	$K = 0,85 - 0,003 * v_c + 0,002 * v_f - 0,16 * Me$	0,06	0,57
Aplainamento	$K = 100,21 - 46,47 * v_c^{(0,18)} + 348 * v_f^{(-77,16)} + 2,96 * Me^{(-1,62)}$	1,21	0,93
Fresamento de perfil	$K = 4,77 + \exp(5,35 - 0,028 * v_c - 2,38 * Me)$	0,31	0,99
Fresamento frontal	$K = 530,83 - 85,23 * v_c^{(-0,0008)} - 445,39 * Me^{(0,00015)}$	0,01	0,95
Furação	$K = 0,079 + \exp(1,44 - 0,62 * v_c - 2,16 * Me)$	0,01	0,99

O uso das equações ajustadas aos modelos matemáticos propostos, permite prever a vida da ferramenta, o índice de rejeição e o volume de madeira usinada durante a vida da ferramenta, conhecendo-se a massa específica da madeira (M_e), a velocidade de corte (v_c) e a velocidade de avanço da peça (v_f). Assim, a determinação do ponto de troca das ferramentas pode ser estabelecido para qualquer combinação ferramenta-peça, desde que conhecidas as variáveis independentes. A previsão do volume de madeira usinada também é útil, no planejamento e controle da produção, principalmente quando da usinagem de novas espécies de madeira.

4.7 Relação entre a usinabilidade da madeira e a eficiência dos processos

A usinabilidade das madeiras utilizadas nos processos de fabricação das peças componentes de móveis, segundo vários fabricantes de ferramentas e fabricantes de móveis, depende de outros fatores além das características das ferramentas, características das máquinas e das condições de corte empregadas. No entanto esse aspecto não é considerado na maioria dos trabalhos dedicados ao estudo da usinagem de madeiras. A determinação da vida das ferramentas depende também de fatores como a capacitação profissional dos operadores de máquinas, das condições ergonômicas e motivacionais do trabalho, da gestão das operações de acordo com as políticas internas de qualidade e produtividade de cada empresa, envolvendo técnicas e procedimentos de manutenção preventiva e documentação dos processos, o que pode, por exemplo, justificar a diferença de vida de uma ferramenta em duas empresas que utilizam a mesma ferramenta, num mesmo processo, nas mesmas condições de corte e com madeiras da mesma espécie.

Algumas empresas preferem colocar em segundo plano a gestão das capacidades das ferramentas, alegando que os custos devido ao desgaste das ferramentas são insignificantes diante de outros fatores de produção.

Por outro lado, empresas que adotaram os procedimentos adequados de gestão de ferramentas, identificando o ponto ideal de troca, possuem maiores índices de aproveitamento, melhor qualidade dos seus produtos, maior produtividade e maior flexibilidade produtiva. Este melhor desempenho, devido à práticas de gestão adequadas, também foi descrito por BONDUELLE (2001) quando estudou a relação entre custos, qualidade e desgaste do gume das ferramentas utilizadas na usinagem da madeira.

Um exemplo prático destas diferenças é a de que, numa empresa pesquisada, a utilização de ferramentas diamantadas (PKD) foi descartada devido à freqüente quebra durante os processos de corte e fresamento de madeira maciça, mesmo este tipo de ferramenta apresentando rendimentos que variam entre 50 e 100 vezes a durabilidade de uma ferramenta similar feita em metal duro,

além da melhor qualidade da superfície usinada. Numa outra empresa esse índice de quebra foi reduzido mediante a adoção das seguintes providências: seleção e classificação das peças de madeira a serem usinadas; evitar o uso de madeiras com nós ou desvios acentuados de grã, retirada de incrustações de pedra ou areia devido à manipulação e armazenamento incorreto da madeira; uso de madeiras com tensões internas devido a programas de secagem inadequados, enfim, evitando desta forma a ocorrência dos fatores que contribuem para a quebra precoce desse tipo de ferramenta, que são na maioria das vezes, causados por materiais duros que causam esforços adicionais sobre a cunha de corte, o que causa mudanças bruscas na direção de corte, efeito para o qual a ferramenta não apresenta rigidez suficiente devido à geometria da cunha.

As ferramentas de metal duro são as mais utilizadas devido a sua durabilidade, diversidade de formas e aplicações e preços mais acessíveis. Mas mesmo nas ferramentas de metal duro as pastilhas são confeccionadas a partir de diferentes classes de dureza, de acordo com as espécies de madeira a serem usinadas e as condições de corte empregadas.

Para os fabricantes de ferramentas, o metal duro é um material frágil e que aumenta sua fragilidade na medida em que aumenta sua dureza. Quanto mais dura for a classe do metal duro, mais difícil de conseguir-se um bom raio do gume (fio), já que este raio de gume exige um ângulo de cunha maior para evitar as micro rupturas. Isto pode afetar o bom acabamento da madeira. Por isso, é necessário buscar soluções de compromisso, encontrando-se para cada aplicação o melhor equilíbrio entre dureza e tenacidade, sendo por isso tão importante a seleção da classe adequada.

As qualidades de microgrãos foram as primeiras classes desenvolvidas especificamente para a usinagem da madeira, já que as outras classes de metal duro utilizadas até agora eram classes desenvolvidas para usinagem de metais. No metal duro com microgrão é possível obter maior dureza sem perda de tenacidade. Neste caso, a solução de compromisso passa pela avaliação econômica, já que o metal duro com microgrão é mais caro. A tendência, no futuro, é utilizar classes de metal duro mais resistentes ao desgaste. Na Europa, por exemplo, já existem classes como o HDF, desenvolvidos para competir com o diamante policristalino (PKD) na usinagem de madeiras.

Segundo a norma ISO (Européia) as classes de metal duro são definidas de acordo com o seu uso e não por sua composição. Segundo esta norma, as classes K30, K20, K10 e K01, são utilizadas na indústria da madeira. Mas, na realidade, cada fabricante desenvolve suas próprias classes, considerando determinadas composições para sua fabricação, determinadas especificações a cumprir nas análises de laboratório e uma denominação particular. Estas definições particulares dependem da tecnologia de cada fabricante. Isto cobre uma deficiência da norma, mas também cria uma grande confusão, já que deve haver cerca de 100 fabricantes no mundo e cada um deles com

sua própria nomenclatura. O Quadro 12 apresenta as diferentes classes de metal duro utilizadas na usinagem de madeiras e derivados.

Quadro 12- Aplicação de cada classe de metal duro (LUCAS FILHO, 2002).

DENOMINAÇÃO TANTAL	EQUIVALÊNCIA ISO	DUREZA Vickers 3 Kg	MATERIAL A CORTAR	TAMANHO DAS PASTILHAS
TH05M	-	1800	MDF Laminado	Pequena
TH10M	-	1750	MDF Laminado Aglomerado	Qualquer Tamanho
TH01	K01	1700	MDF Laminado	Pequena
TSU05 TH05	K05	1650	Aglomerado Madeira dura Sem nós	Pequena Média
TSU10 TH10	K10	1575	Aglomerado Madeira dura Sem nós Polivalente	Qualquer Tamanho
TSU20 TH20	K20	1525	Madeira com nós Polivalente	Qualquer Tamanho
TSU30 TH30	K30	-	Madeira com nós Madeira Branda	Qualquer Tamanho

As ferramentas de aço rápido já são raramente utilizadas nos processos de usinagem da madeira, se restringindo a algumas operações de destopo e corte transversal, onde apresenta boa qualidade de corte, mas ainda baixa produtividade e durabilidade. Algumas empresas utilizam também brocas helicoidais de aço rápido nas operações de furação, mas neste caso também apresentam menor durabilidade e menor produtividade comparativamente ao uso de ferramentas de metal duro.

Na operação de corte, por exemplo, as serras com dentes de metal duro apresentaram uma redução da perda de madeira devido à espessura de corte de cerca de 50% em relação às serras de aço rápido anteriormente utilizadas. A utilização de “janelas de ventilação” nas serras com dentes de metal duro permite que o atrito entre o disco de serra e a madeira seja reduzido, permitindo com isso o aumento do ângulo de incidência e diminuir a quantidade de dentes cortadores, reduzindo a potência necessária ao corte e a espessura das lâminas.

Segundo os fabricantes de ferramentas entrevistados e algumas empresas fabricantes de móveis e de máquinas de afiação, a manutenção das ferramentas é fundamental para a melhoria do desempenho dos processos de usinagem. A qualificação do operador para realizar essa tarefa passa pelo treinamento e capacitação em cuidados básicos como limpeza periódica dos cabeçotes, discos e dispositivos de fixação das pastilhas, o que pode influir no alinhamento e balanceamento do conjunto cabeçote-ferramenta e induzir a vibrações, choques e outros esforços para os quais as

ferramentas não estão dimensionadas, causando desgastes excessivos e até mesmo a quebra precoce da cunha de corte.

A adesão de substâncias como gomas e resinas no gume pode causar a obstrução do corte, o sobre aquecimento, a deformação plástica (empenamento) ou provocar trincas nas pastilhas de metal duro.

Nos processos estudados houve muita variação com relação aos cuidados de manutenção e manipulação das ferramentas. Além dos procedimentos de manutenção, a determinação do ponto de troca de ferramenta para afiação foi citada como informação fundamental para melhoria do desempenho dos processos como um todo. No entanto, essa é uma informação que os próprios fabricantes de ferramentas e usuários das mesmas, em todas as empresas visitadas não conhecem. Os mecanismos de controle do processo de fabricação ainda não estão direcionados para captura e análise de dados para gerar esta informação. A determinação do ponto de troca tem consequências sobre os indicadores de qualidade do processo tais como a porcentagem de rejeição, aumentando o percentual de peças aproveitáveis, índice de retrabalho, reduzindo o número de defeitos por peça e fixação de um padrão de variabilidade aceitável. Os indicadores de produtividades também foram influenciados, pois a determinação deste ponto influi sobre o planejamento, programação e controle da produção, uma vez que é possível dimensionar o número de *setups*, as capacidades de produção em cada operação, evitando a formação de filas e facilitando o seqüenciamento das operações. Outros indicadores de desempenho foram influenciados pela determinação do ponto ideal de troca, são eles, o índice de quebra de ferramentas, a frequência de quebra de ferramentas, o tempo médio entre falhas.

A utilização de um ponto de troca pré-determinado aumenta a utilidade da ferramenta uma vez que evita sua utilização acima da marca de desgaste admissível, facilitando o trabalho de afiação. Neste caso, a afiação pode ser feita retirando menores quantidades de material da cunha de modo a reconstituir a sua geometria inicial e manter a qualidade do corte. Em caso contrário, seria necessário retirar maior quantidade de material da cunha, comprometendo as características geométricas, a resistência e rigidez da cunha e a sobre vida da ferramenta, além da perda da qualidade no acabamento da superfície das peças.

A determinação do ponto de troca depende do critério de definição da vida das ferramentas. Em função dos critérios adotados para o desgaste do gume, é possível estabelecer a agudez crítica da cunha. No entanto este critério não é padronizado. Cada empresa utiliza um critério próprio, dificultando a comparação de desempenho dos processos. Mas, na maioria das empresas fabricantes de móveis, o critério mais utilizado é o da qualidade da superfície usinada. A vida da ferramenta é determinada em função da ocorrência de defeitos na usinagem, apresentados sob a forma de

irregularidades como sulcos, marcas de aquecimento ou de “dentes” na peça. Porém, este critério é meramente subjetivo e impossibilita a substituição da ferramenta antes que a falha ocorra. Quando o defeito se apresenta, a ferramenta já ultrapassou a marca de desgaste admissível.

Mas isto não significa que não existam padrões para orientar a determinação deste ponto de troca. Algumas empresas dedicadas ao desenvolvimento de máquinas para afiação de ferramentas utilizadas na usinagem de madeiras sugerem a adoção de uma marca de desgaste admissível de 0,2 mm, isto é, altura da marca no gume da ferramenta. Se houver desgaste periférico, as pastilhas da ferramenta necessitam de reafiação, principalmente nas costas dos dentes (superfície de incidência). O desgaste normal deve ser no máximo igual a 0,2 mm na superfície de incidência (flanco) e de 0,05 mm na superfície de saída (face) da pastilha para recuperação do gume de corte original e aproveitamento de todas as pastilhas sem a eliminação ou danificação da geometria de corte da ferramenta (Figura 45).

A variação do desgaste da cunha em função da espécie de madeira determina o grau de usinabilidade de cada espécie. Os resultados da avaliação da vida das ferramentas para as diferentes espécies de madeiras utilizadas na confecção de peças e componentes de móveis mostraram que, além das características anatômicas, das propriedades físicas e mecânicas das madeiras usinadas, o desgaste foi fortemente influenciado por fatores relativos as condições de corte empregadas, além das geometrias e materiais das ferramentas.

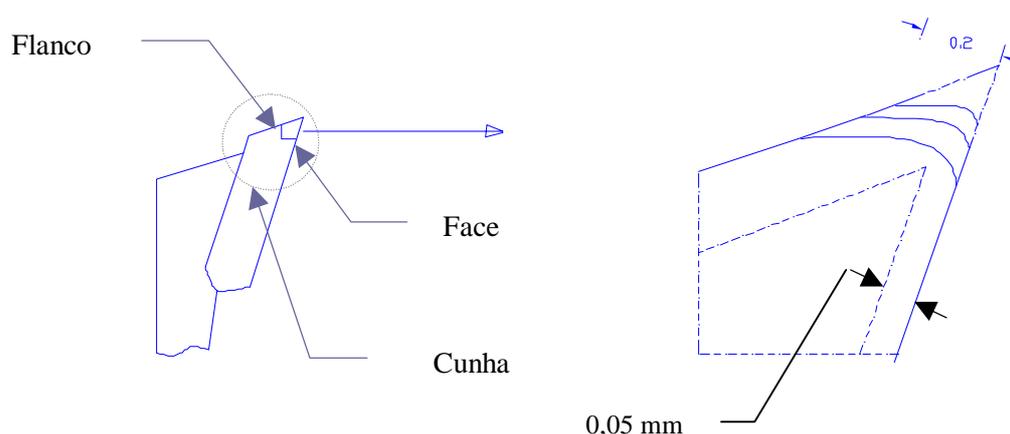


Figura 45 - Processo de desgaste do gume, mostrando a marca de desgaste admissível.

A análise do comportamento da vida das ferramentas em cada processo de usinagem revelou que o desgaste aumenta com o aumento da massa específica da madeira. A Figura 46 mostra a relação entre a vida da ferramenta e a massa específica das várias espécies de madeira aqui estudadas.

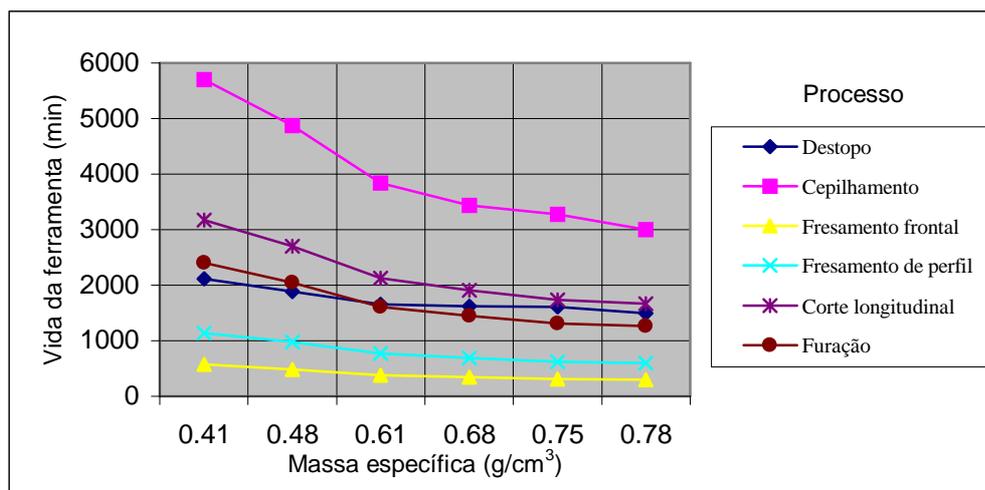


Figura 46 – Relação entre a massa específica da madeira e a vida da ferramenta em vários processos de usinagem.

O gráfico da Figura 46 mostra que a vida da ferramenta diminui com o aumento da massa específica da madeira com diferentes intensidades, variando de acordo com o tipo de processo de usinagem até um ponto próximo a massa específica igual a $0,68 \text{ g/cm}^3$, a partir da qual a taxa de desgaste é menor, principalmente nos processos fresamento, considerados por muitos os principais processos de transformação da madeira.

Isso indica que, em se utilizando madeiras com massa específica acima de $0,68$ para confecção de peças e componentes de móveis, a vida da ferramenta praticamente não é influenciada pelo aumento da massa específica da madeira. Em termos práticos, isso facilita o dimensionamento dos processos de usinagem de madeiras mais duras e prever o desempenho das operações utilizando configurações de ferramentas com geometrias e condições de corte semelhantes.

De forma análoga, o volume de madeira usinado durante a vida da ferramenta nos diferentes processos, teve o mesmo comportamento. A capacidade de transformação da madeira, em cada processo, diminui com o aumento da massa específica da madeira, principalmente nos processo de aplainamento e fresamento, onde são retirados os maiores volumes de cavaco para a confecção das peças.

A Figura 47 ilustra a variação do volume de madeira usinado com a massa específica da madeira para os diferentes processo de usinagem. Este efeito é mais significativo para os processo onde são retiradas as maiores quantidades de material, no caso o fresamento periférico e o aplainamento.

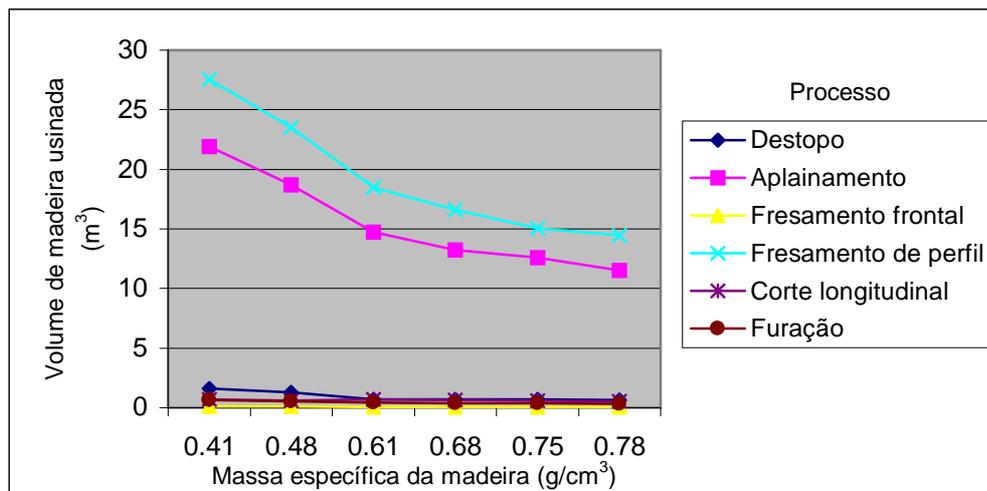


Figura 47 - Variação do volume de madeira usinada com a massa específica da madeira.

Assim, para melhorar os indicadores de produtividade é necessário dimensionar os recursos de modo a obter a maior taxa de remoção de cavaco durante a vida da ferramenta para cada espécie de madeira.

O índice de rejeição também é afetado pela variação da massa específica da madeira. O gráfico mostrado na Figura 48, mostra a relação entre a massa específica da madeira e o índice de rejeição na confecção de peças e componentes de móveis.

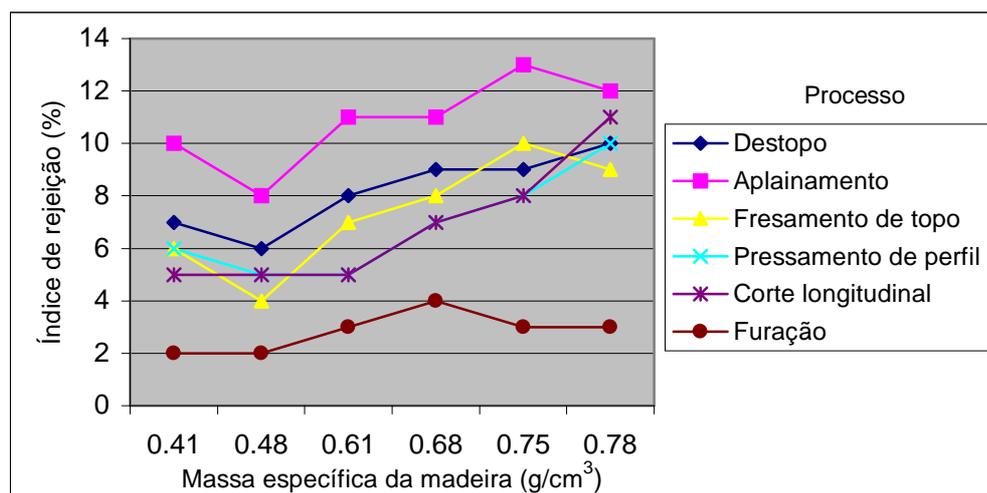


Figura 48 – Relação entre índice de rejeição e massa específica da madeira em vários processos.

Analisando a tendência geral das curvas apresentadas na Figura 48 é possível concluir que o índice de rejeição tende a crescer com o aumento da massa específica. Porém, de uma forma irregular alternando intervalos crescentes e decrescentes. Essa irregularidade pode ser atribuída a

natureza do material (madeira), onde as características anisotrópicas e heterogêneas contribuem para a ocorrência de irregularidades na peça, mas que não são controláveis.

Assim, a melhoria do índice de rejeição passa, também, por uma melhor seleção e classificação do material a ser usinado, evitando a ocorrência de defeitos que não dependem do controle das variáveis do processo.

4.8 Validação dos resultados

A validação dos resultados foi realizada a partir da simulação de um sistema produtivo genérico onde, a partir do conhecimento das relações de causa e efeito de um sistema real, baseado nas informações obtidas junto aos fabricantes de móveis, é possível alterar dados das condições de corte, geometria da ferramenta, massa específica da madeira e estimar as melhorias alcançadas com as alterações dos parâmetros dessas variáveis. A partir da simulação do sistema de fabricação por usinagem foi possível determinar os efeitos das mudanças nas condições de usinagem sobre a capacidade de produção do sistema.

Para simplificação da análise, foi utilizado um modelo que reproduz o processo de fabricação de uma lateral de gaveta. Neste modelo, seis operações realizam a transformação da madeira nesta peça. A dimensão do corte foi considerada igual a 1 metro na direção de avanço para cada processo, com exceção da furação que teve uma dimensão de corte igual a 10 cm. Isso é importante para dimensionar o tempo de máquina e definir a vida da ferramenta em cada processo. A Figura 49 apresenta o fluxo de operações utilizado no modelo. No modelo do sistema são utilizadas seis máquinas, onde são alterados apenas os parâmetros de usinagem das ferramentas em cada processo. Os dados dos sistemas foram simulados para verificar a validade do modelo e comparados com os dados reais. A diferença entre os dados simulados e os dados reais mostra a precisão do modelo em representar o funcionamento do sistema real. Cada máquina corresponde a uma estação de trabalho cada uma com a função de realizar apenas uma operação. Para avaliação da melhoria, foram comparados os resultados obtidos a partir da simulação com dados do sistema real, fornecidos pelos fabricantes e resultados obtidos a partir da alteração dos parâmetros de usinagem. O modelo, representado na Figura 49, procurou reproduzir o comportamento do sistema real quando são alterados estes valores. Para comparação, foram alteradas a velocidade de corte e a massa específica da madeira.

A medida de desempenho utilizada na simulação foi o número de peças produzidas durante a vida da ferramenta.

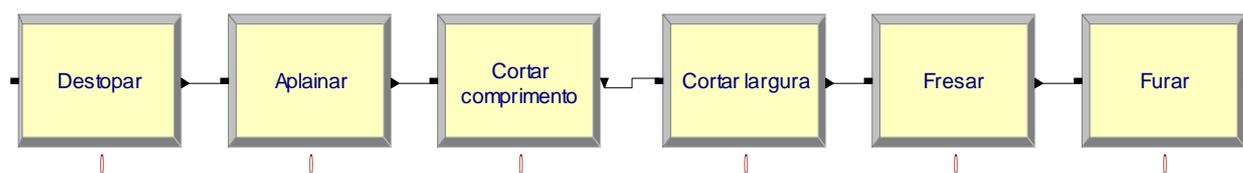


Figura 49 – Fluxo de processos de usinagem para a produção de uma lateral de gaveta.

A capacidade de cada processo de usinagem foi limitada pela vida de cada ferramenta, sendo aqui considerado que as máquinas irão produzir apenas um produto, não havendo, portanto, necessidade de troca de ferramentas devido ao *mix* de produtos. A capacidade de produção dos processos em conjunto estará limitada pelo processo onde a velocidade de transformação e a vida da ferramenta forem as menores, ou seja, com os maiores tempos de processamento e o maior número de *setups*.

Com o objetivo apenas de evidenciar o efeito das mudanças das condições de corte no sistema de fabricação, o modelo considera as movimentações entre as estações de trabalho uma constante de valor igual 1 minuto e desconsidera os *buffers* à frente de cada processo.

As capacidades das máquinas no modelo de simulação são representadas pelos tempos necessários para a usinagem de cada peça em cada operação. Essas capacidades são alteradas quando são alterados os parâmetros de usinagem. Essas capacidades foram simuladas seguindo uma distribuição normal com desvio padrão igual a 10% da capacidade média de cada processo. Por exemplo, no processo de destopo da madeira de jequitibá, com massa específica média de $0,78 \text{ g/cm}^3$ para uma velocidade de corte de $36,65 \text{ m/s}$, velocidade de avanço de $8,4 \text{ m/min}$ e uma espessura de cavaco de $0,05 \text{ mm}$ o tempo de máquina médio foi de $0,12$ minutos com desvio padrão de $0,012$ minutos em torno da média. Na simulação o tempo de manipulação da madeira (tempo manual) nos processos foi considerado uma constante igual $0,1$ minuto, buscando, desse modo, evidenciar o efeito da alteração dos parâmetros de usinagem sobre as medidas de desempenho. Assim foi possível visualizar as filas à frente das estações de trabalho quanto são alterados os parâmetros de usinagem. O processo limitador da capacidade do sistema de transformação foi o fresamento e nele são realizadas as alterações das condições de usinagem para avaliar o impacto das mudanças sobre número de peças produzidas, *lead time* e número de *setups*.

O tamanho e o número de lotes (ritmo de entrada de ordens de fabricação) foi mantido constante para que as velocidades de processamento não fossem alteradas em função da demanda, mas comparados os resultados apenas em função da alteração das condições de usinagem.

O sistema foi simulado para um período igual ao da vida da ferramenta no processo de fresamento. Então, quando são alterados os parâmetros de usinagem a vida das fresas são alteradas

e, por conseguinte, os resultados do sistema de fabricação. Para verificar o número de *setups*, foi estimado o número de *setups* para o funcionamento do sistema pelo período de seis meses (57600 minutos). O quadro 15 mostra os resultados obtidos para as situações em estudo.

Utilizando dados reais dos processos em estudo no modelo de simulação foi possível obter os seguintes resultados quando foram alteradas as condições de corte e a espécie de madeira.

Tabela 15 – Resultados da simulação quando são alterados os parâmetros de usinagem.

Massa específica (g/cm ³)	v _c (m/s)	Peças produzidas	Número de <i>setups</i>
0,41	39,27	227	50
0,75	39,27	188	92
0,41	47,12	121	60
0,75	47,12	101	110

Os resultados da simulação dos processos são mostrados na Figura 50, onde é apresentado o relatório emitido pelo ARENA⁶ para o modelo de operação do sistema.

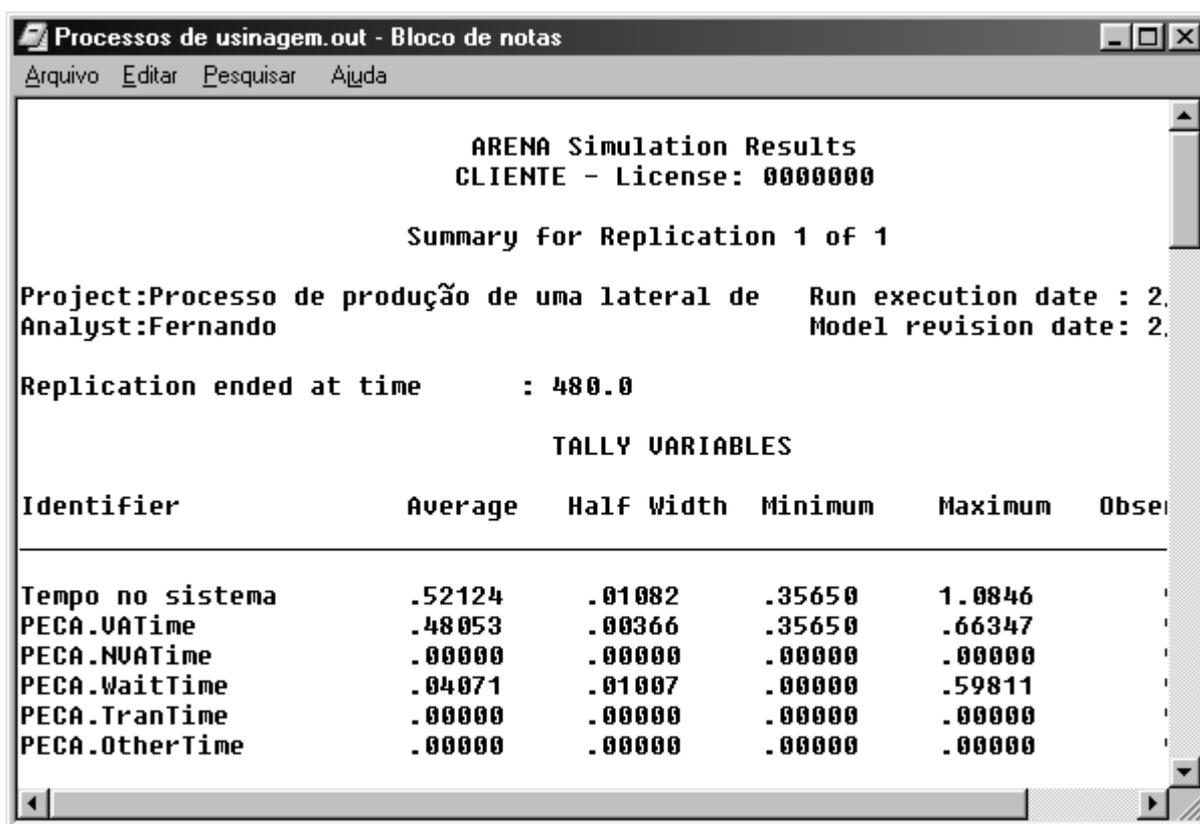


Figura 50 – Tela de resultados da simulação do modelo de sistema de transformação da madeira.

O *lead time* do sistema produtivo só é reduzido significativamente quando os tempos de processamento, de movimentação, manuseio e esperas são reduzidos. Assim, quanto menor o

número de *setups*, menor o tempo parado com esperas para trocas de ferramentas e quanto maior a velocidade de corte, maior a velocidade de processamento e menor o *lead-time*. A correta seleção dos parâmetros de usinagem na simulação mostrou que houve um aumento do número de peças produzidas durante a vida da ferramenta de modo que o tempo gasto com paradas para trocas de ferramentas foi diluído pela maior escala de produção.

A melhoria dos processos foi alcançada com a diminuição da diferença entre a usinagem de madeiras duras e madeiras de menor massa específica utilizando maiores velocidades de corte. Ou seja, para maiores velocidades de corte, houve uma redução do efeito da espécie de madeira sobre o número de peças produzidas durante a vida da ferramenta.

Diante dos valores obtidos na simulação pode-se concluir que os resultados deste trabalho permitem identificar os principais fatores envolvidos na melhoria do desempenho dos processos de usinagem, conhecer as relações entre os parâmetros de usinagem e as medidas de desempenho do sistema de transformação, bem como, determinar as melhores configurações para as diferentes combinações de ferramenta-espécie de madeira-condições de corte utilizadas nos vários processos de transformação da madeira em peças e componentes de móveis, contribuindo, desta forma para a melhoria da tecnologia de fabricação, da eficiência produtiva e, por conseguinte, para a competitividade do setor.

⁶ *Software* utilizado para modelagem e simulação de sistemas produtivos.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos foi possível chegar as seguintes conclusões:

A partir da análise dos processos de usinagem de diferentes espécies de madeira com dados obtidos do ambiente fabril, foi possível gerar as informações necessárias à melhoria da eficiência produtiva nas fábricas de móveis.

A análise dos processos mostrou que as causas da baixa eficiência produtiva na usinagem de madeiras estão relacionadas, principalmente, ao desconhecimento dos fenômenos envolvidos na usinagem e da interação entre os parâmetros de corte e as medidas de desempenho, muitas vezes negligenciadas devido a ausência de pesquisas mais direcionadas ao atendimento desta demanda.

A falta de mão-de-obra mais qualificada, a organização industrial deficiente, os altos tempos de ciclo, a indefinição do ponto de troca de ferramentas para cada combinação espécie de madeira-condição de corte, também são fatores que levam a uma menor eficiência na usinagem de madeira quando comparada à usinagem de metais, causando incertezas no dimensionamento, planejamento e controle dos processos de usinagem. Ausência de medidas de manutenção preventiva e de rotinas de limpeza e calibração também são causas de falhas e defeitos, mas que podem ser evitados.

Além disso, a ausência de métodos quantitativos e critérios padronizados para avaliação da qualidade da superfície usinada e da vida da ferramenta contribuem para a indefinição das relações de causa e efeito e dificulta a introdução de mudanças que visem a melhoria dos processos de usinagem. A utilização de pequenas velocidades de corte e materiais de ferramentas menos resistentes aos desgastes que os utilizados na usinagem de metais, ausência de um sistema de monitoramento e controle, bem como de um método mais preciso para avaliação da qualidade torna a usinagem de madeiras menos eficiente.

A análise das correlações entre os parâmetros de usinagem e as medidas de desempenho dos processos mostrou que as velocidades de corte e de avanço são os principais fatores envolvidos na melhoria da eficiência dos processos de usinagem da madeira. Por isso, a seleção dos diâmetros das ferramentas, da velocidade de giro do eixo árvore e da profundidade de corte ideais, para cada espécie de madeira, tem papel fundamental na melhoria do desempenho dos diversos processos de transformação da madeira.

A identificação dos melhores parâmetros para cada um desses fatores pode ser realizada a partir da análise dos gráficos que correlacionam medidas de desempenho e parâmetros de usinagem com a identificação do padrão de qualidade aceitável e da produtividade desejada em cada processo. Assim, é possível estabelecer os parâmetros que conduzam a estes resultados.

A utilização das equações ajustadas, propostas nas tabelas 11, 12 e 13, permite estimar a vida da ferramenta, o índice de rejeição e o volume de madeira usinada durante a vida da ferramenta em função da espécie de madeira e dos parâmetros de usinagem. Isto facilita o planejamento e o controle dos processos de usinagem, uma vez que fornece referências sobre o ponto de troca e as capacidades do sistema de fabricação para cada combinação madeira-ferramenta, permitindo avaliar os resultados da viabilidade da usinagem de madeiras duras ainda pouco usadas na indústria de móveis.

O desgaste das ferramentas nos processos de usinagem depende principalmente das condições de corte praticadas nos processos e menos das propriedades da madeira. Por isso, desde que sejam utilizados parâmetros adequados, é possível usinar madeiras de alta massa específica de forma econômica e com qualidade. As relações entre as variáveis relevantes mostram que o desempenho da usinagem está intimamente relacionado à geometria da ferramenta e profundidade de corte. Além disso, a velocidade de corte teve grande influência sobre os indicadores de desempenho. Por isso, é recomendada a utilização de altas velocidades de giro do eixo árvore e de sistemas de controle dos parâmetros de usinagem de modo a alcançar melhorias significativas em termos de qualidade e produtividade. Assim será possível contribuir para a competitividade dos processos produtivos baseados na usinagem de madeiras maciças de média e alta massa específica.

O efeito da massa específica da madeira é significativo e afeta o desgaste da ferramenta com diferenças de até o dobro dos valores do desgaste quando são comparadas madeiras de baixa massa específica e madeiras de alta e média massa específica. Mas esse maior desgaste não é impedimento para a viabilidade do uso de madeiras duras na confecção de móveis, desde que sejam respeitadas as limitações impostas pelos parâmetros de usinagem admissíveis para cada espécie de madeira.

A ineficiência na usinagem de madeiras, principalmente quando são introduzidas novas espécies, é uma das causas da baixa competitividade do setor. Por isso, o presente estudo, contribui com a identificação de alguns parâmetros de usinagem, de modo a melhorar a eficiência produtiva no processamento de madeiras ainda pouco utilizadas na fabricação de móveis.

A partir da identificação das causas do baixo desempenho e da melhor compreensão das relações de causa e efeito entre os parâmetros de usinagem e as medidas de desempenho dos processos é possível ajustar estes parâmetros de modo a obter melhorias na eficiência produtiva e propiciar a introdução e o aproveitamento de novas espécies de madeira, até aqui pouco utilizadas devido o desconhecimento dessas relações.

O conhecimento das relações entre os parâmetros de usinagem e as medidas de desempenho facilitam o dimensionamento, o planejamento e o controle dos processos de industrialização da

madeira, pois permitem prever o comportamento do sistema perante alterações dos parâmetros de usinagem ou da espécie de madeira utilizada.

Assim, a análise da usinagem da madeira de diferentes espécies contribui para a geração de conhecimentos necessários à melhoria dos processos e da eficiência produtiva nas indústrias de móveis, reduzindo desperdícios, possibilitando a utilização de novas espécies de madeira, aumentando a qualidade e a produtividade das operações, delimitando restrições e capacidades de acordo com o conhecimento das propriedades das ferramentas, das máquinas e das propriedades das madeiras utilizadas na confecção de peças e componentes de móveis.

5.1 Recomendações

Com base nos resultados e conclusões deste trabalho, como forma de complementar a presente pesquisa e dar continuidade na busca pela melhoria dos processos recomenda-se para futuros trabalhos de pesquisa nesta área:

Determinar o ponto ótimo de troca de ferramenta para diferentes espécies de madeira nos vários processos de usinagem e utilizar outras medidas de desempenho. Além do índice de rejeição, vida da ferramenta e volume usinado utilizar outros métodos de análise para essas variáveis. Medir a interação entre as variáveis e o efeito dessas interações sobre as medidas de desempenho.

Avaliar a viabilidade do uso de pastilhas de cerâmica na usinagem da madeira e suas implicações sobre a melhoria dos processos. Analisar a influência das propriedades das máquinas sobre a eficiência da usinagem da madeira.

Utilizar outros critérios para avaliação da vida da ferramenta e na avaliação da qualidade das peças, utilizar parâmetros mensuráveis e correlacioná-los com os parâmetros de usinagem.

Testar outros modelos determinísticos e estocásticos para avaliação das relações entre as respostas do sistema de fabricação e os parâmetros de usinagem. Utilizar modelos de simulação mais refinados e detalhados para avaliação de outras variáveis sobre o desempenho dos processos. Testar a aplicação dos modelos de simulação no planejamento e projeto do sistema de fabricação.

Relacionar o desempenho dos processos com a classe de qualidade da madeira para diferentes espécies. Estudar a relação entre o tipo, o tamanho e o patamar tecnológico das fábricas com o desempenho dos processos de usinagem.

Minimizar o efeito dos fatores que influem nos resultados, mas que não estão sob controle e analisar o efeito de propriedades não contempladas neste estudo, tais como o tipo de perfil e passo entre os dentes e espessura dos discos de serra, velocidade de giro do eixo árvore, potência de corte, o grau de acabamento da superfície, espessura do cavaco, análise de ruídos e potência consumida.

Analisar o efeito dos fatores aqui estudados sobre a força e a potencia de corte e relaciona-los com os indicadores de desempenho dos processos. Estudar outras propriedades da madeira que não foram contempladas neste trabalho, como propriedades de acabamento, outras propriedades mecânicas, outros testes de usinagem.

Incluir nas análises outras implicações que possam ser relevantes, como efeitos de tratos silviculturais, idade das árvores, programas de melhoramento, técnicas diversificadas de desdobro, secagem, colagem etc.

Desenvolver análise dos resultados físicos e econômicos da usinagem, com avaliação dos tempos de produção e custos dos processos para determinar os melhores parâmetros de usinagem, visando criar alternativas viáveis para a indústria madeireira e moveleira.

Visando identificar outros pontos de melhoria do sistema, inserir a análise de processos como o lixamento, a montagem e o acabamento da superfície das peças. Relacionar aspectos motivacionais, ergonômicos e de qualificação da mão-de-obra com a melhoria dos indicadores de qualidade e produtividade.

Utilizar outros métodos de análise tais como projetos de experimentos, simulações análise de componentes. Desenvolver um banco de dados de usinagem para madeiras incluindo informações sobre os parâmetros recomendados para usinagem de diferentes espécies.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIMOVEL “*Design como Fator de Competitividade na Indústria Moveleira*”. **Relatório setorial SEBRAE – FINEP- ABIMOVEL**, São Pulo, 2002.
- ABPM. Mercado internacional mostra potencial para produtos brasileiros. **Wood Magazine**. n. 47, p.5. Jan./fev.1998.
- ALMEIDA, Alcir R. B. Reengenharia florestal: necessidade perante a evolução do mercado consumidor. **Revista da madeira**. n. 21, p. 9, mar. /abr. 1998.
- ASTM - **Annual book of ASTM standards** - Standard Methods for Conducting Machining Tests of Wood and Wood Base Materials. ASTM D1666-88, Philadelphia. 1995, v.4., t. 10, p. 226-245.
- BANKS, J.; CARSON, J.S.. **Discret Event System Simulation**, Prentice may. Englewood Cliffs, NJ, 1984.
- BARBOSA, Ana Paula; VIANEZ, B.F.; VAREJÃO, M. J.; ABREU, R.L.S. Considerações sobre o perfil tecnológico do setor madeireiro na Amazônia central. **Revista Acta Amazônica**. Biodiversidade, pesquisa e desenvolvimento na Amazônia. Manaus, n.35, p 45-53. 1999.
- BET, L. **Estudo da medição da textura se superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor** 1999. Tese (Doutorado) PPEM, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BIANCHI, Kleber Eduardo. **Concepção de uma máquina CNC para medição e usinagem de peças de madeira**. 1996. Dissertação. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, UFSC, Florianópolis.
- BIRKELAND, R.. Wood machining-Research and education, where are we going?. **Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar** Vol.1 p.17-22. 1997.
- BOEHS, L. **Projeto e Implantação de um Sistema Computadorizado de Banco de Dados de Usinagem CINFUS**.. Tese de Doutorado. Florianópolis - SC:Editado no Departamento de Engenharia mecânica da UFSC., 1988.
- BONAC, T. Measuring of Wood Surface Texture by the Pneumatic Method. *Paperi ja Puu*. **57(4)**, 309-326. 1975.
- BONAC, T. Wood Roughness Volume and Depth Estimated from Pneumatic Surface Measurements. **Wood Science**. 11(4), 227-132. 1979.
- BONDUELLE, Arnaud. **Usinagem, qualidade e custo**. Curso de Engenharia Industrial Madeireira e do Programa de Pós-graduação em Eng. Florestal,UFPR, Curitiba, 2001.
- BONDUELLE, Arnaud.; **Usinagem, material de corte e desgaste do gume**. Curso de Engenharia Industrial Madeireira e Programa de Pós-graduação em Eng. Florestal,UFPR, Curitiba, 2000.
- BONDUELLE, G. M. **Avaliação e análise dos custos da má qualidade na indústria de painéis de fibras**. 1997. Tese (Doutorado) PPGEF - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BONSIEPE, Gui. **A “tecnologia” da tecnologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1983.
- CASTRO, E.M; GONÇALVES, M.T.T. **Estudo da usinabilidade de chapas MDF na usinagem de desbaste e acabamento**. 2001. Dissertação de mestrado. UNESP, Bauru.
- CERQUEIRA, Nelson. **O design e a competitividade empresarial. Guia para Orientação**. Salvador: Publicação no Brasil: Instituto Euvaldo Lodi:Sudene/Bahia *design*, 1994.

- CHARDIN, A. Bandsaw efficiency: development concerned with the tooth, cutting edge, the blade, and the sawing process. **In: International wood machining seminar**, 4. California. Proceedings. p.154-164, 1977.
- COUTINHO, LUCIANO “*Design* como Fator de Competitividade na Indústria Moveleira”. NEIT/UNICAMP. **Relatório setorial SEBRAE – FINEP- ABIMOVEL**, São Pulo, 1999.
- DOI, O; YOKOYAMA, M. Cutting force analysis of wood I. **Bulletin of the JSME**, v.18, n. 140. p.240-246, 1977.
- FARIAS, Marzely Gorges. **As questões ambientais e o processo de fresamento em alta velocidade de madeiras de floresta plantada *eucalyptus grandis* e *eucalyptus dunnii***. 2000. Tese (Doutorado) - Programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo. Edgard Blucher. 1970. 751p.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo dicionário da língua portuguesa**. 2ed. Rio de Janeiro. Editora Nova Fronteira S.A., 1986.
- FISCHER, R. A way to observe and to calculate edge wearing in cutting wood-materials. **Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar** Vol.2 p.631-640. 1997.
- FUJIWARA, Y, ISHII, A. and SAWADA, Y. 1999. Novel Filtering Methods of Evaluating Surface Roughness of Wood. Evaluation Based on Tactile Roughness and 3D Measurement of Surface Roughness. **In: Proc. of the 14th International Wood Machining Seminar**. 12-19, France, 1999.
- FUNCK, J.W., FORRER, J.B., BUTLER, D.A., BRUNNER, C.C. and MARISTANY A.G. Measuring Surface Roughness on Wood: A Comparison of Laser Scatter and Stylus Tracing Approaches. **SPIE**. v.1821, p.173-184, 1992.
- GONÇALVES, M.T.T. ; RUFFINO, R.T. Mecanismo de formação do cavaco na usinagem da madeira – In: **ENBRAMEM**, 3., São Carlos, 1989. Anais. São Paulo, LaMEM/EESC/USP. v.4, p.163-202, 1989.
- GONÇALVES, M.T.T. **Contribuição para o estudo da usinagem de madeiras**. 1990. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- GONÇALVES, M.T.T. **Processamento da Madeira**. Bauru-SP: Document Center Xerox –USC, Livro ISBN 85.901425-1-5. 2000.
- GONÇALVES, M.T.T.. **Proposta de metodologia para medição dos esforços de corte na usinagem da madeira**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos. 1993.
- GUIMARÃES, Ana lúcia Santos Verdasca. **Diagnóstico industrial: Desenvolvimento de produtos**. Dissertação (Mestrado em inovação tecnológica)- Programa de Pós-graduação em Educação, CEFET-PR, Curitiba. 1999.
- GURAU, L., MANSFIELD-WILLIAMS, H.D. and IRLE, M.A. A comparison of Laser Triangulation and Stylus Scanning for measuring the Roughness of Sanded Wood Surfaces. **In: Proc. of the 5th International Conference on the Development of Wood Science, Wood Technology and Forestry**. 5th – 7th September Ljubliana, Slovenia. 2001.
- HANN, R.A. A Method of Quantitative Topographic Analysis of Wood Surfaces. **Forest Products Journal**. 7(12), 448-452. 1957.

- HEISEL, U.. New tools and machining processes for improved surface finish during woodworking. **Proceedings of the 12th International Wood Machining Seminar** p.126-146. 1995.
- HIZIROGLU, Surface Roughness Analysis of Wood Composites: A Stylus Method. **Forest Products Journal**. **46(7/8)**, 67-72. 1996.
- HUBER; H.. BITTNER H.G. Presentation of a lily automatic working equipment for hardening circular saws and knives a new technology. **Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar** vol.1 p.277-288. 1997.
- IBDF/LPF. **Madeiras da Amazônia: características e utilizações**. CNPq. Brasília, 113 p.1981
- INPA/CPPF, Catálogo de madeiras da Amazônia – **Características tecnológicas, área de hidrelétrica de balbina**. v. I, 1991.
- IWAKIRI, S. **Série técnica** n. 1 INPA/CPPF, 1984.
- IWAKIRI, S.. **Série técnica** n. 8 INPA/CPPF, 1985.
- IWAKIRI, S.**Revista acta amazônica**, n. 20: 271-281. 1990.
- JAIN, R., **The art of computer systems performance analysis**. John Wiley & Sons, NY, 1997.
- KIVIMAA, E. Die schnittkraft in der holzbearbeitung. **Holz als roh und werkstoff**, v.10, N.3, p.94-108. 1952.
- KOCH, P.. **Wood Machining Processes**. New York. Ronald Press Company. 1964. 530p.
- KOLLMANN, F.F.P.; CÔTE, W.A.J. **Principles of Wood Science and Technology**. New ork. 1984. v.1, 592 p.
- KOMATSU, Masayuki. Machining Performance of a Router Bit in the Peripheral Milling of Wood I. Effects of the radial rake angle of the peripheral cutting-edge on the cutting force and machine-surface roughness. **Mokuzai Gakkaishi** 39(6) pp.628-635. 1993.
- KRISCH, J and CSIHA, C. 1999. Analysing Wood Surface Roughness Using an S3P Perthometer and Computer Based Data Processing. **In:Proc. XIII Sesja Naukowa “Badania dla Meblarstwa”**, Poznan. 1999.
- LAVERY, D.J., LARNON, D.Mc., TAYLOR, J.M., MOLONEY, S. and ATANACKOVIC, A. Parameters Affecting the Surface Finish of Planed Sitka Spruce. **Forest Products Journal**. **45(4)**, 45-50. 1995.
- LAW, A.M., KELTON, W.D., **Simulation Modeling and Analysis**, 2 Ed, McGraw-Hill, NY, 1991.
- LEMASTER, R.L. and BEALL, F.C.. The Use of an Optical Profilometer to Measure Surface Roughness in Medium Density Fibreboard. **Forest Products Journal**. **46(11/12)**, 73-78. 1996.
- LEMASTER, R.L. and DORNFELD, D.A.. Measurement of Surface Quality of Sawn and Planned Surfaces with a Laser. **In: Proc. on the 7th Wood Machining Seminar**. October, 1982. Richmond, California. 1982.
- LEMASTER, R.L. and TAYLOR, J.B. High Speed Surface Assessment of Wood and Wood-Based Composites. **In: Proc. on the 14th Wood Machining Seminar**. September, 1999. France. 1999.
- LEMASTER, R.L.. Hardwood Machining R&D: Surface Quality and Process Monitoring Technologies. **In: Proc. of the Eastern Hardwood Resource, Technologies and Markets Conference**. April 21-23. Camp Hill, Pennsylvania. Published by the FPS, 109-120. 1997

- LEMASTER; R. L; SALONI; D; RODKWAN, S.. Update of Process Monitoring and Control Research at North Carolina State University. **Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar** p.511-522. 2001
- LIMA, E. S. - Exportações e *design* no setor moveleiro. **Revista da ABIMÓVEL**.1998.
- LUCAS FILHO, F. C. **Influência do teor de umidade e da massa específica aparente sobre a resistência e rigidez das madeiras de *Pinus elliottii*, *E. e Pinus taeda* L.** 1997. Dissertação de mestrado, PPGEF – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- LUCAS FILHO, F. C. 2002. 74 f. Projeto de Tese (Qualificação ao Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, **Análise da usinagem de madeiras visando a melhoria de processos em indústrias de móveis**, UFSC, Florianópolis.
- LUNDBERG, I.A.S. and PORANKIEWICZ, B. Studies of Non Contact Methods for Roughness Measurements on Wood Surfaces. **Holz als Roh- und Werkstoff**. 53, 309-314. 1995.
- LYPTUS – Recomendações técnicas de usinagem, colagem e acabamento. 17p. 2002.
- MAGROSS, E. and SITKEI, G. Influence of Wood Structure on the Surface Roughness at Milling Operations. **In: Proc. of the 4th ICWSF**. 1999, Missenden Abbey, UK. Proceedings, 1999.
- MALDONADO, LUCIA M. O. Como utilizar o registro de exportação simplificado – **Revista Comércio exterior** n.. 20. p.14-30. 2001.
- MARCHAL, R. Interet de la Prise en Compte de Caracteristiques Physiques et Anatomiques Simples du Bois de Chêne pour L'appréciation de la Qualité des Placages D'Ebenisterie. **In: DEA Sciences du Bois**. 1983. INPL, Nancy. Proceedings, 1983.
- McKENZIE, W.. Wood is easy to cut -or is it?. **Proceedings of the 11th International Wood Machining Seminar** p.26-40. 1993.
- McKENZIE, W.M. Fundamental aspects of the wood cutting process. **Forest Products Journal**, v.10, n.9, p.447-456. 1964.
- McKENZIE, W.M. The relationship between the cutting properties of wood and its physical and mechanical properties. **Forest Products Journal**, v.12, n.6, 1962 p.287-294.
- MDICEx **Ações Setoriais para o Aumento de Competitividade da Indústria Brasileira/Moveleiro**. Brasília, MICT/SPI, mimeo. 2002.
- MEAUSSONE; P.J A. Aguilera; P. Martin. Choice of Optimal Cutting Conditions in Wood Machining using the "Coupled Tool-Material" Method. **Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar** p.37-48. 2001.
- MDICEx. **Ações Setoriais para o Aumento de Competitividade da Indústria Brasileira/Moveleiro**. Brasília, MICT/SPI, mimeo. (2002).
- MOTE, C. D Jr. Overview of saw *design* and operations research Results and priorities. **Proceedings of the Sixth International Wood Machining Seminar** p.11-25. 1979.
- MÜNZ, U. V.. Wood processing tools of German manufacturers. **Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar** Vol.2 p.829-830. 1997.
- NAHUZ, F. Fabricação de painéis de Madeira. Uma análise de desempenho. **Wood Magazine**, v.6, n.4, p 25-28. 1999.
- NAUMANN, L. Tecnologia como fator de competitividade na industria madeireira. **Wood Magazine**, v. 5, n.3, p 19-23. 1998.

- PALADINI, Edson Pacheco. **Gestão da qualidade no processo: a qualidade na produção de bens e serviços**. São Paulo. Atlas, 1995.
- PANSHIN, A J & DE ZEEUW, C. **Textbook of Wood Technology**. McGraw-Hill. New York. 1980.
- PEDGEN, C.D., SHANNON, R.E., SADOWSKI, R.P., **Introduction to Simulation Using SIMAN**, McGraw-hill, NY, 2. Ed., 1990.
- PETERS, C.C. and CUMMING, J.D. Measuring Wood. Surface Smoothness: A Review. **Forest Products Journal**. **20(12)**, 40-43. 1970.
- PORTER, M. E. **Estratégia competitiva**. Ed. Campos 7^a. Ed. Rio de Janeiro, 1986.
- SCHAJER; G. WANG, S. Effect of workpiece interaction on circular saw cutting stability. **Proceedings of the 14th International Wood Machining Seminar** Vol.1 p.173-186. 1999.
- SILVA, Alexandre Dias. **Uma metodologia para otimização automática de parâmetros de usinagem**. 1994. Tese (Doutorado). Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando sua utilização na indústria moveleira**. 2002. Tese (Doutorado) – Programa de pós graduação em engenharia florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SILVA, J.; MATTOS, J; MUNIZ, G.B. Influência das características anatômicas da madeira na sua usinagem. **XV Congresso florestal brasileiro**. Belo Horizonte, 1999. Anais. p-232-239. 1999.
- SLACK, Nigel *et al.* **Administração da Produção**. São Paulo. Atlas, 1997.
- SOUZA, P. Viabilidade de exploração da Madeira em florestas tropicais. **Wood Magazine**, v3, n. 4, Curitiba, p. 16-19, 1999.
- STEMMER, Gaspar Erich. **Ferramentas de corte I**. 5. ed. Florianópolis. Ed. da UFSC, . 2001.
- STEMMER, Gaspar Erich. **Ferramentas de corte II**. 2. ed. Florianópolis. Ed. da UFSC, 1995.
- STRUMBO, D.A. Surface Texture. Measurement Methods. **Forest Products Journal**. **12(7)**, 299-303. 1963.
- SUDAM/IPT. **Grupamento de espécies tropicais da Amazônia por similaridade de cracterísticas básicas e por utilização**. Belém, 1981.
- SZYMANI; R.; TYLCZAK; J. H.; HAWK; J. A.; ZIOMEK-MOROZ, M.; WO, J. B. C. Investigations of Wear Resistance of New Stellite 700 Series Grades Used for Saw Tipping. **Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar** p.133-140. 2001.
- TANAKA; C. ZHU; N. OHTANI, T. Automatic Detection of Router Bit Failure During Machining. **Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar** p.523-532. 2001.
- TEIXEIRA, J.A.T.; CÂNDIDO, G.A.;ABREU, A.F. A utilização dos materiais no *Design* e a Competitividade da Indústria Moveleira da Região de Metropolitana de Curitiba: um estudo de caso. **Revista Produção**,v.11, n. 1, p.27-41, 2001.
- THUNELL, B. Estimating production capacity during sawmill planning. **Proceedings of the Seventh International Wood Machining Seminar** p.18-32. 1982
- TOMASELLI, Ivan. As perspectivas para o setor florestal Brasileiro. **Revista Referência**, Curitiba, v.2 n.3., p.28, jan./fev.2000.

TUSET, R.; DURAN, F. **Manual de Madera Comerciales, Equipos y Procesos de Utilizacion**. Montevideo 1986. Editorial Agropecuaria Hemisferia Sur S. R. L.

VALARELLI, Ivaldo D.; GONÇALVES, Marcos Tadeu T. Otimização do processo de usinagem em operações de desdobro. **VIII Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira**. Uberlândia, 2001.

BIBLIOGRAFIA

BALDWIN, R. F. **Operations Management in the forest products industry**. Miller Freeman. San Francisco. 1984.

COLLIER, J. W. **Wood finishing**. V, 6. Pergamon Press. Rome. 1967.

GROSSMAN, E.; NAVEIRO, R. M. **A atividade de desenvolvimento de projeto de produto na indústria de móveis**. III CBGDP, Florianópolis, 2001.

HASEN, H. J. **Modern timber design**. John Wiley & Sons. New York, 1962.

HOCQUET, M. **Manuel d'entretien et d'affûtage des lames de scies à ruban et scies alternatives**. CTBA - Centre Technique du Bois et de L'amieublement. France. 1983.

HOLTMAN, D. F. **Wood construction. Principles. Practice. Details**. McGraw-Hill. New York. 1929.

HORTEN, H. E. **Woodworking machines - in 4 languages**. CR Books. London. 1968.

JURAN, J. M. **Controle de qualidade**. Handbook, vol. 1, McGraw-Hill, 1991.

MÉNARD. S. **L'Usinage du Bois**. CRIMBO - Centre de Resaerche industrielle du meuble et du bois ouvré. France, 1995.

MERCIER, C. **L'affutage des outils à bois et dérivés**. Éditions H. Vial – París 1978 .

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**, 4^a. Ed., John Wiley & Sons, 1997.

OLIVÉRIO, J. L. **Projeto da Fábrica**, São Paulo, Instituto Brasileiro do Livro Científico Ltda, 1985.

PESSOA, D. **Avaliação de sistemas de produção a partir de parâmetros de desempenho e produtividade**. São Paulo. Atlas/USP, 1998.

PINTO, J. K.; SLEVIN, D. P. **Critical success factors in succesful project implementation**. IEEE Transactions on Engineering Management, v. 34, n.1, Feb. 1987.

PORTER, M. E. **Vantagem competitiva das nações**. Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1989.

REVISTA COMÉRCIO EXTERIOR – número 20 pag. 18-24. **A importância do design**.

SHINGO, Shigeo. **O sistema Toyota de produção: do ponto de vista da engenharia de produção**. Porto Alegre. Bookman, 1996.

SINK, D. S.; TUTTLE, T. C. **Planejamento e medição para performance**. Rio de Janeiro. Qualitymark, 1993.

SULE, D.R.. **Manufacturing Facilities**, Bostom-EUA, PWS-KENT Pubfishing Company, 1992.

TIMBER ENGINEERING COMPANY. **Timber design and construction Handbook**. McGraw-Hill. NewYork, 1956.

TUBINO, Dálvio Ferrari. **Sistemas de produção: a produtividade no chão de fábrica.** Porto Alegre. Bookman, 1999.

APÊNDICES

Apêndice 1 – Questionário utilizado na pesquisa

Realização:



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Pesquisa sobre usinagem da madeira

QUESTIONÁRIO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS SOBRE A EFICIÊNCIA NA USINAGEM DA MADEIRA

O objetivo desta pesquisa é coletar dados sobre o desempenho dos processos de usinagem de diferentes espécies de madeira, visando à melhoria dos mesmos e o desenvolvimento de padrões operacionais para auxiliar na orientação ao planejamento e na melhoria do processo produtivo em fábricas de móveis.

A pesquisa consiste em coletar informações sobre o desempenho das ferramentas nos diferentes processos de corte, fresamento e furação e utilizará questionários e formulários eletrônicos para aquisição das informações necessárias. Para isso, enviamos-lhes um questionário onde será possível coletar estas informações. Por favor, preencha o questionário assinalando as respostas mais apropriadas. Ao final do questionário é apresentado um formulário para comentários e sugestões para a pesquisa.

Forneça os dados solicitados. No final envie o formulário. Você receberá uma mensagem de confirmação pouco tempo depois. Em contrapartida ao preenchimento e envio do questionário você receberá os resultados da pesquisa para avaliar o grau de eficiência do seu processo de fabricação, com relação à concorrência.

Dados da empresa

Qual a área de atuação da sua empresa?

Qual o porte da sua empresa?

Pequeno Médio Grande

Gostaríamos de enviar os resultados desta pesquisa. Qual seu endereço?

Nome E-mail

QUESTIONÁRIO

1. Dentre os fatores de competitividade para indústria do mobiliário qual o mais importante?

- Organização industrial
- Design
- Tecnologia de fabricação
- Certificação e Disponibilidade da madeira
- Qualificação da mão-de-obra
- Estratégias comerciais/Marketing

2. Quais as operações que tem maior frequência de falhas de ferramentas?
Ordene em ordem crescente.(por exemplo, de 6 para a mais freqüente até 1 para a menos freqüente).

OPERAÇÃO	FREQUÊNCIA DE FALHAS					
Destopagem	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6
Aplainamento/Desengrosso	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6
Perfilagem	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6
Furação	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6
Corte	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6
Fresamento	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6

3. Qual a principal falha das ferramentas nas operações de corte da madeira?

- Quebra ou Lascamento do gume
 Superaquecimento
 Desgaste no flanco
 Desgaste na face
 Não sei

4. Qual a causa das falhas nas operações de usinagem da madeira?

- Condições de corte impróprias
 Geometria da ferramenta inadequada
 Material da ferramenta inadequado
 Baixa Potência do eixo árvore
 Não sei/Nenhuma
 Outra

5. Se Outra Qual?

6. Organize em ordem de frequência de ocorrência os seguintes defeitos na usinagem?
De 8 para o mais freqüente até 1 para o menos freqüente

DEFEITO	FREQÜÊNCIA DE OCORRÊNCIA								
Arrancamento de fibras	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Queima de superfície	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Marcas de maravalha	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lascamento	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Levantamento de fibras	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Arrepiamento superficial	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aspereza da superfície	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Esmagamento de fibras	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

7. Quais as matérias-primas utilizadas na confecção de peças e componentes de móveis?

- Pinus*
- Eucalyptus
- Madeira tropical de média e alta massa específica
- MDF/Aglomerado
- Todos

8. Vocês utilizam madeiras duras na usinagem de peças e componentes de móveis?

- Sim
- Não

9. Se não, porque?

10. Quais os principais problemas encontrados na usinagem de madeiras tropicais de média e alta massa específica?

- Quebra/Desgastes excessivos
- Maiores custos
- Restrições ambientais
- Baixa produtividade
- Dificuldade em obter boa qualidade da superfície
- Nenhum/Outro

11. Se outro, qual?

12. O desgaste e a quebra das ferramentas na usinagem de madeiras tropicais em relação à madeira de *pinus* é:

- Maior e inviabiliza a produção
- Maior, mas não inviabiliza a produção
- Menor
- Indiferente
- Depende do processo

13. Nos países mais competitivos na indústria do mobiliário a tecnologia de fabricação já permite usinar madeiras duras gerando peças com qualidade e grande produtividade nos processos de usinagem. Na sua opinião as máquinas e ferramentas desenvolvidas no Brasil estão dimensionadas para usinagem de madeiras duras?

- Sim
- Não

14. Os custos na usinagem de madeira dura são cobertos pelos preços dos móveis? São compensatórios?

- Sim
- Não

15. A qualidade dos móveis de madeira dura é a mesma obtida na usinagem de *pinus*?

- Sim
- Pior
- Melhor

16. Em termos de produtividade, os processos de usinagem de madeiras duras comparada a usinagem de *pinus* é:

- Maior
- Menor
- Igual
- Não sei

17. Os fabricantes de ferramentas fornecem dados sobre os rendimentos das ferramentas utilizadas nas operações de corte, fresamento e furação da madeira?

- Sim
- Não

18. Os fabricantes de ferramentas lhes fornecem as especificações da vida das ferramentas para as diferentes operações de usinagem?

- Sim
- Não

19. Na sua opinião, quais são as causas da baixa eficiência produtiva das ferramentas e máquinas para usinagem da madeira quando comparada a usinagem de metais ?

- Máquinas obsoletas

- Falta de visão
 - Produto não justifica avanços na tecnologia de fabricação
 - Falta de pesquisas sobre o assunto
 - Não sei
20. Dentre as operações de usinagem da madeira, qual delas causa a maior restrição de capacidade (gargalo)?
- Fresamento
 - Corte
 - Furação
 - Não sei
21. Qual operação tem a maior frequência de paradas para troca de ferramentas por desgaste?
- Fresamento
 - Corte
 - Furação
 - Não sei
22. Qual operação tem maior índice de quebras de ferramentas?
- Fresamento
 - Corte
 - Furação
 - Não sei
23. Quais as medidas de qualidade utilizadas para avaliar o desempenho das operações de usinagem?
- Número de defeitos por unidade
 - Nível de reclamação do consumidor/usuário
 - Nível de refugo
 - Tempo médio entre falhas
 - Nenhum/Não há medidas de desempenho
24. Qual das medidas abaixo é utilizada para avaliar a capacidade do sistema de transformação da madeira?
- Lead time de fabricação
 - Tempo de ciclo
 - Aderência à programação
 - Nenhum
25. Qual o método utilizado para avaliar a qualidade da superfície das peças usinadas?
- Escaneamento por apalpador mecânico
 - Escaneamento a laser

- Método Visual
- Avaliação baseada no tato
- Nenhum

26. Qual a propriedade da madeira que tem maior influência sobre o desempenho dos processos de corte, fresamento e furação?

- Teor de sílica
- Dureza
- Teor de goma/resina
- Textura da madeira/grã
- Presença de Nós
- Teor de umidade

27. Nos processos de fresamento o grau de acabamento da superfície é bom o suficiente para dispensar as operações de lixamento?

- Sim
- Não

28. Qual o critério utilizado para determinar a vida das ferramentas utilizadas nas operações de corte, fresamento e furação?

- Perda da qualidade e precisão do corte
- Aumento da potência consumida
- Deficiência do acabamento da superfície
- Largura da marca de desgaste no flanco
- Vibrações da peça ou da ferramenta
- Ruídos fortes
- Profundidade da cratera
- Tempo de máquina
- Tempo efetivo de corte
- Volume de madeira removida
- Número de peças usinadas
- Quantidade em metros lineares de madeira usinada
- Raio do gume/arredondamento do gume
- Nenhum critério é utilizado

29. Dentro desse critério há valores limites estabelecidos pelos fabricantes de ferramenta para usinagem das diferentes espécies de madeira?

- Sim
- Não. Mas é necessário estabelecê-los

Não. Não é necessário estabelecê-los

30. Na sua opinião as máquinas estão dimensionadas para fornecer força necessária a usinagem de diferentes tipos de madeiras ou apenas madeira de *Pinus* ?

Sim

Não

31. Na sua opinião há um aumento ou redução dos custos da usinagem com o uso de ferramentas diamantadas?

Aumento dos custos

Redução dos custos

Não sei

32. Na sua opinião a utilização de ferramentas mais caras e mais resistentes ao desgaste e a quebra é economicamente viável?

Sim

Não

Não sei

33. Em termos de qualidade do produto, o uso de ferramentas mais caras e mais resistentes é justificável?

Sim

Não

Não sei

34. Na sua empresa há alguma estatística que correlacione os custos de fabricação de uma peça/componente de móvel com a vida das ferramentas utilizadas na usinagem dessas peças?

Sim

Não. Mas é uma informação importante para redução dos custos

Essa informação é irrelevante para redução dos custos de usinagem

35. Na sua opinião o estabelecimento desta correlação é importante para melhoria da usinagem?

Sim

Não

36. O percentual de peças aprovadas em cada operação de usinagem:

Depende das condições de corte

Depende das propriedades das ferramentas

Depende da espécie de madeira

Depende da máquina

37. Na sua opinião a rotação e a potência oferecida pelas máquinas são suficientes para se obter um bom acabamento da superfície e uma produtividade satisfatória?

Sim

Não

38. O uso de equipamentos CNC é justificável?

Sim

Não

39. Por que?

40. Quais grupos de operações têm os maiores tempos entre falhas (menor índice de quebras)?

Fresamento

Corte

Furação

41. Qual o grupo de operações que têm os maiores tempos de reparos?

Corte

Fresamento

Furação

42. Qual o grupo de operações que apresenta a maior a vida das ferramentas?

Fresamento

Corte

Furação

43. Qual a porcentagem de rejeição de peças por operação (% do total de peças):

Fresamento:

Corte:

Furação:

44. Na decisão sobre a compra de um móvel, o consumidor prioriza:

Preservação do meio ambiente

Espécie de madeira

Design

Preço

45. Na seleção de uma nova espécie de madeira para confecções de móveis qual a propriedades mais importante?

Resistência

Facilidade de usar e secar

Cor, brilho e textura

Abundância da espécie

46. Qual o material dos gumes das fresas utilizadas na sua produção?

- Aço rápido
- Metal duro
- PKD/Diamante
- Cerâmica

47. Qual das seguintes variáveis tem mais influência na qualidade e na produtividade dos processos de usinagem?

- Ângulo de folga da ferramenta
- Ângulo de Saída da ferramenta
- Velocidade de corte
- Velocidade de avanço
- Profundidade de corte

Envie seus comentários:



ENVIO DO FORMULÁRIO

Obrigado por contribuir com nossa pesquisa.

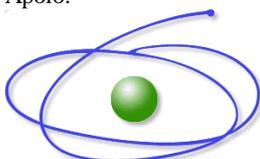
O texto inserido aqui explica como planejar o uso das informações fornecidas por você.

Também explicaremos os benefícios que você terá ao contribuir conosco.

Enviar formulário

Limpar campos

Apoio:



C A P E S



Www.Ufam.Edu.br

Informações e Contatos:

Fernando Cardoso Lucas Filho

Doutorando eng. de produção UFSC

postmaster@technonline.com.br

<http://www.technonline.com.br/>

0xx41-376-4218

APÊNDICE 2 – Formulários para aquisição e tabulação de dados submetidos às fábricas de móveis.

Rotina de operações padrão:		Demanda diária (unidades)		Simbologia: Op.Manual  Op. Mecânica  Andando		
Item:	Operações	Processo:		Tempo de ciclo (seg):		Responsável
		Manual	Máquina	Tempo de operação (seg)		
1						
2						
3						
4						
5						
6						

Roteiro de Fabricação:		Atualizado em		Responsável			
Item:	Operações	Especif.do item		Consumo Padrão			
		Máquina	Tempo de proc. (seg)	Troca de ferram.	Capac. de prod. por turno		
Ordem	Operações	Máquina	Manual	Total	Vida (un.)	Tempo Total (seg)	Tempo Unit. (seg)
1							
2							
3							
4							
5							
6							

APÊNDICE 4 – DESTOPAGEM

Alfa	Gama	N	fz	Z	f	Vf (m/min)	D (mm)	Vc (m/s)	Vida (min)	Produção (m)	Rejeição (%)	ME (g/cm ³)	Desvio Vida	Desvio Rej.	Madeira
10.00	2.00	3500	0.05	48.00	2.40	8.40	200.00	36.65	1500.00	12600.00	17.00	0.78	201.00	2.28	Jequitibá
10.00	3.00	3500	0.05	60.00	3.00	10.50	250.00	45.82	1230.00	12915.00	12.00	0.78	172.00	1.61	Jequitibá
10.00	4.00	3500	0.05	72.00	3.60	12.60	300.00	54.98	1008.60	12708.36	9.00	0.78	146.00	1.21	Jequitibá
10.00	5.00	3500	0.05	84.00	4.20	14.70	350.00	64.14	827.05	12157.66	7.00	0.78	134.00	0.94	Jequitibá
10.00	5.00	3500	0.05	96.00	4.80	16.80	400.00	73.30	678.18	11393.47	7.00	0.78	121.00	0.94	Jequitibá
15.00	2.00	3500	0.10	40.00	4.00	14.00	200.00	36.65	2112.00	29568.00	10.00	0.41	283.01	1.34	Pinus
15.00	3.00	3500	0.10	48.00	4.80	16.80	250.00	45.82	1917.00	32205.60	8.00	0.41	276.05	1.07	Pinus
15.00	4.00	3500	0.10	60.00	6.00	21.00	300.00	54.98	1715.00	36015.00	7.00	0.41	264.11	0.94	Pinus
15.00	5.00	3500	0.10	72.00	7.20	25.20	350.00	64.14	1213.00	30567.60	5.00	0.41	198.93	0.67	Pinus
15.00	5.00	3500	0.10	72.00	7.20	25.20	400.00	73.30	1012.00	25502.40	5.00	0.41	172.04	0.67	Pinus
10.00	2.00	3500	0.05	48.00	2.40	8.40	200.00	36.65	1610.00	13524.00	15.00	0.75	225.40	2.01	Muiracatiara
10.00	3.00	3500	0.05	60.00	3.00	10.50	250.00	45.82	1320.20	13862.10	13.00	0.75	190.11	1.74	Muiracatiara
10.00	4.00	3500	0.05	72.00	3.60	12.60	300.00	54.98	1082.56	13640.31	11.00	0.75	166.71	1.47	Muiracatiara
10.00	5.00	3500	0.05	84.00	4.20	14.70	350.00	64.14	887.70	13049.23	10.00	0.75	146.47	1.34	Muiracatiara
10.00	5.00	3500	0.05	96.00	4.80	16.80	400.00	73.30	727.92	12228.99	8.00	0.75	117.92	1.07	Muiracatiara
12.00	2.00	3500	0.05	48.00	2.40	8.40	200.00	36.65	1659.00	13935.60	9.00	0.61	240.56	1.21	Curupixá
12.00	3.00	3500	0.05	60.00	3.00	10.50	250.00	45.82	1360.38	14283.99	7.00	0.61	210.04	0.94	Curupixá
12.00	4.00	3500	0.05	72.00	3.60	12.60	300.00	54.98	1115.51	14055.45	5.00	0.61	184.06	0.67	Curupixá
12.00	5.00	3500	0.05	84.00	4.20	14.70	350.00	64.14	914.72	13446.38	4.00	0.61	153.67	0.54	Curupixá
12.00	5.00	3500	0.05	96.00	4.80	16.80	400.00	73.30	750.07	12601.18	4.00	0.61	127.51	0.54	Curupixá
10.00	2.00	3500	0.05	48.00	2.40	8.40	200.00	36.65	1623.00	13633.20	13.00	0.68	227.22	1.74	Amapá
10.00	3.00	3500	0.05	60.00	3.00	10.50	250.00	45.82	1330.86	13974.03	11.00	0.68	194.31	1.47	Amapá
10.00	4.00	3500	0.05	72.00	3.60	12.60	300.00	54.98	1091.31	13750.45	10.00	0.68	169.15	1.34	Amapá
10.00	5.00	3500	0.05	84.00	4.20	14.70	350.00	64.14	894.87	13154.59	9.00	0.68	143.18	1.21	Amapá
10.00	5.00	3500	0.05	96.00	4.80	16.80	400.00	73.30	733.79	12327.73	7.00	0.68	121.08	0.94	Amapá
15.00	2.00	3500	0.10	40.00	4.00	14.00	200.00	36.65	1890.00	26460.00	6.00	0.48	264.60	0.80	Cedro
15.00	3.00	3500	0.10	48.00	4.80	16.80	250.00	45.82	1549.80	26036.64	4.00	0.48	226.27	0.54	Cedro
15.00	4.00	3500	0.10	60.00	6.00	21.00	300.00	54.98	1270.84	26687.56	3.00	0.48	190.63	0.40	Cedro
15.00	5.00	3500	0.10	72.00	7.20	25.20	350.00	64.14	1042.09	26260.56	2.00	0.48	165.69	0.27	Cedro

APÊNDICE 5 – APLAINAMENTO

Alfa	Gama	n	fz	Z	f	Vf (m/min)	D (mm)	Vc (m/s)	Vida (min)	Produção (m3)	Rejeição	ME	Desvio Vida	Desvio Rej.	Madeira
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	80.00	33.51	3000.00	14.40	12.00	0.78	435.00	1.74	Jequitiba
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	100.00	41.89	2400.00	11.52	11.00	0.78	369.60	1.60	Jequitiba
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	120.00	50.27	2000.00	9.60	10.00	0.78	320.00	1.45	Jequitiba
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	140.00	58.64	1714.29	8.23	10.00	0.78	291.43	1.45	Jequitiba
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	150.00	62.83	1600.00	7.68	9.00	0.78	272.00	1.31	Jequitiba
10.00	25.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	80.00	33.51	5700.00	27.36	10.00	0.41	826.50	4.50	Pinus
10.00	25.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	100.00	41.89	4560.00	21.89	8.00	0.41	702.24	6.30	Pinus
10.00	25.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	120.00	50.27	3648.00	17.51	6.00	0.41	583.68	8.30	Pinus
10.00	25.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	140.00	58.64	2918.40	14.01	5.00	0.41	496.13	9.45	Pinus
10.00	25.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	150.00	62.83	2334.72	11.21	4.00	0.41	396.90	10.20	Pinus
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	80.00	33.51	3280.00	15.74	13.00	0.75	475.60	5.20	Muiracatiara
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	100.00	41.89	2624.00	12.60	12.00	0.75	404.10	7.10	Muiracatiara
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	120.00	50.27	2099.20	10.08	11.00	0.75	335.87	9.20	Muiracatiara
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	140.00	58.64	1679.36	8.06	11.00	0.75	285.49	10.20	Muiracatiara
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	150.00	62.83	1343.49	6.45	10.00	0.75	228.39	11.40	Muiracatiara
15.00	18.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	80.00	33.51	3836.00	18.41	11.00	0.61	556.22	3.90	Curupixá
15.00	18.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	100.00	41.89	3068.80	14.73	10.00	0.61	472.60	5.56	Curupixá
15.00	18.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	120.00	50.27	2455.04	11.78	8.00	0.61	392.81	7.89	Curupixá
15.00	18.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	140.00	58.64	1964.03	9.43	6.00	0.61	333.89	9.35	Curupixá
15.00	18.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	150.00	62.83	1571.23	7.54	5.00	0.61	267.11	10.20	Curupixá
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	80.00	33.51	3441.00	16.52	11.00	0.68	498.95	6.10	Amapá
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	100.00	41.89	2752.80	13.21	10.00	0.68	423.93	7.80	Amapá
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	120.00	50.27	2202.24	10.57	9.00	0.68	352.36	10.20	Amapá
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	140.00	58.64	1761.79	8.46	9.00	0.68	299.50	11.30	Amapá
15.00	15.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	150.00	62.83	1409.43	6.77	8.00	0.68	239.60	12.10	Amapá
12.00	20.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	80.00	33.51	4874.00	23.40	8.00	0.48	706.73	3.40	Cedro
12.00	20.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	100.00	41.89	3899.20	18.72	6.00	0.48	600.48	5.20	Cedro
12.00	20.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	120.00	50.27	3119.36	14.97	5.00	0.48	499.10	7.40	Cedro
12.00	20.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	140.00	58.64	2495.49	11.98	4.00	0.48	424.23	8.80	Cedro
12.00	20.00	8000.00	0.50	4.00	2.00	16.00	150.00	62.83	1996.39	9.58	3.00	0.48	339.39	9.30	Cedro

APÊNDICE 6 – FRESAMENTO FRONTAL

Gama	n	fz	Z	f	Vf (m/min)	D (mm)	Vc (m/s)	Vida (min)	Produção (m3)	Rejeição	ME	Desvio Vida	Madeira
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	5.00	4.71	300.00	0.108	9.00	0.78	43.50	Jequitiba
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	10.00	9.42	150.00	0.054	8.00	0.78	23.10	Jequitiba
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	15.00	14.14	100.00	0.036	7.00	0.78	16.00	Jequitiba
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	20.00	18.85	75.00	0.027	6.00	0.78	12.75	Jequitiba
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	26.00	24.50	57.69	0.021	5.00	0.78	9.81	Jequitiba
25.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	5.00	4.71	570.73	0.205	6.00	0.41	82.76	Pinus
25.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	10.00	9.42	285.37	0.103	5.00	0.41	43.95	Pinus
25.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	15.00	14.14	190.24	0.068	4.00	0.41	30.44	Pinus
25.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	20.00	18.85	142.68	0.051	3.00	0.41	24.26	Pinus
25.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	26.00	24.50	109.76	0.040	3.00	0.41	18.66	Pinus
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	5.00	4.71	312.00	0.112	10.00	0.75	45.24	Muiracatiara
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	10.00	9.42	156.00	0.056	8.00	0.75	24.02	Muiracatiara
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	15.00	14.14	104.00	0.037	7.00	0.75	16.64	Muiracatiara
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	20.00	18.85	78.00	0.028	6.00	0.75	13.26	Muiracatiara
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	26.00	24.50	60.00	0.022	5.00	0.75	10.20	Muiracatiara
18.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	5.00	4.71	383.61	0.138	7.00	0.61	55.62	Curupixá
18.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	10.00	9.42	191.80	0.069	6.00	0.61	29.54	Curupixá
18.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	15.00	14.14	127.87	0.046	4.00	0.61	20.46	Curupixá
18.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	20.00	18.85	95.90	0.035	3.00	0.61	16.30	Curupixá
18.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	26.00	24.50	73.77	0.027	3.00	0.61	12.54	Curupixá
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	5.00	4.71	344.12	0.124	8.00	0.68	49.90	Amapá
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	10.00	9.42	172.06	0.062	7.00	0.68	26.50	Amapá
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	15.00	14.14	114.71	0.041	6.00	0.68	18.35	Amapá
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	20.00	18.85	86.03	0.031	4.00	0.68	14.63	Amapá
15.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	26.00	24.50	66.18	0.024	4.00	0.68	11.25	Amapá
20.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	5.00	4.71	487.50	0.176	4.00	0.48	70.69	Cedro
20.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	10.00	9.42	243.75	0.088	3.00	0.48	37.54	Cedro
20.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	15.00	14.14	162.50	0.059	2.00	0.48	26.00	Cedro
20.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	20.00	18.85	121.88	0.044	1.00	0.48	20.72	Cedro
20.00	18000.00	0.10	2.00	0.20	3.60	26.00	24.50	93.75	0.034	1.00	0.48	15.94	Cedro

APÊNDICE 7 – FRESAMENTO DE PERFIL

Alfa	Gama	n	fz	Z	f	Vf (m/min)	D (mm)	Vc (m/s)	Vida (min)	Produção (m3)	Rejeição	ME	Desvio Vida	Madeira
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	125.00	39.27	600.00	16.20	10.00	0.78	87.00	Jequetiba
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	140.00	43.98	535.71	14.46	8.00	0.78	82.50	Jequetiba
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	150.00	47.12	500.00	13.50	6.00	0.78	80.00	Jequitiba
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	165.00	51.84	454.55	12.27	5.00	0.78	77.27	Jequitiba
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	175.00	54.98	428.57	11.57	5.00	0.78	72.86	Jequitiba
10.00	25.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	125.00	39.27	1141.46	30.82	6.00	0.41	165.51	Pinus
10.00	25.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	140.00	43.98	1019.16	27.52	4.00	0.41	156.95	Pinus
10.00	25.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	150.00	47.12	951.22	25.68	3.00	0.41	152.20	Pinus
10.00	25.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	165.00	51.84	864.75	23.35	3.00	0.41	147.01	Pinus
10.00	25.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	175.00	54.98	815.33	22.01	3.00	0.41	138.61	Pinus
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	125.00	39.27	624.00	16.85	8.00	0.75	90.48	Muiracatiara
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	140.00	43.98	557.14	15.04	7.00	0.75	85.80	Muiracatiara
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	150.00	47.12	520.00	14.04	6.00	0.75	83.20	Muiracatiara
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	165.00	51.84	472.73	12.76	5.00	0.75	80.36	Muiracatiara
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	175.00	54.98	445.71	12.03	5.00	0.75	75.77	Muiracatiara
15.00	18.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	125.00	39.27	767.21	20.71	5.00	0.61	111.25	Curupixá
15.00	18.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	140.00	43.98	685.01	18.50	4.00	0.61	105.49	Curupixá
15.00	18.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	150.00	47.12	639.34	17.26	3.00	0.61	102.30	Curupixá
15.00	18.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	165.00	51.84	581.22	15.69	2.00	0.61	98.81	Curupixá
15.00	18.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	175.00	54.98	548.01	14.80	2.00	0.61	93.16	Curupixá
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	125.00	39.27	688.24	18.58	7.00	0.68	99.79	Amapá
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	140.00	43.98	614.50	16.59	7.00	0.68	94.63	Amapá
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	150.00	47.12	573.53	15.49	6.00	0.68	91.76	Amapá
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	165.00	51.84	521.39	14.08	6.00	0.68	88.64	Amapá
15.00	15.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	175.00	54.98	491.60	13.27	5.00	0.68	83.57	Amapá
12.00	20.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	125.00	39.27	975.00	26.33	5.00	0.48	141.38	Cedro
12.00	20.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	140.00	43.98	870.54	23.50	4.00	0.48	134.06	Cedro
12.00	20.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	150.00	47.12	812.50	21.94	3.00	0.48	130.00	Cedro
12.00	20.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	165.00	51.84	738.64	19.94	2.00	0.48	125.57	Cedro
12.00	20.00	6000.00	0.50	6.00	3.00	18.00	175.00	54.98	696.43	18.80	2.00	0.48	118.39	Cedro

APÊNDICE 8 – CORTE LONGITUDINAL

Alfa	Gama	n	fz	Z	f	Vf (m/min)	D (mm)	Vc (m/s)	Vida (min)	Produção (m3)	Rejeição	ME	Desvio Vida	Madeira
15.00	15.00	3400.00	0.10	20.00	2.00	6.80	200.00	35.60	1665.23	0.57	11.00	0.78	241.46	Jequetiba
15.00	15.00	3400.00	0.10	24.00	2.40	8.16	250.00	44.51	1332.18	0.54	9.00	0.78	205.16	Jequetiba
15.00	15.00	3400.00	0.10	30.00	3.00	10.20	300.00	53.41	1110.15	0.57	7.00	0.78	177.62	Jequetiba
15.00	15.00	3400.00	0.10	32.00	3.20	10.88	350.00	62.31	951.56	0.52	6.00	0.78	161.77	Jequetiba
15.00	15.00	3400.00	0.10	36.00	3.60	12.24	400.00	71.21	832.62	0.51	5.00	0.78	141.54	Jequetiba
10.00	25.00	3400.00	0.10	14.00	1.40	4.76	200.00	35.60	3168.00	0.75	5.00	0.41	459.36	Pinus
10.00	25.00	3400.00	0.10	16.00	1.60	5.44	250.00	44.51	2534.40	0.69	4.00	0.41	390.30	Pinus
10.00	25.00	3400.00	0.10	16.00	1.60	5.44	300.00	53.41	2112.00	0.57	4.00	0.41	337.92	Pinus
10.00	25.00	3400.00	0.10	18.00	1.80	6.12	350.00	62.31	1810.29	0.55	3.00	0.41	307.75	Pinus
10.00	25.00	3400.00	0.10	20.00	2.00	6.80	400.00	71.21	1584.00	0.54	3.00	0.41	269.28	Pinus
15.00	15.00	3400.00	0.10	20.00	2.00	6.80	200.00	35.60	1731.84	0.59	8.00	0.75	251.12	Muiracatiara
15.00	15.00	3400.00	0.10	24.00	2.40	8.16	250.00	44.51	1385.47	0.57	7.00	0.75	213.36	Muiracatiara
15.00	15.00	3400.00	0.10	30.00	3.00	10.20	300.00	53.41	1154.56	0.59	6.00	0.75	184.73	Muiracatiara
15.00	15.00	3400.00	0.10	32.00	3.20	10.88	350.00	62.31	989.62	0.54	6.00	0.75	168.24	Muiracatiara
15.00	15.00	3400.00	0.10	36.00	3.60	12.24	400.00	71.21	865.92	0.53	5.00	0.75	147.21	Muiracatiara
15.00	18.00	3400.00	0.10	20.00	2.00	6.80	200.00	35.60	2129.31	0.72	5.00	0.61	308.75	Curupixá
15.00	18.00	3400.00	0.10	24.00	2.40	8.16	250.00	44.51	1703.45	0.70	4.00	0.61	262.33	Curupixá
15.00	18.00	3400.00	0.10	30.00	3.00	10.20	300.00	53.41	1419.54	0.72	3.00	0.61	227.13	Curupixá
15.00	18.00	3400.00	0.10	32.00	3.20	10.88	350.00	62.31	1216.75	0.66	3.00	0.61	206.85	Curupixá
15.00	18.00	3400.00	0.10	36.00	3.60	12.24	400.00	71.21	1064.66	0.65	2.00	0.61	180.99	Curupixá
15.00	15.00	3400.00	0.10	20.00	2.00	6.80	200.00	35.60	1910.12	0.65	7.00	0.68	276.97	Amapá
15.00	15.00	3400.00	0.10	24.00	2.40	8.16	250.00	44.51	1528.09	0.62	7.00	0.68	235.33	Amapá
15.00	15.00	3400.00	0.10	30.00	3.00	10.20	300.00	53.41	1273.41	0.65	6.00	0.68	203.75	Amapá
15.00	15.00	3400.00	0.10	32.00	3.20	10.88	350.00	62.31	1091.50	0.59	5.00	0.68	185.55	Amapá
15.00	15.00	3400.00	0.10	36.00	3.60	12.24	400.00	71.21	955.06	0.58	5.00	0.68	162.36	Amapá
12.00	20.00	3400.00	0.10	14.00	1.40	4.76	200.00	35.60	2706.00	0.64	5.00	0.48	392.37	Cedro
12.00	20.00	3400.00	0.10	16.00	1.60	5.44	250.00	44.51	2164.80	0.59	4.00	0.48	333.38	Cedro
12.00	20.00	3400.00	0.10	16.00	1.60	5.44	300.00	53.41	1804.00	0.49	3.00	0.48	288.64	Cedro
12.00	20.00	3400.00	0.10	18.00	1.80	6.12	350.00	62.31	1546.29	0.47	3.00	0.48	262.87	Cedro
12.00	20.00	3400.00	0.10	20.00	2.00	6.80	400.00	71.21	1353.00	0.46	2.00	0.48	230.01	Cedro

APÊNDICE 9 – FURAÇÃO

Alfa	Gama	n	fz	Z	f	Vf (m/min)	D (mm)	Vc (m/s)	Vida (min)	Produção (m)	Rejeição	ME	Desvio Vida	Madeira
12.00	20.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	8.00	1.42	1261.54	0.43	3.00	0.78	182.92	Jequitiba
12.00	20.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	10.00	1.78	1009.23	0.34	2.00	0.78	155.42	Jequitiba
12.00	20.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	12.00	2.14	841.03	0.29	2.00	0.78	134.56	Jequitiba
12.00	20.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	14.00	2.49	720.88	0.25	2.00	0.78	122.55	Jequitiba
12.00	20.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	16.00	2.85	630.77	0.21	2.00	0.78	107.23	Jequitiba
15.00	30.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	8.00	1.42	2400.00	0.82	2.00	0.41	348.00	Pinus
15.00	30.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	10.00	1.78	1920.00	0.65	2.00	0.41	295.68	Pinus
15.00	30.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	12.00	2.14	1600.00	0.54	2.00	0.41	256.00	Pinus
15.00	30.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	14.00	2.49	1371.43	0.47	1.00	0.41	233.14	Pinus
15.00	30.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	16.00	2.85	1200.00	0.41	1.00	0.41	204.00	Pinus
12.00	20.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	8.00	1.42	1312.00	0.45	3.00	0.75	190.24	Muiracatiara
12.00	20.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	10.00	1.78	1049.60	0.36	2.00	0.75	161.64	Muiracatiara
12.00	20.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	12.00	2.14	874.67	0.30	2.00	0.75	139.95	Muiracatiara
12.00	20.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	14.00	2.49	749.71	0.25	2.00	0.75	127.45	Muiracatiara
12.00	20.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	16.00	2.85	656.00	0.22	1.00	0.75	111.52	Muiracatiara
15.00	25.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	8.00	1.42	1613.11	0.55	3.00	0.61	233.90	Curupixá
15.00	25.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	10.00	1.78	1290.49	0.44	3.00	0.61	198.74	Curupixá
15.00	25.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	12.00	2.14	1075.41	0.37	3.00	0.61	172.07	Curupixá
15.00	25.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	14.00	2.49	921.78	0.31	2.00	0.61	156.70	Curupixá
15.00	25.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	16.00	2.85	806.56	0.27	2.00	0.61	137.11	Curupixá
12.00	25.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	8.00	1.42	1447.06	0.49	4.00	0.68	209.82	Amapá
12.00	25.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	10.00	1.78	1157.65	0.39	3.00	0.68	178.28	Amapá
12.00	25.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	12.00	2.14	964.71	0.33	2.00	0.68	154.35	Amapá
12.00	25.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	14.00	2.49	826.89	0.28	2.00	0.68	140.57	Amapá
12.00	25.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	16.00	2.85	723.53	0.25	2.00	0.68	123.00	Amapá
15.00	30.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	8.00	1.42	2050.00	0.70	2.00	0.48	297.25	Cedro
15.00	30.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	10.00	1.78	1640.00	0.56	2.00	0.48	252.56	Cedro
15.00	30.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	12.00	2.14	1366.67	0.46	2.00	0.48	218.67	Cedro
15.00	30.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	14.00	2.49	1171.43	0.40	1.00	0.48	199.14	Cedro
15.00	30.00	3400.00	0.50	2.00	1.00	3.40	16.00	2.85	1025.00	0.35	1.00	0.48	174.25	Cedro