

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UM
SISTEMA ESPECIALISTA PARA A OTIMIZAÇÃO
DO PROCESSO DE USINAGEM**

ELESANDRO ANTONIO BAPTISTA

ORIENTADOR: PROF. DR. NIVALDO LEMOS COPPINI

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2000

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UM
SISTEMA ESPECIALISTA PARA A OTIMIZAÇÃO
DO PROCESSO DE USINAGEM**

ELESANDRO ANTONIO BAPTISTA

ORIENTADOR: PROF. DR. NIVALDO LEMOS COPPINI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2000

**DESENVOLVIMENTO DE UM
SISTEMA ESPECIALISTA PARA A OTIMIZAÇÃO
DO PROCESSO DE USINAGEM**

ELESANDRO ANTONIO BAPTISTA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, em 22 de agosto de 2000, pela
Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, Presidente
UNIMEP

Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho
EESC - USP

Prof. Dr. Neócles Alves Pereira
UFSCar

Prof. Dr. Milton Vieira Júnior
UNIMEP

À

Minha Família

Especialmente aos meus pais Sidnei e Celina

AGRADECIMENTOS

Ao professor Nivaldo Lemos Coppini pela orientação, compreensão e Incentivo dispensado ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Milton Vieira Júnior pelo incentivo e amizade.

À professora Maria Isabel Santoro, pela dedicação e paciência dispensados à orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Reginaldo Teixeira Coelho, pelo apoio na implementação da otimização em modo automático e na realização de testes de verificação do sistema especialista TOES.

Ao Prof. Klaus Shützer pelo apoio dispensado durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Rafael Furlan Grivoldi pela amizade, companheirismo e principalmente pelo suporte no aprendizado da linguagem de programação.

À João Carlos Malaquias pela amizade, companheirismo e apoio na realização dos testes em laboratório.

À secretaria da pós-graduação da FEMP, pelo apoio, e principalmente, pela amizade demonstrada pelas secretária e bolsistas, Marta, Flávia e Daniele.

Aos técnicos do laboratório de fabricação mecânica da UNIMEP, pelo auxílio na realização dos ensaios para a verificação do sistema especialista em laboratório.

À Mercedes Benz do Brasil, e a todos seus funcionários que colaboraram direta ou indiretamente nos ensaios realizados em ambiente fabril.

À Sandvik do Brasil pelo apoio.

À FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro.

Quem tem um sonho não dança.

Agenor de Miranda Araújo Neto (Cazuza)

(1958-1990)

Músico e poeta brasileiro.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABELAS.....	XVII
LISTA DE EQUAÇÕES.....	XVIII
RESUMO	XIX
ABSTRACT.....	XX
1. INTRODUÇÃO	21
1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA.....	24
1.2. OBJETIVOS	24
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	27
2.1. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	27
2.1.1. HISTÓRICO	28
2.1.2. CARACTERÍSTICAS.....	29
2.1.3. COMPONENTES DE IA.....	33
2.1.4. APLICAÇÕES NA MANUFATURA	36
2.2. SISTEMAS ESPECIALISTAS	37
2.2.1. BASE DE CONHECIMENTO.....	39
2.2.2. BASE DE DADOS.....	44
2.2.3. MOTOR DE INFERÊNCIA	45
2.2.4. INTERFACE COM O USUÁRIO	45
2.2.5. RECURSO DE EXPLICAÇÃO.....	46
2.2.6. TRATAMENTO DE INCERTEZAS	46
2.2.7. ÁREAS DE APLICAÇÃO DE SES.....	46
2.2.8. ALGUNS SES DESENVOLVIDOS	47
2.3. NOÇÕES BÁSICAS DE TORNEAMENTO.....	48
2.3.1. DEFINIÇÕES.....	48
2.3.2. FORÇAS E POTÊNCIAS DE CORTE.....	50
2.3.3. CUSTOS EM OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO	51
2.3.4. INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA	53
2.3.5. DETERMINAÇÃO DO IME	54
2.3.6. EQUIVALÊNCIA	57
2.4. CONEXÕES VIA REDE E INTERNET.....	59
2.4.1. TOPOLOGIA DE REDES	60
2.4.2. A INTERNET	62
2.4.3. CONTEXTO NA MANUFATURA.....	63
2.5. A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM	65
3. MÉTODO.....	71

4.	CONSTRUÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA.....	73
4.1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	73
4.2.	ESCOLHA DO ESPECIALISTA E AQUISIÇÃO DO CONHECIMENTO.....	74
4.3.	OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	74
4.3.1.	CONCEITO DE EQUIVALÊNCIA IMPLEMENTADO NO SE	77
4.4.	CENÁRIOS DE FABRICAÇÃO	81
4.4.1.	CENÁRIO CORRENTE	81
4.4.2.	CENÁRIOS RECOMENDADOS PARA A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	82
4.4.3.	CENÁRIOS NÃO RECOMENDADOS.....	83
4.4.4.	ADAPTAÇÃO DOS CENÁRIOS PARA O SE	83
4.5.	METODOLOGIAS DE OTIMIZAÇÃO PARA OS CENÁRIOS.....	87
4.5.1.	ESTRATÉGIA DE COMUNICAÇÃO ENTRE SE E MÁQUINA-FERRAMENTA	89
4.6.	ESCOLHA DA VELOCIDADE DE CORTE OTIMIZADA	91
4.6.1.	INFORMAÇÕES SOBRE O SISTEMA PRODUTIVO.....	93
4.6.2.	CONFIGURAÇÃO DO SE	96
4.6.3.	ESCOLHA PELA TABELA DE DECISÃO	98
4.6.4.	ESCOLHA PELA REGRA RESIDENTE	99
4.6.5.	ESCOLHA PELA TABELA DE EXCEÇÕES	100
4.7.	O SISTEMA ESPECIALISTA TOES	100
4.7.1.	TELAS DO TOES	102
4.7.2.	CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS.....	105
4.7.3.	ESTRUTURA DO TOES	106
4.7.4.	MÁQUINA DE INFERÊNCIA.....	106
4.7.5.	BASE DE CONHECIMENTO	107
4.7.6.	A CONSTRUÇÃO DOS BANCO DE DADOS.....	108
5.	VERIFICAÇÃO E EXEMPLO DE APLICAÇÃO	112
5.1.	ENSAIO DE USINAGEM.....	112
5.1.1.	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	116
5.1.2.	RESULTADOS.....	119
5.2.	DETERMINAÇÃO DA FAMÍLIA DE PEÇAS	120
5.2.1.	PEÇA CÓDIGO VTF_P_2	120
5.2.2.	PEÇA CÓDIGO VTF_P_3	121
5.2.3.	PEÇA CÓDIGO VTF_P_4	122
5.2.4.	PEÇA CÓDIGO VTF_P_5	123
5.2.5.	CONFIGURAÇÃO DOS LOTES DE PEÇAS.....	124
5.3.	DETERMINAÇÃO DE PEÇAS COM MATERIAIS DIFERENTES.....	125
5.3.1.	PEÇA CÓDIGO VTF_P_6	126
5.3.2.	PEÇA CÓDIGO VTF_P_7	127
5.3.3.	CONFIGURAÇÃO DOS LOTES DE PEÇAS.....	128
5.3.4.	CONFIGURAÇÃO DO TOES	129
5.4.	EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM AMBIENTE FABRIL.....	131
5.4.1.	OTIMIZAÇÃO DO “CUBO DE FREIO”.....	132
5.4.2.	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	133
5.4.3.	OTIMIZAÇÃO DO TUBO DE APOIO.....	138
5.4.4.	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	139
5.4.5.	PREFERÊNCIAS DO USUÁRIO.....	143
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	145
6.1.	VERIFICAÇÃO	145
6.1.1.	SIMULAÇÃO PARA OS CENÁRIOS 1 E 2	145
6.1.2.	SIMULAÇÃO PARA O CENÁRIO 4	147
6.2.	OTIMIZAÇÃO DO CUBO DE FREIO	148
6.3.	OTIMIZAÇÃO DO TUBO DE APOIO	150
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	153

7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	154
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	155
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	160
ANEXO I - MEDIDAS DE DESGASTE VB DAS ARESTAS CONSUMIDAS NO ENSAIO REALIZADO EM LABORATÓRIO.....	167
ANEXO II - CONTROLE DIMENSIONAL E DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVA.....	169
ANEXO III - PROGRAMA CNC UTILIZADO NA USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA EM LABORATÓRIO.....	175
ANEXO IV - CÓPIAS DAS PLANILHAS ELETRÔNICAS UTILIZADAS NOS CÁLCULOS DA PEÇA USINADA EM LABORATÓRIO E EM TODAS AS PEÇAS SIMILARES DESCRITAS NO CAPÍTULO 5.....	177
ANEXO V - PROGRAMA CNC UTILIZADO NA USINAGEM DO CUBO DE FREIO EM AMBIENTE FABRIL.....	185
ANEXO VI - PROGRAMA CNC UTILIZADO NA USINAGEM DO TUBO DE APOIO EM AMBIENTE FABRIL.....	187
ANEXO VII - RUGOSIDADES MEDIDAS NA USINAGEM DO TUBO DE APOIO.....	189
ANEXO VIII - TAXA DE CÂMBIO	192
ANEXO IX – FLUXOGRAMA DE CHECAGEM AMPLIADO	194

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a_p	profundidade de corte [mm].
A_r	Arrojado (referente a política do operador).
AC	Aquisição do Conhecimento.
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange.</i>
ATAC	Assistência Técnica Assistida Por Computador.
b	largura de corte [mm].
BD	Banco de Dados.
C_o	Conservador (referente a política do operador).
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing.</i>
CAPP	<i>Computer Aided Process Planning.</i>
CERN	<i>European Laboratory for Particle Physics.</i>
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing.</i>
CM	Carga da Máquina.
CNC	Comando Numérico Computadorizado.
d	diâmetro da peça [mm].
$d_{crítico}$	diâmetro crítico [mm].
d_e	diâmetro equivalente [mm].
d_{e1}	diâmetro equivalente para a V_{c1} [mm].
d_{e2}	diâmetro equivalente para a V_{c2} [mm].
d_i	diâmetro do rebaixo [mm].
d_{mp}	maior diâmetro a ser usinado na peça [mm].
d_{np}	menor diâmetro a ser usinado na peça [mm].
DOS	<i>Disk Operating System.</i>
d_1	diâmetro menor [mm].
d_2	diâmetro maior [mm].
<i>e-mail</i>	<i>eletronic mail.</i>
E_m	espaço ocupado pela máquina-ferramenta [m ²].
EstoqueFer	situação do estoque da ferramenta.
EC	Engenharia do Conhecimento.
EESC-USP	Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade São Paulo.

f	avanço de corte [mm/volta].
F_c	força de corte [Kgf].
F_f	força de avanço [Kgf].
Fer_Utiliz	ferramenta utilizada.
FP	Ferramenta Padrão.
FTP	<i>File Transfer Protocol.</i>
G_a	Gargalo.
h	espessura de corte [mm].
H	número de horas de trabalho previstas por ano [H].
IA	Inteligência Artificial.
IME	Intervalo de Máxima Eficiência.
j	taxa anual de juros.
k_{s1}	constante de Kienzle.
K	constante da equação de vida de Taylor.
K_c	custo do m^2 ocupado pela máquina-ferramenta [R\$/ m^2 * ano].
K_{ft}	custo da aresta de corte da ferramenta [R\$].
K_i	constante da equação de Taylor, da peça do lote i .
K_m	custo de manutenção da máquina-ferramenta [R\$ / ano].
K_p	custo de produção por peça [R\$/peça].
K_{pi}	custo de aquisição do inserto [R\$].
K_{uf}	custo de usinagem relativo a ferramenta de corte [R\$/peça].
K_{um}	custo de usinagem relativo a máquina-ferramenta [R\$/peça].
K_{us}	custo de usinagem relativo a mão de obra [R\$/peça].
l_a	comprimento total da peça [mm].
l_{ar}	comprimento de corte total da peça retificado [mm].
l_c	vida da ferramenta de corte expressa em comprimento de corte [m].
l_{cp}	comprimento de corte de uma peça[mm].
l_{c1}	vida da aresta da ferramenta expressa em comprimento de corte para a primeira velocidade de corte V_{c1} .
l_{c2}	vida da aresta da ferramenta expressa em comprimento de corte para a segunda velocidade de corte V_{c2} .
l_f	percurso de avanço [mm].
l_i	comprimento do rebaixo [mm].
LAN	<i>Local Area Network.</i>

i_m	idade da máquina-ferramenta [anos].
M	vida prevista para a máquina-ferramenta [anos].
M_o	Moderado (referente a política do operador).
MEI	<i>Maximum Efficiency Interval.</i>
n	rotação da peça [rpm].
n_e	rotação equivalente [rpm].
n_{e1}	rotação equivalente para V_{c1} [rpm].
n_{e2}	rotação equivalente para V_{c2} [rpm].
n_{eot}	rotação equivalente otimizada [rpm].
n_l	é o número total de lotes programados, em uma TAREFA.
n_{Lim}	rotação limite [rpm].
n_{LimOp}	rotação limite para a operação [rpm].
n_{mai}	maior rotação a ser utilizada na usinagem [rpm].
$n_{máx}$	rotação máxima disponível pela máquina-ferramenta [rpm].
n_{men}	menor rotação a ser utilizada na usinagem [rpm].
n_{op}	rotação máxima imposta como limite para a operação [rpm].
n_{rb}	número de rebaxos de uma peça cilíndrica.
n_t	número total de arestas necessárias para realizar uma determinada operação em uma TAREFA.
N	Não.
N_{fp}	vida média para o porta ferramentas em número de trocas.
N_o	Normal.
N_s	número de arestas de corte existentes em cada inserto.
NUMA	Núcleo de Manufatura Avançada.
P_c	potência de corte [CV].
P_f	potência de avanço [CV].
PolUsuário	política do usuário.
PF	Preço do Ferramental.
PU	Política do Usuário.
QFE	Quantidade de Ferramentas em Estoque.
R_a	medida de rugosidade R_a .
SitCarga	situação de carga da máquina-ferramenta.
S_h	salário homem [R\$/hora].
S_m	salário máquina [R\$/hora].

S	Sim.
SisCusteio	sistema de custeio.
SE	Sistema Especialista.
SEU	Sistema Especialista de Usinagem.
SEDCU	Sistema Especialista para Determinação das Condições de Usinagem.
t_c	tempo efetivo de corte [min].
t_{c1}	tempo efetivo de corte para V_{c1} [min];
t_{c2}	tempo efetivo de corte para V_{c2} [min];
t_{ce}	tempo efetivo de corte equivalente [min].
t_{cr}	tempo efetivo de corte real [min].
t_{crot}	tempo efetivo de corte real para a V_{cot} [min].
t_{cr1}	tempo efetivo de corte real equivalente para a V_{c1} [min].
t_{cr2}	tempo efetivo de corte real equivalente para a V_{c2} [min].
t_{ft}	tempo de troca da aresta da ferramenta [min].
t_s	tempo de SETUP [min].
t_t	tempo total de confecção por peça [min].
T	vida da ferramenta de corte expressa em tempo [min].
TG	Tecnologia de Grupo.
TOES	<i>Tool Optimization Expert System.</i>
TP	Topologia de Redes.
T_Troca	tempo de troca da aresta da ferramenta.
T_1	vida da ferramenta correspondente à V_{c1} [min].
T_2	vida da ferramenta correspondente à V_{c2} [min].
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas.
UNIMEP	Universidade Metodista de Piracicaba.
USP	Universidade de São Paulo.
V_c	velocidade de corte [m/min].
V_{ce1}	velocidade de corte equivalente a V_{c1} [m/min].
V_{ce2}	velocidade de corte equivalente a V_{c2} [m/min].
V_{ci}	velocidade de corte, onde o índice i representa seus possíveis valores [m/min].
V_{cLim}	velocidade de corte limite [m/min].
V_{cLimO}	velocidade de corte limite pela rotação imposta como limite para a operação [m/min].

V_{cLimP}	velocidade de corte limite pela potência da máquina-ferramenta [m/min].
V_{cLimR}	velocidade de corte limite pela rotação máxima da máquina-ferramenta [m/min].
V_{cmc}	velocidade de corte de mínimo custo [m/min].
V_{cmce}	velocidade de corte de mínimo custo equivalente [m/min].
V_{cmcLim}	velocidade de corte de mínimo custo limite [m/min].
$V_{cmcLime}$	velocidade de corte de mínimo custo limite equivalente [m/min].
$V_{cmcLimi}$	velocidade de corte de mínimo custo limite para o lote i [m/min].
V_{cmxp}	velocidade de corte de máxima produção [m/min].
V_{cmxpe}	velocidade de corte de máxima produção equivalente [m/min].
V_{cot}	velocidade de corte otimizada [m/min].
V_{c1}	primeira velocidade de corte [m/min].
V_{c2}	segunda velocidade de corte [m/min].
V_f	velocidade de avanço [mm/min].
V_{mi}	valor inicial de aquisição da máquina-ferramenta [R\$].
V_{si}	custo de aquisição do porta ferramentas [R\$].
VelRef	velocidade de referência para a otimização.
WAN	<i>Wide Area Network.</i>
WWW	<i>World Wide Web.</i>
x	expoente da equação de vida de Taylor.
x_i	expoente da equação de Taylor, da peça do lote i .
Z_i	número de peças do lote i .
Z_t	vida da ferramenta de corte expressa em número de peças usinadas.
Z_{ti}	número de peças usinadas por vida de aresta para a peça do lote i .
Z_{t1}	vida da aresta da ferramenta expressa em número de peças para a primeira velocidade de corte V_{c1} .
Z_{t2}	vida da aresta da ferramenta expressa em número de peças para a segunda velocidade de corte V_{c2} .
1-z	expoente de Kienzle.
χ_r	ângulo de posição [graus].
π	pi.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA – IME.	22
FIGURA 2 – PRINCIPAIS COMPONENTES DE IA	33
FIGURA 3 – ESQUEMA BÁSICO DE UM NEURÔNIO ARTIFICIAL.....	35
FIGURA 4 – ESTRUTURA TÍPICA DE UM SE.....	39
FIGURA 5 – REGRAS DE PRODUÇÃO.....	41
FIGURA 6 – USO DE INSTRUÇÕES “ELSE” E “ELSE IF”	42
FIGURA 7 – QUADRO PARA UMA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO.	43
FIGURA 8 – REDE SEMÂNTICA.	44
FIGURA 9 – EXEMPLO DE EQUIVALÊNCIA.....	57
FIGURA 10 – TORNEAMENTO CÔNICO DE UMA PEÇA.....	58
FIGURA 11 – TORNEAMENTO CILÍNDRICO DE UMA PEÇA COM VÁRIOS DIÂMETROS.....	59
FIGURA 12 – TOPOLOGIA ESTRELA.	60
FIGURA 13 – TOPOLOGIA EM BARRAMENTO.....	61
FIGURA 14 – TOPOLOGIA EM ANEL.	62
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DE CHECAGEM.	75
FIGURA 16 – ESQUEMA DA CONEXÃO ENTRE SE E CNC.....	90
FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DE COMUNICAÇÃO.	93
FIGURA 18 – TELA PRINCIPAL DO TOES.	101
FIGURA 19 – CADASTRO E ALTERAÇÃO DA MÁQUINA-FERRAMENTA.....	102
FIGURA 20 – CADASTRO E ALTERAÇÃO DA FERRAMENTA (PRODUTO).	103
FIGURA 21 – CONFIGURAÇÃO DO TOES.....	103
FIGURA 22 – CADASTRO E ALTERAÇÃO DO PROCESSO.	104
FIGURA 23 – CADASTRO E ALTERAÇÃO DE FERRAMENTA DO PROCESSO.....	105
FIGURA 24 – CADASTRO E ALTERAÇÃO DE TAREFAS.	105
FIGURA 25 – ESTRUTURA DO TOES.....	106
FIGURA 26 – CORPO DE PROVA.	113
FIGURA 27 – BLANQUE DA PEÇA.	114
FIGURA 28 – PEÇA EQUIVALENTE CÓDIGO VTF_P_2.....	121
FIGURA 29 - PEÇA EQUIVALENTE CÓDIGO VTF_P_3	122
FIGURA 30 - PEÇA EQUIVALENTE CÓDIGO VTF_P_4	123
FIGURA 31 - PEÇA EQUIVALENTE CÓDIGO VTF_P_5	124
FIGURA 32 - PEÇA CÓDIGO VTF_P_6	126
FIGURA 33 - PEÇA CÓDIGO VTF_P_7	127
FIGURA 34 - CUBO DE FREIO.	133
FIGURA 35 – PERCURSO DA FERRAMENTA.	133
FIGURA 36 – TORNO VERTICAL HESSAPP.	134
FIGURA 37 – FERRAMENTA UTILIZADA NO CUBO DE FREIO.....	135
FIGURA 38 – SISTEMA DE FIXAÇÃO DA PEÇA.	137
FIGURA 39 – TUBO DE APOIO.....	138
FIGURA 40 – TORNO INDEX GU 800 – CNC.	140
FIGURA 41 – FIXAÇÃO DO TUBO DE APOIO NO TORNO.	143
FIGURA 42 – AMOSTRA DA PEÇA.....	149
FIGURA 43 – MICROESTRUTURA DA AMOSTRA (AMPLIAÇÃO 50X).	149

FIGURA 44 – MICROESTRUTURA DA AMOSTRA (AMPLIAÇÃO 200X).	149
FIGURA 45 – DIFERENÇA DE ESPESSURA DA PEÇA.....	150

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- COMPARAÇÃO ENTRE INTELIGÊNCIA NATURAL E ARTIFICIAL	31
TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE IA E COMPUTAÇÃO CONVENCIONAL.....	32
TABELA 3 – TABELA DE DECISÃO.....	42
TABELA 4 – CONFIGURAÇÃO DOS CENÁRIOS PRODUTIVOS	86
TABELA 5 – ESTRUTURA DOS ARQUIVOS PARAM.ATD E BACK.ATD.	92
TABELA 6 – TABELA DE DECISÃO IMPLEMENTADA NO SE.	98
TABELA 7 – BANCO DE DADOS DA MÁQUINA-FERRAMENTA.	108
TABELA 8 – BANCO DE DADOS DA FERRAMENTA (PRODUTO).	109
TABELA 9 – BANCO DE DADOS DO PROCESSO.	110
TABELA 10 – BANCO DE DADOS DA FERRAMENTA (PROCESSO).....	110
TABELA 11 – BANCO DE DADOS DE RESULTADOS.	111
TABELA 12 - CÁLCULO DO TEMPO DE CORTE.	114
TABELA 13 – TEMPO DE TROCA DA PEÇA.	115
TABELA 14 – RESULTADOS DO ENSAIO.	119
TABELA 15 – INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA (IME).....	119
TABELA 16 – TAREFAS PARA A REALIZAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO.	125
TABELA 17 – TAREFA PARA VERIFICAÇÃO - CENÁRIO 3.	128
TABELA 18 – CÁLCULO DO NÚMERO DE TROCAS PREVISTAS.....	129
TABELA 19 – ALTERAÇÕES NO CENÁRIO PRODUTIVO.....	132
TABELA 20 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS 1 E 2.	146
TABELA 21 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DO CENÁRIO 4.	147
TABELA 22 – VELOCIDADES DE CORTE TESTADAS.	148
TABELA 23 – VIDAS DA FERRAMENTA PARA V_{C1} E V_{C2}	151
TABELA 24 - RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DO TUBO DE APOIO.	151

LISTA DE EQUAÇÕES

[1]	VELOCIDADE DE CORTE	49
[2]	VELOCIDADE DE AVANÇO.....	49
[3]	TEMPO EFETIVO DE CORTE.....	49
[4]	LARGURA DE CORTE	49
[5]	ESPESSURA DE CORTE.....	50
[6]	FORÇA DE CORTE	50
[7]	POTÊNCIA DE CORTE	50
[8]	CUSTO DE PRODUÇÃO POR PEÇA	51
[9]	CUSTO DE MÃO DE OBRA POR PEÇA	51
[10]	SALÁRIO MÁQUINA.....	52
[11]	CUSTO DA MÁQUINA-FERRAMENTA POR PRÇA.....	52
[12]	CUSTO DA ARESTA DE CORTE DO INSERTO	52
[13]	CUSTO DA FERRAMENTA POR PEÇA	53
[14]	VELOCIDADE DE CORTE DE MÍNIMO CUSTO	53
[15]	VELOCIDADE DE CORTE DE MÁXIMA PRODUÇÃO	53
[16]	VELOCIDADE DE CORTE DE MÍNIMO CUSTO LIMITE	54
[17]	EQUAÇÃO DE VIDA DE TAYLOR	54
[18]	COEFICIENTE "X", PARA VIDA EM TEMPO	55
[19]	CONSTANTE "K", PARA VIDA EM TEMPO.....	55
[20]	COEFICIENTE "X", PARA VIDA EM NÚMERO DE PEÇAS.....	56
[21]	CONSTANTE "K", PARA VIDA EM NÚMERO DE PEÇAS.....	56
[22]	COEFICIENTE "X", PARA VIDA EM COMPRIMENTO DE CORTE	56
[23]	CONSTANTE "K", PARA VIDA EM COMPRIMENTO DE CORTE.....	56
[24]	DIÂMETRO EQUIVALENTE PARA TORNEAMENTO CÔNICO.....	58
[25]	DIÂM. EQUIV. P/ TORN. CILÍNDRICO EM DIFERENTES DIÂMETROS ...	58
[26]	MENOR ROTAÇÃO UTILIZADA NA PEÇA	76
[27]	MAIOR ROTAÇÃO UTILIZADA NA PEÇA.....	76
[28]	VELOCIDADE DE CORTE LIMITE PELA POTÊNCIA	76
[29]	VELOCIDADE DE CORTE LIMITE PELA ROTAÇÃO DA MÁQUINA.....	76
[30]	VELOCIDADE DE CORTE LIMITE PELA ROTAÇÃO DA OPERAÇÃO	76
[31]	DIÂMETRO CRÍTICO	78
[32]	ROTAÇÃO EQUIVALENTE PARA V_{c1}	78
[33]	ROTAÇÃO EQUIVALENTE PARA V_{c2}	79
[34]	COEFICIENTE "X" EM OPERAÇÕES EQUIVALENTES	79
[35]	DIÂMETRO EQUIVALENTE PARA V_{c1}	79
[36]	DIÂMETRO EQUIVALENTE PARA V_{c2}	79
[37]	VELOCIDADE DE CORTE EQUIVALENTE PARA V_{c1}	79
[38]	VELOCIDADE DE CORTE EQUIVALENTE PARA V_{c2}	79
[39]	ROTAÇÃO EQUIVALENTE OTIMIZADA.....	80
[40]	ROTAÇÃO LIMITE PARA A OPERAÇÃO.....	80
[41]	NÚMERO DE PEÇAS USINADAS POR ARESTA	88
[42]	NÚM. DE ARESTAS NECES. P/ REALIZAR UMA OPERAÇÃO.....	88

BAPTISTA, Elesandro Antonio. ***Desenvolvimento de Um Sistema Especialista Para A Otimização Do Processo De Usinagem***. 2000. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

Apresenta-se o desenvolvimento de um sistema especialista para a otimização do processo de usinagem, baseado no Intervalo de Máxima Eficiência – IME, e demais restrições do processo e do cenário produtivo envolvido. Foi utilizada a metodologia para determinar as condições de corte em ambiente fabril, através de ensaios para a obtenção da vida da ferramenta de corte, e conseqüentemente, dos demais elementos necessários para a construção do IME. Como resultado foi obtida a velocidade de corte otimizada. Todas as variáveis que influenciam o processo foram consideradas na otimização. O sistema possui dois diferentes modos de aplicação: o interativo comandado pelo usuário e o completamente automático, em que é possível sua aplicação dentro do conceito de fábrica virtual. O sistema foi submetido à verificação em laboratório e a exemplos de aplicações em ambiente fabril. Em ambos os casos, os resultados permitem concluir que o *Tool Optimization Expert System* - TOES, (nome atribuído ao sistema), atende aos requisitos para os quais foi desenvolvido. Desta forma, pode substituir, em alguns casos, ou apoiar, um especialista humano na complexa tarefa de otimização do processo de usinagem em ambiente fabril.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema Especialista, Otimização, Usinagem, Intervalo de Máxima Eficiência.

BAPTISTA, Elesandro Antonio. ***Desenvolvimento de Um Sistema Especialista Para A Otimização Do Processo De Usinagem***. 2000. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

DEVELOPMENT OF AN EXPERT SYSTEM TO MACHINING PROCESS OPTIMIZATION

ABSTRACT

It is presented an expert system development to optimise the cutting process, based on the Maximum Efficiency Interval – MEI. It was considered all the process constraints involved, and the environment scenery. Cutting condition determination was proposed to be in shop floor, and consists on tests realisation to obtain the cutting tool life coefficients. All process parameters were considered. The system allows two different application modes: interactive and fully automatic, both could be used in virtual enterprises concept. The system was tested in laboratory and shop floor conditions. It allows to conclude that the Tool Optimisation Expert System – TOES (the name of the developed system) met the initial requirements. Thus, the system can replace or aid a human expert in complex tasks of cutting process optimisation, in industrial environment.

KEYWORDS: *Expert System, Optimisation, Machining, Maximum Efficiency Interval.*

1. INTRODUÇÃO

A otimização de processos de usinagem é uma meta permanente das indústrias manufatureiras, especialmente nos dias de hoje, em que a globalização de mercado requer uma postura mais competitiva.

Este processo pode ser otimizado sob dois diferentes parâmetros: a redução dos tempos não-produtivos, como tempo de fila, movimentação e outros tempos passivos que envolvam tarefas humanas, ou, a redução dos tempos produtivos, quando se analisa o próprio processo de usinagem. A redução dos tempos passivos pode ser obtida, principalmente, com a implantação de ferramentas gerenciais e/ou técnicas, como KANBAM, entre outros. Pode-se alcançar a redução dos tempos produtivos com a implementação de novas máquinas, ferramentas, ou dispositivos, com a otimização dos parâmetros de corte, com a redução do sobremetal, ou ainda, através da estratégia de corte que define o caminho da ferramenta de corte no percurso de usinagem.

A melhoria do processo de usinagem é obtida através do uso de diversas técnicas, sendo que muitas podem ser utilizadas em conjunto. Por exemplo, a implementação de novo ferramental, juntamente com novos dispositivos e alteração da estratégia de corte, em função de uma simulação prévia em computador (*Computer Aided Manufacturing - CAM*), em que é possível analisar diversas condições e situações de usinagem.

Nas indústrias, entretanto, encontra-se um cenário no qual o processo é otimizado, no que diz respeito ao ferramental, substituindo-se a ferramenta de corte atualmente em uso, por outra, tecnologicamente mais evoluída, alterando-se assim, todas as características do processo corrente.

Normalmente, ensaios de usinagem são realizados, e os novos custos obtidos são comparados com os antigos, buscando-se legitimar sua implementação. Quando justificado, a nova ferramenta é adotada, juntamente com novos parâmetros de corte, e o processo é considerado otimizado.

São pouco freqüentes os relatos sobre a otimização do processo de usinagem, adequando-se as condições de corte e ferramentas atuais dentro de limites técnicos, econômicos e gerenciais existentes, como: restrições técnicas da máquina-ferramenta e condições econômicas de corte dentro do Intervalo de Máxima Eficiência - IME aliados a uma análise do sistema produtivo.

A otimização da velocidade de corte através da determinação do IME em ambiente fabril, pode apresentar significativa redução dos tempos de corte, com conseqüente redução de custos. Entretanto, a determinação do IME não é suficiente para a otimização, pois é composto pelas velocidades de corte de máxima produção, V_{cmxp} , de mínimo custo limite, V_{cmclim} , e de mínimo custo, V_{cmc} . O IME é ilustrado na Figura 1.

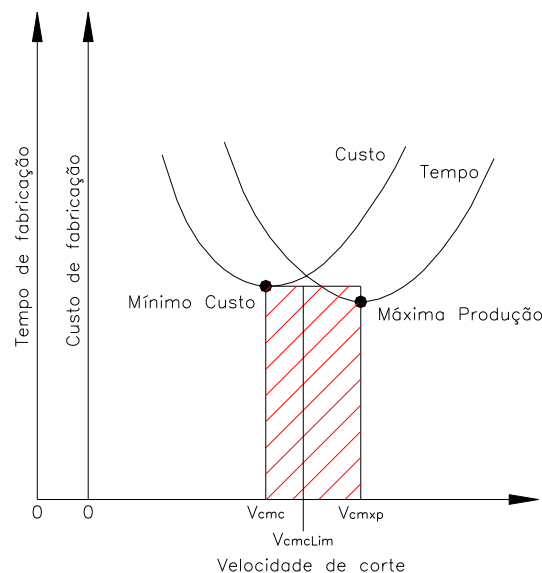


FIGURA 1 – INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA – IME.

A definição da velocidade de corte adequada que será utilizada para otimização, merece especial atenção, pois, o sistema produtivo possui restrições, e/ou características, que podem influenciar na escolha da velocidade de corte de referência.

Como exemplo, cita-se uma situação em que a carga da máquina é definida como gargalo, e neste caso, não é indicada a V_{cmc} como velocidade de referência para a otimização, pois obviamente, necessita-se acelerar o processo produtivo, mesmo com a ocorrência de custos maiores.

Portanto, a otimização da velocidade de corte deve ser realizada em uma situação em que respeita-se, ao mesmo tempo, o IME e o sistema produtivo envolvido. O processo otimizado nesta condição apresentar-se-á, principalmente, através de redução de custos, ou da redução do tempo efetivo de corte. Como a velocidade de corte otimizada foi especificada analisando-se o cenário produtivo, com suas informações restritivas, minimiza-se a possibilidade de que a nova condição de corte acarrete em problemas produtivos posteriores.

Apesar de apresentar vantagens em sua utilização, a determinação do IME em ambiente fabril enfrenta algumas resistências em sua aplicação por parte de processistas e/ou engenheiros de processo. A principal causa desta resistência está relacionada a: necessidade de resolução de cálculos complexos; necessidade de análise do sistema produtivo; realização de ensaios para a determinação da vida da ferramenta; definição do critério, adequado, para o decreto do fim de vida da ferramenta; e finalmente, a escolha da velocidade de corte.

Um sistema especialista para otimização do processo de usinagem, o *Tool Optimization Expert System - TOES*, foi desenvolvido, cuja elaboração é tema deste trabalho, com o objetivo de facilitar o procedimento de otimização da velocidade de corte. Este sistema foi concebido para auxiliar na resolução dos cálculos, na análise do sistema produtivo e na escolha da velocidade de corte de referência para a otimização.

Este trabalho apresenta as atividades executadas durante o desenvolvimento do TOES.

1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA

Com a crescente quantidade de informações, oriundas principalmente de fabricantes de ferramentas, fornecedores de materiais e de máquinas, aliada ao crescente volume de trabalho, os processistas, ou engenheiros de processo, necessitam cada vez mais de instrumentos que os auxiliem na tomada de decisões acertadas, para se obter redução no desenvolvimento de novos processos e/ou auxiliar na otimização de processos existentes.

Com o auxílio do TOES pode-se adotar condições de corte para novos processos, com base nas condições econômicas de usinagem, respeitando-se as restrições do cenário produtivo. A otimização de processos existentes também é realizada facilmente com o auxílio deste sistema especialista - SE. Portanto, este trabalho disponibiliza, mais uma importante ferramenta para o aumento de competitividade.

1.2. OBJETIVOS

Desenvolver um sistema especialista, que permita a otimização do processo de usinagem, através de seus parâmetros de corte, com base no IME e demais restrições do sistema produtivo, para diversos cenários de fabricação, com a determinação de dados em ambiente fabril durante a ocorrência do processo de usinagem.

Este sistema deve permitir a otimização de processos de usinagem de modo completamente automático. Deve também, permitir tal otimização em modo interativo, atendendo assim, as situações nos quais não é possível obter a completa automação.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em 7 capítulos, sendo estes:

Capítulo 1 – Introdução, relevância do tema, objetivos e estrutura do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: apresenta uma revisão bibliográfica dos temas relacionados ao desenvolvimento do sistema especialista. Primeiramente, tem-se uma introdução sobre inteligência artificial e sistemas especialistas, sua estrutura, técnicas para seu desenvolvimento, etc. Em seguida, tem-se conceitos básicos sobre usinagem, especificamente, sobre operações de torneamento, destacando-se o cálculo de forças e potências de usinagem, custos na referida operação, e conceito de equivalência. Analisa posteriormente, metodologias em uso para a otimização do processo de usinagem.

Capítulo 3 – Método: apresenta a metodologia de trabalho adotada.

Capítulo 4 – Proposta do Sistema Especialista: Todas as etapas de desenvolvimento do SE são descritas neste capítulo. Parte-se da construção da engenharia do conhecimento, definição sobre a linguagem utilizada, características sobre o sistema, destacando-se a rotina de trabalho desenvolvida, que permite que o SE opere em modo totalmente automático, inclusive via rede ou Internet.

Capítulo 5 – Verificação do TOES: Os ensaios realizados para a verificação do sistema especialista são apresentados neste capítulo. Submeteu-se o TOES a dois diferentes tipos de situações, sendo a primeira uma verificação baseada em dados obtidos em laboratório, em que alguns cenários produtivos foram simulados com o intuito de analisar-se seu comportamento. Já na segunda situação, executou-se exemplos de aplicação em ambiente fabril buscando-se a otimização de duas peças distintas.

Capítulo 6 – Resultados e Discussões sobre os ensaios realizados com o TOES, especificamente, dos resultados obtidos na verificação e na aplicação em ambiente fabril.

Capítulo 7 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta conceitos sobre Inteligência Artificial - IA, Sistemas Especialistas - SE, noções sobre usinagem, metodologias de otimização do processo de usinagem, juntamente, com alguns sistemas computacionais e especialistas desenvolvidos para auxiliar tal otimização.

2.1. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A expressão “Inteligência Artificial” foi apresentada pela primeira vez em 1956 por John McCarthy, “para descrever os computadores que tivessem a capacidade de imitar ou replicar as funções do cérebro humano” (STAIR, 1998). Atualmente existem outras definições para IA, destaca-se:

“Artificial Intelligence (AI) is the branch of computer science dealing with the design of computer systems that exhibit characteristics associated with intelligence in human behaviour, including reasoning learning, self-improvement, goal seeking, self-maintenance, problem solving and adaptability” (BARR apud TETI & KUMARA, 1997).

“Inteligência Artificial é o estudo de como fazer os computadores realizarem tarefas em que, no momento, as pessoas são melhores” (RICH 1988).

“Inteligência Artificial (IA) é simplesmente uma maneira de fazer o computador pensar inteligentemente” (LEVINE *et al*, 1988).

“IA é a parte da ciência da computação voltada para o desenvolvimento de sistemas de computadores inteligentes, i. e. sistemas que exibem características, as quais nós associamos com a inteligência no comportamento humano – e. g. compreensão da

linguagem, aprendizado, raciocínio, resolução de problemas, etc” (FEIGENBAUM *apud* LIMA, 2000).

“A inteligência artificial (IA) é um campo científico preocupado com a criação de sistemas computadorizados que podem atingir níveis humanos de raciocínio. Mais precisamente, a IA é o ramo da informática que enfoca o desenvolvimento de programas de computadores capazes de desempenhar tarefas normalmente associadas ao comportamento humano inteligente” (CHORAFAS, 1988).

Algumas definições são abrangentes, não especificando detalhadamente quais são as características de um sistema de IA, outras, consideram que este tipo de sistema deve apresentar algumas características básicas, como capacidade de aprendizado, entre outros.

O fato é que existem muitas definições sobre IA, e conseqüentemente, também existem muitas divergências e convergências. Destaca-se a definição apresentada por RICH (1988), na qual a própria autora reconhece que a mesma não é aceita com unanimidade no meio científico atualmente.

Entre as definições existentes, verifica-se que a ênfase, em aplicações baseadas em IA, “consiste no desenvolvimento de máquinas com comportamento inteligente” (STAIR, 1998).

Percebe-se que a obtenção de um comportamento inteligente, em uma máquina qualquer, só é possível com a utilização de técnicas de IA, as quais foram desenvolvidas estudando-se o comportamento humano. Portanto, muitas vezes uma definição mais genérica traz consigo algumas informações implícitas que permitem configurar, ou classificar, um sistema de IA.

2.1.1. HISTÓRICO

Na década de 50 os pesquisadores já haviam estabelecido os fundamentos de IA (SCHILDT *apud* BATOCCHIO, 1994), entretanto, somente a partir da

década de 60 a IA ganhou popularidade no meio científico (KUMARA *et al*, 1986).

Nesta época, os computadores disponíveis que suportavam o processamento de um grande volume de informações, estavam restritos a laboratórios de pesquisas, o que limitou o desenvolvimento de aplicações e de técnicas de IA neste ambiente (SHAFER, 1985).

O surgimento de microcomputadores comerciais, na década de 70, não contribuiu, como esperado, com o desenvolvimento de aplicações comerciais baseadas em IA, pois, apresentavam *softwares* deficientes, que não suportavam o desenvolvimento de programas sofisticados. Também eram caracterizados por possuírem *hardware* com pequena capacidade de memória e processamento (IDEM).

No início da década de 80, entretanto, o custo dos equipamentos de informática apresentaram substancial queda, concomitantemente, com o surgimento de novas linguagens de programação e aumento da capacidade de processamento. Como resultado disso, o financiamento de pesquisas relacionadas com IA recebeu substancial apoio, principalmente, de organismos governamentais de países desenvolvidos (KINNUCAN, 1984).

Atualmente, a IA é alvo de estudo em diversos centros de pesquisas no mundo. Também existem inúmeros sistemas comerciais desenvolvidos com técnicas de IA disponíveis no mercado. O principal responsável pelo sucesso da IA comercialmente são os “Sistemas Especialistas, que foram os produtos financeiramente mais bem sucedidos” (BATOCCHIO, 1994).

2.1.2. CARACTERÍSTICAS

As características necessárias para a obtenção de comportamento inteligente, são também utilizadas para caracterizar a IA (STAIR, 1998), são estas :

- aprender com a experiência;

- ❑ aplicar o conhecimento adquirido da experiência;
- ❑ tratar situações complexas;
- ❑ resolver problemas quando faltam informações importantes;
- ❑ determinar o que é importante;
- ❑ capacidade de raciocinar e pensar;
- ❑ reagir rápida e corretamente a novas situações;
- ❑ compreender imagens visuais;
- ❑ processar e manipular símbolos;
- ❑ ser criativo e imaginativo;
- ❑ utilização de heurística.

Algumas das características acima também são extremamente difíceis para nós seres humanos, como a capacidade de tratar situações complexas, ou, resolver problemas em que faltam informações, outras, apresentam o mesmo grau de dificuldade para serem implementadas em sistemas computacionais, como a visão artificial. Portanto, para que um sistema seja classificado como sendo de IA, não é necessário apresentar todas as características acima descritas, isto deve depender do tipo de problema para o qual foi projetado.

Apesar de procurar estudar, e tentar aplicar, as mesmas técnicas que o homem utiliza em seu dia-a-dia, para raciocinar e tomar decisões, a IA apresenta ainda uma série de diferenças quando comparada a inteligência natural, ver Tabela 1.

Existem discordâncias quanto a estas diferenças, entretanto, ambas tenderão a diminuir quando o homem compreender melhor seu processo de raciocínio e pensamento, e conseguir sua implementação em sistemas computacionais.

TABELA 1- COMPARAÇÃO ENTRE INTELIGÊNCIA NATURAL E ARTIFICIAL

Atribua o grau de capacidade para o seguinte:	Inteligência Natural (Humana)	Inteligência Artificial (Máquina)
Obter grande volume de informações externas	Alto	Baixo
Usar sensores (olhos, ouvidos, tato, olfato)	Alto	Baixo
Ser criativo e imaginativo	Alto	Baixo
Apreender com a experiência	Alto	Baixo
Ser esquecido	Alto	Baixo
Realizar cálculos complexos	Baixo	Alto
Ser flexível	Alto	Baixo
Usar diversas fontes de informações	Alto	Baixo
Transferir informações	Baixo	Alto
Custo de obtenção de inteligência	Alto	Baixo

FONTE: STAIR (1998, P. 258).

Também pode-se comparar a IA com a computação convencional, conforme dados apresentados na Tabela 2. A principal diferença entre sistemas de IA e computação convencional, refere-se à utilização de heurística e não algorítmica (BATOCCHIO, 1994). Algumas linguagens de programação, que foram desenvolvidas especialmente para a construção de programas de IA, como o PROLOG, apresentam recursos que facilitam a utilização de heurística em sua estrutura.

Entretanto, a utilização de outras linguagens, como BASIC, Pascal, C, VISUAL BASIC®, VISUAL C++®, também permitem o desenvolvimento de programas de IA. Visto que “o mais difícil na codificação de programas em IA é a apreensão dos conceitos de programação em IA em geral. Uma vez que o conceito tenha sido aprendido, muitas linguagens poderão ser empregadas” (HOLTZ, 1991).

TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE IA E COMPUTAÇÃO CONVENCIONAL

Programação em Inteligência Artificial	Programação Convencional
Processamento Simbólico	Processamento numérico
Busca Heurística (Passos da solução implícita)	Busca Algorítmica (Passos da solução explícita)
Estrutura de controle normalmente separada do domínio de conhecimento	Estrutura de controle e informação normalmente integrados
Fácil de modificar, atualizar e ampliar	Difícil de modificar
Algumas respostas incorretas são toleradas	Apenas respostas corretas são aceitas
Respostas satisfatórias são aceitas	É procurada somente a melhor solução

FONTE: PASSOS APUD BATOCCHIO, 1994, P. 15.

Evidentemente, a escolha sem critério da linguagem de programação utilizada no desenvolvimento de qualquer sistema computacional, pode representar aumento do número de horas dispensadas na programação, ou ainda, pode comprometer seu desempenho e resultados em sua aplicação.

Outra diferença importante entre estes sistemas, refere-se a facilidade de alteração da base de conhecimento. Em sistemas convencionais desenvolvidos em linguagens compiladas, qualquer alteração em sua estrutura implica em acesso ao código fonte, o que em muitos casos é impossível devido ao fato deste não estar disponível ao usuário.

Nos casos em que um programa convencional foi desenvolvido em linguagem interpretada, a alteração será realizada com auxílio de um programador experiente, o qual, deverá estudar e entender a rotina de funcionamento de todo o programa.

Os sistemas desenvolvidos com técnicas de IA possuem a base de conhecimento separada do módulo de controle. Deste modo, para realizar alguma alteração neste tipo de sistema, também será necessária a presença

de um programador, entretanto, somente a base de conhecimento deverá ser analisada.

Em ambos os casos encontram-se dificuldades na alteração da base de conhecimento, sendo que, os programas desenvolvidos com técnicas de IA apresentam maior flexibilidade pelos motivos descritos. Portanto, pode-se afirmar que a alteração destes pode ser realizada com maior facilidade em relação aos programas convencionais.

2.1.3. COMPONENTES DE IA

A IA possui diversas sub-áreas para o desenvolvimento de aplicações. As que mais se destacam estão no esquema na Figura 2, e são relacionadas a seguir.

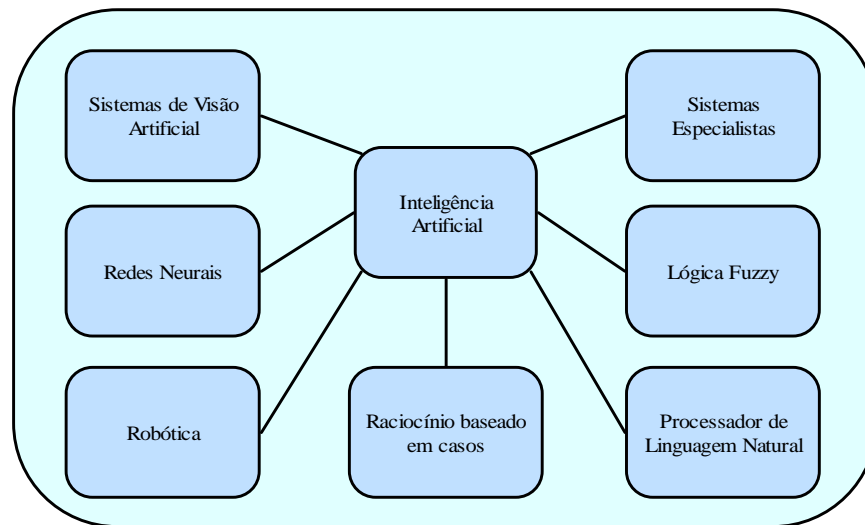


FIGURA 2 – PRINCIPAIS COMPONENTES DE IA

- Sistemas de Visão Artificial: estes sistemas incluem *hardware* e *software* que possibilitam aos computadores capturar, armazenar e manipular imagens visuais e figuras (STAIR, 1998).
- Robótica: Compreende o desenvolvimento, e aplicação, de técnicas para transformar o robô em uma máquina inteligente. Esta área está ligada diretamente à adequação de sensores e módulos de controle, juntamente com o desenvolvimento de algoritmos computacionais, que capacitem ao

robô replicar características inteligentes dos seres humanos. Técnicas para projeto e construção de robôs não enquadram-se nesta.

- **Processador de Linguagem Natural:** “Consiste no desenvolvimento de programas que entendam a linguagem falada e escrita” segundo BATOCCHIO (1994). O computador HAL, do filme “2001 - uma odisséia no espaço” apresentou ao mundo um conceito futurístico do que seria esta área da IA. Este computador possuía recursos de fala e compreensão de linguagem natural, no caso o Inglês e, deste modo, mantinha diálogos com seres humanos. Saindo da ficção, o processamento de linguagem natural é uma realidade nos dias de hoje, pois, existem *softwares* comerciais que permitem a interpretação da fala humana, traduzindo-a em textos escritos (IBM-Voice®). Apesar dos avanços obtidos nesta área, ainda existem problemas com relação ao entendimento de palavras com mesma pronúncia, como “concerto” e “conserto”, mas com significados diferentes (análise léxica) (BATOCCHIO, 1994) (STAIR, 1998). Outro exemplo são as frases “Eu vi um homem no morro a cavalo”, e “Eu vi um homem no morro a cavá-lo”.

- **Redes Neurais:** “são uma forma de computação inspirada no modelo do sistema nervoso biológico, considerando-se principalmente suas características comportamentais, estruturais e funcionais”, segundo MURBACK & MANTEVECHI (1988). São compostas por elementos computacionais conhecidos como nós ou neurons, ver Figura 3. Possuem capacidade de aprendizado em três diferentes paradigmas: aprendizado supervisionado, no qual um agente externo indica a resposta desejada em função do padrão de entrada; aprendizado não supervisionado, em que não existe um agente externo; e reforço, no qual um crítico externo avalia a resposta fornecida pela rede. Segundo STAIR (1998), as redes neurais apresentam características como:
 - “capacidade de recuperar informações mesmo que alguns nós falhem;
 - atualiza informações rapidamente em função de novas entradas;

- capacidade de descobrir relacionamentos e tendências em grandes bancos de dados;
- capacidade de resolver problemas complexos em que faltam informações”.

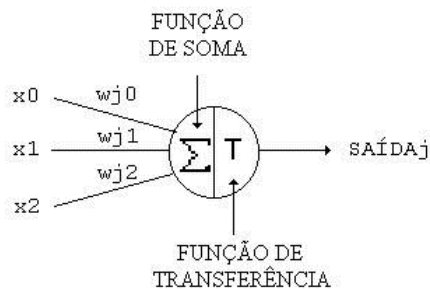


FIGURA 3 – ESQUEMA BÁSICO DE UM NEURÔNIO ARTIFICIAL.

- **Lógica Fuzzy:** Foi estruturada em 1965 pelo Dr. Loffi A. Zadeh da Universidade da Califórnia para tratar e representar incertezas, permite representar valores de pertinência intermediários entre os valores verdadeiro ou falso da lógica clássica (LIMA, 2000).
- **Raciocínio Baseado em Casos:** Consiste na resolução de problemas através da consulta e recuperação de informações retiradas de banco de dados ou listas, construídos com base em problemas semelhantes resolvidos anteriormente. Apresenta-se como importante ferramenta para o desenvolvimento de Sistemas Especialistas (COPPINI & COSTA, 1996).
- **Sistemas Especialistas:** são os maiores responsáveis pelo sucesso comercial da IA, como citado anteriormente. Por se tratar do tipo de sistema desenvolvido neste trabalho, será discutido com maior profundidade no item 2.2.

2.1.4. APLICAÇÕES NA MANUFATURA

O desenvolvimento de máquinas que imitam o comportamento humano proporcionado pela IA, apesar de suas limitações, logo desencadeou interesse do setor manufatureiro. Segundo KUSIAK (KUSIAK *apud* BATOCCHIO, 1994), em 1990 já se observava que a IA tinha provocado um grande impacto em sistemas de manufatura e todas as áreas do CIM (*Computer Integrated Manufacturing*).

SHAFFER *apud* BATTOCHIO (1994) relatou como as principais áreas da manufatura que provavelmente seriam usuárias de IA, as seguintes:

- engenharia de Projeto;
- planejamento da manufatura;
- planejamento de Qualidade;
- facilidade quanto ao planejamento;
- controle de produção;
- automação de fábrica.

Em recente trabalho publicado por uma rede internacional de pesquisadores (TETI & KUMARA, 1997), que foi formada para investigar o estado-da-arte, desafios e tendências sobre aplicações de técnicas de IA na Manufatura Mundial, observou que a IA tem sido aplicada com destaque nas seguintes áreas:

- montagem;
- controle;
- projeto;
- inspeção;

- manutenção;
- monitoramento;
- planejamento;
- produção;
- sistemas de programação.

Como pode ser observado, as previsões de SHAFFER foram confirmadas em apenas 14 anos, o que demonstra a evolução da IA no contexto da manufatura.

2.2. SISTEMAS ESPECIALISTAS

Na década de 70, iniciou-se o desenvolvimento de sistemas conhecidos como *Knowledge Based Systems*, ou, Sistemas Baseados em Conhecimentos. Estes sistemas continham alto nível de informação extraído de especialistas humanos sobre um domínio específico de conhecimento. Por este motivo, passaram a ser conhecidos como *Expert Systems*, ou Sistemas Especialistas, SE (TETI & KUMARA, 1997). Segundo SMART (SMART *apud* BATOCCHIO, 1994), os SE podem apresentar benefícios como:

- sintetizar e conservar conhecimento coletivo;
- treinamento;
- assegurar consistência e perfeição em decisões repetitivas;
- execução de tarefas por leigos;
- determinação de especificações funcionais;
- realizar tomada de decisão em profundidade;
- implementação de sistemas fáceis de atualização.

Assim como em IA também existem divergências quanto à definição de sistemas especialistas, destacam-se as seguintes:

“Knowledge Based Systems are computer programs embodying knowledge about a narrow domain for solving problems related to that domain.” (TETI & KUMARA, 1997)

“Um sistema de IA criado para resolver problemas em um determinado domínio é chamado de Sistema Especialista” (LEVINE *et al*, 1988).

“...podemos pensar em sistemas especialistas baseados em conhecimento como uma combinação de computador e programas que usam o conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas que são tão complexos que eles normalmente exigem a intervenção de seres humanos com conhecimento especializado na área do problema.” (HOLTZ, 1991).

“São sistemas projetados para emitir uma decisão ou parecer sobre uma determinada área de conhecimento humano” (CUPINI & BATOCCHIO, 1992).

“... a tool which has the capability to understand problem specific knowledge and use the domain knowledge intelligently to suggest alternate paths of action” (KUMARA *et al*, 1986).

“Os sistemas especialistas (SE) são construções de *software* que os peritos em campos específicos enriquecem com seu conhecimento” (CHORAFAS, 1988).

Uma análise das definições apresentadas acima, permite observar que, de uma maneira genérica, SE são sistemas que podem substituir especialistas humanos em suas áreas de atuação, tratando de problemas relativos a um específico domínio de conhecimento.

Este tipo de interpretação gera a possibilidade de que sistemas desenvolvidos com técnicas convencionais de computação e que possam desempenhar tarefas realizadas por especialistas humanos, também sejam classificados como sistemas especialistas.

Entretanto, os SE destacam-se dentre os sistemas computacionais convencionais pela sua estrutura, e conseqüentemente, pelas técnicas utilizadas em sua programação. Uma estrutura típica de um sistema especialista é mostrada na Figura 4, a qual é explicada na seqüência.

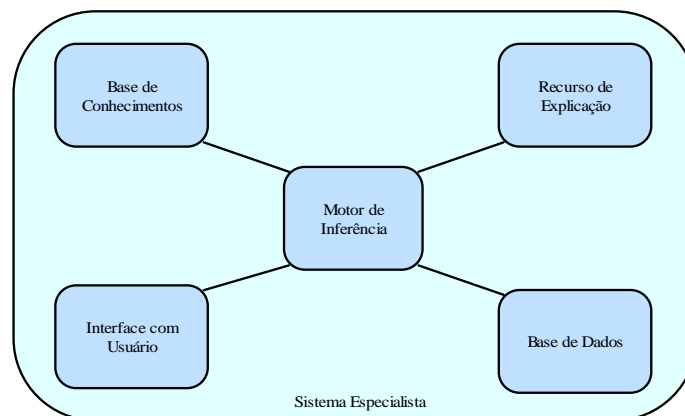


FIGURA 4 – ESTRUTURA TÍPICA DE UM SE.

2.2.1. BASE DE CONHECIMENTO

A “base de conhecimento” armazena, ou procura armazenar, todo o conhecimento sobre um domínio específico, que é utilizado por um, ou mais, especialistas humanos. O propósito de uma base de conhecimento “é de ser semelhante à soma total de conhecimento adquirido por uma pessoa em anos de trabalho em uma área ou disciplina específica” (STAIR, 1998).

A construção da base de conhecimento é conhecida como Engenharia do Conhecimento - EC. Exercer a EC consiste em adquirir e representar todo conhecimento do(s) especialista(as) de um específico domínio, o que é

denominado aquisição do conhecimento - AC. A AC pode ser realizada através de métodos computacionais ou manuais.

- Os métodos computacionais consistem no emprego de programas especialmente desenvolvidos para esta finalidade conhecidos como *shell*, que possuem fácil interação para com o usuário e recursos específicos para facilitar a implementação do raciocínio, aquisição e representação do conhecimento (LIMA, 2000). Existem atualmente no mercado algumas ferramentas do tipo *shell*, destacam-se: ARBORIST, EXSYS, INSIGHT, PERSONAL CONSULTANT e NEXPERT.
- Os métodos manuais consistem na aquisição do conhecimento diretamente pelo engenheiro do conhecimento, podem ser realizados através de (IDEM):
 - entrevistas: é a técnica mais utilizada para esclarecimento de dúvidas e de conhecimentos implícitos;
 - análise de protocolos verbais: consiste em observar o especialista trabalhando e explicar seus procedimentos;
 - exploração do discurso: consiste em deixar o especialista falar (num monólogo) a respeito de um dado assunto sem fazer interrupções.
 - observação direta: consiste em observar e gravar em vídeo como o especialista trabalha.
 - questionários: consiste em elaborar um questionário sobre o conteúdo que vai ser modelado.
 - verbalização retrospectiva: Consiste em analisar um caso já tratado e interrogar especialistas sobre o porque de suas ações.

A necessidade de interação com especialistas humanos pode transformar a construção da base de conhecimento em uma tarefa difícil de ser realizada, pois, diversos especialistas podem possuir diferentes níveis de informação com possíveis divergências entre suas opiniões. Entretanto, uma base de

conhecimento ganha em consistência proporcionalmente ao aumento do número de especialistas que participaram de sua construção.

A representação do conhecimento pode ser realizada utilizando-se de **Regras de Produção** (*Production Rules*), **Quadros** (*Frames*), **Redes Semânticas** (*Semantic Nets*) e **Roteiros** (*SCRIPTS*).

- Regras de Produção: segundo BATOCCHIO (1994) “são mais adequadas para representação de conhecimento dedutivo, como situação/ação, premissa/conclusão, antecedente/conseqüente e causa/efeito”. Podem ser expressas por instruções do tipo Se-Então (*IF-THEN*), também é possível utilizar os operadores E (*AND*) e OU (*OR*) para a formação de uma regra composta por mais de uma condição, ver Figura 5.

Os operadores *AND* e *OR*, juntamente com as instruções *IF-THEN*, são os elementos básicos, e normalmente mais utilizados, que permitem compor regras de produção. Entretanto, HOLTZ (1991) descreveu exemplos de utilização de instruções dos tipos *SENÃO* (*ELSE*) e *SENÃO-SE* (*ELSE IF*) na construção de SEs empregando-se linguagem C. A instrução *ELSE* pode ser utilizada para situações em que existam apenas duas possíveis respostas para uma condição *IF*, já a instrução *ELSE IF* pode ser utilizada quando mais de duas respostas são possíveis. A Figura 6 apresenta exemplos.

```

IF SituaçãoDeCarga = Gargalo AND
  PolíticaDoUsuário = Arrojado AND
  SistemaDeCusteio = ABC AND
  TempoDeSetup = Rápido AND
  PreçoDoFerramental = MuitoCaro AND
  TempoDeTroca = Grande AND
  Cenário = 1 AND
  FerramentaUtilizada = Padrão AND
  SituaçãoEstoqueFerramenta = Crítica OR
  SituaçãoEstoqueFerramenta = Normal
THEN VelocidadeDeReferência = VCMXP
  
```

FIGURA 5 – REGRAS DE PRODUÇÃO.

```

main ()
{
    int x;
    puts ("Este animal amamenta seus filhotes (S/N)?");
    scanf ("%d", &x);
    if (x = 'S')
        puts ("O animal é um mamífero.");
    else
        puts ("O animal não é um mamífero.");
}

/* D = desconheço */
main ()
{
    int x;
    puts ("Este animal amamenta seus filhotes? (S/N/D)?");
    scanf ("%d", &x);
    if (x = 'S')
        puts ("Este animal é um mamífero.");
    else if (x = 'N')
        puts ("Este animal não é um mamífero.");
    else {
        puts ("Este animal tem pelos e sangue quente? (S/N)?");
        if (x = 'S')
            puts ("Este animal provavelmente é um mamífero.");
        if (x = 'N')
            puts ("Este animal provavelmente não é um mamífero.");
        }
}
    
```

FIGURA 6 – USO DE INSTRUÇÕES “ELSE” E “ELSE IF”.

FONTE: HOLTZ (1991).

As regras de produção também podem ser representadas através de uma tabela de decisão, que “apresentam diversas condições que podem existir e as diferentes ações que o computador deve realizar caso elas ocorram” (STAIR, 1998). A Tabela 3 apresenta uma tabela de decisão que representa o mesmo exemplo da Figura 5.

TABELA 3 – TABELA DE DECISÃO.

SitCarga	PolUsuário	SisCusteio	t_s	PF	T_Troca	Cenário	Fer_Utiliz	EstoqueFer	VelRef
Gargalo	Arrojado	ABC	Rápido	MuitoCaro	Grande	1	Padrão	Crítica	VCMXP
Gargalo	Arrojado	ABC	Rápido	MuitoCaro	Grande	1	Padrão	Normal	VCMXP

Onde:

SitCarga é a situação carga da máquina, **PolUsuário** é a política do usuário, **SisCusteio** é o sistema de custeio, t_s é o tempo de *setup* da máquina-ferramenta, **PF** é o preço do ferramental, **T_Troca** é o tempo de troca da aresta da ferramenta, **Cenário** é o cenário produtivo envolvido,

Fer_Utiliz armazena se a ferramenta utilizada é padrão (de prateleira) ou especial, **EstoqueFer** é a situação do estoque da ferramenta, **VelRef** é a velocidade de referência para a otimização.

- Quadros: são estruturas que permitem representação de conhecimento relacional e declarativo em termos de atributos. Relaciona um objeto ou um item a um ou vários fatos ou valores. A Figura 7 apresenta exemplos de quadros.



*FIGURA 7 – QUADRO PARA UMA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO.
 FONTE: CHANG (1990. P. 17).*

- Redes Semânticas: são um conjunto de itens ou nós interligados para mostrar o relacionamento entre itens da base de conhecimentos. São facilmente entendidas, entretanto, apresentam maior dificuldade de serem implantadas. A Figura 8 apresenta exemplo de uma rede semântica e de uma matriz de relacionamento.

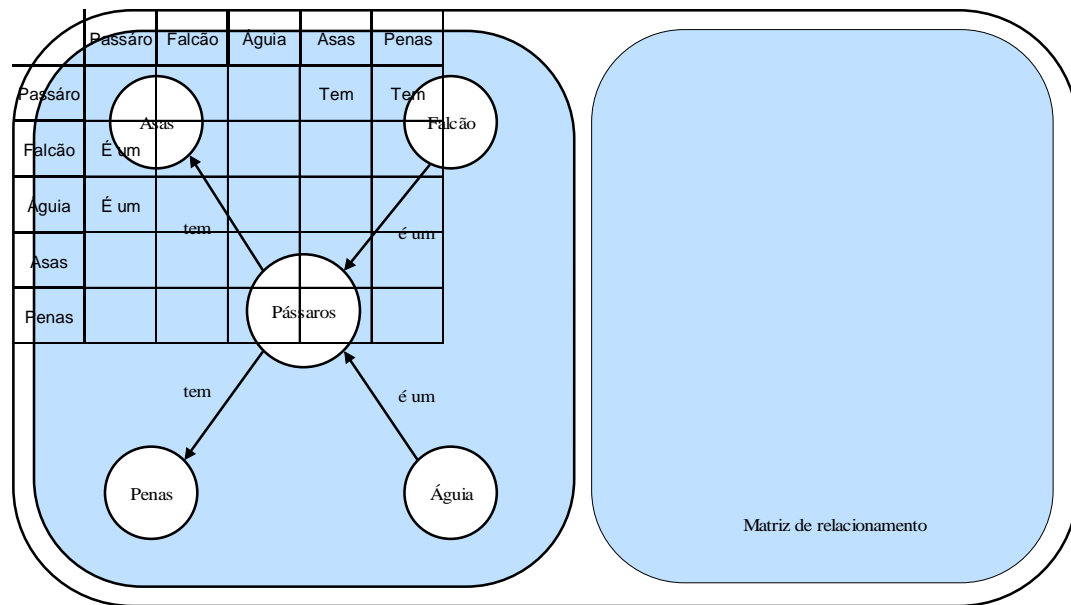


FIGURA 8 – REDE SEMÂNTICA.

FONTE: LEVINE ET AL, (1988, P. 216 – 217).

- Roteiros: Segundo RICH (1988) “o roteiro é uma estrutura que descreve uma seqüência estereotipada de eventos em um contexto em particular...” “...e pode ser muito eficaz para representar tipos específicos de conhecimento para que foram projetados”. Os roteiros são muito importantes para a representação do conhecimento porque os seres humanos desempenham muitas ações repetitivas, como ir ao cinema, restaurante, escola etc.

2.2.2. BASE DE DADOS

A base de dados contém informações que serão utilizadas pelo SE durante o tratamento de um problema referente a um específico domínio. Deve ser construída de modo a permitir alterações diversas como atualizações, exclusões e inclusões de novos dados. Uma tabela (ou mais) elaborada em MS-ACCESS® por exemplo, pode compor uma Base de Dados.

2.2.3. MOTOR DE INFERÊNCIA

O motor, ou máquina, de inferência tem como objetivo buscar informações e relacionamentos entre todos os elementos do SE, como base de conhecimentos e de dados, e fornecer respostas, previsões e sugestões de modo como um especialista humano faria (STAIR, 1998). As técnicas mais utilizadas para a construção de uma máquina de inferência são:

- Encadeamento para frente (*Forward Chaining*): Parte de uma situação inicial em busca de uma solução, ou seja, a condição inicial vem antes da solução do problema. LEVINE *et al* (1988) elucidou esta técnica através do exemplo:

“**Regra1: Se** o carro enguiçar, **ENTÃO** eu vou chegar tarde em casa.”

A conclusão de que **eu vou chegar em casa tarde** foi desencadeada pela quebra do motor, ou seja, partiu-se da condição em direção a conclusão.

- Encadeamento reverso (*Backward chaining*): Parte de uma conclusão em busca do objetivo, ou seja, a consequência é conhecida e o(s) elemento(s) causador(es) ainda é(são) desconhecido(s).

O encadeamento reverso inicia a busca pela consequência, ou seja **cheguei tarde em casa** e parte em direção ao elemento causador, no caso, **o carro enguiçou**. Iniciou pela consequência, ou conclusão, em direção a condição, ou elemento causador.

Uma ou ambas técnicas podem ser utilizadas por um SE ao mesmo tempo, sendo que o encadeamento para frente é muito utilizado por *shells* de sistemas especialistas mais caros (STAIR, 1998).

2.2.4. INTERFACE COM O USUÁRIO

Um dos benefícios de um SE é a possibilidade de seu uso por parte de pessoas leigas, no que se refere ao domínio de conhecimento para o qual o SE

foi desenvolvido. Apesar da informática ser mais difundida nos dias de hoje, em relação a alguns anos atrás, ainda existem pessoas que não são qualificadas para o uso de microcomputadores, ou quando muito, possuem cursos básicos para a operação do mesmo. Portanto, um SE deve disponibilizar uma interface amigável para com o usuário de modo a permitir seu uso por parte de pessoas com pouco, ou nenhum, conhecimento de informática.

2.2.5. RECURSO DE EXPLICAÇÃO

Este recurso permite que um SE demonstre ao seu usuário os caminhos seguidos até a obtenção da solução encontrada. Em alguns tipos de SE este recurso é de fundamental importância, como em um SE da área médica que deverá demonstrar, ao médico responsável, os fundamentos que o levaram a adotar uma determinada ação. Neste caso, a responsabilidade sobre a vida do paciente é do médico e este poderá, eventualmente, discordar da solução encontrada pelo SE.

2.2.6. TRATAMENTO DE INCERTEZAS

Uma das características de um sistema especialista, é a sua capacidade de obter respostas para problemas com dados incompletos ou imprecisos. Um SE trata estas situações através da heurística utilizada em sua construção, entretanto, técnicas de lógica fuzzy e redes neurais também podem ser utilizadas para auxiliar na resolução de problemas desta natureza (STAIR, 1998).

2.2.7. ÁREAS DE APLICAÇÃO DE SES

Segundo STAIR (1998), nos últimos anos os SEs tem se destacado nas seguintes áreas:

- negócios;
- desenvolvimento de sistemas computacionais;

- manufatura;
- financeira;
- monitoramento;
- médicas;
- químicas;
- mineralogia;
- militares;

2.2.8. ALGUNS SEs DESENVOLVIDOS

Segundo CHORAFAS (1988) alguns dos SEs mais difundidos são:

- “Dendral: Geração de representações estruturais plausíveis de moléculas orgânicas a partir dos dados espectrográficos de massa;
- Metadendral: Geração de um conjunto de regras de fragmentação (da forma utilizada pelo Dendral) dados os conjuntos de pares estrutura-espectro conhecidos;
- Mycin: Diagnósticos de infecções bacterianas e recomendações para a terapia antibiótica;
- Noah: Planejamento do robô designando-se a ordem temporal para os operadores num plano;
- Molgen: Projeto de experimentos genéticos e moleculares;
- SYN: Síntese do circuito; determinação dos valores para os componentes num circuito elétrico;
- Kas: Supervisão da interação com um perito na construção ou acréscimo de um banco de conhecimentos de um SE;

- Guidon: O ensino de fatos e estratégias de resolução de problemas no diagnóstico e tratamento da meningite e bacteriemia ou análise da função pulmonar (utiliza os bancos de conhecimentos do Mycin);

2.3. NOÇÕES BÁSICAS DE TORNEAMENTO

Apresenta conceitos sobre operações de torneamento que foram utilizadas na construção do sistema especialista TOES. O capítulo 4 descreve com maiores detalhes a utilização destas informações.

2.3.1. DEFINIÇÕES

A operação de usinagem conhecida como torneamento consiste na remoção de material de uma peça, a qual gira em torno do eixo principal de rotação da máquina-ferramenta, por uma ferramenta que desloca-se em relação ao referido eixo. Segundo FERRARESI (1977), torneamento é um “processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes”.

Para que a operação de torneamento seja realizada, são necessários a ocorrência de movimentos simultâneos, como o da ferramenta em relação à peça, para a retirada de material, e também como o movimento de giro da peça em relação à ferramenta. Estes movimentos possuem algumas propriedades como direção, sentido, velocidade e percurso.

As principais propriedades relacionados a estes movimentos são à velocidade de corte, V_c , velocidade de avanço, V_f , e tempo efetivo de corte, t_c . Segundo DINIZ *et al* (1999), estas propriedades podem ser definidas como:

- velocidade de corte: “... é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça...”. Pode ser calculada através da Equação 1.

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad [1]$$

Onde:

V_c = velocidade de corte [m / min].

d = diâmetro da peça [mm].

n = rotação da peça [rpm].

- velocidade de avanço: “em operações do tipo torneamento, é o produto do avanço pela rotação da ferramenta”. Pode ser calculada através da Equação 2.

$$V_f = f \cdot n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \cdot f \quad [2]$$

Onde:

f = avanço [mm / volta].

V_f = velocidade de avanço [mm / min].

- tempo efetivo de corte: “...resume a totalidade dos tempos ativos, pois ele representa o tempo em que os movimentos de corte ou de avanço estão efetivamente ocorrendo”. Para uma operação de torneamento cilíndrico pode ser calculado através da Equação 3.

$$t_c = \frac{l_f}{V_f} = \frac{l_f}{f \cdot n} = \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{1000 \cdot f \cdot V_c} \quad [3]$$

Onde:

l_f = percurso de avanço [mm];

t_c = tempo efetivo de corte [min.].

- largura de corte: “é a largura calculada da área da seção transversal de um cavaco a ser removido, medida perpendicularmente à direção de corte”. Pode ser calculada através da Equação 4.

$$b = \frac{a_p}{\text{sen}(\chi_r)} \quad [4]$$

Onde:

b = largura de corte [mm];

a_p = profundidade de corte [mm];

χ_r = ângulo de posição da ferramenta de corte [°];

- espessura de corte: “é a espessura calculada da área da seção transversal de um cavaco a ser removido, medida perpendicularmente à direção de corte”. Pode ser calculada através da Equação 5.

$$h = f \cdot \text{sen}(\chi_r) \quad [5]$$

Onde:

h = espessura de corte [mm];

2.3.2. FORÇAS E POTÊNCIAS DE CORTE

Durante a ocorrência do processo de usinagem, a ação da peça na ferramenta em operações de torneamento, gera esforços que consomem potência fornecida pela máquina-ferramenta.

As duas principais componentes de força que atuam sobre a ferramenta de corte são a força de corte, F_c , e a força de avanço, F_f , através das quais calcula-se as potências de corte, P_c , e de avanço, P_f . Entretanto, conforme demonstrado por DINIZ *et al* (1999), a P_c pode possuir, em situações extremas, um valor até 140 vezes maior que a P_f , que por este motivo, pode ser desprezada no cálculo da potência fornecida pela máquina em uma operação de torneamento. Pode-se calcular a F_c , e a P_c através das Equações 6 e 7, respectivamente.

$$F_c = K_{s1} \cdot b \cdot h^{1-z} \quad [6]$$

Onde:

F_c = força de corte [Kgf];

K_{s1} = constante do Kienzle;

$1-z$ = coeficiente de Kienzle;

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 75} \quad [7]$$

Onde:

P_c = potência de corte, ou potência consumida [CV];

De acordo com KIENZLE *apud* FERRARESI (1977), uma diminuição entre 1 a 2% deve ser considerada no cálculo da P_c , para cada 1° (um grau) de aumento no ângulo de saída da ferramenta, em relação ao ângulo de saída utilizado em seus ensaios, que foi de 6°.

2.3.3. CUSTOS EM OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO

O custo final de uma peça é composto por duas diferentes parcelas, uma referente aos custos diretos e outra relativa aos custos indiretos do processo. Os custos indiretos não serão considerados neste trabalho por envolverem variáveis que podem ou não existir em empresas distintas, portanto, considerar-se-á somente os custos diretos, cujos componentes envolvidos podem ser facilmente identificados.

Segundo FERRARESI (1977), três parcelas são identificadas no cálculo do custo de produção por peça, sendo elas, o custo relativo a mão de obra, K_{us} , relativo à máquina-ferramenta, K_{um} , e relativo à ferramenta, K_{uf} . O custo de produção por peça pode ser calculado através da Equação 8.

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf} \quad [8]$$

Onde:

K_p = custo de produção por peça [R\$ / Peça];

K_{us} = custo de mão de obra envolvidos na usinagem [R\$ / peça];

K_{um} = custo da máquina-ferramenta [R\$ / Peça];

K_{uf} = custo das ferramentas [R\$ / Peça];

O custo de mão de obra pode ser calculado através da Equação 9.

$$K_{us} = t_t \cdot \frac{S_h}{60} \quad [9]$$

Onde:

t_t = tempo total de confecção por peça [min];

S_h = salário e encargos do operador [R\$ / hora];

Para o cálculo do custo da máquina-ferramenta utiliza-se o salário máquina, que é obtido através da Equação 10.

$$S_m = \frac{1}{H} \left[\left(V_{mi} - V_{mi} \cdot \frac{i_m}{M} \right) \cdot j + \frac{V_{mi}}{M} + K_m + (E_m \cdot K_e \cdot j) \right] \quad [10]$$

Onde:

S_m = salário máquina [R\$ / hora];

H = número de horas de trabalho previstas por ano;

V_{mi} = valor inicial de aquisição da máquina-ferramenta [R\$];

i_m = idade da máquina-ferramenta [anos];

M = vida prevista para a máquina-ferramenta [anos];

j = taxa anual de juros;

E_m = espaço ocupado pela máquina-ferramenta [m²];

K_m = custo de manutenção [R\$ / ano];

K_e = custo do m² ocupado pela máquina-ferramenta [R\$ / m² • ano];

Assim, o valor do custo da máquina-ferramenta é calculado através da Equação 11.

$$K_{um} = \frac{t_i}{60} \cdot S_m \quad [11]$$

Considerando a utilização de pastilhas intercambiáveis como ferramenta de corte, o custo de cada aresta da ferramenta pode ser calculado através da equação 12.

$$K_{ft} = \frac{V_{si}}{N_{fp}} + \frac{K_{pi}}{N_s} \quad [12]$$

Onde:

K_{ft} = custo de cada aresta de corte do inserto [R\$];

V_{si} = custo de aquisição do porta-ferramenta [R\$];

N_{fp} = vida média para o porta ferramentas em número de trocas;

K_{pi} = custo de aquisição do inserto [R\$];

N_s = número de arestas de corte disponíveis em cada inserto;

Assim, o custo da ferramenta por peça pode ser calculado através da Equação 13.

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_t} \quad [13]$$

Onde:

Z_t = número de peças usinadas por vida da ferramenta.

2.3.4. INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA

O intervalo de máxima eficiência, IME, é definido pelas velocidades de corte de mínimo custo, V_{cmc} , e de máxima produção, V_{cmxp} , sendo que com a V_{cmc} obtêm-se o menor custo por peça em um processo de usinagem, pode ser calculado através da Equação 14. Já a V_{cmxp} permite a obtenção de menor tempo de fabricação e pode ser calculada através da Equação 15 (RODRIGUES *et al*, 1987). O IME está representado na Figura 1.

$$V_{cmc} = \left\{ \frac{K \cdot (S_h + S_m)}{60 \cdot (x-1) \cdot \left[K_{ft} + \left(\frac{S_h + S_m}{60} \right) \cdot t_{ft} \right]} \right\}^{\frac{1}{x}} \quad [14]$$

Onde:

K = constante da equação de Taylor;

x = coeficiente da equação de Taylor;

t_{ft} = tempo de troca da ferramenta [min.];

$$V_{cmxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_{ft}}} \quad [15]$$

Considerando a utilização de ferramental com sistema de troca rápida, em que o t_{ft} possui valores muito pequenos, ou sistemas flexíveis de fabricação, em que o mesmo pode até possuir valor igual a zero, o produto de t_{ft} pela soma do S_h mais S_m fica desprezível em relação ao custo da ferramenta, ver Equação 14. Neste caso, obtêm-se a V_{cmcLim} , que é a velocidade de corte de mínimo

custo limite, que nunca será menor que a V_{cmc} , e nunca maior que V_{cmxp} (MALAQUIAS, 1999). A V_{cmcLim} pode ser calculada através da Equação 16.

$$V_{cmcLim} = \left\{ \frac{K \cdot (S_h + S_m)}{60 \cdot (x-1) \cdot K_{ft}} \right\}^{\frac{1}{x}} \quad [16]$$

2.3.5. DETERMINAÇÃO DO IME

O IME pode ser determinado através da realização de ensaios de usinagem em laboratório ou em ambiente fabril, nos quais a velocidade de corte deve ser mantida constante, em que determina-se a constante K e o coeficiente x da equação de vida da ferramenta definida por TAYLOR (DINIZ *et al*, 1989), expressa na Equação 17.

$$T = \frac{K}{V_c^x} \quad [17]$$

Onde:

T = é a vida da ferramenta que pode ser expressa em tempo, minutos, em comprimento de corte, metros, ou em número de peças;

□ metodologia para a determinação do IME

A metodologia para a realização dos ensaios que permitem a determinação do IME consiste em (RODRIGUES *et al*, 1987):

- A. determinar os parâmetros de corte de acordo com os procedimentos em uso por parte do responsável pela elaboração do processo de usinagem, como a adoção de valores sugeridos por catálogos de fabricantes de ferramentas, com base na experiência do operador, ou até mesmo, recuperando-se valores armazenados em banco de dados oriundos de experimentos anteriores. Observa-se que os valores da profundidade de corte, a_p , e do avanço de corte, f , adotados devem possuir os valores máximos possíveis em relação às restrições inerentes ao sistema máquina-ferramenta-peça.

- B. iniciar a usinagem do primeiro lote de peças com a velocidade de corte, V_{c1} , até que o final da vida da aresta da ferramenta seja decretado por um critério previamente estabelecido. Anotar a vida da ferramenta obtida para a primeira velocidade de corte;
- C. calcular a segunda velocidade de corte, V_{c2} , que deve possuir um valor de $\pm 20\%$ em relação à V_{c1} (PALLEROSI & COPPINI, 1975). Em seguida deve-se iniciar a usinagem do segundo lote de peças até que o final da vida da aresta da ferramenta seja decretado, pelo mesmo critério anterior. Anotar a vida da ferramenta obtida para a segunda velocidade de corte;
- D. após a realização da usinagem obtêm-se os valores da vida da ferramenta expressos em minutos, T , em número de peças, Z_t , ou em comprimento de corte, l_c , os quais são utilizados nos cálculos da constante K e do coeficiente x da equação de vida de Taylor. Para a vida expressa em minutos deve-se utilizar as Equações 18 e 19.

$$x = \frac{\log\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}{\log\left(\frac{V_{c2}}{V_{c1}}\right)} \quad [18]$$

Onde:

T_1 = vida da aresta da ferramenta expressa em tempo para V_{c1} [min];

T_2 = vida da aresta da ferramenta expressa em tempo para V_{c2} [min];

V_{c1} = primeira velocidade de corte [m/min];

V_{c2} = segunda velocidade de corte [m/min];

$$K = T_1 \cdot V_{c1}^x \quad [19]$$

Para vida da aresta da ferramenta expressa em número de peças deve-se utilizar as Equações 20 e 21.

$$x = \frac{\log\left(\frac{Z_{t1}}{Z_{t2}}\right)}{\log\left(\frac{V_{c2}}{V_{c1}}\right)} + 1 \quad [20]$$

Onde:

Z_{t1} = vida da aresta da ferramenta expressa em número de peças para V_{c1} ;

Z_{t2} = vida da aresta da ferramenta expressa em número de peças para V_{c2} ;

$$K = Z_{t1} \cdot t_{c1} \cdot V_{c1}^x \quad [21]$$

Onde:

t_{c1} = tempo efetivo de corte para V_{c1} .

Para a vida da aresta da ferramenta expressa em comprimento de corte, deve-se utilizar as Equações 22 e 23.

$$x = \frac{\log\left(\frac{l_{c1}}{l_{c2}}\right)}{\log\left(\frac{V_{c2}}{V_{c1}}\right)} + 1 \quad [22]$$

Onde:

l_{c1} = vida da aresta da ferramenta expressa em comprimento de corte para V_{c1} [m];

l_{c2} = vida da aresta da ferramenta expressa em comprimento de corte para V_{c2} [m];

$$K = \frac{l_{c1}}{l_{cp}} \cdot t_{c1} \cdot V_{c1}^x \quad [23]$$

Onde:

l_{cp} = Comprimento de corte de uma peça [m];

E. Calcular as velocidades de corte que constituem o IME, através das Equações 14, 15 e 16, as quais devem pertencer ao intervalo utilizado no ensaio, podendo-se ainda, respeitar uma tolerância de $\pm 10\%$, salvo a V_{cmxp} , que devido a influência do t_{ft} , pode atingir valores muito altos.

2.3.6. EQUIVALÊNCIA

Como citado anteriormente, a metodologia para a determinação do IME parte do princípio que a velocidade de corte é mantida constante durante todo o processo de corte, entretanto, existem situações em que a variação da V_c ocorre durante a usinagem. Nestes casos, é necessário utilizar conceitos de equivalência em usinagem.

Duas operações de usinagem serão consideradas equivalentes quando, para o mesmo tempo de corte, na usinagem de cada uma das peças, resultar uma mesma vida para a ferramenta. Assim, para um par ferramenta-peça, com suas condições de usinagem, será sempre possível definir uma peça e condições de usinagem equivalentes, conforme demonstrado na Figura 9. Tem-se assim, uma peça equivalente que pode ser usinada com uma rotação equivalente, n_e , que resulta em uma mesma vida da aresta da ferramenta.

Em recente trabalho, RIBEIRO (1999), citou o cálculo do diâmetro equivalente para diferentes operações de usinagem, publicados por FERRARESI (1977), sendo estas, as operações de torneamento cônico e torneamento cilíndrico para peças com diferentes diâmetros.

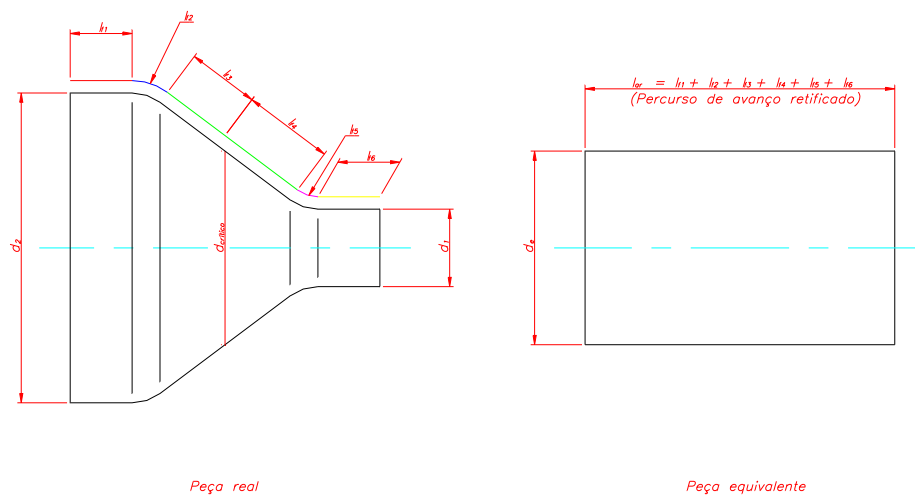


FIGURA 9 – EXEMPLO DE EQUIVALÊNCIA.

Onde:

l_{f1} a l_{f6} , são os percursos de avanço do trecho; $d_{crítico}$, é o diâmetro crítico; d_e , é o diâmetro equivalente; e d_1 , é o diâmetro menor; d_2 , é o diâmetro maior.

□ Torneamento cônico:

$$d_e = \sqrt[x]{\frac{1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{x+1}}{(x+1) \cdot \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)}} \quad [24]$$

Onde:

d_e = diâmetro equivalente [mm];

d_1 = diâmetro menor [mm];

d_2 = diâmetro maior [mm];

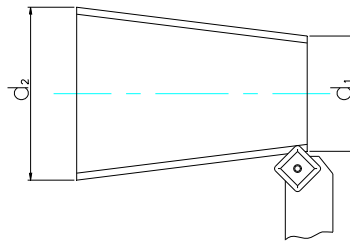


FIGURA 10 – TORNEAMENTO CÔNICO DE UMA PEÇA.

□ Torneamento cilíndrico em diferentes diâmetros:

$$d_e = \sqrt[x]{\frac{1}{l_a} \sum_{i=1}^{n_{rb}} d_i^x \cdot l_i} \quad [25]$$

Onde:

l_a = comprimento total da peça [mm];

l_i = comprimento do rebaixo [mm];

d_i = diâmetro do rebaixo [mm];

n_{rb} = número de rebaixos.

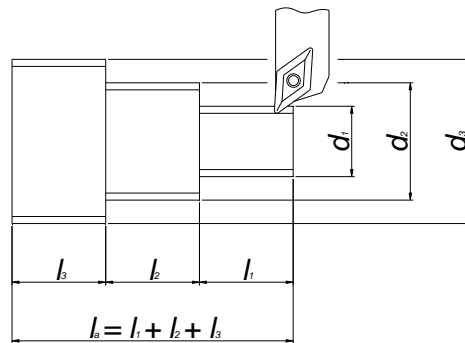


FIGURA 11 – TORNEAMENTO CILÍNDRICO DE UMA PEÇA COM VÁRIOS DIÂMETROS.

2.4. CONEXÕES VIA REDE E INTERNET

A utilização, cada vez maior, de computadores nos mais diversos setores de uma empresa, tem requerido cada vez mais a interligação entre cada uma das estações de trabalho, o que pode ser realizado através de uma rede de computadores.

O compartilhamento de informações e recursos entre diversos usuários, tais como impressoras, *modems*, *plotters*, etc, são algumas das vantagens da utilização de computadores em rede.

De acordo com a necessidade do usuário, existem diferentes tipos de configurações de sistemas de redes que combinam a utilização de *software* e *hardware*, em função da necessidade do volume de dados a serem manipulados, juntamente, com o nível de segurança pretendido.

Entre os tipos de redes existentes, os que se destacam são as redes do tipo LAN (*Local Area Network*) e do tipo WAN (*Wide Area Network*). As redes do tipo LAN permitem a conexão de equipamentos situados em uma mesma planta, ou seja, possui restrição técnica ou econômica em relação à distância dos equipamentos. Já a rede do tipo WAN tem sido utilizada para realizar a comunicação em nível corporativo, permite a conexão entre diferentes localidades através do uso da *Internet* e de um *modem*. Estes dois tipos de redes apresentam características que possibilitam sua utilização em conjunto.

2.4.1. TOPOLOGIA DE REDES

A distribuição geográfica dos equipamentos juntamente com seus elos de ligação, ou seja, todos os componentes que configuram uma rede, são conhecidos como topologia de rede - TP, (VELLOSO, 1999). A combinação entre os arranjos possíveis permitem classificar a TP em estruturas Hierárquicas, entre as quais destacam-se as redes em estrela e em barramento, e em estruturas Não-hierárquicas, na qual destaca-se a rede distribuída em anel.

□ Rede estrela:

Uma rede estrela é caracterizada pela utilização de um concentrador chamado *Hub*, no qual estão conectados os demais equipamentos conhecidos como nós da rede. A facilidade de manutenção é a principal vantagem desta topologia, entretanto, exige maior quantidade de cabos para a conexão entre os nós e uma falha no *Hub* central pode paralisar todo o sistema. A Figura 12 apresenta uma configuração típica de uma rede estrela.

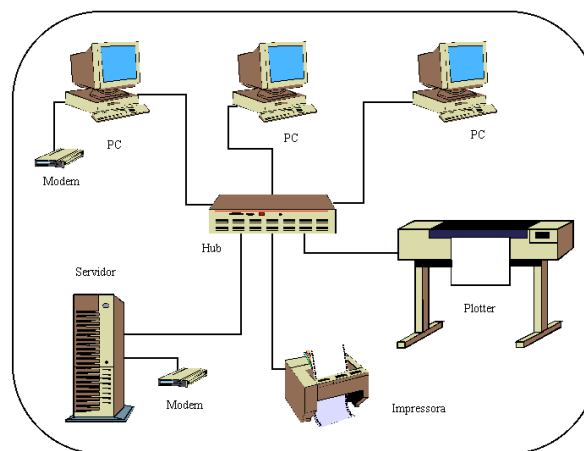


FIGURA 12 – TOPOLOGIA ESTRELA.

□ Rede em barramento

Também conhecida como rede em árvore, neste caso, os servidores, estações e outros periféricos são conectados através de um cabo comum, e um sinal emitido por um dos equipamentos é enviado a todos os nós da rede. Como vantagens: necessita de menor quantidade de cabos; a montagem e manutenção dos cabos é relativamente simples; e pode ser expandida facilmente. A dificuldade na identificação de problemas é sua principal desvantagem. A Figura 13 apresenta uma configuração típica de uma rede em barramento.

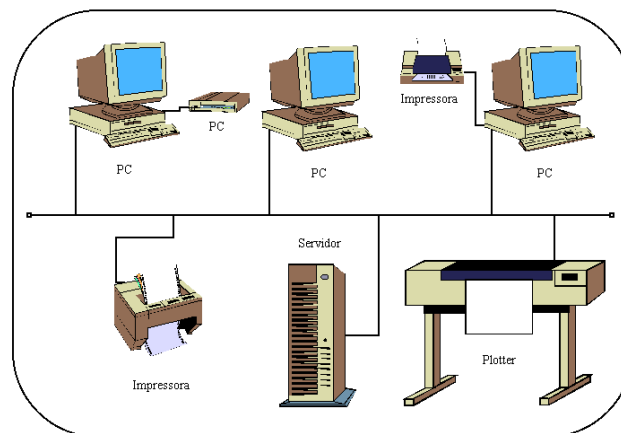


FIGURA 13 – TOPOLOGIA EM BARRAMENTO.

□ Rede em anel

Neste caso os nós são todos interligados uns aos outros formando um anel, ou seja, a informação enviada passa por todos os nós da rede até chegar ao seu destino, devido ao fato, de o sinal percorrer o anel em sentido único. O baixo consumo de cabos e a regeneração do sinal em cada nó, que também permite cobrir distâncias maiores, são as principais vantagens desta abordagem que, entretanto, apresenta desvantagens quanto à flexibilidade da quantidade de estações ou outros periféricos instalados, pois, sua configuração é relativamente complicada, e quanto ao diagnóstico de falhas nos cabos, em função de que uma falha em um único nó,

desencadear falhas em todo o sistema. A Figura 14 apresenta uma configuração típica de uma rede em anel.

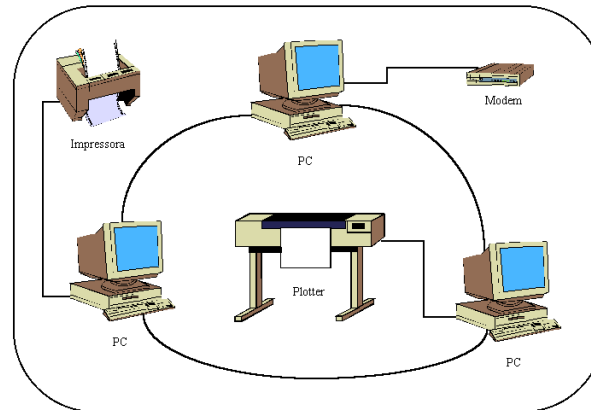


FIGURA 14 – TOPOLOGIA EM ANEL.

2.4.2. A INTERNET

Com argumentos sobre a necessidade de fortalecer seu sistema de defesa, o governo dos Estados Unidos da América financiou o desenvolvimento de uma rede pública de computadores, de modo a permitir a comunicação entre os estados da federação em situações de guerra. Esta rede ganhou popularidade no meio científico graças a facilidade para a troca de documentos. Com o passar dos anos esta rede se tornou uma rede pública internacional de computadores, conhecida atualmente como *Internet*, que é uma rede híbrida, ou seja, uma rede composta por outras redes situadas em diversos países do globo terrestre.

Talvez a maior responsável pelo sucesso que a *Internet* tem obtido nos últimos anos seja a *World Wide Web* (*WWW*), devido a facilidade que permite a disponibilização de informações em documentos eletrônicos compostos por textos, figuras, vídeos, fotos e sons. Foi desenvolvida em 1991 pelo *European Laboratory for Particle Physics*, (conhecido como CERN), e consiste em um sistema que é executado através da *Internet*, para a criação de páginas, conhecidas como *home pages*, que podem conter informações, mecanismos

de busca, ou até mesmo páginas que interagem com o usuário, conhecidas como páginas ativas.

Entre os serviços disponíveis pela *Internet* os que mais se destacam são:

- *File Transfer Protocol (FTP)*, é um serviço que permite a troca de arquivos entre os nós da rede com servidores de FTP. O acesso pode ser realizado em um ambiente DOS (*Disk Operating System*) ou *Windows*[®], e o usuário deve possuir uma senha especial para ter acesso ao servidor;
- *Gopher*, é um serviço semelhante ao FTP, mas possui recursos para a localização e aquisição de arquivos, através de menus, em servidores *Gopher* localizados em qualquer ponto da *Internet*. Inicialmente este serviço foi disponibilizado em ambiente DOS, nos dias de hoje, já existem programas em ambiente *Windows*[®]. Seu nome é o mesmo do mascote da Universidade de *Minnesota*, local onde foi criado este serviço, que é um esquilo dourado chamado *Gopher*;
- *e-mail*, é um serviço de correio eletrônico que permite o envio e recebimento de mensagens, as quais podem ter ou não arquivos anexos, entre os nós da rede. Para a utilização de um serviço de correio eletrônico é necessário fazer uso de um servidor de *e-mail*.

2.4.3. CONTEXTO NA MANUFATURA

Na manufatura a utilização de redes hoje é uma necessidade, devido, principalmente, ao grande volume de informações manipulados, associado às estruturas organizacionais enxutas que requerem maior agilidade.

Os avanços obtidos pela *Internet* também tem disponibilizado maior quantidade de recursos para serem explorados pelas organizações, como comércio eletrônico, catálogos virtuais, correio eletrônico entre outros, em suma, são recursos que permitem a obtenção de maior agilidade no trato com clientes e fornecedores. Segundo STAIR (1998), as empresas estão usando cada vez mais a *Internet* como ferramenta de negócios, com as seguintes aplicações:

- troca eletrônica de mensagens com empregados, clientes e fornecedores;
- enviar e receber documentos por todo o mundo;
- encontrar informação usando quadros de boletins em uma grande variedade de tópicos;
- seguir os desenvolvimentos tecnológicos para uma variedade de áreas e juntar informação sobre a indústria;
- comprar vender e comercializar produtos e/ou serviços para outras empresas ou organizações;
- fornecer suporte ao cliente e responder indagações e necessidades dos clientes;
- conduzir pesquisa de mercado enviando perguntas sobre interesse por produtos e quadros de boletins;
- baixar *softwares* aplicativos de menor custo, como *freeware* e o *shareware*;
- ler jornais e relatórios de pesquisas acadêmicas e do governo, colocadas de forma eletrônica;
- assinar serviços diários de notícias;
- obter informação e análises de departamentos governamentais.

A *Internet* tem obtido grande popularidade em todo mundo graças à quantidade de informações disponíveis a um baixo custo (PINHEIRO, 1998). Também tem criado um ambiente propício para a cooperação entre empresas, dentro de um conceito em que recursos podem ser compartilhados através da utilização de sistemas de informação. Por este motivo, estas empresas são denominadas como empresas virtuais (BREMER, 1999).

Uma empresa pode então, compartilhar recursos entre suas filiais ou com empresas associadas para a exploração conjunta de uma oportunidade de

negócio. Esta “associação” permite uma racionalização de custos e investimentos.

Publicações recentes (HOGARTH, 1999) (BEARD, 1999), também relatam a utilização da *Internet* para a realização de diagnósticos a distância, em problemas ocorridos em máquinas-ferramenta. Nestes casos, utilizou-se de recursos de vídeo conferência para que o responsável pelo suporte técnico orientasse os clientes na outra extremidade, onde, a máquina-ferramenta apresenta problemas. Com este recurso obteve-se economia em relação aos dispêndios ocasionados por viagens, que são realizadas apenas nos casos em que o problema da máquina-ferramenta não apresentou solução adequada com o uso do novo recurso.

2.5. A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM

A otimização do processo de usinagem consiste na redução de custos e de tempos de fabricação, através do emprego de novas tecnologias de fabricação, ou, através da adequação das condições de corte.

A aquisição de equipamentos mais evoluídos nem sempre é possível devido ao seu alto custo, assim, as técnicas mais utilizadas consistem na implementação de novas ferramentas, novos dispositivos de fixação, ou no auxílio de ferramentas computacionais para a escolha da estratégia de corte da ferramenta, como sistemas CAM ou ainda, para a auxiliar na definição de todo o processo, como sistemas CAPP.

Os dispositivos de fixação devem ser projetados com o objetivo de garantir tempos de sujeição, fixação e liberação da peça reduzidos, juntamente, com características que garantam as tolerâncias dimensionais da mesma. A vida e a quantidade de produtos a serem fabricados são normalmente os parâmetros utilizados como referência para a especificação de seu projeto. Portanto, os dispositivos de fixação podem até não apresentar grande flexibilidade quanto à

sua otimização, devido ao seu alto custo inicial, mas entretanto, durante a vida de um dispositivo de fixação pode-se otimizar o ferramental de corte utilizado.

Apesar de a simples substituição do ferramental garantir bons resultados iniciais, o processo ainda pode sofrer eventuais melhorias com uma análise mais profunda sobre os parâmetros de corte. Esta análise, se realizada antes da substituição do ferramental, pode resultar em redução de custos sem a necessidade da geração de dispêndios. No mundo atualmente de 80 a 90% dos tornos em operação trabalham abaixo de seus limites, segundo pesquisa publicada pela fabricante de ferramentas Sandvik em janeiro de 2000 (GAMARRA, 2000), informação que demonstra um campo a ser explorado e que deve receber atenção cada vez maior por parte de pesquisadores e de profissionais da indústria.

Dentre os parâmetros de corte, a velocidade de corte é a que apresenta maior flexibilidade quanto à sua possível gama de valores, pois apresenta menor influência que a profundidade de corte, em relação à potência da máquina-ferramenta (CHUA *et al*, 1993), e apresenta menor influência no acabamento superficial da peça, quando comparado com o avanço de corte (DINIZ & NORITOMI, 1998).

Nesta direção, CHEN *et al* (1989), desenvolveu um sistema para a seleção automática dos parâmetros de corte, para operações de desbaste em torneamento, que respeita as restrições da máquina-ferramenta, ferramenta e peça. Utilizando um método denominado “bom controle do cavaco”, o qual usa a maior profundidade de corte possível para uma operação, em função de restrições do processo de usinagem, para a obtenção do avanço de corte. Esta técnica apresenta limitação, por não considerar operações de acabamento, pois, a rugosidade superficial sofre influência direta do avanço de corte, e este, é aqui determinado tendo por restrições as forças e potências de usinagem.

Com o intuito de obter maior taxa de remoção de material, em função do acabamento superficial da peça e vida da ferramenta, JANG (1991), propôs um modelo de otimização que considera relações das propriedades físicas do

material da peça e da ferramenta com os parâmetros de corte, as quais, através de uma simulação, permitem prever a variação de temperatura, de tensão na ferramenta, e na rugosidade superficial da peça. Estas informações são correlacionadas pelo autor, com a dimensão e rugosidade superficial da peça, e vida da ferramenta. Esta abordagem utiliza informações relativas às propriedades do material, tanto da peça como da ferramenta, que em ambiente fabril, são dificilmente controladas, o que pode restringir sua aplicação neste ambiente.

Os trabalhos realizados por CHEN *et al* (1989), e JANG (1991), citados anteriormente, buscam obter redução do tempo de corte, cada qual com seu método, sem entretanto, utilizar a equação de vida de Taylor. Esta permite determinar o IME, e conseqüentemente, verificar se os parâmetros de corte calculados pertencem ao mesmo.

CAKIR & GURARDA (1998), sugerem um método para otimizar operações de torneamento de passes múltiplos, na condição de mínimo custo, respeitando as restrições do sistema máquina-ferramenta-peça, como forças, potências, maior profundidade de corte e rugosidade superficial da peça. A determinação dos parâmetros de corte é realizada através de programação dinâmica. Um método semelhante a este, foi proposto por SHIN & JOO (1992), o qual também considera restrições da máquina, ferramenta e peça, na otimização de operações de torneamento de passes múltiplos, e também utiliza técnicas de programação dinâmica. Este modelo, entretanto, permite calcular a vida para a ferramenta, para que a mesma seja substituída de forma preventiva, evitando-se assim, possíveis quebras. Um fato curioso nestes trabalhos, é que SHIN & JOO (1992) são citados por CAKIR & GURARDA (1998), que publicaram seu trabalho posteriormente, de forma muito discreta, não gerando maiores comentários ou críticas sobre seu conteúdo, nem mesmo comentando sobre o cálculo da vida prevista para a ferramenta, que não foi utilizada no trabalho mais recente. Estes dois últimos trabalhos, não consideram informações sobre o sistema produtivo para a escolha da velocidade de corte, pois, existem casos

em que a condição de mínimo custo não é indicada, e este fato, limita o campo de aplicação destas técnicas.

Estudos sobre a otimização dos parâmetros de corte tem sido realizados também no Brasil. Recentemente, DOMINGUES & NAZZONI (1999) publicaram um trabalho propondo a variação da velocidade de corte em sistemas de produção que utilizam tornos automáticos. Nesta proposta, a variação da V_c deve ocorrer para adequar os tempos de usinagem do sistema produtivo, e conseqüentemente, adequar o fluxo de peças na linha produtiva. Entretanto, não apresenta a relação com o IME, não permitindo desta forma, variar a V_c dentro das condições econômicas de usinagem.

Em trabalho publicado por FERREIRA *et al* (1999), é apresentado o desenvolvimento de um sistema CAD/CAPP/CAM, para a definição dos parâmetros de corte e geração automática do programa CNC, para a usinagem de uma peça na condição de máxima produção. A escolha dos parâmetros de usinagem é realizada pelo método do “bom controle do cavaco”, no entanto, não considera informações sobre o sistema produtivo, que podem influenciar na escolha da velocidade de corte, e este método, pode não apresentar bons resultados em operações de acabamento.

Procurando analisar a otimização do processo de usinagem, para um cenário de fabricação flexível, DINIZ *et al* (1989), propõem a determinação dos parâmetros intrínsecos ao material, em ambiente fabril, utilizando a condição de máxima produção. Nesta abordagem, a vida da ferramenta pode ser determinada com maior exatidão em função da obtenção de x e K , da equação de vida de Taylor, para o sistema máquina-ferramenta-peça em questão. Na seqüência deste trabalho, foram desenvolvidos dois sistemas especialistas, com base em seus conceitos.

O primeiro, proposto por CUPINI & BATOCCHIO (1994), e denominado Sistema Especialista de Usinagem – SEU, foi concebido em uma versão semi-automática, isto quer dizer que toma as decisões de corte e adota todos os parâmetros de corte em função da base de dados e de todas as regras da base

de conhecimento, com a intervenção do usuário através do teclado do computador. Este SE foi desenvolvido em PROLOG. O segundo, desenvolvido por BERNARDO & COPPINI (1996), e denominado Sistema Especialista para a Determinação das Condições de Usinagem – SEDCU, tem uma estrutura semelhante ao SEU, mas, desenvolvido através de um *shell* conhecido como *Smart Elements*.

Ainda com os conceitos apresentados por DINIZ *et al* (1989), RIBEIRO (1999), propôs a aplicação de um sistema, denominado Assistência Técnica Assistida por Computador – ATAC, que tem como objetivo armazenar e manipular dados oriundos de ensaios realizados em planta fabril, auxiliando assim, o desenvolvimento de um novo processo, comparando o desempenho de diversas ferramentas ensaiadas. Neste caso, ao final da execução dos ensaios, obtém-se a ferramenta com os melhores resultados e velocidade de corte otimizada. O ATAC também foi estruturado de tal maneira que se possa recuperar os dados armazenados, para a determinação dos parâmetros de corte de usinagem para as peças em situações similares, facilitando assim, a escolha da V_c inicial.

Os dois SEs, apresentados acima, permitem a otimização do processo, considerando restrições do sistema máquina-ferramenta-peça, como forças e potências de corte. Como já citado, estes trabalhos tem como base a condição de máxima produção, aplicados principalmente quando a máquina é considerada gargalo, porém, existem situações em que esta não é desejada, sendo necessário portanto, a utilização da velocidade de mínimo custo ou de mínimo custo limite.

Esta necessidade, desencadeou estudos para a utilização da condição de mínimo custo em ambiente fabril (COPPINI *et al*, 1995) (COPPINI *et al*, 1998) (COPPINI & MALAQUIAS, 1998). Foram analisadas situações de produção flexível, considerando a possível ociosidade da máquina. Estes estudos culminaram na descoberta da velocidade de corte de mínimo custo limite, V_{cmcLim} , que posteriormente foi empregada por MALAQUIAS (1999), para a otimização do processo de usinagem em sistemas flexíveis, que utilizam peças

com materiais diferentes. Até então, um único material era analisado durante a otimização.

Em paralelo a estes trabalhos, outro SE foi desenvolvido por ARAÚJO (1997). Desenvolvido em MS-VISUAL BASIC[®], respeita restrições do processo e do sistema máquina-ferramenta-peça. Sugere a seleção das velocidades de máxima produção ou de mínimo custo, em função da situação da carga da máquina e de relações entre a taxa de produção e taxa de custo. A relação de taxa de produção é calculada a partir dos tempos de produção, e a relação de custo, é feita em função dos custos de usinagem para cada uma das V_c . Este SE representou um avanço em relação aos outros sistemas e metodologias aqui apresentados, pois, foi o primeiro a selecionar a velocidade de corte, em função de informações do sistema produtivo, como a situação de carga da máquina. Entretanto, não considerou a utilização da V_{cmLim} , pois esta foi descoberta após sua conclusão.

3. MÉTODO

Iniciou-se os trabalhos através da pesquisa bibliográfica, e durante esta atividade, deparou-se com poucos trabalhos que tratam da otimização do processo de usinagem baseado na análise de parâmetros de corte, principalmente, baseado na velocidade de corte.

A maior parte do material encontrado relacionado ao assunto, refere-se aos trabalhos desenvolvidos pela equipe do professor Coppini, da qual o autor deste trabalho é membro. Em função disto, pesquisou-se assuntos periféricos ao tema, cujas metodologias para a otimização do processo de usinagem, não se baseiam, necessariamente, em parâmetros de corte.

Esta dificuldade também foi encontrada ao realizar-se pesquisas sobre sistemas especialistas de usinagem, portanto, trabalhos sobre o desenvolvimento de sistemas especialistas para outras finalidades foram estudados.

A pesquisa bibliográfica foi realizada em bibliotecas de outras Universidades, como: UNICAMP e USP. Utilizou-se de sistemas informatizados de busca, disponíveis nestas Universidades, e disponíveis para avaliação na *Internet*. A maior parte desta atividade foi desenvolvida no primeiro ano do curso, mas, em função do ritmo e do andamento dos trabalhos, foram realizadas realimentações durante o segundo ano.

Com os resultados da pesquisa bibliográfica, deu-se início ao estudo da metodologia a ser utilizada para a otimização do desenvolvimento de sistemas especialistas.

Em seguida iniciou-se o desenvolvimento da engenharia do conhecimento, buscando-se documentar e armazenar o conhecimento sobre otimização do processo de usinagem. Isto foi realizado através de pesquisa bibliográfica e de reuniões com o orientador. Como resultado, identificou-se os possíveis

cenários produtivos para a aplicação da metodologia de otimização, definiu-se as estratégias de otimização, e algumas características do sistema.

O desenvolvimento do sistema especialista foi realizado em seguida, quando definiu-se a linguagem utilizada, juntamente com todas as características do mesmo. Trabalhos realizados em conjunto com a Escola de Engenharia de São Carlos - EESC-USP, permitiram o desenvolvimento da técnica que possibilitou a utilização do SE em modo completamente automático.

Enfim, o SE, denominado TOES, foi submetido a uma verificação em que dados obtidos em ensaios de usinagem realizados em laboratório, permitiram a simulação de otimização de um conjunto peças, especialmente definidas com técnicas de similaridade em relação à peça usinada no ensaio, que foram agrupadas de diferentes formas, buscando-se assim, a obtenção de algumas situações similares aos cenários produtivos possíveis de serem identificados na indústria.

Em seguida, um exemplo de aplicação foi realizado na Indústria Mercedes Benz Brasil, em São Bernardo do Campo, no qual o processo de fabricação de duas peças distintas foram submetidas a uma otimização com auxílio do TOES. A primeira peça apresentou características que impediram sua otimização com a metodologia empregada. Já a segunda peça, teve seu processo de fabricação otimizado com êxito.

4. CONSTRUÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA

A construção do sistema especialista foi iniciada pela definição do problema que deverá ser resolvido com seu auxílio. Em seguida escolheu-se o especialista em usinagem que foi consultado na aquisição do conhecimento. Após estas, iniciou-se a AC e o desenvolvimento do SE, cujas etapas estão descritas neste capítulo.

4.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema observado na construção deste SE está descrito no objetivo deste trabalho no item 1.2, o qual consiste em:

- desenvolver um sistema especialista para a otimização do processo de usinagem, através de seus parâmetros de corte;
- considerar o IME e demais restrições do sistema produtivo para diversos cenários de fabricação;
- a determinação de dados devem ocorrer em ambiente fabril durante a ocorrência do processo de usinagem;
- permitir que a otimização seja realizada de modo interativo e de modo completamente automático.

Com relação a estes objetivos, observa-se que o processo de usinagem contempla alguns tipos de operações que são executadas, normalmente, por máquinas diferentes entre os quais destacam-se, torneamento, fresamento, retificação e furação. A determinação do IME em ambiente fabril, conforme a metodologia descrita no item 2.3.5, é aplicada principalmente em operações de torneamento, fresamento e furação, visto que a vida do rebolo utilizado em processos de retificação possui características particulares e diferentes em relação aos outros processos citados, e este assunto não será abordado neste

trabalho. O SE foi construído considerando a otimização de operações de torneamento, com o intuito de simplificar o desenvolvimento e verificação do mesmo. Entretanto, os conceitos nele utilizados podem ser aplicados, com as devidas adaptações, em operações de fresamento e furação.

4.2. ESCOLHA DO ESPECIALISTA E AQUISIÇÃO DO CONHECIMENTO

O especialista em usinagem escolhido para ser consultado na elaboração deste SE foi o professor Dr. Nivaldo Lemos Coppini, que tem dispensado esforços de pesquisa durante os últimos anos, juntamente com uma equipe por ele coordenada que é formada por professores e alunos. Alguns sistemas especialistas foram por sua equipe desenvolvidos, ver capítulo 2 e referências bibliográficas, e este trabalho é portanto, uma continuidade das atividades desenvolvidas. Também atuou-se de forma ativa como especialista em usinagem, devido à experiência acumulada em atividades profissionais e na formação acadêmica.

Definido o especialista em usinagem, a aquisição do conhecimento foi iniciada através da leitura de publicações da referida equipe, em seguida, reuniões com o especialista foram realizadas para a resolução de dúvidas e argüição de novas propostas. Desta forma, este trabalho apresenta algumas abordagens diferentes em relação a alguns trabalhos realizados. A seguir é apresentado os resultados da aquisição do conhecimento.

4.3. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Foi definido que otimização do processo de usinagem realizado pelo sistema especialista deve respeitar a metodologia para a determinação do IME em ambiente fabril, já descrito no item 2.3.5. Entretanto, ao iniciar a otimização alguns itens devem ser checados, com o intuito de que não sejam causados danos ao sistema máquina-peça-ferramenta, em decorrência do uso de dados

ou informações conflitantes. A rotina de checagem está representada no fluxograma ilustrado na Figura 15.

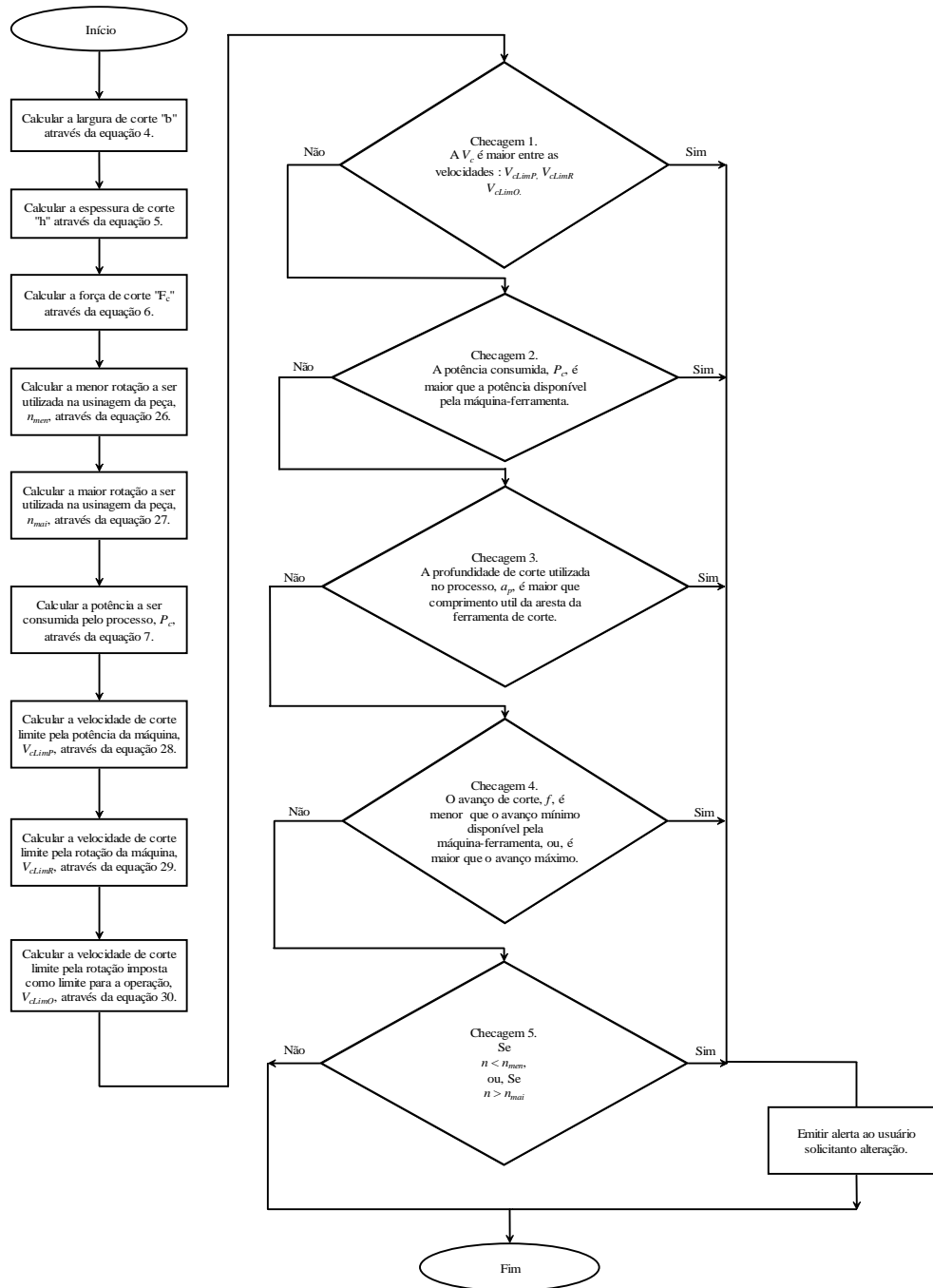


FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DE CHECAGEM.

As equações utilizadas na checagem inicial, que não foram citadas anteriormente são listadas a seguir:

$$n_{men} = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times d_{mp}} \quad [26]$$

Onde:

n_{men} = menor rotação a ser utilizada na usinagem da peça [rpm];

d_{mp} = maior diâmetro a ser usinado na peça [mm].

$$n_{mai} = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times d_{np}} \quad [27]$$

Onde:

n_{mai} = maior rotação a ser utilizada na usinagem da peça [rpm];

d_{np} = menor diâmetro a ser usinado na peça [mm].

$$V_{cLimP} = \frac{P_c \times 60 \times 75}{F_c} \quad [28]$$

Onde:

V_{cLimP} = velocidade de corte limite pela potência da máquina-ferramenta [m/min];

$$V_{cLimR} = \frac{\pi \times d_{np} \times n_{máx}}{1000} \quad [29]$$

Onde:

V_{cLimR} = velocidade de corte limite pela máxima rotação da máquina-ferramenta [m/min];

$n_{máx}$ = rotação máxima disponível pela máquina-ferramenta [rpm].

$$V_{cLimO} = \frac{\pi \times d_{np} \times n_{op}}{1000} \quad [30]$$

Onde:

V_{cLimO} = velocidade de corte limite pela rotação imposta como limite para a operação [m/min];

n_{op} = rotação máxima imposta como limite para a operação [rpm].

Estas equações foram obtidas a partir de desdobramentos e substituições de dados realizados nas equações 1, 6 e 7 descritas no capítulo 2.

Conforme descrito no item 2.3.6, em alguns tipos de peças a velocidade de corte não pode ser mantida constante durante a ocorrência da usinagem, em função de limites técnicos da máquina-ferramenta ou de sistemas de fixação, no que diz respeito a rotação máxima disponível ou máxima para a operação. Nestes casos, é necessário o uso de conceitos de equivalência, os quais foram adaptados com o intuito de facilitar sua implementação no TOES. Assim, um novo modelo foi proposto, o qual também sugere alteração no procedimento para a determinação do IME. Um modelo similar foi implementado por RIBEIRO (1999) no sistema ATAC, de acordo com os conceitos sugeridos por FERRARESI (1977), o qual utiliza a redefinição geométrica da peça para a obtenção do tempo de corte.

O modelo proposto neste trabalho, entretanto, utiliza o tempo efetivo de corte obtido em processo, que pode ser facilmente mensurado durante a usinagem, inclusive pelo próprio operador, dispensando a necessidade da realização de cálculos que podem variar conforme a geometria da peça, dificultando sua implementação em sistemas automatizados. Desta forma, entende-se que a tarefa de otimização pode ser executada com maior facilidade. A seguir é descrito o modelo desenvolvido e implementado no SE.

4.3.1. CONCEITO DE EQUIVALÊNCIA IMPLEMENTADO NO SE

A estratégia básica, do modelo de equivalência implementado no TOES, é calcular rotações equivalentes para cada velocidade de corte utilizada, considerando um comprimento de corte retificado, para o cálculo de x e K , da equação de vida de Taylor, para isto deve-se seguir as seguintes etapas:

- A. definir a primeira velocidade de corte, V_{c1} , pelos métodos tradicionais, como catálogo do fabricante da ferramenta, experiência do operador ou através de resultados obtidos em ensaios realizados anteriormente que podem estar armazenados em banco de dados. A seguir calcula-se a velocidade de corte limite, V_{cLim} , que deve ser a menor entre as velocidades calculadas para a operação através das Equações 26, 27 e 28, e o diâmetro crítico,

$d_{crítico}$, que é o diâmetro de transição entre a velocidade de corte constante e a velocidade de corte variável, e pode ser obtido através da Equação 31. Na seqüência deve-se comparar se a V_{c1} e V_{c2} são menores ou iguais a V_{cLim} , lembrando que a V_{c2} deve ter seu valor 20% maior, ou menor, que a V_{c1} . Se o resultado destas forem verdadeiros, a otimização do processo pode ser realizada normalmente sem a utilização do modelo aqui proposto. Entretanto, no caso em que o resultado de uma das, ou ambas, verificações não forem verdadeiras, deve-se analisar o $d_{crítico}$ para a(s) condição(ões) que não for(em) verdadeira(s). Se o $d_{crítico}$ for maior que o maior diâmetro da peça a ser usinado, d_{mp} , então, esta peça não pode ser otimizada pelo modelo aqui proposto, mas, se possuir valor menor a otimização pode ser iniciada pela etapa seguinte.

$$d_{crítico} = \frac{V_{ci} \times 1000}{\pi \cdot n_{Lim}} \quad [31]$$

Onde:

n_{Lim} = rotação limite;

V_{ci} = velocidade de corte, o índice i representa os possíveis valores desta variável, que pode ser V_{c1} ou V_{c2} .

- B. inicia-se a usinagem do primeiro lote de peças, que deve ser interrompida quando o fim de vida da aresta da ferramenta for decretado, de acordo com um critério previamente definido. Paralelamente, deve-se medir: o tempo efetivo de corte real, t_{cr1} ; a vida da ferramenta, que pode ser expressa em número de peças, Z_{t1} ; e o comprimento de corte retificado, l_{ar1} , que serão utilizados no cálculo da rotação equivalente.
- C. adotar a segunda velocidade de corte, V_{c2} , reiniciar a usinagem e medir: a segunda vida da aresta Z_{t2} ; e o tempo efetivo de corte real, t_{cr2} .
- D. calcular as rotações equivalentes, n_{e1} e n_{e2} com os dados anteriores, através das Equações 32 e 33.

$$n_{e1} = \frac{l_{ar}}{t_{cr1} \times f} \quad [32]$$

$$n_{e2} = \frac{l_{ar}}{t_{cr2} \times f} \quad [33]$$

- E. calcular a constante K e o coeficiente x da equação de vida de Taylor, substituindo-se no cálculo de x , as velocidades de corte pelas rotações equivalentes obtidas pelas Equações 32 e 33, o que resulta na Equação 34. Já a constante K é obtida através da equação 21, que não sofre alterações.

$$x = \frac{\left[\log \left(\frac{Z_{t1}}{Z_{t2}} \right) \right]}{\left[\log \left(\frac{n_{e2}}{n_{e1}} \right) \right]} \quad [34]$$

- F. calcular os diâmetros equivalentes, d_{e1} e d_{e2} , através das equações 35 e 36, e as velocidades de corte equivalentes, V_{ce1} e V_{ce2} , através das Equações 37 e 38.

$$d_{e1} = \frac{K^{\frac{1}{x}} \times 1000}{(Z_{t1} \times t_{cr1})^{\frac{1}{x}} \times \pi \times n_{e1}} \quad [35]$$

$$d_{e2} = \frac{K^{\frac{1}{x}} \times 1000}{(Z_{t2} \times t_{cr2})^{\frac{1}{x}} \times \pi \times n_{e2}} \quad [36]$$

$$V_{ce1} = \frac{n_{e1} \times \pi \times d_{e1}}{1000} \quad [37]$$

$$V_{ce2} = \frac{n_{e2} \times \pi \times d_{e2}}{1000} \quad [38]$$

- G. Calcular as velocidades de corte equivalentes de mínimo custo, V_{cmce} , de mínimo custo limite, $V_{cmcLime}$, e de máxima produção, V_{cmxpe} , através das Equações 15, 16 e 14, respectivamente. Observa-se que estas equações são as mesmas utilizadas nos cálculos das velocidades de corte de mínimo custo, mínimo custo limite, e de máxima produção, entretanto, os resultados obtidos através deste procedimento são as velocidades equivalentes.
- H. as velocidades V_{cmxpe} e V_{cmce} devem pertencer ao intervalo composto pelas velocidades V_{ce1} e V_{ce2} , respeitando-se uma tolerância de no máximo 10% abaixo e acima destes valores respectivamente, caso contrário, será necessário adotar um novo intervalo, e providenciar outro experimento.
- I. definir qual será a velocidade de corte a ser utilizada como referência para a otimização. Esta escolha deve respeitar a decisão do SE, do mesmo modo que será realizado para as peças que não se enquadram neste procedimento, e será descrita mais adiante. Definida a velocidade de corte otimizada, V_{cot} , deve-se comparar a mesma com a V_{cLim} , se menor, a V_{cot} deve ser adotada no processo, entretanto, caso seja maior, deve-se passar para a etapa seguinte.
- J. nesta situação, em que a V_{cot} é maior que a V_{cLim} , deve-se medir o tempo de corte real, t_{cot} , para a velocidade de corte otimizada, em seguida, calcula-se a rotação equivalente otimizada, n_{eot} , e a rotação limite para a operação, n_{LimOp} , em função da V_{cLim} , através das Equações 39 e 40 respectivamente. Se $n_{eot} \geq n_{LimOp}$, deve-se usar a peça com n_{LimOp} , entretanto, se $n_{eot} < n_{LimOp}$, a n_{eot} deve ser adotada. Em ambos os casos, a peça será usinada com rotação constante.

$$n_{eot} = \frac{l_{ar}}{t_{cot} \times f} \quad [39]$$

$$n_{LimOp} = \frac{V_{cLim} \times 1000}{\pi \times d_{np}} \quad [40]$$

Foi utilizado como exemplo no modelo aqui proposto, a utilização do número de peças como unidade de vida para a aresta da ferramenta. Entretanto, é sabido que esta também pode ser expressa em tempo e em comprimento de corte e, nestes casos, deve-se realizar as devidas adaptações nas equações descritas.

Este modelo, apesar de ter sido desenvolvido com base teórica, precisa ainda ser submetido a testes práticos para fins de validação, os quais poderão reforçar, ou não, sua eficácia.

4.4. CENÁRIOS DE FABRICAÇÃO

Com relação ao processo de usinagem, diversos cenários podem ser encontrados no ambiente produtivo, principalmente em função da ramo de atuação e do porte da empresa. Na construção do SE, entretanto, considerou-se algumas informações que permitem classificar o cenário produtivo, com sua respectiva estratégia de otimização, do modo como foram implementados no mesmo. Inicia-se com uma introdução sobre o cenário corrente, os cenários que são recomendados para a utilização da metodologia de otimização e os não recomendados. Em seguida, tem-se uma análise sobre as metodologias de otimização a serem adotadas em cada caso.

4.4.1. CENÁRIO CORRENTE

Atualmente a otimização dos parâmetros de corte em usinagem está limitado à escolha correta da ferramenta com base em avanços, profundidades de usinagem e velocidades de corte indicados por fontes que publicam a experiência acumulada no assunto, geralmente catálogos de fabricantes (DINIZ et al, 1989).

A principal preocupação, no que tange a otimização, é conseguir usinar a peça dentro das especificações do desenho da mesma. São pouco freqüentes os relatos práticos que mostram uma preocupação de aliar ao cuidado mencionado, o de otimizar as condições de corte. Desta forma, condições

operacionais de usinagem são utilizadas através de extrapolações àquelas existentes, mesmo sendo notório o fato de que este processo de fabricação sofra influência de inúmeros fatores e que tal prática é, por este motivo, geradora de possíveis erros que se perpetuam em plantas fabris, gerando e avolumando eventuais prejuízos que permanecem como se não existissem (COPPINI & BAPTISTA, 1998).

Assim, a otimização mais freqüentemente encontrada na prática de usinagem, consiste em “adotar as condições de usinagem”, muitas vezes substituindo o ferramental em uso por outro tecnologicamente mais evoluído, e considerando-as como otimizadas, gerenciar o tempo passivo que o operador da máquina teria a sua disposição para as trocas de ferramentas e recuperação da fadiga devido as mais diversas causas.

4.4.2. CENÁRIOS RECOMENDADOS PARA A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Os cenários que enquadram-se nesta situação:

- produção em série: com máquina dedicadas, ou produção em série para peças de uma mesma família, que utilizem do mesmo material e ferramenta para a usinagem de todas as peças;
- desenvolvimento de um processo: neste, o ideal é a realização de testes com diferentes ferramentas, para a comparação dos custos obtidos. O ATAC, já descrito no capítulo 2, atende a este requisito. Para o sistema especialista desenvolvido neste trabalho, esta opção não foi considerada;
- produção flexível: é dividido em duas situações, na primeira, considera-se a usinagem de lotes pequenos, tendendo a unidade, que são usinados com a mesma ferramenta, nas operações correspondentes, e com peças constituídas pelo mesmo material. Na segunda, tem-se uma situação semelhante à primeira, mas, com materiais diferentes.
- completa automação: este cenário é obtido com o uso de máquinas que permitem sua conexão em redes de computadores, inclusive com a *Internet*.

A otimização deve ser realizada sem a interferência humana, sendo a própria máquina-ferramenta, através de seu CNC, responsável pela contagem do número de peças, monitoramento do fim de vida da ferramenta e envio de informações para um programa gerenciador. Esta foi a configuração utilizada neste trabalho, pois, não existem relatos de experimentos semelhantes em otimização do processo de usinagem.

4.4.3. CENÁRIOS NÃO RECOMENDADOS

Os cenários em que não é recomendada a aplicação da metodologia utilizada para a otimização do processo de usinagem são:

- produção flexível em situações em que são produzidos lotes pequenos, tendendo à unidade, que não são executados com frequência;
- ambientes produtivos que envolvam a utilização de materiais, ferramentas ou máquinas com qualidades e propriedades não repetitivas;
- ambientes produtivos em que se emprega máquinas convencionais, que não permitem a utilização dos parâmetros de usinagem otimizados.

4.4.4. ADAPTAÇÃO DOS CENÁRIOS PARA O SE

Para atender às necessidades do SE, os cenários produtivos foram classificados em função das seguintes informações:

- tipo de produção: flexível ou seriada. Esta classificação é realizada após comparação do número de peças do lote, com um número previamente configurado pelo usuário, e da verificação do número de peças existentes em uma programação diária;
- tecnologia de grupo: utiliza ou não utiliza. Ao cadastrar o processo produtivo de uma peça, o usuário deve informar o código da família da mesma, caso exista;

- programação diária: é composta por uma única peça ou por diversas peças diferentes. Deve ser cadastrada previamente pelo usuário;
- material da peça: iguais para todas as peças do lote ou diferentes;
- ferramenta de corte: utiliza a mesma para a usinagem de todas as peças, considerando-se as operações similares (ex. mesma ferramenta para o operação de desbaste), ou utiliza ferramentas diferentes;
- desenvolvimento de processo: trata-se de um processo novo ou trata-se de um processo existente (O SE não considera o desenvolvimento de um novo processo);
- automação existente: é possível realizar a otimização automaticamente, sem interferência humana ou não. Assim, é determinado se a otimização ocorrerá em modo interativo, com interferência humana, ou em modo automático. Esta opção é definida pelo usuário antes do início da otimização.

Observação: Normalmente entende-se que um lote é formado por uma determinada quantidade de peças, sendo todas iguais, e durante um período de trabalho realiza-se, eventualmente, a usinagem de diferentes lotes de peças. Entretanto, pode-se também agrupar diferentes peças em um único lote, e neste caso, tem-se um lote formado por várias peças, ou seja, uma situação bem diferente da anterior. Com o intuito de minimizar possíveis erros ocasionados por diferentes interpretações, convencionou-se que uma programação diária a ser usinada será a partir de então denominada TAREFA. Uma TAREFA é portanto, formada pelo(s) lote(s) de peça(s) a ser(em) usinado(s) com sua(s) respectiva(s) quantidade(s), sendo que um lote pode ser formado por uma única peça. No SE foi construído um banco de dados específico para o armazenamento das TAREFAS. Para facilitar a otimização de peças conforme a necessidade do usuário, em situações que não desejar cadastrar uma TAREFA para uma única peça, também foi disponibilizado uma seqüência para a otimização

em que é possível otimizar apenas um único processo. Por este motivo, esta opção no SE foi denominada PROCESSO. A TAREFA e o PROCESSO foram definidos antes das outras características e funções do SE, para facilitar a compreensão da classificação do cenário produtivo.

Estas informações foram agrupadas e os cenários identificados estão descritos na Tabela 4, na qual está associado a sua respectiva metodologia para a otimização, e utilizou-se a seguinte nomenclatura:

- **qtd de peças no lote:** é quantidade de peças existentes em uma TAREFA, seu valor pode ser “1” ou “maior que 1” – M1;
- **tamanho do lote:** é o resultado de uma comparação entre o número de peças existentes no lote, com um valor previamente configurado pelo usuário;
- **somatória de todos os lotes:** é a somatória de todas as peças de todos os lotes que constituem uma TAREFA;
- **é família:** seu valor pode ser sim ou não, neste caso, quando todas as peças que constituem uma TAREFA possuem o mesmo código de família, este campo é preenchido com o valor “sim”, caso contrário, é preenchido com o valor “não”. Para a otimização de um PROCESSO, este campo é automaticamente preenchido com o valor “sim”, pois, trata-se de uma única peça.
- **usa a mesma ferramenta:** se todas as peças que constituem uma TAREFA forem usinadas com a mesma ferramenta, para as operações correspondentes, este campo é preenchido com o valor “sim”, caso contrário, com o valor “não”. Para a otimização de um PROCESSO, este campo é automaticamente preenchido com o valor “sim”, pois, trata-se de uma única peça que é usinada por uma mesma ferramenta.
- **possuem materiais iguais:** Se todas as peças que constituem uma TAREFA utilizarem o mesmo material, este campo será preenchido com o

valor “sim”, caso contrário, com o valor “não”. Para a otimização de um PROCESSO, este campo é automaticamente preenchido com o valor “sim”, pois, trata-se de uma única peça que utiliza um único material.

TABELA 4 – CONFIGURAÇÃO DOS CENÁRIOS PRODUTIVOS

Qtd de peças no lote	Tamanho do lote	Somatória de todos os lotes	É família	Usa a mesma ferramenta	Possuem materiais iguais	Descrição	Cenário	Metodologia
1	GD	-	Sim	Sim	Sim	Produção em Série	1	1
1	PQ	-	Sim	Sim	Sim	Produção Flexível	1	1
M1	-	GD	Sim	Sim	Sim	Produção Flexível	2	2
M1	-	GD	Não	Sim	Sim	Produção Flexível	2	2
M1	-	GD	Sim	Não	Sim	Produção Flexível	3	3
M1	-	GD	Sim	Sim	Não	Produção Flexível	4	4
M1	-	GD	Não	Não	Não	Produção Flexível	3	3
M1	-	GD	Sim	Não	Não	Produção Flexível	3	3
M1	-	GD	Não	Sim	Não	Produção Flexível	4	4
M1	-	GD	Não	Não	Sim	Produção Flexível	3	3
M1	-	PQ	Sim	Sim	Sim	Produção Flexível	2	2
M1	-	PQ	Não	Sim	Sim	Produção Flexível	2	2
M1	-	PQ	Sim	Não	Sim	Produção Flexível	3	3
M1	-	PQ	Sim	Sim	Não	Produção Flexível	4	4
M1	-	PQ	Não	Não	Não	Produção Flexível	3	3
M1	-	PQ	Sim	Não	Não	Produção Flexível	3	3
M1	-	PQ	Não	Sim	Não	Produção Flexível	4	4
M1	-	PQ	Não	Não	Sim	Produção Flexível	3	3
1	GD	-	Sim	Sim	Sim	Automático	5	5

- **descrição:** apresenta a configuração do cenário, que pode ser “produção em série” e “produção flexível”.
- **cenário:** no SE o cenário pode receber uma numeração de 1 a 5, conforme descrito na Tabela 4, isto porque, a este número esta associado a metodologia para a otimização.
- **metodologia:** é a metodologia a ser utilizada na otimização do processo de usinagem, que é descrita com maiores detalhes no próximo item.

4.5. METODOLOGIAS DE OTIMIZAÇÃO PARA OS CENÁRIOS

A metodologia básica consiste na determinação do IME em ambiente fabril, entretanto, em função dos diversos cenários possíveis de serem encontrados, algumas adaptações foram necessárias, resultando em 5 diferentes metodologias, sendo estas:

- metodologia 1 – é indicada para a usinagem de lotes grandes de peças (produção em série – cenário 1), e para a otimização de um único PROCESSO, o qual possui pequena quantidade de peças (produção flexível – cenário 1). Esta metodologia é idêntica à descrita no item 2.3.5, não sofrendo alterações.
- metodologia 2 – é indicada para a usinagem de toda a programação diária, TAREFA, nas situações em que estas são compostas por peças diferentes, as quais podem ser ou não da mesma família, TG, possuem o mesmo material, utilizam a mesma ferramenta para a usinagem das operações correspondentes, e a somatória de todas as peças constituintes é considerada grande (produção flexível – cenário 2). Nestes casos, todas as peças da TAREFA deverão ser agrupadas em um único lote perante o SE. A vida da ferramenta deverá expressa em tempo neste caso. A partir deste ponto, pode-se utilizar a metodologia descrita no item 2.3.5, não sofrendo alterações.
- metodologia 3 – neste caso a otimização do processo não será possível de ser executada com auxílio do SE, em função do uso de diferentes ferramentas e de pequenos lotes de peças (produção flexível – cenário 3), que inviabilizam a aplicação da metodologia aqui empregada.
- metodologia 4 – é indicada para a otimização de uma TAREFA, quando as peças usam, ou não, a TG, possuem diferentes materiais, mas, utilizam a mesma ferramenta (produção flexível – cenário 4). Neste caso, não será utilizada a otimização através do IME, e a velocidade de corte não será escolhida em função do cenário produtivo. Deve-se utilizar a metodologia

proposta por COPPINI *et al* (1995), e adaptada por MALAQUIAS (1999), a qual consiste na definição do número de arestas de ferramentas a serem consumidos em uma jornada de trabalho. Desta forma, o operador recebe a quantidade exata de arestas para a usinagem de uma TAREFA, e deve realizar a troca da aresta somente quando for decretado seu fim de vida. O critério para o decreto do fim de vida é o tempo de corte total da ferramenta. Assim, utiliza-se o coeficiente x e a constante K , obtidos em ensaios anteriores ou em catálogos de fabricantes, para o cálculo da velocidade de corte de mínimo custo limite, V_{cmcLim} , em seguida, calcula-se o número de peças usinadas por aresta, Z_{ti} , através da Equação 41. O número de arestas consumidas é obtido através da Equação 42. Ao final, o operador deverá registrar qual o número de arestas utilizadas, para que possam ser realizados ajustes nos cálculos do modelo.

$$Z_{ti} = \frac{K_i}{t_{ci} \cdot (V_{cmcLim})^{x_i}} \quad [41]$$

Onde:

Z_{ti} = número de peças usinadas por aresta;

K_i = constante da equação de Taylor, da peça do lote i ;

x_i = coeficiente da equação de Taylor, da peça do lote i ;

V_{cmcLim} = velocidade de corte de mínimo custo limite para o lote i .

$$n_t = \sum_{i=1}^{n_l} \left(\frac{Z_i}{Z_{ti}} \right) \quad [42]$$

Onde:

n_t = é o número total de arestas necessárias para realizar uma determinada operação em uma TAREFA;

Z_i = é o número de peças do lote i ;

n_l = é o número total de lotes programados, em uma TAREFA;

Z_{ti} = é o número de peças usinadas por vida de aresta para a peça do lote i , que é calculado pela Equação 41.

- metodologia 5 – é aplicada em completa automação (automático – cenário 5), utiliza a metodologia 1, sem alterações, visto que neste caso, só é possível realizar a otimização de um processo por vez. Entretanto, foi

desenvolvida uma estratégia que permite a comunicação entre o SE e a máquina ferramenta. Desta forma, a vida da ferramenta, que é medida em número de peças, é informada pela máquina-ferramenta diretamente a um programa gerenciador, o qual é responsável pela interface entre SE e máquina-ferramenta. Esta estratégia é descrita com maiores detalhes no próximo item.

4.5.1. ESTRATÉGIA DE COMUNICAÇÃO ENTRE SE E MÁQUINA-FERRAMENTA

A comunicação entre o sistema especialista TOES e o CNC da máquina ferramenta pode ser realizada basicamente via uma rede do tipo LAN ou uma rede do tipo WAN.

A rede do tipo LAN permite a conexão e compartilhamento de dados entre microcomputadores em um mesmo ambiente, como uma fábrica ou um escritório. Neste caso, o SE pode ser instalado em uma máquina localizada em qualquer ponto de conexão da rede, próxima ou não da(s) máquina(s) a ser(em) otimizada(s).

Para que a otimização de um processo de usinagem seja possível de ser realizada via *Internet*, deve-se utilizar uma rede do tipo WAN, neste caso, o microcomputador, no qual reside o SE, pode estar localizado em qualquer parte onde se tenha acesso a *Internet*.

As características da máquina-ferramenta utilizada, um torno CNC INDEX pertencente ao NUMA – Núcleo de Manufatura Avançada, da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, facilitaram o desenvolvimento dos trabalhos devido ao fato de o mesmo possuir um microcomputador do tipo padrão IBM-PC, que é responsável pelo controle de seu CNC. Desta forma, uma placa de rede foi instalada neste microcomputador, permitindo assim, o compartilhamento de sua unidade de disco rígido em um ambiente de rede, que pode ser do tipo LAN ou WAN.

Outra característica importante desta máquina, é a possibilidade do uso de variáveis de programação dentro dos programas de usinagem desenvolvidos em “linguagem G”, pois, é possível reservar uma variável dentro deste programa, cujo valor é definido em um arquivo externo que possui formato texto (ASCII).

Este arquivo pode ser lido, alterado e gravado enquanto o torno realiza operações de usinagem, considerando que somente a cada início de ciclo de usinagem o CNC do torno carrega as informações nele contidas. Este arquivo também é importante para a contagem do número de peças devido ao fato de que uma rotina foi desenvolvida, em linguagem de programação disponível pelo comando numérico, para adicionar o valor 1 (um) a cada início de ciclo de trabalho, em uma variável predefinida.

Um outro computador foi utilizado como servidor, que também foi instalado no NUMA, e fez a conexão entre o SE e o CNC da máquina-ferramenta. Este servidor foi empregado para possibilitar maior segurança ao sistema, e nele foi instalado um *software* gerenciador, desenvolvido em MS-VISUAL BASIC®. Tal gerenciador é responsável pelo envio e recebimento de informações existentes no CNC da máquina ferramenta e no SE. Finalmente, tem-se o computador em que esta instalado o sistema especialista. Um esquema desta conexão é mostrado na Figura 16.

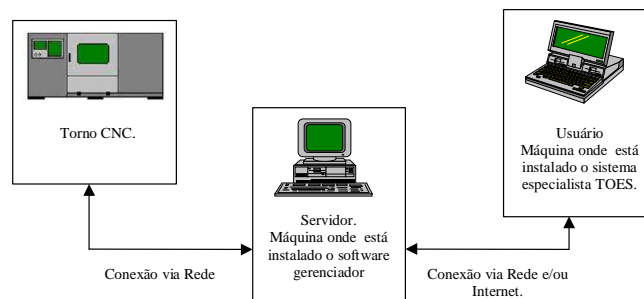


FIGURA 16 – ESQUEMA DA CONEXÃO ENTRE SE E CNC.

A estratégia de comunicação entre o SE e CNC consiste na interação entre ambos através de dois arquivos previamente definidos, que são o arquivo

“PARAM.ATD” e o arquivo “BACK.ATD”, via rede. O primeiro “PARAM.ATD” é gerado pelo *software* gerenciador e é lido pelo SE, que ao receber as informações existentes no arquivo “PARAM.ATD”, realiza os cálculos necessários e devolve os resultados gravados no arquivo “BACK.ATD”, para o gerenciador.

Ambos arquivos possuem o mesmo conteúdo, sendo que a diferença entre os nomes adotados foi determinada para se evitar possíveis problemas em função de interrupções do sistema de comunicação utilizado. A estrutura do arquivo adotado, é mostrada na Tabela 5.

A Figura 17 apresenta o fluxograma utilizado pelo *software* gerenciador, pelo SE e pela máquina-ferramenta, na troca de informações através dos arquivos “PARAM.ATD” e “BACK.ATD”.

4.6. ESCOLHA DA VELOCIDADE DE CORTE OTIMIZADA

Ao iniciar uma otimização do processo de usinagem, o usuário deve selecionar entre um PROCESSO e uma TAREFA. Ao realizar esta escolha, o SE carrega todas as informações necessárias de bancos de dados, sobre a máquina-ferramenta, ferramenta e processo(s) envolvido(s), bastando ao usuário informar a vida da ferramenta para cada velocidade de corte, e em caso de ter selecionado um PROCESSO, o tamanho do lote.

Com estas informações o SE é capaz de classificar o cenário produtivo, definindo assim, a metodologia de otimização, e de calcular as velocidades de corte que constituem o IME. Portanto, a última etapa a ser concluída é a seleção da velocidade de corte otimizada, V_{cot} . A qual será realizada após análise de informações sobre o sistema produtivo e da configuração do SE providenciada pelo usuário, os quais são apresentados a seguir.

TABELA 5 – ESTRUTURA DOS ARQUIVOS PARAM.ATD E BACK.ATD.

Variável	Função	Descrição
R0	Ordem se serviço	Utilizada pelo CNC da máquina-ferramenta, no armazenamento do nome do programa CNC para a usinagem da peça.
R1	Fim de vida da ferramenta	Possui valor <i>default</i> = 0. No momento em que é decretado o final da vida da ferramenta, este valor é alterado para 1.
R2	Diferença	Armazena o valor obtido na medição da peça. A máquina utilizada possui sistema de medição através de um apalpador em conjunto com sistema de monitoramento por emissão acústica. Após a usinagem de cada peça, é realizada sua medição, através do toque do referido apalpador que encosta na peça, e cujo momento do toque é acusado pela emissão acústica. Neste momento, é armazenado o valor dimensional obtido.
R3	Reservado	Reservado para eventual uso de outros sistemas de monitoramento.
R4	Reservado	Reservado para eventual uso de outros sistemas de monitoramento.
R5	Velocidade de Corte (V_c)	Armazena o valor da velocidade de corte.
R6	Avanço de corte (f)	Armazena o avanço de corte.
R7	Profundidade de corte (a_p)	Armazena o valor da profundidade de corte.
R8	Número de peças usinadas	Armazena o número de peças usinadas. A cada início de ciclo de usinagem da peça, soma-se 1 ao valor inicial (<i>default</i> = 0)
R9	Limite de rotação	Armazena o valor da rotação adotada como limite para a operação.
R10	Medição da peça	Armazena a dimensão limite para o decreto do final da vida da ferramenta.
R11	Reservado	Reservado para eventual uso de outros sistemas de monitoramento.
R12	Controle de liberação	Possui valor <i>default</i> = 0, neste caso, o sistema especialista TOES, ou o <i>software</i> gerenciador, lê as informações do arquivo, mas não dá prosseguimento ao processo de otimização. No momento em que o final de vida da ferramenta é decretado, este valor é alterado para 1, liberando assim, o <i>software</i> gerenciador, ou o TOES, para prosseguir com a otimização.

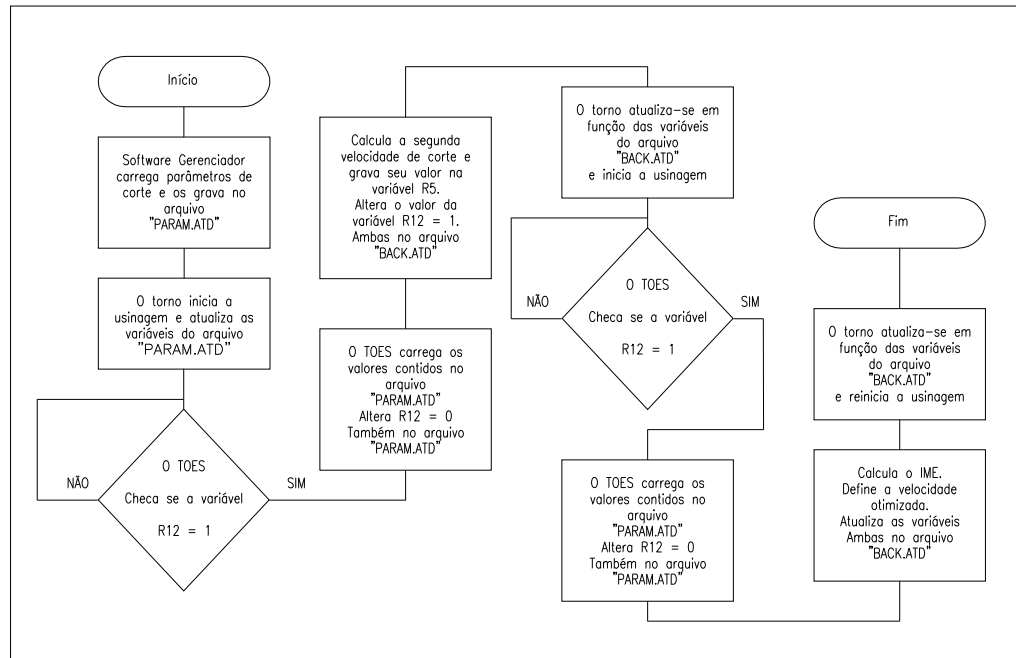


FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DE COMUNICAÇÃO.

4.6.1. INFORMAÇÕES SOBRE O SISTEMA PRODUTIVO

As informações sobre o sistema produtivo que influenciam na escolha da velocidade de corte otimizada são:

- situação de carga da máquina - é classificada em “gargalo”, “normal” e “ociosa”, sendo:
 - gargalo – nesta situação, objetiva-se maior produção possível, mesmo ocorrendo custos de fabricação mais altos, pois esta máquina influencia toda a linha produtiva. Neste caso, a adoção da V_{cmxp} como velocidade de corte otimizada é recomendada, atingindo-se assim, a maior produção dentro do IME. O fator restritivo, refere-se as limitações técnicas da máquina-ferramenta, que podem não atender a V_{cmxp} necessária, neste caso, deve-se utilizar a maior V_c possível;
 - normal – situação em que é desejada, normalmente, a redução de custos, e portanto a V_{cmLim} é indicada.

- Ociosa – situação em que é desejada a redução do custo de fabricação da peça, ou seja, é indicado o uso da V_{cmc} como V_{cot} . Pois, pode-se ocorrer em um aumento do tempo de ciclo, sem prejudicar a produtividade da máquina.
- custo do ferramental – A V_c tem influência negativa sobre a vida da ferramenta, ou seja, a utilização de uma velocidade de corte muito alta implica numa vida da ferramenta menor, ocorrendo num aumento do custo do processo, em função do maior número de arestas consumidas e do maior número de trocas realizadas. Portanto, para os casos em que a V_{cmxp} é recomendada, uma análise do custo do ferramental é indicada. Na situação de um ferramental muito caro deve-se reduzir a velocidade de corte, prevenindo assim, futuras quebras e diminuindo-se a influência negativa da velocidade de corte sobre o custo do processo, ou seja, a utilização de um ferramental muito caro pode descartar o uso da V_{cmxp} como velocidade de referência para a otimização. Na configuração do SE, o preço do ferramental pode ser classificado em: “muito caro”; “caro”; e “baixo preço”.
- tempo de troca da ferramenta, t_{ft} – será analisada as seguintes situações:
- grande – nesta situação a V_{cmxp} tende a se aproximar da V_{cmc} , neste caso, pode-se escolher qualquer uma das duas para ser utilizada como referência, entretanto, a V_{cmxp} pode, dependendo do valor do t_{ft} , possuir um valor maior que a V_{cmc} , e em máquinas que forem classificadas como gargalo, é indicada sua utilização como a V_{cot} ;
 - médio – não implica em alterações na seleção da V_{cot} ;
 - baixo – para as situações em que o t_{ft} tende a valores muito pequenos, tendendo a zero, e podendo até ser desprezado, a V_{cmxp} , tende a atingir valores muito altos, podendo até, extrapolar os limites técnicos da máquina. Neste caso analisar a situação de carga da máquina, que sendo “gargalo”, recomenda-se a utilização da maior V_c disponível na

máquina, e sendo “normal” ou “ociosa”, é indicado o uso da V_{cmcLim} como V_{cot} .

- Inexistente – para os casos em que uma ferramenta usina mais de uma peça, sendo estas diferentes, sem a necessidade de sua troca. Esta situação, pode acontecer em sistemas flexíveis, com lotes de peças tendendo a unidade, em que é aconselhado a adoção da V_{cmcLim} como V_{cot} ;
- ferramenta padrão: neste caso, uma ferramenta padrão é aquela que pode ser adquirida imediatamente com o fornecedor, sem a necessidade da realização de encomendas antecipadas, ou seja, são as chamadas “ferramentas de prateleira”, que não implicam na seleção da V_c . Entretanto, se o processo fizer uso de uma ferramenta considerada especial, ou importada, ou de qualquer outro tipo e origem no qual sua compra é feita sob encomenda, a utilização da V_{cmxp} deve ser indicada somente após de uma verificação do estoque da ferramenta. Portanto, no SE a ferramenta poder ser classificada como “padrão” e “não padrão”;
- Estoque da ferramenta – é a quantidade de ferramentas em estoque, e pode ser classificado no SE como: “crítica”, quando menor que a quantidade limite; “normal”, quando maior que a quantidade limite; e “limite” quando igual. Esta informação é utilizada como referência para a seleção da V_{cot} nos casos em que o ferramental empregado é muito caro, e cabe ao usuário configurar a quantidade limite para cada ferramenta;
- tempo de *SETUP* – pode ser classificado como “rápido”, “normal” e “lento”. Este tempo, quando lento, pode sugerir a utilização da V_{cmxp} nas situações em que a carga da máquina é “normal” ou “ociosa”. O tempo perdido no *SETUP* pode ser, pelo menos em parte, compensado durante a usinagem, e desta forma, a máquina não se tornaria um gargalo momentâneo.
- sistema de custeio – As velocidades V_{cmc} e V_{cmcLim} , utilizam em seus cálculos informações sobre os custos da operação de usinagem. Quando é

utilizado o sistema de custeio ABC de forma correta, o qual é baseado em atividades, tais custos são obtidos com maior precisão;

- política do usuário – pode ser classificado como “arrojado”, “conservador” e “moderado”. As informações sobre o sistema produtivo descritas acima, quando na seleção da V_{cot} , podem gerar conflitos, como por exemplo uma situação em que a máquina é “gargalo”, o ferramental “não é padrão” e sua quantidade em estoque é “crítica”. Após uma análise, pode-se concluir que a V_{cmcLim} seria indicada, entretanto, o usuário pode possuir um perfil mais agressivo, assumindo o risco da adoção da V_{cmxp} . Para resolver possíveis problemas como este, ou seja, de permitir que o usuário interfira na otimização do processo de acordo com sua preferência, foi criado este campo.
- cenário – o cenário pode ser classificado em “produção flexível”, ou em “produção em série”. A produção flexível indica a utilização da V_{cmc} como V_{cot} , entretanto, pode-se ter situações de conflitos em função da carga da máquina, neste caso, a política do usuário deve ser consultada para a escolha da V_{cot} .

4.6.2. CONFIGURAÇÃO DO SE

Para que o SE classifique o sistema produtivo envolvido, é necessário que seja feita uma configuração prévia por parte do usuário. Abaixo estão relacionadas, inclusive com valores preenchidos em negrito como exemplo, as informações que devem ser inseridas pelo usuário.

- tempo de SETUP, t_s , em minutos:
 - “rápido” quando $t_s \leq \mathbf{3}$.
 - “normal” quando $\mathbf{3} < t_s \leq \mathbf{15}$.
 - “lento” quando $t_s > \mathbf{15}$.

- tempo de troca da aresta da ferramenta, t_{ft} , em minutos.
 - grande quando $t_{ft} > 2$;
 - médio quando $1 < t_{ft} \leq 2$;
 - baixo quando $t_{ft} \leq 1$.
- preço do ferramental, PF .
 - muito caro quando $PF > \text{R\$ } 8,00$;
 - caro quando $\text{R\$ } 4,00 < PF \leq \text{R\$ } 8,00$;
 - baixo preço quando $PF \leq \text{R\$ } 4,00$.
- quantidade limite para sistema produtivo flexível.
 - **40** peças.
- política do usuário, escolher entre:
 - **arrojado**;
 - moderado;
 - conservador.
- unidade de vida para a ferramenta, escolher entre:
 - **tempo** (T – em minutos);
 - número de peças (Z_t);
 - comprimento de corte (l_c – em metros).
- quantidade de ferramentas em estoque:
 - **100** ferramentas.

- sistema de custeio, escolher entre:
 - **rateio**;
 - ABC.

Após a definição do cenário produtivo e da obtenção e classificação das informações acima descritas, o SE está pronto para realizar a escolha da V_{cot} . Até aqui, as rotinas foram implementadas no SE de forma estruturada, pois, a rotina para a realização de cálculos e classificação do cenário não são alteradas de indústria para indústria. Já a escolha da V_{cot} foi implementada com técnicas específicas, as quais, permitem alteração por parte do usuário de acordo com seu ambiente produtivo. Deve-se Lembrar, que a influência das informações acima descritas foram obtidas junto a um especialista, o que não elimina a possibilidade de que outros especialistas em usinagem discordem do mesmo. A seguir são apresentadas as técnicas utilizadas para a escolha da V_{cot} .

4.6.3. ESCOLHA PELA TABELA DE DECISÃO

Um exemplo de tabela de decisão foi exposto no item 2.2.1, a qual é uma forma de representação de regras de produção. No SE foi implementada uma tabela de decisão que permite ao usuário configurá-la de acordo com suas necessidades. A Tabela 6 apresenta uma pequena parte da tabela de decisão implementada no SE.

TABELA 6 – TABELA DE DECISÃO IMPLEMENTADA NO SE.

SitCarga	PoUsuário	SisCusteio	t_s	PF	T_Troca	Cenário	Fer_Utiliz	EstoqueFer	VelRef
Gargalo	Arrojado	Rateio	Rápido	MuitoCaro	Grande	1	Padrão	Crítica	V_{cmp}
Gargalo	Arrojado	Rateio	Rápido	MuitoCaro	Grande	1	Padrão	Normal	V_{cmp}
Gargalo	Conservador	Rateio	Rápido	MuitoCaro	Grande	1	Padrão	Crítica	V_{cmc}
Gargalo	Moderado	Rateio	Rápido	MuitoCaro	Grande	1	Padrão	Crítica	V_{cmclim}
Gargalo	Conservador	ABC	Rápido	Caro	Grande	2	Padrão	Límite	N

Esta tabela apresenta um grande número de possibilidades, portanto, para que o usuário possa preenche-la de acordo com sua disponibilidade e uso, o campo “VelRef”, no qual é indicada a velocidade de corte de referência para a otimização, pode armazenar o valor “N” de não definido. Neste caso, o SE pode ser configurado para questionar ao usuário qual a velocidade de corte que será adotada, ou para especificar uma das três velocidades de corte que constituem o IME automaticamente.

4.6.4. ESCOLHA PELA REGRA RESIDENTE

Foi implementado no SE um conjunto de regras que não podem ser alteradas pelo usuário, e por este motivo foram denominadas “regra residente”, a qual foi construída com base nas recomendações do especialista consultado. Foi elaborada utilizando-se regras de produção que foram agrupadas em um roteiro, pois, a escolha da V_{cot} respeita sempre a mesma seqüência, de um modo que a busca é interrompida quando a V_{cot} é encontrada.

A regra em sua totalidade não será descrita neste trabalho, entretanto, um pequeno trecho, com alterações, da mesma é apresentado a seguir:

REGRA001 – (Verificar a situação de carga da máquina)

Se: Situação_De_Carga = *Gargalo* **Ou** Situação_De_Carga = *Normal*

Então: Checar REGRA002

Senão: Checar REGRA006

REGRA002 – (Verificar o estoque da ferramenta)

Se: Estoque_Da_Ferramenta = *Crítica* **Ou** *Limite*

Então: Checar REGRA003

Senão: Checar REGRA004

REGRA003 – (Verificar se a ferramenta é padrão)

Se: Ferramenta_Padrão = *Sim*

Então: Checar REGRA004

Senão: Velocidade_Escolhida = V_{cmLim}

REGRA... (As regras continuam até que a V_{cot} seja encontrada)

Esta regra residente, pode não atender algumas, ou todas, as necessidades do usuário. Nos casos em que não atender uma grande maioria, sugere-se que a tabela de decisão seja utilizada. Entretanto, em casos em que é identificada apenas algumas divergências, pode-se ainda utilizar a tabela de exceções.

4.6.5. ESCOLHA PELA TABELA DE EXCEÇÕES

Esta tabela possui os mesmo campos e propriedades da tabela de decisão, entretanto, chega ao usuário completamente vazia, cabendo ao mesmo, configurar as situações que discorda da regra residente. Assim, o SE durante a seleção da velocidade de corte, realiza primeiramente uma pesquisa na tabela de exceções, se a configuração atual enquadrar-se em algum dos itens nela cadastrados, a V_{cot} é definida, caso contrário, o SE redireciona a busca para a regra residente.

4.7. O SISTEMA ESPECIALISTA TOES

O sistema especialista desenvolvido neste trabalho recebeu o nome de *Tool Optimization Expert System* – TOES. Este nome não possui vínculo com a função do sistema, mas, é um nome fácil de ser lembrado e possui um som parecido com a palavra “brinquedo” em inglês no plural, que é *toys*. Este trocadilho é interessante em função da facilidade de seu uso.

O TOES foi desenvolvido em MS-VISUAL BASIC[®], versão 5.0. Esta linguagem foi adotada em função de possibilitar uma interface amigável para com o usuário, e também porque possui recursos que facilitam sua interação com banco de dados (PETROUTSOS, 1999). Para a construção das tabelas dos banco de dados foi utilizado o MS-ACCESS[®]. A tela principal do TOES é apresentada na Figura 18.

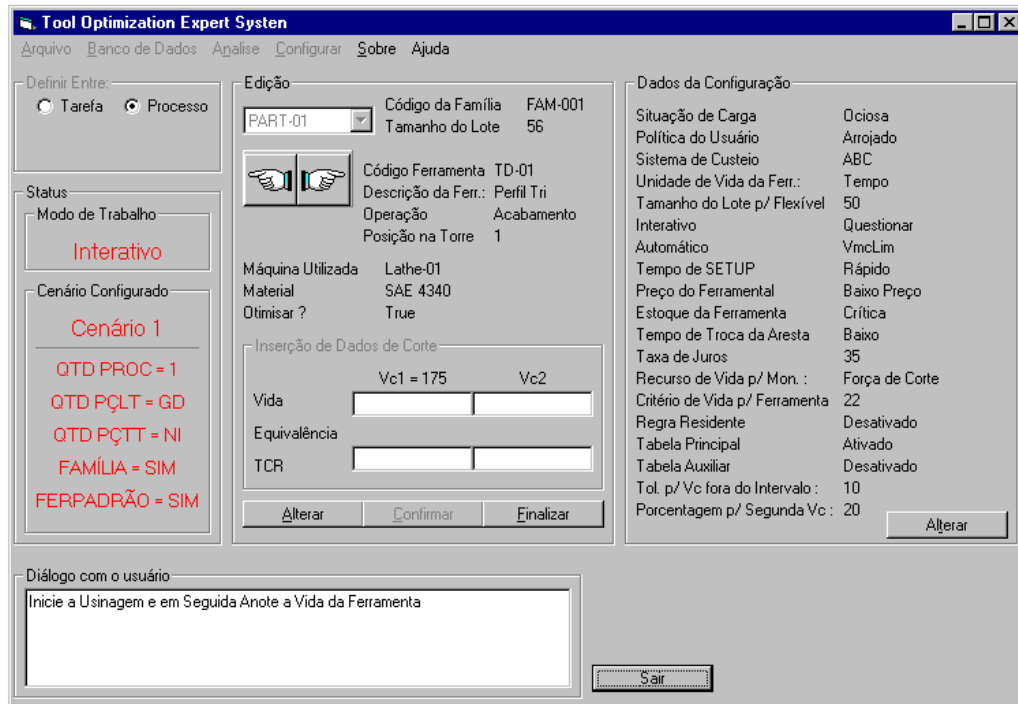


FIGURA 18 – TELA PRINCIPAL DO TOES.

O TOES apresenta as seguintes características:

- Permite a otimização do processo de usinagem em modo interativo, com participação humana, ou, em modo completamente automático, sem a necessidade de intervenção humana;
- Permite configurar o idioma dinamicamente, sendo disponíveis os idiomas Português e o Inglês;
- Possui senha para a inicialização, dificultando assim, o fácil acesso à informações sigilosas por parte de pessoas não autorizadas;
- Requer Windows 95[®], ou superior, com um mínimo de 8 Mb de memória RAM;
- Exige conhecimentos básicos de informática para sua operação.
- Possui tabelas de decisão e de exceções que podem ser configuradas pelo usuário.

A seguir são apresentadas as telas do TOES, em uma seqüência similar à de uma otimização.

4.7.1. TELAS DO TOES

Ao utilizar o TOES pela primeira vez, o usuário deve cadastrar a(s) máquina(s)-ferramenta e as informações sobre a(s) ferramenta(s) (o produto). Não existe seqüência obrigatória para o preenchimento destes, entretanto, na Figura 19, o primeiro banco de dados selecionado, foi o da máquina-ferramenta.

Todas as máquinas-ferramenta podem ser cadastradas de uma só vez, considerando a existência de mais de uma, ou conforme a necessidade do usuário. Para acionar esta tela, o usuário seleciona entre “adicionar máquina” e “alterar máquina”. Esta seleção prévia trava alguns botões que não permitem que sejam realizadas operações por engano, como a eliminação de uma máquina ocasionada por um clique acidental no botão “apagar”. Este recurso está presente nas outras telas do programa, as quais interagem com banco de dados.

Informações sobre a Máquina Ferramenta - Alterar Item			
Código da Máquina	Lathe-01	Num. de Fer. na Torre :	12
Descrição	Romi	Comprimento Máximo	2
Potência	27,5	Idade da Máquina	4
Rendimento	0,85	Espaço Ocupado	14,2
Potência Limite	25	Vida Prevista	10
Força de Corte Máxima	1000	Hora Máquina	13
For. de Avanço Máxima	600	Custo de Aquisição	85000
Velocidade em Rápido	1	Custo do Local Ocupado	40
RPM Máximo	5500	Situação de Carga	Gargalo
RPM Mínimo	5	Faixa Salarial - A	18
Avanço Máximo	3	Faixa Salarial - B	16,5
Avanço Mínimo	0,01	Faixa Salarial - C	15
Diâmetro Máximo	300	Faixa Salarial - D	13,5
Custo de Conservação/Ano	2400	Faixa Salarial - E	10

Botões de ação: Adicionar, Confirmar, Alterar, Apagar, Atualizar, Sair

FIGURA 19 – CADASTRO E ALTERAÇÃO DA MÁQUINA-FERRAMENTA.

Após a inserção da máquina-ferramenta, o usuário deve cadastrar a(s) ferramenta(s). Esta tarefa também pode ser realizada de uma só vez, ou

conforme a necessidade do usuário. A Figura 20 apresenta a tela para o cadastro da ferramenta. Em seguida deve-se configurar o TOES com base em informações do sistema produtivo e algumas preferências do usuário, o que é feito a partir da Figura 21.

Código da Ferramenta	TD-01	TD-01
Descrição Comercial	Perfil Tri	
Aplicação	Desbaste	
Ângulo de Posição	93	
Ângulo da Ponta	7,5	Adicionar
Comprimento de Corte	4	Confirmar
Custo da Aresta	3,2	Alterar
Número de Arestas	4	Apagar
Tempo de Troca	0,5	Atualizar
Raio da Ponta	0,5	
Ferramenta Padrão ?	<input type="checkbox"/>	
Ferramentas em estoque	12	Sair
Qtd. Crítica de Estoque :	30	
Vida Prevista do Sup. :	500	
Custo de Aquisição Sup. :	40	

FIGURA 20 – CADASTRO E ALTERAÇÃO DA FERRAMENTA (PRODUTO).

TOES - Configuração

Sair

Tempo de SETUP

Rápido, quando menor ou igual que : 3

Normal, quando maior que : 3 e menor ou igual que : 15

Lento, quando maior que : 15

Tempo de Troca

Grande, quando maior que : 2

Médio, quando maior que : 1 e menor ou igual que : 2

Baixo, quando menor ou igual que : 1

Inexistente, quando igual à : 0

Sistema Produtivo

Quantidade de peças para que o tamanho do lote seja considerado grande ou pequeno : 40

Para modo Interativo - Sem Combinação na Tabela

Usar Vmc Usar Vm_{px} Usar VmcLim Questionar

Para modo Automático - Sem Combinação na Tabela

Usar Vmc Usar Vm_{px} Usar VmcLim

Preço do Ferramental

Muito Caro, quando maior que : 3

Caro, quando maior que : 1 e menor ou igual que : 3

Baixo Preço, quando menor ou igual que : 1

Política do usuário

Conservador Moderado Arrojado

Sistema de Custeio

ABC Rateio

Situação de Carga da Máquina

Gargalo Normal Ociosa

Decisão

Regra Residente Tabela Principal Tabela Auxiliar

Unidade para a Vida da Ferramenta

Numero de Peças - Zt (peças)

Comprimento de Corte - Lf (metros)

Tempo - T (minutos)

Tolerância p/ Vc

+/- 10 %

Taxa de Juros Anual : 35 %

Estoque da Ferr. : 20

Porcentagem p/ Vc : 20 %

Recurso e Critério para Fim da Vida da Ferr.

Exp. Operador NI

Sair

FIGURA 21 – CONFIGURAÇÃO DO TOES.

As regiões “Para modo Interativo – Sem Combinação na Tabela” e “Para modo automático – Sem Combinação na Tabela” devem ser utilizadas para as situações em que não existirem valores configurados para a velocidade de corte na tabela de decisão.

O próximo passo é o cadastro do processo a ser otimizado, ver Figura 22. Os campos “Máquina Utilizada” e “Faixa Salarial do Operador”, exibem apenas as informações previamente cadastradas no banco de dados da máquina-ferramenta. Já os campos “Descrição comercial do material” e “Código de Família”, exibem informações previamente definidas pelo usuário em dois arquivos específicos, sendo um para o armazenamento das informações sobre o material e outra para a família. Estes arquivos podem ser alterados a partir de qualquer editor de textos que tenha acesso a extensão “.TXT”.

Alteração das Informações do Processo			
Código do Processo	PART-01	PART-01	31/03/99
Máquina Utilizada	Lathe-01		
Nome do Programa CNC	01		
Descrição Comercial do Material	SAE 4340		Adicionar
Custo da Matéria Prima	12		Confirmar
Custo Indireto da Matéria Prima	3		Alterar
Tempo de Troca da Peça	0,042		Apagar
Tempo Total de Fabricação da Peça :	2,48		Atualizar
Tempo de Preparação da Máquina (SETUP)	0,938		Sair
Tempo Efetivo de Corte	1,5		
Faixa Salarial do Operador	Faixa_A		
Número de Ferramentas Utilizadas	1		
Dureza do Material	51 HRC		
Código da Família	NaoTem	FAM-001	

FIGURA 22 – CADASTRO E ALTERAÇÃO DO PROCESSO.

O campo “Número de Ferramentas Utilizadas”, deve armazenar o número de ferramentas utilizadas no processo, sendo que cabe ao usuário a decisão de cadastrar todas ou somente aqueles que pretende otimizar. A tela para cadastro de ferramentas do processo, ver Figura 23, será exibida tantas vezes quantas forem necessárias, até que todas as ferramentas indicadas neste campo sejam configuradas.

A partir deste ponto, o usuário pode realizar a otimização de um único processo, pois, as informações para esta opção já foram definidas, entretanto,

no caso de se desejar a otimização de uma programação diária, deve-se primeiramente, cadastrar a(s) TAREFA(S) correspondentes, o que é feito a partir da Figura 24.

The screenshot shows a window titled "Alteração do Cadastro de Ferramentas" with the following fields and controls:

- Código da Ferramenta: TD-01
- Posição na Torre: 1
- Velocidade de Corte: 175
- Avanço: 1
- Profundidade de Corte: 1
- Menor Diâmetro a usinar: 25
- Maior Diâmetro a usinar: 1
- Constante de Kienzle: 1
- Expoente de Kienzle: 1
- Fator de Correção de Kienzle: 1
- Operação a ser Realizada: Acabamento
- Índice da Ferramenta: 10
- Otimizar Velocidade de Corte:
- Valor de "w" de Catálogo: 1
- Valor de "K" de Catálogo: 11
- Rotação Adot. Como Limite: 4500
- Tempo Efetivo de Corte: 1,5

Buttons on the right side include: Adicionar, Confirmar, Alterar, Apagar, Atualizar, Sair, and Otimizar Avanço e Profundidade.

FIGURA 23 – CADASTRO E ALTERAÇÃO DE FERRAMENTA DO PROCESSO.

The screenshot shows a window titled "Alteração do Cadastro de Tarefas" with the following fields and controls:

- Código da Tarefa: []
- Código do Processo: []
- Quantidade de Peças: []

Buttons at the bottom include: Adicionar, Confirmar, Apagar, Alterar, Atualizar, and Sair.

Table on the right:

Processo	Quantidade

FIGURA 24 – CADASTRO E ALTERAÇÃO DE TAREFAS.

4.7.2. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS

O TOES apresenta algumas características que não foram ainda explorados por outros sistemas especialistas para a otimização do processo de usinagem, são elas:

- Considera as três velocidades de corte do IME, a V_{cmc} , V_{cmcLim} e V_{cmxp} , na otimização, sendo que é o primeiro a utilizar a V_{cmcLim} ;
- Permite a otimização de processos de torneamento em modo completamente automático;
- Permite a otimização de processos de torneamento compostos por mais de uma ferramenta de corte, ao mesmo tempo;
- Considera diferentes cenários produtivos, com suas informações restritivas em relação a velocidade de corte, na otimização.

4.7.3. ESTRUTURA DO TOES

A estrutura do TOES, ver Figura 25, é composta pela máquina de inferência, pela base de conhecimento, por uma base de dados e pela interface com o usuário.

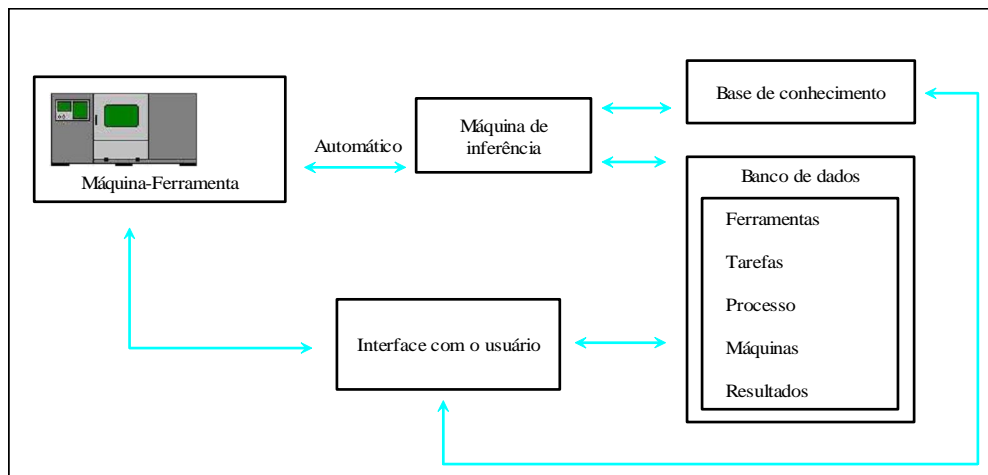


FIGURA 25 – ESTRUTURA DO TOES.

4.7.4. MÁQUINA DE INFERÊNCIA

A máquina de Inferência no TOES é responsável pelo gerenciamento do fluxo de informações entre os outros componentes do SE, e também pela escolha da

seleção da velocidade de corte otimizada. É do tipo “busca pra frente”, pois parte da concepção do problema, em direção da solução.

4.7.5. BASE DE CONHECIMENTO

É composta por regras de produção, roteiros e banco de dados, que armazenam as informações oriundas do especialista. Os cálculos executados pelo programa foram implementados através de roteiros, em função de não sofrerem alterações por parte do usuário, visto que a metodologia de otimização não é alterada.

A seleção da velocidade de corte otimizada também é realizada por roteiros, cuja seqüência também não sofre alteração, tanto para a busca em banco de dados, como na utilização da regra residente. O campo que pode sofrer alteração no BD é o que armazena a velocidade de corte configurada para os diversos cenários existentes.

A interface para com o usuário, como pode ser visualizada nas telas do TOES expostas nas Figuras 18 a 24, consiste em uma interface gráfica, cuja construção foi facilitada em função do *software* utilizado. Foram também criadas rotinas para limitar a interação do usuário, que por exemplo, para alterar informações dos bancos de dados, deve selecionar a opção “alterar” nos menus, desta forma, evita-se que informações sejam cadastradas por acidente. Também existe uma tela texto, a qual exibe mensagens orientativas, que seqüenciam as etapas da otimização.

As regras de produção foram utilizadas na construção da regra residente, e os banco de dados, foram criados para armazenar as tabelas de decisão e de exceções, informações da máquina-ferramenta, da ferramenta, do processo, da ferramenta utilizada no processo, da TAREFA e os resultados da otimização.

4.7.6. A CONSTRUÇÃO DOS BANCO DE DADOS

Para o cadastro de todas informações utilizadas pelo SE descritas até aqui, foram criados banco de dados, os quais foram separados de acordo com sua utilização.

□ Banco De Dados Da Máquina-Ferramenta

As informações referentes a máquina-ferramenta que foram armazenadas no BD estão descritas na Tabela 7.

TABELA 7 – BANCO DE DADOS DA MÁQUINA-FERRAMENTA.

Campo	Campo	Campo
Código da máquina	Avanço máximo	Custo de aquisição
Descrição	Avanço mínimo	Custo do local ocupado
Potência	Diâmetro máximo	Situação de carga da máquina
Rendimento	Custo de conservação / ano	Faixa salarial A
Potência Limite	Num. Máximo de ferr. na torre	Faixa salarial B
Força de corte máxima	Comprimento máximo da peça	Faixa salarial C
Força de avanço máxima	Idade da máquina	Faixa salarial D
Velocidade em rápido	Espaço ocupado	Faixa salarial E
rpm máximo	Vida prevista	-
rpm mínimo	Hora máquina	-

Os campos “Faixa salarial ..”, devem armazenar os possíveis diferentes salários dos operadores da máquina-ferramenta, pois, estes são normalmente especificados por faixas associadas a um valor.

□ Banco De Dados Da Ferramenta (Produto)

Armazena informações sobre o inserto, ou seja, o produto fornecido pelo fabricante de ferramentas, as quais estão descritas na Tabela 8. Lembrando que associado ao processo existem informações relativas a ferramenta,

como velocidade de corte, profundidade e avanço de corte, que são armazenadas em outro banco de dados, que será descrito mais adiante.

TABELA 8 – BANCO DE DADOS DA FERRAMENTA (PRODUTO).

Campo	Campo
Código da ferramenta	Tempo de troca
Descrição comercial	Raio da ponta
Aplicação	Ferramenta Padrão
Ângulo de posição	Ferramentas em estoque
Ângulo de ponta	Quantidade limite para o estoque
Comprimento de corte	Vida prevista do suporte
Custo da aresta	Custo de aquisição do suporte
Número de arestas	-

□ Bando De Dados Do Processo

Todas as informações relativas ao processo de usinagem da peça são armazenadas no banco de dados do processo, o qual relaciona-se com os banco de dados da máquina-ferramenta e da ferramenta (produto). Após cadastrar todas as informações que estão descritas na Tabela 9, será necessário ainda, inserir as informações sobre a(s) ferramenta(s) que será(ão) utilizadas neste processo, ver item 4.7.1. Esta característica permite a otimização de mais de uma ferramenta seja realizada ao mesmo tempo.

□ Banco De Dados Da Ferramenta (Processo)

O arquivo deste banco de dados, BD, recebe o mesmo nome do processo ao qual está associado, assim, para cada processo cadastrado, existirá um arquivo independente deste BD, cujas informações estão descritas na Tabela 10.

TABELA 9 – BANCO DE DADOS DO PROCESSO.

Campo	Campo
Código do processo	Tempo total de fabricação da peça
Máquina Utilizada	Tempo de SETUP
Nome do programa CNC	Faixa Salarial do operador
Descrição comercial do material	Número de ferramentas utilizadas
Custo da matéria prima	Dureza do material
Custo indireto da matéria prima	Código da família
Tempo de troca da peça	-

TABELA 10 – BANCO DE DADOS DA FERRAMENTA (PROCESSO).

Campo	Campo
Código da ferramenta	Expoente de Kienzle
Posição na torre	Fator de correção de Kienzle
Velocidade de corte	Operação a ser realizada
Avanço	Otimizar velocidade de corte ?
Profundidade de corte	Valor de "x" de catálogo
Menor diâmetro a usinar	Valor de "K" de catálogo
Maior diâmetro a usinar	Rotação adotada como limite
Constante de Kienzle	Tempo efetivo de corte

□ Banco De Dados da TAREFA

É composto por apenas três campos, sendo eles: o código do processo, a quantidade de peças, e um índice que é utilizado pelo próprio banco de dados.

□ Banco De Dados dos Resultados

Após a realização dos ensaios e da otimização, o TOES armazena as informações obtidas em um BD, cujos campos estão descritos na Tabela 11.

O campo “Opção” armazena a opção utilizada na otimização, se foi PROCESSO ou TAREFA, cujos códigos são armazenados no campo “Código”. Os outros campos armazenam informações como quantidade de peças do lote, coeficiente x , constante K , as velocidades que constituem o IME e a Velocidade de corte Otimizada.

TABELA 11 – BANCO DE DADOS DE RESULTADOS.

Campo	Campo	Campo
Opção	Valor de x	V_{cmcLim}
Código	Valor de K	V_{cmxp}
Quantidade de peças	V_{cmc}	V_{cot}

5. VERIFICAÇÃO E EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A verificação do TOES consistiu na realização de simulações de otimização do processo de usinagem, utilizando-se um cenário ideal para a definição dos dados e variáveis envolvidas, o qual permitiu a redução de erros e de variações que podem ocorrer em ambiente fabril, pois, o objetivo inicial foi verificar se as rotinas e regras implementadas no TOES corresponderiam ao que foi determinado.

Para isso foi realizado um ensaio em laboratório, no qual determinou-se as condições de usinagem reais para uma peça, a qual será apresentada mais adiante. Em seguida, algumas peças foram criadas considerando condições de similaridade, em relação à peça real, para a determinação de suas geometrias.

Também elaborou-se algumas peças com materiais diferentes para verificação da otimização de uma produção composta por lotes de peças com diferentes materiais.

Com as referidas peças, juntamente com informações sobre a máquina-ferramenta e ferramenta utilizadas, definiu-se uma programação de lotes de peças para a realização da simulação desejada. A configuração do TOES foi definida com base nas circunstâncias envolvidas no laboratório de fabricação da UNIMEP.

Após esta verificação, realizou-se ensaios de otimização em ambiente fabril, os quais estão relatados como um exemplo de aplicação do TOES em uma situação real de trabalho.

5.1. ENSAIO DE USINAGEM

O ensaio realizado consistiu na usinagem de uma peça, corpo de prova, especialmente definida para esta finalidade, ver Figura 26, a qual possibilitou a

determinação do coeficiente “ x ” e da constante “ k ” da equação de vida de Taylor, para o sistema máquina-ferramenta-peça utilizado.

A operação de usinagem consistiu no desbaste leve de um corpo de prova em 12 passadas, com profundidade de corte de 1 mm e avanço de corte de 0,25 mm/volta. A primeira velocidade de corte foi definida de acordo com a recomendação do fabricante da ferramenta, que neste caso, possuiu valor igual a 175 m/min. Desta forma, o blanque da peça que possuía $\varnothing 50,8$ mm, ver Figura 27, foi desbastado até atingir o $\varnothing 26,8$ mm. O programa CNC da peça está em anexo.

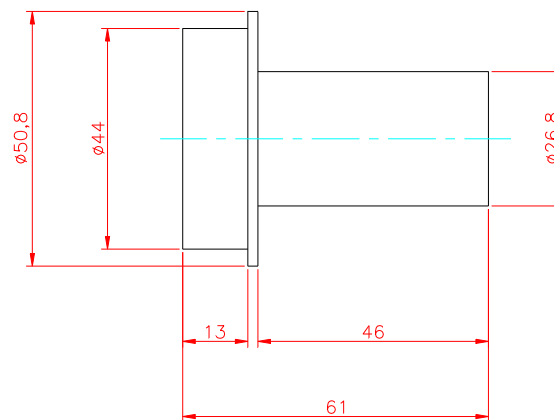


FIGURA 26 – CORPO DE PROVA.

A alimentação da máquina foi contínua, ou seja, a peça foi fixada imediatamente após o término do ciclo de usinagem da peça anterior, entre o ciclo de cada peça foi considerado, portanto, apenas seu tempo de troca.

O tempo efetivo de corte foi calculado através de uma planilha eletrônica, ver Tabela 12, devido ao fato de a geometria da peça ter formato cilíndrico. Para geometrias complexas, em que o cálculo do tempo de corte apresenta maior grau de dificuldade, este tempo pode ser obtido através de medição na ocorrência do processo de usinagem. Este cálculo foi realizado através da

Equação 3 e todos os dados, parâmetros e variáveis utilizados estão descritos na seqüência do texto.

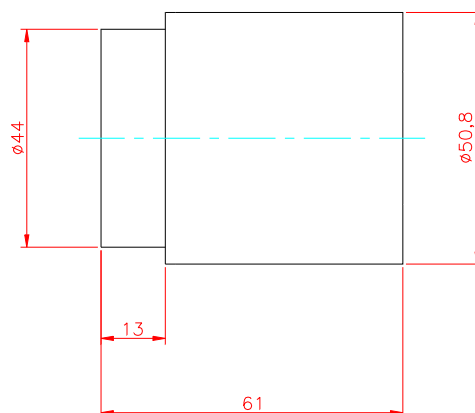


FIGURA 27 – BLANQUE DA PEÇA.

O tempo de troca da aresta da ferramenta foi obtido através da média de oito trocas realizadas por três operadores diferentes, sendo estes técnicos do Laboratório de Fabricação da UNIMEP, conforme demonstra a Tabela 13.

TABELA 12 - CÁLCULO DO TEMPO DE CORTE.

Tempo de corte		
Passada	Diâmetro (mm)	Tempo (min)
1	48,8	0,161
2	46,8	0,155
3	44,8	0,148
4	42,8	0,141
5	40,8	0,135
6	38,8	0,128
7	36,8	0,121
8	34,8	0,115
9	32,8	0,108
10	30,8	0,102
11	28,8	0,095
12	26,8	0,088
Total		1,500

A interrupção do processo de usinagem ocorreu no momento em que foi decretado o fim de vida da primeira aresta da ferramenta. Após a troca desta, deu-se continuidade ao ensaio, para a obtenção de um segundo valor de vida para a ferramenta, com a mesma velocidade de corte.

Após o decreto do fim de vida da segunda aresta da ferramenta, o programa da máquina CNC foi alterado realizando-se a substituição da V_{c1} pela V_{c2} , cujo valor adotado foi 20% superior em relação a V_{c1} , ou seja, com valor igual a 210 m/min. Após esta alteração e fixação da peça deu-se continuidade à usinagem.

TABELA 13 – TEMPO DE TROCA DA PEÇA.

	t_{ft} 1 (s)	t_{ft} 2 (s)	t_{ft} 3 (s)
Operador 1	21	36	27
Operador 2	35	38	44
Operador 3	44	32	-
Tempo médio para uma troca (min).	0,58		

Ao atingir o fim de vida da aresta de corte, realizou-se sua substituição, e novamente, repetiu-se a usinagem com a segunda velocidade de corte.

Observa-se que o fim de vida da aresta de corte foi determinado por critério do operador, o qual usou sua sensibilidade e conhecimento para observar o momento da ocorrência de faíscas durante a usinagem. Em todas as velocidades, a última peça usinada, ou seja, aquela em que foi decretado o fim de vida da ferramenta, foi descartada na contagem de peças que expressaram a vida da aresta.

Para suportar este critério para monitoramento do fim de vida da aresta de corte, realizou-se medição do desgaste VB na aresta de corte, da rugosidade superficial e do diâmetro da peça, com o intuito de acompanhar a variação ocorrida nestas dimensões em função do desgaste da ferramenta. Estas medições também foram realizadas por três operadores diferentes, seus resultados encontram-se em anexo.

A medição do desgaste *VB* da aresta da ferramenta foi realizado com auxílio de um projetor de perfis, e do *software* GlobalLab[®]. Executou-se a medição da rugosidade com um rugosímetro digital e a medição do diâmetro externo da região usinada foi auxiliada por um micrômetro externo.

5.1.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Na usinagem do corpo de prova realizado em laboratório utilizou-se:

- material da peça:
 - Nome comercial do material: Aço SAE 4340.
 - Fornecedor: Aços Villares.
 - Dureza: 33,4 HRC.
 - Custo por peça: R\$ 4,35.
- Máquina-ferramenta:
 - Tipo: Torno horizontal a comando numérico - CNC.
 - Fabricante: Indústrias Romi.
 - Modelo: Torno CNC CENTUR 30 RV.
 - Procedência: Brasil.
 - Potência: 7 CV.
 - Rotação máxima: 4500 rpm.
 - Rendimento: 95%.
 - Potência limite: 6,6 CV.
 - Diâmetro máximo da peça: 300 mm.

- Custo de conservação por ano: R\$2.400,00.
 - Número máximo de ferramentas na torre: 12.
 - Comprimento máximo da peça: 1500 mm.
 - Idade da máquina: 4 anos.
 - Espaço ocupado pela máquina: 14,2 m².
 - Vida prevista: 10 anos.
 - Custo da hora máquina (salário máquina): R\$13,16.
 - Custo de aquisição: R\$ 85.000,00.
 - Custo do local ocupado: R\$ 40,00 / m².
- Ferramenta:
- Inseto: CNMG 120408-PM
 - Classe: GC 4035.
 - Ângulo de posição: 95°
 - Ângulo de saída: 16°
 - Comprimento útil de corte: 5,5 mm.
 - Raio da ponta: 0,8 mm.
 - Ferramenta especial (sim/não): não.
 - Número de aresta: 4.
 - Fabricante: Sandvik.
 - Preço: R\$ 12,80.
- Suporte da ferramenta:

- Código: PCLN 20 x 20.
- Fabricante: Sandvik.
- Preço: R\$ 40,00.
- Vida: 500 trocas.
- Projetor de Perfis:
 - Fabricante: TOPOCON.
 - Modelo: PP-30E.
- Micrômetro externo:
 - Fabricante: Mitutoyo.
 - Capacidade: 25 – 30 mm.
- Rugosímetro digital:
 - Fabricante: Mitutoyo.
 - Modelo: Surf test - 211.
- Informações adicionais:
 - Salário do operador: R\$ 15,00
 - Código da Família: FAM-001
 - Posição na torre: 1
 - Menor diâmetro a usinar: 26,8 mm.
 - Maior diâmetro a usinar: 50,8 mm.
 - Constante de Kienzle (literatura): 199.
 - Coeficiente de Kienzle (literatura): 0,74.

- Fator de correção de Kienzle (diferença do ângulo de saída): 10.
- Valor de “x” de catálogo: 4,46.
- Valor de “K” de catálogo: $1,0023 \times 10^{11}$.
- Rotação adotada como limite: 4000 rpm.

5.1.2. RESULTADOS

Os resultados obtidos na usinagem dos corpos de prova estão descritos na Tabela 14.

TABELA 14 – RESULTADOS DO ENSAIO.

V_c	Aresta	VB	R_a (1°)	R_a (2°)	Z_t	T	lc
175	1	1,5	2,7	2,61	16	24	8,832
	2	1,4	2,61	2,53	16	24	8,832
210	1	1,4	1,66	3,8	9	11,25	4,968
	2	1,6	2,35	3,57	10	12,5	5,520

Onde:

VB : é a medida de desgaste VB [mm].

R_a : é a medida de rugosidade R_a .

Em função dos resultados obtidos calculou-se as velocidades de corte que constituem o IME, os resultados estão descritos na Tabela 15.

TABELA 15 – INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA (IME).

Intervalo		Vida		Coeficientes		Intervalo de Máxima Eficiência		
V_{c1}	V_{c2}	T_1	T_2	x	K	V_{cmc}	V_{cmcLim}	V_{cmxp}
175	210	9	16	4,16	5,02E+10	176	179	325

5.2. DETERMINAÇÃO DA FAMÍLIA DE PEÇAS

Para a simulação da usinagem de lotes de peças que possuem mesmo material e são usinadas com a mesma ferramenta, apesar de possuírem geometrias diferentes conforme o cenário 2, um conjunto formado por cinco peças foi criado, usando-se conceitos de equivalência em usinagem.

Desta forma, as propriedades inerentes ao sistema máquina-ferramenta-peça não são alteradas, diminuem-se assim, os possíveis erros que podem ocorrer no que diz respeito a vida da ferramenta, em situações que envolvam geometrias complexas.

As peças são apresentadas nas Figuras 28, 29, 30 e 31, respectivamente. Descreve-se as informações que sofreram alterações em função das alterações geométricas. Observa-se que a peça utilizada no ensaio em laboratório, também foi utilizada na composição dos lotes de peças e adotou-se “VTF_P_1” como seu código.

Os parâmetros de corte, especificamente, a profundidade a_p , o avanço f e as velocidades de corte utilizadas para a obtenção do IME, também permaneceram inalteradas. Apresenta-se em anexo as planilhas que foram utilizadas para o cálculo das variáveis, dos parâmetros e dados envolvidos.

5.2.1. PEÇA CÓDIGO VTF_P_2

Esta peça possui comprimento de corte igual a 60 mm por um diâmetro final de 30,8 mm, conforme demonstra a Figura 28.

As propriedades alteradas são:

- comprimento de corte total da peça, l_{cp} : 600 mm.
- comprimento de corte da passada: 60 mm.
- número de passadas: 10.

- vida expressa em número de peças, Z_{t1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 13,7 peças.
- vida expressa em tempo, T_1 , para $V_{c1} = 175$ m/min: 23,42 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 1,71 min.
- vida expressa em número de peças – Z_{t2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 7,68 peças.
- vida expressa em tempo, T_2 , para $V_{c2} = 210$ m/min: 10,97 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 1,43 min.

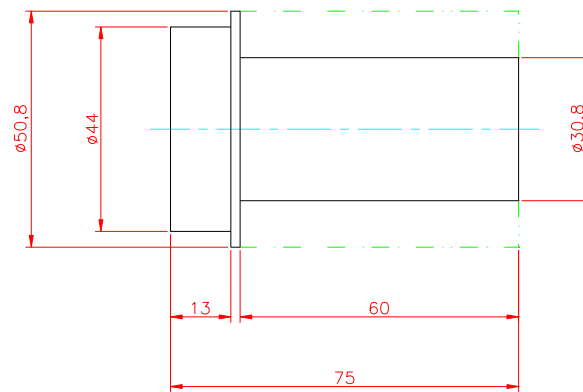


FIGURA 28 – PEÇA EQUIVALENTE CÓDIGO VTF_P_2.

5.2.2. PEÇA CÓDIGO VTF_P_3

Esta peça possui comprimento de corte igual a 85 mm por um diâmetro final de 36,8 mm, conforme demonstra a Figura 29.

As propriedades alteradas são:

- comprimento de corte total da peça, l_{cp} : 680 mm.
- comprimento de corte da passada: 85 mm.
- número de passadas: 18.

- vida expressa em número de peças, Z_{t1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 12,8 peças.
- vida expressa em tempo, T_1 , para $V_{c1} = 175$ m/min: 23,42 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 1,83 min.
- vida expressa em número de peças, Z_{t2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 7,20 peças.
- vida expressa em tempo, T_2 , para $V_{c2} = 210$ m/min: 10,97 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 1,52 min.

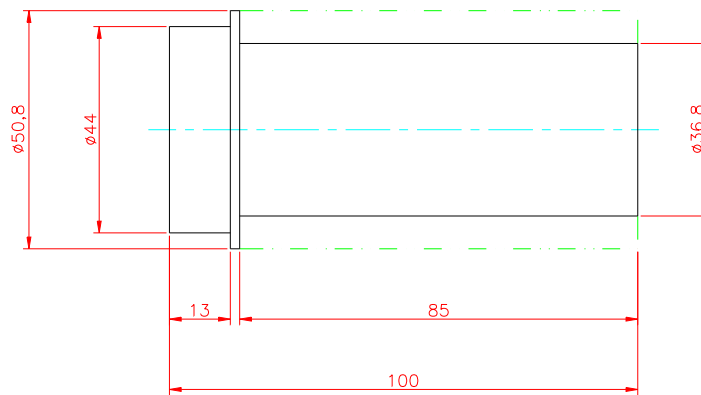


FIGURA 29 - PEÇA EQUIVALENTE CÓDIGO VTF_P_3

5.2.3. PEÇA CÓDIGO VTF_P_4

Esta peça possui comprimento de corte igual a 150 mm por um diâmetro final de 26,8 mm, conforme demonstra a Figura 30.

As propriedades alteradas são:

- comprimento de corte total da peça, l_{cp} : 1800 mm.
- comprimento de corte da passada: 150 mm.
- número de passadas: 12.

- vida expressa em número de peças, Z_{t1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 4,8 peças.
- vida expressa em tempo, T_1 , para $V_{c1} = 175$ m/min: 23,42 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 4,88 min.
- vida expressa em número de peças, Z_{t2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 2,7 peças.
- vida expressa em tempo, T_2 , para $V_{c2} = 210$ m/min: 10,97 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 4,07 min.

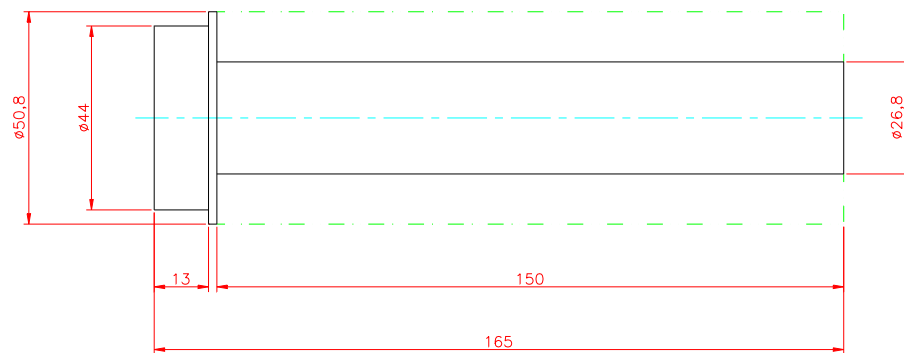


FIGURA 30 - PEÇA EQUIVALENTE CÓDIGO VTF_P_4

5.2.4. PEÇA CÓDIGO VTF_P_5

Esta peça possui comprimento de corte igual a 30 mm por um diâmetro final de 36,8 mm, conforme demonstra a Figura 31.

As propriedades alteradas são:

- comprimento de corte total da peça, l_{cp} : 120 mm.
- comprimento de corte da passada: 30 mm.
- número de passadas: 4.

- vida expressa em número de peças, Z_{t1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 53,3 peças.
- vida expressa em tempo, T_1 , para $V_{c1} = 175$ m/min: 23,42 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 0,34 min.
- vida expressa em número de peças, Z_{t2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 29,97 peças.
- vida expressa em tempo, T_2 , para $V_{c2} = 210$ m/min: 10,97 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 0,29 min.

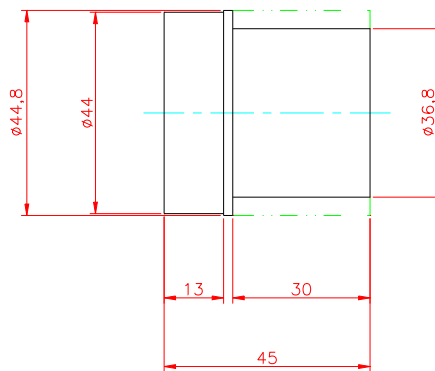


FIGURA 31 - PEÇA EQUIVALENTE CÓDIGO VTF_P_5

5.2.5. CONFIGURAÇÃO DOS LOTES DE PEÇAS

Para a realização da simulação de otimização do processo de usinagem utilizado na verificação do TOES, elaborou-se alguns lotes de peças variando-se a quantidade de peças existentes em cada lote. Em seguida agrupou-se estes lotes simulando uma programação a ser cumprida em um determinado período, o que no TOES denomina-se “TAREFA”.

Esta TAREFA possui cadastrado o nome do processo de cada peça, especialmente criadas para este ensaio através de conceitos de equivalência, e sua respectiva quantidade. As TAREFAS criadas estão descritas na Tabela 16.

TABELA 16 – TAREFAS PARA A REALIZAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO.

Código da Tarefa	Código do Processo (Peça)	Quantidade
-	VTF_P_1	50
VTF_T_1	VTF_P_1	10
	VTF_P_1	10
	VTF_P_1	10
	VTF_P_1	10
	VTF_P_1	10
VTF_T_2	VTF_P_1	10
	VTF_P_2	10
	VTF_P_3	10
	VTF_P_4	10
	VTF_P_5	10
VTF_T_3	VTF_P_1	1
	VTF_P_2	3
	VTF_P_3	5
	VTF_P_4	7
	VTF_P_5	9

5.3. DETERMINAÇÃO DE PEÇAS COM MATERIAIS DIFERENTES

Para a realização da simulação de usinagem de peças com geometrias e materiais diferentes, uma situação idêntica ao cenário 4, elaborou-se duas peças adicionais, as quais foram denominadas VTF_P_6 e VTF_P_7, ver Figura 32 e 33. Em seguida criou-se uma programação – “TAREFA”, a qual foi composta pela peça VTF_P_1 juntamente com as duas peças recém criadas.

Calculou-se em seguida, através de uma planilha eletrônica – ver Tabela 18, o número de arestas a serem consumidas na manufatura desta TAREFA. Observa-se que os dados empregados nos cálculos referentes a peça VTF_P_1, foram os mesmos utilizados anteriormente no ensaio em laboratório.

Com relação as duas novas peças, VTF_P_6 e VTF_P_7, calculou-se seus parâmetros, através de planilha eletrônica, que são apresentados na seqüência dos desenhos destas.

5.3.1. PEÇA CÓDIGO VTF_P_6

Esta peça possui comprimento de corte igual a 70 mm por um diâmetro final de 28,8 mm, conforme demonstra a Figura 32.

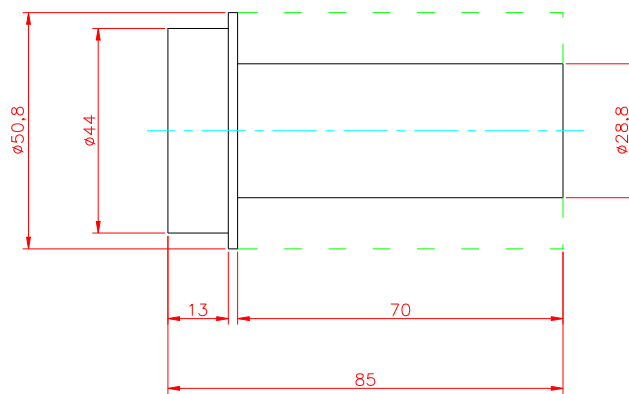


FIGURA 32 - PEÇA CÓDIGO VTF_P_6

As propriedades são:

- comprimento de corte total da peça, l_{cp} : 770 mm.
- comprimento de corte da passada: 70 mm.
- número de passadas: 11.
- vida expressa em número de peças, Z_{t1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 24,8 peças.
- vida expressa em tempo, T_1 , para $V_{c1} = 175$ m/min: 53,13 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 2,14 min.

- vida expressa em número de peças, Z_{t2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 13,83 peças.
- vida expressa em tempo, T_2 , para $V_{c2} = 210$ m/min: 24,71 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 1,79 min.

5.3.2. PEÇA CÓDIGO VTF_P_7

Esta peça possui comprimento de corte igual a 65 mm por um diâmetro final de 32,8 mm, conforme demonstra a Figura 33.

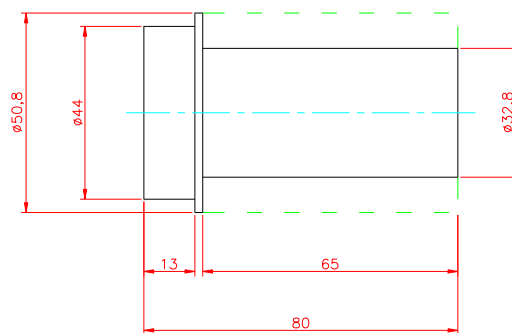


FIGURA 33 - PEÇA CÓDIGO VTF_P_7

As propriedades são:

- comprimento de corte total da peça, l_{cp} : 585 mm.
- comprimento de corte da passada: 65 mm.
- número de passadas: 9.
- vida expressa em número de peças, Z_{t1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 195 peças.
- vida expressa em tempo, T_1 , para $V_{c1} = 175$ m/min: 334 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c1} , para $V_{c1} = 175$ m/min: 1,71 min.

- vida expressa em número de peças, Z_{t1} , para $V_{c1} = 210$ m/min: 13,83 peças.
- vida expressa em tempo, T_2 , para $V_{c2} = 210$ m/min: 155,3 min.
- tempo efetivo de corte, t_{c2} , para $V_{c2} = 210$ m/min: 1,43 min.

5.3.3. CONFIGURAÇÃO DOS LOTES DE PEÇAS

Para a verificação do TOES na otimização de lotes formados por peças diferentes, foi composta uma TAREFA, ver Tabela 17. Com o intuito de comparar o resultado obtido no TOES, elaborou-se uma planilha para cálculo do número de arestas consumidas, através do número de trocas previstas, conforme demonstra a Tabela 18.

TABELA 17 – TAREFA PARA VERIFICAÇÃO - CENÁRIO 3.

Código da Tarefa	Código do Processo (Peça)	Quantidade
VTF_T_4	VTF_P_1	4
	VTF_P_6	2
	VTF_P_7	15
	VTF_P_1	8
	VTF_P_6	12

Observa-se que o coeficiente “ x ” e a constante “ K ”, referente ao material das peças VTF_T_6 e VTF_T_7 foram obtidos no catálogo do fabricante da ferramenta. Os dados de custos utilizados no cálculo da V_{cmLim} foram idênticos aos utilizados na peça VTF_T_1, em função de fazer-se uso dos mesmos equipamentos, instalações, ferramentas etc.

O número de arestas a serem consumidas na usinagem desta “TAREFA” é igual a três, conforme Tabela 18, pois, deve-se iniciar a usinagem na peça VTF_P_1, que consumirá 27% da vida da aresta da ferramenta, a peça VTF_P_2 consumirá 16% e a peça VTF_P_3 61%. A soma destas

porcentagens possuem valor igual a 104%, indicando assim, a necessidade de troca da aresta.

TABELA 18 – CÁLCULO DO NÚMERO DE TROCAS PREVISTAS.

Peça	Material	Dureza (HB)	x	K	V_{cmLim}	T (min)	N_{zt}	Z_L	n_a	Σn_a	Troca
VTF_P_1	SAE 4340	305	4,16	5,02E+10	179	21,32	14,60	4	0,27	0,27	
VTF_P_6	ASTM A353	200	4,20	1,40E+11	216	21,95	12,61	2	0,16	0,43	
VTF_P_7	SAE 1045	150	4,20	8,80E+11	334	22,12	24,58	15	0,61	1,04	X
VTF_P_1	SAE 4340	305	4,16	5,02E+10	179	21,32	14,60	8	0,55	0,55	
VTF_P_6	ASTM A353	200	4,20	1,40E+11	216	21,95	12,61	7	0,55	1,10	X
VTF_P_6	ASTM A353	200	4,20	1,40E+11	216	21,95	12,61	5	0,40	0,40	

Na seqüência da TAREFA é considerado a usinagem dos lotes das peças VTF_P_1 e VTF_P_6, agora com uma quantidade de 8 e de 12 peças respectivamente. A VTF_P_1 consumirá 55% da vida da aresta e a usinagem de 7 peças VTF_P_6 consumirá outros 55%, desta forma, deve-se ser realizada outra troca. A aresta final será utilizada para o término do lote de peças VTF_P_6, no qual restará 5 peças para serem fabricadas. Assim, o número de arestas a serem consumidas por esta TAREFA é igual a três.

5.3.4. CONFIGURAÇÃO DO TOES

O TOES possui uma tela especial para a configuração de informações, sobre o ambiente produtivo, utilizadas durante o processo de otimização, que são aproveitadas tanto em operações de cálculos quanto na escolha da velocidade de corte otimizada. Para a realização da verificação aqui descrita, considerou-se o ambiente utilizado no ensaio em laboratório, os dados inseridos no TOES foram:

- tempo de SETUP, t_s , em min.:
 - rápido quando $t_s \leq 3$;
 - normal quando $3 < t_s \leq 15$;

- lento quando $t_s > 15$.
- tempo de troca da aresta da ferramenta, t_{ft} , em min.:
 - grande quando $t_{ft} > 2$;
 - médio quando $1 < t_{ft} \leq 2$;
 - baixo quando $t_{ft} \leq 1$.
- preço do ferramental, PF :
 - muito caro quando $PF > R\$ 8,00$;
 - caro quando $R\$ 4,00 < PF \leq R\$ 8,00$;
 - baixo preço quando $PF \leq R\$ 4,00$.
- quantidade limite para sistema produtivo:
 - 40 peças.
- política do usuário:
 - arrojado.
- unidade de vida para a ferramenta:
 - tempo em minutos (T).
- quantidade de ferramentas em estoque:
 - 100 ferramentas.
- sistema de custeio:
 - ABC.

- situação de carga da máquina:
 - gargalo.

Algumas informação acima descritas foram alteradas durante a verificação, com o intuito de analisar a alteração na escolha da velocidade de corte otimizada em função da configuração do cenário produtivo . As alterações estão descritas na Tabela 19, na qual utilizou-se a seguinte notação:

- *PU* – política do usuário, sendo “*A_r*” para arrojado, “*M_o*” para moderado e “*C_o*” para conservador;
- *QFE*. – quantidade de ferramentas em estoque;
- *PF* – preço do ferramental;
- *CM* – carga da máquina, sendo “*G_a*” para gargalo e “*N_o*” para normal;
- *FP* – ferramenta padrão, sendo “*S*” para sim e “*N*” para não.

5.4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM AMBIENTE FABRIL

Com o intuito de submeter o TOES a uma aplicação real, foi estabelecida uma parceria com a empresa Mercedes Benz do Brasil, localizada na cidade de São Bernardo do Campo – SP, que permitiu a realização de dois ensaios em ambiente fabril. Os quais consistiram na otimização de duas diferentes peças, que foram sugeridas pelos funcionários da própria Mercedes. Em um dos casos não foi possível otimizar a velocidade de corte devido a problemas identificados no processo, entretanto, no outro obteve-se bons resultados conforme será descrito a seguir.

TABELA 19 – ALTERAÇÕES NO CENÁRIO PRODUTIVO.

Ensaio	TAREFA / Processo	Configuração				
		PU	QFE.	PF	CM	FP
1	VTF_P_1	A _r	100	muito caro	G _a	S
2	VTF_P_1	A _r	100	baixo preço	G _a	N
3	VTF_P_1	M _o	100	muito caro	G _a	N
4	VTF_P_1	C _o	100	muito caro	G _a	N
5	VTF_P_1	A _r	20	muito caro	G _a	S
6	VTF_P_1	M _o	20	muito caro	G _a	S
7	VTF_P_1	C _o	20	muito caro	G _a	S
8	VTF_P_1	A _r	20	baixo preço	N _o	S
9	VTF_P_1	M _o	20	baixo preço	N _o	S
10	VTF_P_1	C _o	20	baixo preço	N _o	S
11	VTF_T_1	A _r	100	muito caro	G _a	S
12	VTF_T_1	C _o	100	muito caro	G _a	S
13	VTF_T_1	A _r	20	muito caro	G _a	S
14	VTF_T_1	C _o	20	muito caro	G _a	S
15	VTF_T_2	A _r	100	muito caro	G _a	S
16	VTF_T_2	C _o	100	muito caro	G _a	S
17	VTF_T_2	A _r	20	muito caro	G _a	S
18	VTF_T_2	C _o	20	muito caro	G _a	S
19	VTF_T_3	A _r	100	muito caro	G _a	S
20	VTF_T_3	C _o	100	muito caro	G _a	S
21	VTF_T_3	A _r	20	muito caro	G _a	S
22	VTF_T_3	C _o	20	muito caro	G _a	S

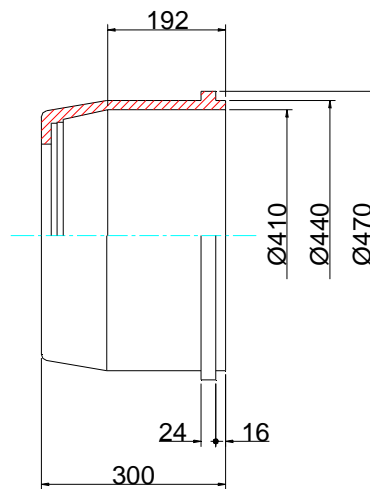
5.4.1. OTIMIZAÇÃO DO “CUBO DE FREIO”

A primeira peça avaliada é denominada “cubo de freio”, trata-se de uma peça que é utilizada em veículos do tipo ônibus e caminhões, na qual é fixada uma roda em seu lado externo, e em seu interior existe uma região que faz parte do sistema de frenagem destes veículos. O desenho desta peça pode ser observado na Figura 34.

O ensaio realizado consistiu no desbaste da região externa da peça, a qual possui dimensões finais de Ø470 x 24 mm e Ø440 x 16mm. Inicialmente a ferramenta desbasta estes diâmetros no sentido de cima para baixo, lembrando que a máquina-ferramenta empregada na manufatura desta peça trata-se de

um torno vertical, em seguida, a mesma ferramenta altera seu sentido de corte, agora de baixo para cima, e executa um passe final nestes diâmetros e também faceia a região entre eles, conforme demonstra a Figura 35.

FIGURA 34 - CUBO DE FREIO.



O critério para a definição do fim de vida da ferramenta baseou-se na experiência do operador, em relação ao aspecto visual da região usinada.

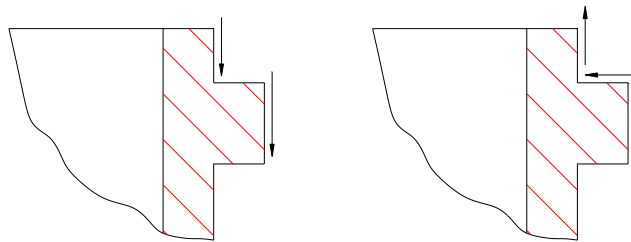


FIGURA 35 – PERCURSO DA FERRAMENTA.

5.4.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Na usinagem do cubo de freio utilizou-se:

- peça:

- material: ferro fundido cinzento perlítico;
- dureza: 175 HB;
- custo da matéria prima por peça: R\$ 47,25;



FIGURA 36 – TORNO VERTICAL HESSAPP.

- máquina-ferramenta:
 - tipo: torno vertical a comando numérico – CNC;
 - fabricante: HESSAPP;
 - procedência: Alemanha;
 - potência nominal: 37 CV;
 - rendimento: 95%;
 - potência limite: 35 CV;
 - código Mercedes Benz: 18627;
 - rotação máxima: 1120 rpm;
 - avanço máximo na direção transversal: 4,91 mm/volta;
 - avanço máximo na direção longitudinal: 4,91 mm/volta;

- deslocamento máximo transversal: 670 mm;
- deslocamento máximo longitudinal: 800 mm;
- diâmetro máximo: 670 mm;
- custo de conservação/ano: R\$ 11.364,00;
- número máximo de ferramentas na torre: 4;
- comprimento máximo da peça: 800 mm;
- idade da máquina: 7 anos;
- espaço ocupado pela máquina: 15,6 m²;
- vida prevista (2 turnos): 12 anos;
- custo da hora máquina(salário máquina): R\$ 54,24;
- custo de aquisição: R\$ 1.067.593,72;
- custo do local ocupado: R\$ 2,45 / m²;

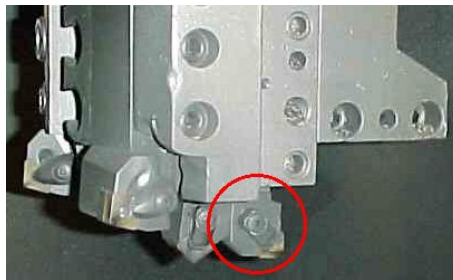


FIGURA 37 – FERRAMENTA UTILIZADA NO CUBO DE FREIO.

- ferramenta:
 - inserto: CNGA 16 06 16 T02520;
 - classe: 1690;
 - código da empresa: F3 394608726631;

- ângulo de posição: 95°;
 - ângulo de saída: 5°;
 - comprimento útil de corte: 6,0 mm;
 - raio da ponta: 1,6 mm;
 - ferramenta especial (sim/não): não;
 - número de arestas: 4
 - fabricante: Sandvik;
 - preço: R\$ 50,81;
 - tempo de troca: 0,5 min;
 - posição na torre: T22.
- suporte da ferramenta:
- código: CCLNR;
 - fabricante: Sandvik;
 - preço: R\$ 71,82;
 - vida: 500 trocas.
- Informações adicionais:
- salário do operador, S_h : R\$ 15,47;
 - maior diâmetro a usinar, d_{mp} : 470 mm;
 - menor diâmetro a usinar, d_{np} : 440 mm;
 - constante de Kienzle (literatura): 116;
 - coeficiente de Kienzle (literatura): 0,81;

- fator de correção de Kienzle (diferença do ângulo de saída): 1;
- valor de “ x ” de catálogo: 5,50;
- valor de “ K ” de catálogo: $1,77 \times 10^{16}$;
- rotação adotada como limite, n_{LimOp} : 474 rpm;
- situação de carga da máquina: gargalo;
- tempo de troca da peça: 1,1 min;
- nome do programa CNC: %3100;
- código interno da peça: A 617 423 01 01;
- tempo de SETUP, t_s : 10 min;
- velocidade de corte, V_c : 550 m/min;
- avanço de corte, f : 0,5 mm/volta;
- profundidade de corte, a_p : 1,5 mm.

Observações: A primeira condição de corte utilizada no ensaio respeitou os parâmetros em uso no processo. A rotação adotada como limite é baixa em relação a velocidade disponível pela máquina ferramenta, devido a restrições do sistema de fixação da peça, ver Figura 38.



FIGURA 38 – SISTEMA DE FIXAÇÃO DA PEÇA.

5.4.3. OTIMIZAÇÃO DO TUBO DE APOIO

A segunda peça avaliada é denominada “tubo de apoio”, trata-se de uma peça que também é utilizada por veículos do tipo ônibus e caminhões, especificamente, no sistema responsável pela tração destes. O desenho da peça pode ser observado na Figura 39.

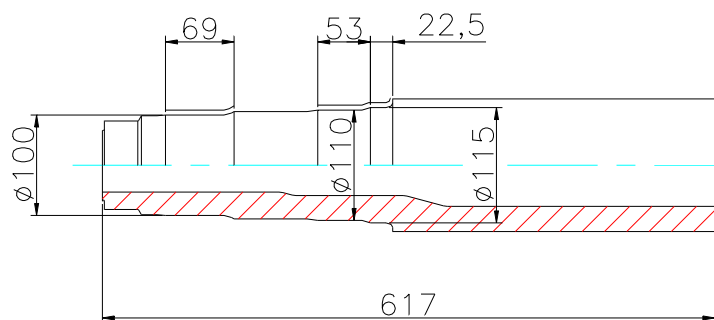


FIGURA 39 – TUBO DE APOIO.

O ensaio realizado consistiu no acabamento das regiões em destaque na figura acima, em específico, das dimensões $\varnothing 100 \times 69$ mm, $\varnothing 110 \times 53$ e $\varnothing 115 \times 22,5$. Estas regiões possuem fino ajuste dimensional, é são controladas através do uso de micrômetros, relógios comparadores e rugosímetros, pelo operador da máquina.

Os parâmetros de corte em uso pelo operador também foram utilizados como a primeira condição de corte inserida no TOES. O critério para o decreto do fim da vida da ferramenta baseou-se na experiência do operador, que verificou o acabamento superficial da peça.

Na realidade, a medição da rugosidade superficial é realizada a cada 5 peças, de acordo com prévias orientações do departamento de controle da qualidade. Apesar de contar ferramental específico para esta atividade, em determinadas situações, a troca da ferramenta é realizada quando o operador percebe alterações na rugosidade superficial da peça através de uma análise visual de sua superfície, então, este foi o critério adotado para o decreto do fim de vida

da ferramenta. Em paralelo as atividades do operador, realizou-se o acompanhamento da rugosidade superficial, cujos resultados estão em anexo.

5.4.4. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Na usinagem do tubo de apoio utilizou-se:

- peça:
 - material: ST 52 3N;
 - dureza: 83 HRB;
 - custo da matéria prima por peça: R\$ 61,08;
- máquina-ferramenta:
 - tipo: torno horizontal CNC;
 - fabricante: INDEX, modelo GU 800;
 - procedência: Brasil;
 - potência nominal: 41 CV;
 - rendimento: 78%;
 - potência limite: 31 CV;



FIGURA 40 – TORNO INDEX GU 800 – CNC.

- código Mercedes Benz: 18812;
- rotação máxima: 4000 rpm;
- avanço máximo na direção transversal: 2,50 mm/volta;
- avanço máximo na direção longitudinal: 2,50 mm/volta;
- deslocamento máximo transversal: não disponível;
- deslocamento máximo longitudinal: não disponível;
- diâmetro máximo: 320 mm;
- custo de conservação/ano: R\$ 2.623,00;
- número máximo de ferramentas na torre: 16;
- comprimento máximo da peça: 820 mm;
- idade da máquina: 8 anos;
- espaço ocupado pela máquina: 18 m²;
- vida prevista (2 turnos): 12 anos;

- custo da hora máquina(salário máquina): R\$ 16,18;
 - custo de aquisição: R\$ 105.292,49;
 - custo do local ocupado: R\$ 2,45 / m²;
- ferramenta:
- inserto: TCMT 16 T3 08 UM;
 - classe: 4025;
 - código da empresa: F3 3945 0872 285;
 - ângulo de posição: 95°;
 - ângulo de saída: 20°;
 - comprimento útil de corte: 4,0 mm;
 - raio da ponta: 0,8 mm;
 - ferramenta especial (sim/não): não;
 - número de arestas: 3
 - fabricante: Sandvik;
 - preço: R\$ 11,90;
 - tempo de troca: 0,5 min;
 - posição na torre: T2.
- suporte da ferramenta:
- código: STGCL;
 - fabricante: Sandvik;
 - preço: R\$ 71,82;

- vida: 500 trocas.
- Informações adicionais:
 - salário do operador, S_h : R\$ 17,02;
 - maior diâmetro a usinar, d_{mp} : 115 mm;
 - menor diâmetro a usinar, d_{np} : 100 mm;
 - constante de Kienzle (literatura): 199;
 - coeficiente de Kienzle (literatura): 0,74;
 - fator de correção de Kienzle (diferença do ângulo de saída): 14;
 - valor de "x" de catálogo: 4,96;
 - valor de "K" de catálogo: $4,78 \times 10^{13}$;
 - rotação adotada como limite, n_{LimOp} : 1200 rpm;
 - situação de carga da máquina: gargalo;
 - tempo de troca da peça: 0,62 min;
 - nome do programa CNC: %7;
 - código interno da peça: 696 351 0006;
 - tempo de SETUP, t_s : 15 min;
 - velocidade de corte, V_c : 300 m/min;
 - avanço de corte, f : 0,15 mm/volta;
 - profundidade de corte, a_p : 0,8 mm.
 - tamanho do lote : 28 peças.

Observações: A rotação adotada como limite para a operação é baixa em relação a velocidade disponível pela máquina ferramenta, devido a restrições do sistema de fixação da peça, ver Figura 41. A usinagem é realizada com lubrificação.

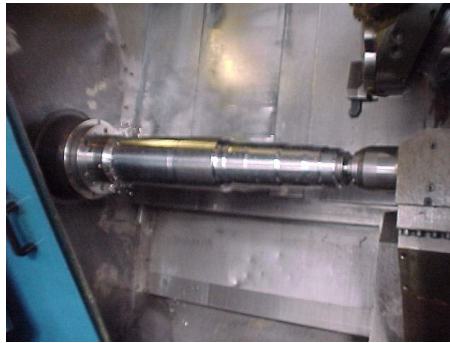


FIGURA 41 – FIXAÇÃO DO TUBO DE APOIO NO TORNO.

5.4.5. PREFERÊNCIAS DO USUÁRIO

Uma entrevista junto ao supervisor da área em que foi realizado o ensaio, permitiu a obtenção das seguintes informações:

- tempo de SETUP, t_s , em min.:
 - rápido quando $t_s \leq 5$;
 - normal quando $5 < t_s \leq 10$;
 - lento quando $t_s > 10$.
- tempo de troca da aresta da ferramenta, t_{ft} , em min.:
 - grande quando $t_{ft} > 5$;
 - médio quando $3 < t_{ft} \leq 5$;
 - baixo quando $t_{ft} \leq 3$.
- preço do ferramental, PF :

- muito caro quando $PF > R\$ 4,00$;
 - caro quando $R\$ 2,00 < PF \leq R\$ 4,00$;
 - baixo preço quando $PF \leq R\$ 2,00$.
- quantidade limite para sistema produtivo:
 - 60 peças.
 - política do usuário:
 - Moderado.
 - unidade de vida para a ferramenta:
 - número de peças (Z_t).
 - quantidade de ferramentas em estoque:
 - 100 ferramentas.
 - sistema de custeio:
 - Rateio.
 - situação de carga da máquina:
 - gargalo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados, obtidos nas simulações realizadas para a verificação do TOES, e nos exemplos de aplicação em ambiente fabril, são apresentados neste capítulo, juntamente com os respectivos comentários e análises.

6.1. VERIFICAÇÃO

A simulação de otimização do processo de usinagem, foi dividida em duas categorias: a verificação das peças que enquadram-se nos cenários 1 e 2, ou seja, a peça VTF_P_1, e as TAREFAS VTF_T_1, VTF_T_2 e VTF_T_3, conforme demonstra a Tabela 16; e a verificação da TAREFA VTF_T_4, ver Tabela 17, que é composta por peças constituídas por diferentes materiais e enquadra-se no cenário 4.

6.1.1. SIMULAÇÃO PARA OS CENÁRIOS 1 E 2

Esta simulação compreendeu algumas possíveis situações de trabalho, ver Tabela 19, com o intuito de simplificar a verificação do sistema, pois, objetiva-se demonstrar que as rotinas e regras do TOES não apresentam falhas, em relação ao que foi determinado. A Tabela 20 apresenta os resultados da simulação.

É possível, observando-se a Tabela 20, perceber que os cálculos das velocidades de corte V_{cmcLim} e a V_{cmxp} , foram realizados com exatidão pelo TOES, visto que os valores obtidos pelo SE conferem com os resultados da planilha eletrônica, ver Tabela 15. Já a V_{cmc} , apresentou valor igual a 175 m/min, ou seja, uma pequena diferença em relação ao previsto, que era uma V_c de 176 m/min. O erro de 0,01% identificado nesta velocidade, deve-se a diferença do número de casas decimais utilizadas.

Com relação à velocidade de corte otimizada, selecionada pelo TOES, não foram identificadas divergências em relação ao que foi definido na regra residente. Na tabela de decisão, configurou-se as mesmas características do ensaio número 1, e definiu-se a V_{cmxp} como velocidade de referência. Ao repetir este ensaio, os resultados também se confirmaram. Para testar a tabela de exceções, definiu-se a V_{cmc} como velocidade de referência para o mesmo cenário utilizado no ensaio 1, de modo que, ao repetir o ensaio como fora realizado pela primeira vez com a regra residente, o sistema deveria selecionar a V_{cmc} como V_{cot} . O resultado desta simulação também atendeu as expectativas, ou seja, a velocidade escolhida foi a V_{cmc} .

TABELA 20 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS 1 E 2.

Ensaio	V_{cmc}	V_{cmcLim}	V_{cmxp}	V_c escolhida	Cenário
1	175	179	325	V_{cmxp}	1
2	175	179	325	V_{cmxp}	1
3	175	179	325	V_{cmcLim}	1
4	175	179	325	V_{cmcLim}	1
5	175	179	325	V_{cmxp}	1
6	175	179	325	V_{cmcLim}	1
7	175	179	325	V_{cmcLim}	1
8	175	179	325	V_{cmxp}	1
9	175	179	325	V_{cmcLim}	1
10	175	179	325	V_{cmc}	1
11	175	179	325	V_{cmxp}	1
12	175	179	325	V_{cmcLim}	1
13	175	179	325	V_{cmxp}	1
14	175	179	325	V_{cmcLim}	1
15	175	179	325	V_{cmxp}	2
16	175	179	325	V_{cmcLim}	2
17	175	179	325	V_{cmxp}	2
18	175	179	325	V_{cmcLim}	2
19	175	179	325	V_{cmxp}	2
20	175	179	325	V_{cmcLim}	2
21	175	179	325	V_{cmxp}	2
22	175	179	325	V_{cmcLim}	2

Foram realizadas duas simulações com as tabelas de decisão e exceções, devido ao fato de as mesmas só serem utilizadas para a seleção da velocidade de corte, pois, os cálculos necessários e a classificação dos cenários são etapas que antecedem esta escolha. Portanto, as simulações permitiram observar que a busca da V_{cot} esta sendo realizada de modo correto nestas tabelas.

6.1.2. SIMULAÇÃO PARA O CENÁRIO 4

Nesta simulação, objetiva-se identificar se o número de arestas previstas para a usinagem de uma TAREFA, calculadas pelo SE, estão sendo realizadas da forma correta.

A TAREFA utilizada foi a VTF_T_4, que é composta por peças com geometrias e materiais diferentes, conforme cenário 4. Os resultados da simulação estão descritos na Tabela 21.

TABELA 21 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DO CENÁRIO 4.

Aresta	Usinar	Quantidade
1	VTF_P_1	4
	VTF_P_6	2
	VTF_P_7	15
2	VTF_P_1	8
	VTF_P_6	7
3	VTF_P_6	5

O número de arestas consumidas calculadas pelo TOES para o cenário de fabricação 4, não apresentou diferença entre o previsto, ver Tabela 18.

6.2. OTIMIZAÇÃO DO CUBO DE FREIO

Conforme já descrito anteriormente, a primeira velocidade de corte empregada neste ensaio, V_{c1} , respeitou o valor atual em uso pelo operador, que era igual a 550 m/min. A partir desta, os ensaios foram iniciados até a obtenção da vida da aresta da ferramenta, neste caso em número de peças, a qual foi imediatamente inserida no TOES. Assim, o SE recomendou a V_{c2} , a qual foi 20% maior que a V_{c1} , e esta foi introduzida no programa CNC da máquina, dado-se assim, seqüência na usinagem até a obtenção da vida da ferramenta relativa a V_{c2} . Entretanto, os valores das vidas das ferramentas apresentaram incoerências, e a partir deste momento, iniciou-se testes com outras velocidades, que também apresentaram incoerências, pois, as vidas das ferramentas se estabilizaram. A Tabela 22 apresenta as velocidades testadas com suas respectivas vidas.

TABELA 22 – VELOCIDADES DE CORTE TESTADAS.

	Velocidade de Corte (m/min)	Vida (Peças)
1	550	28
2	660	40
3	440	46
4	700	26

Estas incoerências nas vidas das ferramentas desencadearam uma análise mais profunda sobre o processo de fabricação desta peça. Inicialmente, através de uma amostra do material retirada de uma peça descartada, ver Figura 42, realizou-se ensaio de dureza e metalográfico.

A dureza medida, em ensaio realizado no laboratório de materiais da UNIMEP, foi de 175 HB.



FIGURA 42 – AMOSTRA DA PEÇA.

O ensaio metalográfico objetivou a identificação de possíveis problemas com relação a estrutura do material, o que não foi comprovado. As características da microestrutura da peça permitiram classificá-la como ferro fundido cinzento perlítico, ver Figuras 43 e 44, um material que apresenta como características, grande resistência ao processo de usinagem e pode apresentar dureza entre 170 a 190 HB.

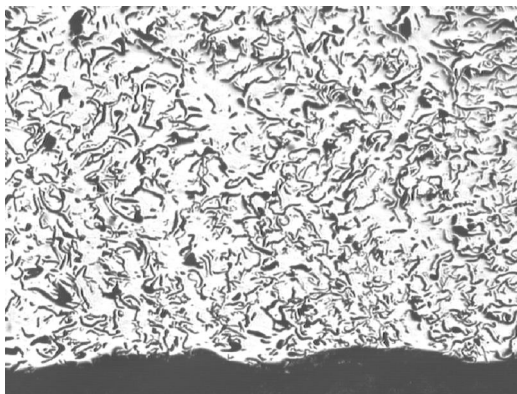


FIGURA 43 – MICROESTRUTURA DA AMOSTRA (AMPLIAÇÃO 50X).

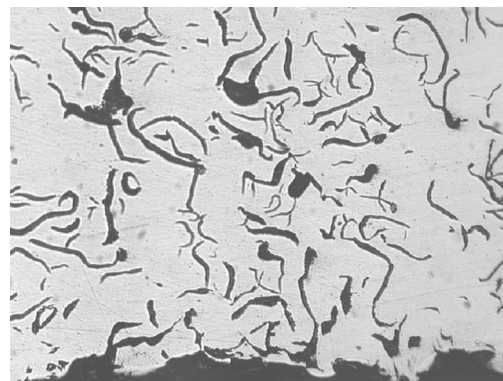


FIGURA 44 – MICROESTRUTURA DA AMOSTRA (AMPLIAÇÃO 200X).

Após estes ensaios, uma entrevista com o operador da máquina foi realizada, através da qual, relatou que as peças recebidas de um fornecedor apresenta melhores condições para serem usinadas em relação as peças oriundas do

outro, sendo que existiam na época da realização dos ensaios, 2 fornecedores diferentes.

Após este relato, uma análise dimensional das peças em espera foi realizada, através da qual, percebeu-se que as peças oriundas de um dos fornecedores apresentaram variações de até 7 mm, ver Figura 45, em função das rebarbas de fundição deixadas na peça. Estas rebarbas, apesar de existirem em materiais fundidos e de estarem dentro das tolerâncias dimensionais especificada pelo cliente, acarretam na geração de solavancos durante a usinagem, em função da variação da profundidade de corte.

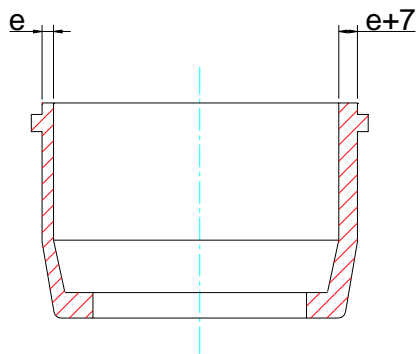


FIGURA 45 – DIFERENÇA DE ESPESSURA DA PEÇA.

Estes solavancos agredem a ferramenta cujo material é cerâmico, causando variações em sua vida como as identificadas no início do ensaio. Por este motivo, esta peça não pode ser otimizada pelo TOES, em função da existência de propriedades não repetitivas no processo.

6.3. OTIMIZAÇÃO DO TUBO DE APOIO

O tubo de apoio apresenta características mais comportadas em relação ao material do cubo de freio. Trata-se de um aço pré usinado pelo fornecedor, restando apenas as operações de desbaste e acabamento para serem realizadas por parte da Mercedes Benz.

A primeira condição de corte respeitou os parâmetros em uso pelo operador, nos quais, a V_{c1} era igual a 300 m/min. Assim, a usinagem foi realizada até a obtenção da vida da ferramenta, cujo critério baseou-se na experiência operador. Em seguida, inseriu-se a vida da ferramenta, em número de peças, correspondente a V_{c1} no TOES, que calculou a V_{c2} , cujo valor foi de 360 m/min. Entretanto, não foi iniciada a usinagem com esta velocidade, ao invés disto, repetiu-se a usinagem com a V_{c1} com o intuito de verificar a repetibilidade do ensaio. Na seqüência, adotou-se a V_{c2} e a usinagem das peças também foi realizada duas vezes.

De posse de cada um dos resultados para cada velocidade, calculou-se a vida média da ferramenta para V_{c1} e V_{c2} , cujos valores, foram introduzidos no TOES. A Tabela 23 apresenta as vidas obtidas para a ferramenta, em cada uma das velocidades de corte utilizadas durante a usinagem, com suas respectivas médias.

TABELA 23 – VIDAS DA FERRAMENTA PARA V_{c1} E V_{c2} .

	Vida para $V_{c1} = 300$ m/min (Z_t)	Vida para $V_{c2} = 360$ m/min (Z_t)
1	29	17
2	27	17
Média	28	17

Os resultados apresentados pelo TOES estão descritos na Tabela 24.

TABELA 24 - RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DO TUBO DE APOIO.

Cenário	V_{cmc}	V_{cmLim}	V_{cmxp}	V_{cot}
1	388	387	1067	V_{cmLim}

O cenário definido pelo TOES foi correto, pois, trata-se de um sistema de produção flexível, em que foi usinado apenas um tipo de peça, mas em

quantidade inferior ao especificado pelo usuário para classificá-lo em produção em série. Já o Intervalo do IME calculado foi aceito, visto que a V_{cmxp} apresentou valor considerado alto, em relação as limitações da máquina-ferramenta. Provavelmente, isto ocorreu em função do tempo de troca da aresta ser considerado baixo.

O TOES selecionou a V_{cmLim} como velocidade de corte otimizada, mas, em função da rotação adotada como limite para a operação, que foi de 1200 rpm, não foi possível a realização de ensaio para a sua confirmação. Entretanto, o ensaio demonstrou que a V_c utilizada, que possuía valor igual a 300 m/min, encontra-se fora do IME determinado para o sistema máquina-ferramenta-peça, estando inclusive abaixo da V_{cmc} . Neste caso, mesmo não sendo possível trabalhar dentro IME, pode-se aproximar a V_c do mesmo adotando 360 m/min como V_c de trabalho.

Os resultados do TOES, tanto em sua verificação quanto em sua aplicação em ambiente fabril, foram adequados em relação ao proposto, e nenhum problema foi encontrado.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com o apresentado em capítulos anteriores, que se referem ao desenvolvimento de um sistema especialista para a otimização do processo de usinagem, pode-se concluir que:

- A metodologia utilizada para determinar o IME em ambiente fabril mostrou-se eficiente, tanto para a otimização do processo de usinagem, quanto para a detecção de processos produtivos que utilizam materiais com propriedades e/ou qualidades não repetitivas;
- As restrições e informações sobre o sistema produtivo utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, corresponderam ao esperado e permitiram a classificação dos cenários pelo sistema especialista;
- As adaptações para a otimização do processo de usinagem em cenários flexíveis, com materiais diferentes, foram adequadas;
- A otimização em modo completamente automático pode ser realizada, para uma ferramenta;
- O TOES pode substituir ou auxiliar o especialista humano, em casos similares aos ensaios realizados neste trabalho, na complexa tarefa de otimização do processo de usinagem;
- O TOES permite o armazenamento de informações: da máquina-ferramenta, da ferramenta, e do processo de fabricação da peça;
- Enfim, construiu-se um sistema especialista que permite a otimização do processo de usinagem, com todas as características já descritas, e que pode ser utilizado como importante ferramenta para o aumento de competitividade por parte das indústrias manufatureiras.

7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver sistemas especialistas para otimização do processo de usinagem, que considerem processos de furação, fresamento e retificação;
- Analisar com maior profundidade a metodologia para a otimização de cenários flexíveis que utilizam materiais diferentes, verificando a influência da dureza do material da peça no desgaste da ferramenta, quando a peça altera sua posição e quantidade no lote;
- Estudar a influência que tempo de troca da aresta da ferramenta tem sobre a V_{cmxp} . Como demonstrado, quando t_{ft} tende a valores pequenos, ou mesmo inexistente, esta velocidade tende a valores muito altos. A sugestão é que seja verificada, de alguma forma, a partir de qual valor o t_{ft} pode ser considerado pequeno, e começa assim, a influenciar a V_{cmxp} ;
- Implementar, no sistema, o cálculo do custo de produção por peça para as velocidades de corte que constituem o IME;
- Analisar o uso de redes neurais, ou raciocínio baseado em casos, para a recuperação de resultados de ensaios anteriores;
- Implementar ferramentas estatísticas para verificar o tamanho significativo da amostra, durante a otimização;
- Implementar a otimização automática para operações de torneamento que utilizem mais de uma ferramenta;
- Aplicar o SE em ambiente fabril para verificar sua efetiva contribuição no apoio ou substituição do especialista humano.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, G. A. **Sistema de apoio à decisão na escolha de condições operacionais para processos de usinagem**. São Paulo: DEM, EPUSP, 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade Estadual de São Paulo, 1997. 148p.

BATOCCHIO, M. C. A. **Desenvolvimento de um sistema especialista de usinagem**. Campinas: FEM, UNICAMP, 1993. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1993, 141p.

BEARD, T. *Servicio CNC de larga distancia*. **MetalMecanica-International**, v. 4, ed. 4, p. 22-24, ago./set. 1999.

BERNARDO, V., COPPINI, N. L. Inteligência artificial aplicada na otimização das condições de usinagem. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 369, p. 76-87, out. 1996.

BREMER, C. F. Um sistema para apoio à formação de empresas virtuais baseada em recursos de chão-de-fábrica. **Gestão&Produção**, São Carlos, v. 6, n.2, p. 79-86, ago. 1999.

CAKIR, M. C., GURARDA, A. *Optimization and graphical representation of machining conditions in multi-pass turning operations*. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v. 11, n.3, p. 157-170. Jul. 1998.

CHANG, T. **Expert Process Planning for Manufacturing**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1990, 283p.

CHEN, S. J., HINDUJA, S., BARROW, G. *Automatic tool selection for rough turning operations*. **International Journal of Machining Tools of Manufacturing**, v. 29, n.4, p. 535-553. 1989.

- CHUA, M. S., RAHMAN, M., WONG, S. Y., LOH, H. T. *Determination of optimal cutting conditions using design of experiments and optimization techniques. **International Journal of Machining tools of Manufacturing.*** v. 33, n.2, p. 297-305. 1993.
- CHORAFAS, D. N. **Sistemas especialistas – aplicações comerciais.** São Paulo: McGraw-Hill, 1988, 254p.
- COPPINI, N. L., ARAÚJO, G. A. Sistema de apoio na escolha de condições operacionais para processos de usinagem. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 15, Bauru, **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1997. Publicado em CD.
- COPPINI, N. L., BAPTISTA, E. A. Alternativas de otimização dos parâmetros de corte para cenários de fabricação em usinagem. In.: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 18, Niterói, **Anais...** Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 1998.
- COPPINI, N. L., BERNARDO, V., MARCONDES, F. C. Determinação de condições otimizadas para usinagem dentro do conceito de fabricação flexível. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 13, Belo Horizonte, **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1995.
- COPPINI, N. L., COSTA, D. D. Raciocínio baseado em casos : uma ferramenta útil para a escolha de parâmetros de processos. In.: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 16, 1996, Santa Bárbara d'Oeste, **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 1996.
- COPPINI, N. L., MALAQUIAS, J. C., MARCONDES, F. C. Otimização em usinagem, uma visão gerencial. In.: Congresso de Engenharia Mecânica – Norte-Nordeste, 6, João Pessoa, **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1998.

- COPPINI, N. L., MALAQUIAS, J. C. Gerenciamento em usinagem – proposta para cenário de fabricação flexível. In.: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 18, Niterói, **Anais...** Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 1998.
- CUPINI, N. L., BATOCCHIO, M. C. A. Otimização das condições de usinagem através de um sistema especialista. In.: Congresso de Engenharia Mecânica Norte-nordeste, 3, 1994, Belém, **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1994. v. 2, p. 564-567.
- CUPINI, N. L., BATOCCHIO, M. C. A. Sistema especialista para otimização das condições de usinagem. In.: Encontro nacional de usuários de automação industrial, 1992, São Paulo, **Anais...** São Paulo: Sociedade brasileira comando numérico p. 93-104.
- DINIZ, A. E., COPPINI, N. L., VILELLA, R. C., RODRIGUES, A. C. S. Otimização das condições de usinagem em células. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.281, p. 48-54, jun. 1989.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. São Paulo: mm editora, 1999, 242p.
- DINIZ, A. E., NORITOMI, P. Y. Influência dos parâmetros de corte na rugosidade. **Máquinas e Metais**. São Paulo, n. 391, p. 92-101, ago. 1998.
- DOMINGUES, M. A., NAZZONI, R. Como a variação da velocidade de corte em tornos automáticos beneficia a produção. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.399, p. 186-192, Abril 1999.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977, 751p.
- FERREIRA, J. C. E., STRADIOTTO, C. R. K., BUTZKE, A. U. Parâmetros de usinagem e geração do programa NC em CAD/CAPP/CAM. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.396, p. 54-63, Jan. 1999.

- GAMARRA, J. R. Mais força com novas classes para torneamento. **O mundo da usinagem**, São Paulo, n.1, p. 18-20. jan. 2000.
- HOGARTH, S. *Remote Possibilities: Machine Diagnostics at a distance*. **Manufacturing Engineering**, Dearborn, v. 122, n.2, p. 70-78, Feb. 1999.
- HOLTZ, F. **Sistemas especialistas – programando em turbo C**. Rio de Janeiro: Campus, 1991. 248p.
- JANG, D. Y. *A unified optimization model of a machining process for specified conditions of machined surface and process performance*. **International Journal of Production Research**, v. 30, n.3, p.647-663, Mar. 1992.
- KINNUCAN, P. *Computers that think like experts*. **High Technology Publish Coporation**, v. 71, p.30-42, Jan. 1984.
- KUMARA, S. R. T., JOSHI, S., KASHYAP, R. L., MOODIE, C. L., CHANG, T. C. *Expert systems in industrial engineering*. **International Journal of Production Research**, v. 24, n.01, p.225-240, Jan. 1986.
- LEVINE, R. I., DRANG, D. E., EDELSON, B. **Inteligência artificial e sistemas especialistas**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988. 264p.
- LIMA, C. M. **Introdução à inteligência artificial**. 2000. [On-Line] Disponível: <http://www.elo.com.br/~cynthia>, 05 de maio de 2000.
- MALAQUIAS, J. C. **Otimização e gerenciamento em usinagem para cenário de fabricação flexível**. Santa Bárbara d'Oeste: FEMP, UNIMEP, 1999. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, 1999, 115p.
- MURBACK, F. G. R., MONTEVECHI, A. B. As redes neurais se aliam à TG e auxiliam a formação de famílias de peças. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.384, p. 85-92, Jan. 1998.

- PALLEROSI, C. A., CUPINI, N. L. Durabilidade de ferramentas de corte na usinagem dos metais. **Metalurgia**, São Paulo, n.215, p. 645-649, out. 1975.
- PETROUTSOS, E. **Dominando o Visual Basic 6 “A Bíblia”**. São Paulo: Makron Books, 1999. 1126p.
- PINHEIRO, P. C. C. Internet para Engenheiros Mecânicos, **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.391, p. 104-118, ago. 1998.
- RIBEIRO, M. V. **Otimização das condições de corte assistida por computador durante o desenvolvimento do processo**. Campinas: FEM, UNICAMP, 1999. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 143p.
- RICH, E. **Inteligência Artificial**. São Paulo: Makron Books, 1988. 503p.
- RODRIGUES, A, C. S., DINIZ, A. E., COPPINI, N. L. Análise das condições operacionais visando a obtenção das condições de usinagem otimizadas. In.: Seminário de comando numérico no Brasil, 7,1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade brasileira comando numérico, 1987.
- SHAFER D. G. *Microcomputer-based expert systems : where we are, where we are headed*. **Expert Systems and Intelligent Manufacturing**, v.2, n.4, p. 188-195, Oct. 1985.
- STAIR, R. M. **Princípios de sistemas de informação: uma abordagem gerencial**. Rio de Janeiro, LTC, 1998. Cap. 11: Inteligência artificial e sistemas especialistas. p. 256-275.
- TETI, R., KUMARA, S. R. T. *Intelligent computing Methods for manufacturing systems*. **Annals of the CIRP**, v. 46, p. 629-652, Feb. 1997.
- VELLOSO, F. C. **Informática – conceitos básicos**. Rio de Janeiro, CAMPUS, 1999. Cap. 12: Redes locais. p. 197-246.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AGAPIOU, J. S. *Optimisation of multistage machining systems, PART 1 : Mathematical solution. Transactions of the ASME*, v. 114, p. 524-531, Nov. 1992.

AGAPIOU, J. S. *Optimisation of multistage machining systems, PART 2 : The algorithm and applications. Transactions of the ASME*, v. 114, p. 532-538, Nov. 1992.

AGAPIOU, J. S. *The optimisation of machining operations based on a combined criterion, PART 1 : The use of combined objectives in single-pass operations. Transactions of the ASME*, v. 114, p. 500-507. Nov. 1992.

AGAPIOU, J. S. *The optimisation of machining operations based on a combined criterion, PART 2 : Multipass operations. Transactions of the ASME*, v. 114, p. 508-513. Nov. 1992.

AMSTEAD, B. H., OSTWALD, P. F., BEGEMAN, M. L. **Manufacturing Process**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 721p.

BILLATOS, S. B., KENDALL, L. A. *A general optimisation model for multi-tool manufacturing systems. Transactions of the ASME*, v. 113, p. 10-16, Feb. 1991.

BOEHS, L., MOSTIACK, G. R., BET, L. Comparação dos valores de rugosidade em superfícies usinadas. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.402, jul. 1999.

CARIUS, A. Super-Revestimento para superabrasivos. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.399, p. 92-101, Abril 1999.

CASTNER, M., PITSKER, A. *Quick-Change turns to lathes. American Machinist*, v. 139, n.9, p. 45-47, Sep. 1995.

- COPPINI, N. L., FERREIRA, J. R., MIRANDA, G. W. A. Procedimento para otimização das condições de usinagem para aplicação em chão de fábrica. In.: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 17, Gramado, **Anais...** Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 1997.
- COPPINI, N. L., MIRANDA, G. W. A., FERREIRA, J. R. Otimização do processo de usinagem através do uso de critério prático de troca da ferramenta. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 15, Bauru, *Anais...* São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1997. Publicado em CD.
- COPPINI, N. L., COSTA, D. D. Módulo Especialista para escolha automática de parâmetros de usinagem. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 13, Belo Horizonte, **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1995. Publicado em CD.
- COELHO, R. T. **Otimização de sobremetal para torneamento e retificação cilíndrica de peças forjadas.** São Carlos: EESC-USP, 1999. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999, 156p.
- C. FILHO, A., GILENO, L.C., BUTTON, S.T. Sistema Especialista para forjamento a quente. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.399, p. 128-137, Abril 1999.
- CORREA FILHO, A. N., MAESTRELLI, N.C., COPPINI, N.L. Identificação do ferramental de grupo. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.399, p. 46-74, Abril 1999.
- COSTA, D. D., COPPINI, N. L. Representação de processos através de níveis hierárquicos. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 15, 1997, Baurú. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1997. Publicado em CD.

- COWTON, C. J., WIRTH, A. *On the economics of cutting tools. **International Journal of Production Research***, v. 31, n.10, Oct. 1993.
- DINIZ, A. E., COSTA, C. E. A corrente elétrica do motor da máquina mostra o fim da vida da ferramenta. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.354, p. 41-52, jul. 1995.
- DINIZ, A. E., NORITOMI, P. Y. Parâmetros de usinagem nos esforços de corte em aço. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 395, p. 92-100, dez. 1998.
- DINIZ, A. E., PIGARI, A. Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, São Paulo, v. XVIII, n.3, p. 227-238, Sep. 1996.
- DORNFELD, D. A. *Process monitoring and control for precision manufacturing, **Production Engineering, Dortmund***, V. VI/2, p. 29-34, 1999.
- ELBESTAWI, M. A., TELTZ, R. *Intelligent Machining Systems: Opportunities and Challenges. In.: Integrity – Reliability – Failure an International Conference, Porto, Portugal, **Anais...*** July 1999.
- FERREIRA, J. R., MIRANDA, G. W. A., COPPINI, N. L. Metodologia de otimização da ferramenta de corte na prática da usinagem. **O mundo da usinagem**, São Paulo, n.3, 1997, p. 42-46.
- GIMENEZ, C., TELLES, G. N. Sistemas CAD/CAM aplicados entre diferentes fornecedores. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 395, p. 83-91, dez. 1998.
- HALE, T. E. *Maximize profits with computer models. **Manufacturing Engineering, Dearborn***, p. 28-34, Dec. 1997.
- HEIDE, A., Stilborne, L. **Guia do professor para a Internet: completo e fácil**. Porto Alegre: ArtMed, 2000. 465p.

- HOGARTH, S. *Machines with vision. **Manufacturing Engineering***, v. 122, n.4, p. 100-107, April 1999.
- HUMMEL, K. E., BROOKS, S. L. *Using hierarchically structured problem-solving knowledge in a rule-based process planning system. **Expert Systems and Intelligent Manufacturing***, v. 05, n.1, p. 120-137, Jan. 1988.
- JEDRZEJEWSKI, J., KWASNY, W. *Artificial intelligence tools diagnostics of machine tool drives. **Annals of the CIRP***, v. 45, Jan. 1996.
- KOEPFER, T. Novo conceito de máquina de alta velocidade de corte. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.395, p. 28-34, dez. 1998.
- KOULAMAS, C. P. *Simultaneous determination of optimal machining conditions and tool replacement policies in constrained machining economics problems by geometric programming. **International Journal of Production Research***, v. 29, n.12, p. 2407-2421, Dez. 1991.
- MALAQUIAS, J. C., COPPINI, N. L. Velocidade de mínimo custo como condição suficiente para seleção da velocidade de corte otimizada. In.: Congresso de engenharia mecânica Norte-nordeste, Recife, p. 297-300, Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1996.
- MALAQUIAS, J. C., COPPINI, N. L. Seleção da velocidade de corte em usinagem com base na velocidade de mínimo custo. In.: Encontro de Mestrados em Engenharia da UNIMEP, 1, Santa Bárbara d'Oeste, Anais... Piracicaba: Universidade Metodista de Piracicaba, 1997.
- MALAKOOTI, B. *An interactive on-line multi-objective optimization approach with application to metal cutting turning operation. **International Journal of Production Research***, v.29, n.03, p.575-598. Mar. 1991
- MAROPOULOS, P. G., ALAMIN, B. *Integrated tool life prediction and management for an intelligent tool selection system. **Journal of Materials Processing Technology***, USA, v. 61, n. 1-2, p.225-230, Aug. 1996.

- MATSUMOTO, H. DINIZ, A. E. Torneamento do aço endurecido monitorado por emissão acústica e corrente do motor. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 395, p. 72-79. dez. 1998.
- MCKELVY, M. **Usando Visual Basic 4 para windows 95**. Rio de Janeiro: Campus, 1997. 740p.
- MEREDITH, D. *Practical tool condition monitoring*. **Manufacturing Engineering**, v. 121, n. 01, p. 34-39, Jan. 1998.
- MEYER, P. L. **Probabilidade – Aplicações à estatística**. Rio de Janeiro: Ao livro técnico S. A., 1974. 370p.
- MILLER, P. *Failure Mechanisms in tool steels*. **Manufacturing Engineering**. v.122, n.1, p. 82-87, Jan. 1999.
- MIRANDA, G. W. A. **Uma contribuição para aplicações em controle adaptativo otimizado no torneamento**. Campinas: FEM, UNICAMP, 1997. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997, 80p.
- NEVES, M., PROENÇA, A. Evolução dos perfis de automação no Brasil. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.399, p. 83-91, abril 1999.
- NOVAK, A., WIKLUND, H. *On-Line prediction of the tool life*. **Annals of the CIRP**, v. 45, Jan. 1996.
- PEREIRA, N. A. Sistema especialista de 2º geração para diagnose técnica : Modelo de Procedimento. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 1, n. 1, p. 7-28. abr. 1994
- RIBEIRO, M. V., COPPINI, N. L. Aplicação do sistema ATAC na otimização dos parâmetros de usinagem e seleção de ferramentas. In.: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 15, Bauru, **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1997.

- SCHNEIDER, J. *Ceramics and CBN – for high-speed, dry, and hard machining, these cutting tools may prove the ideal solution.* **Manufacturing Engineering**, v.122, n.1, p. 66-73, Jan. 1999.
- SCHWEITZER, P. J., SEIDMANN, A. *Optimizing processing rates for flexible manufacturing systems.* **Management Science**, v. 37, n.4, p. 454-466, april. 1991.
- SHIN, Y. C., JOO, Y. S. *Optimization of machining conditions with practical constraints.* **International Journal of Production Research**, v. 30, n.12, p. 2907-2919, dez. 1992.
- SOUZA, R. *Tool-provisioning strategies for flexible manufacturing systems.* **Robotics & Computer-Integrated Manufacturing**, v. 13, n.1, p. 31-39, Jan. 1997.
- SZWARCFITER C., DALCOL, P. R. T. Economias de escala e de escopo : Desmistificando alguns aspectos da transição. **Revista PRODUÇÃO**, Belo Horizonte, v. 7, n.2, p. 117-129, nov. 1997.
- TANI, G. *Tool Management in manufacturing systems equipped with CNC Machines.* **Revista PRODUÇÃO**, Belo Horizonte, v. 7, n.2, p. 177-187, nov. 1997.
- TELTZ, R., ELBESTAWI, M. A. *Hierarchical, Knowledge-Based Control in Turning,* **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, v. 115, march 1993.
- UHLMANN, E., FRIES, E. *Intelligent process monitoring.* **Production Engineering, Dortmund**, V. VI/2, p. 25-28, 1999.
- VENJARA, Y. *Setup Savings.* **Manufacturing Engineering**, v.117, n.1, p. 96-102, Jul. 1996.
- WATERMAN, D. A. **A guide to expert systems. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company**, 1986. 419p.

WESTKÄMPER, E. Zero defeito através da supervisão de aprendizado das cadeias do processo. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.395, p. 36-50, dez. 1998.

ZHOU, C., WYSK, R. A. *An integrated system for selecting optimum cutting speeds and tool replacement times.* **International Journal Machining Tools Manufacturing**, v. 32, n.5, p. 695-707, 1992.

**ANEXO I - MEDIDAS DE DESGASTE VB DAS ARESTAS CONSUMIDAS NO
ENSAIO REALIZADO EM LABORATÓRIO.**

Medidas de VB para as arestas usadas no ensaio

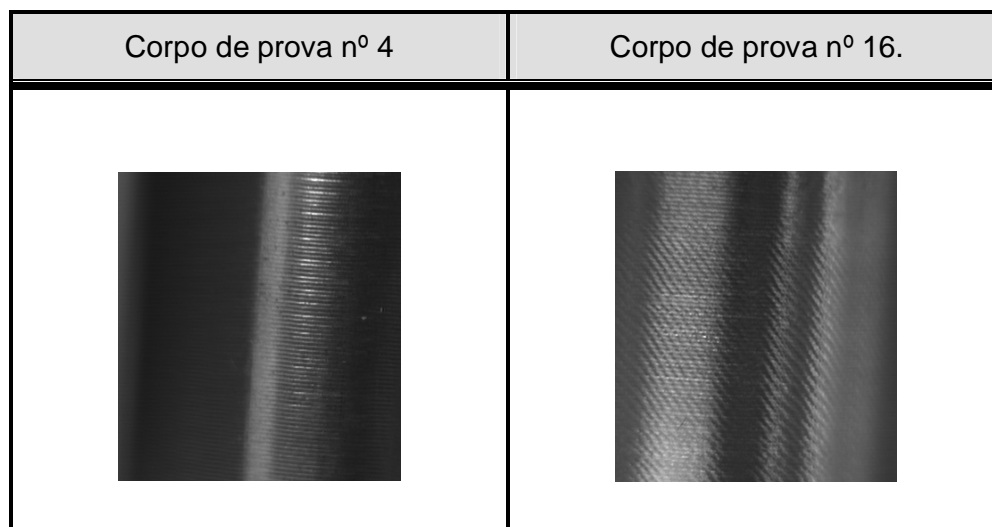
V_c	Instr	Lupa				Projetor de Perfil				GlobalLab				Média Geral
	Medida	1	2	3	Méd	1	2	3	Méd	1	2	3	Med	
175	Ar 1	1,5	1,6	1,6	1,6	1,63	1,62	1,61	1,62	1,45	1,45	1,34	1,41	1,5
175	Ar 2	1,4	1,3	1,3	1,3	1,43	1,37	1,39	1,40	1,34	1,28	1,34	1,32	1,4
210	Ar 3	1,4	1,4	1,5	1,4	1,57	1,48	1,53	1,53	1,33	1,32	1,33	1,33	1,4
210	Ar 4	1,7	1,7	1,8	1,7	1,78	1,77	1,74	1,76	1,34	1,28	1,33	1,32	1,6

Observação: A medição de desgaste VB ocorreu após a usinagem de todas as peças, pois, o critério utilizado foi a experiência do operador. Entretanto, os valores obtidos nesta, permitem observar que tal critério foi coerente, devido a proximidade dos valores médios dos desgastes. Por não ter sido utilizado como critério de fim de vida, não foram criadas análises estatísticas.

**ANEXO II - CONTROLE DIMENSIONAL E DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL
DOS CORPOS DE PROVA.**

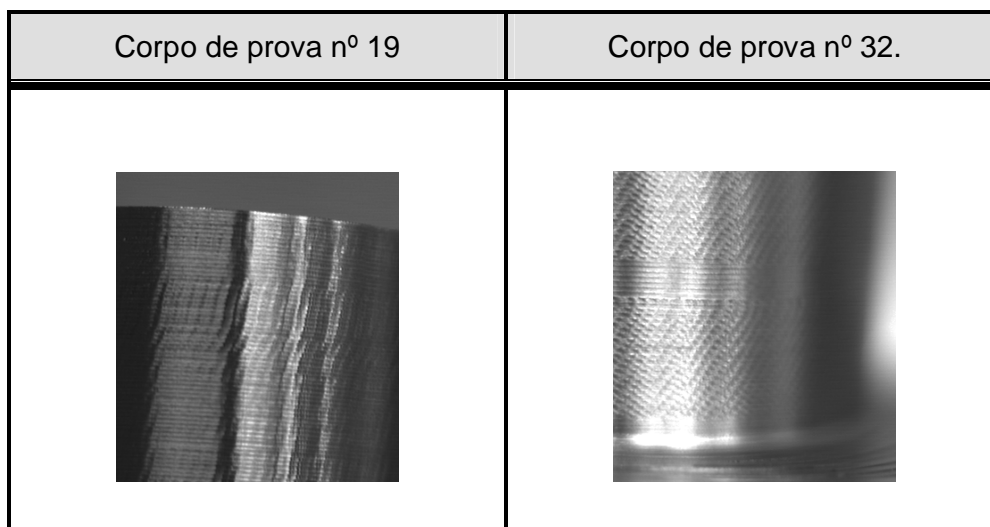
Corpos de prova usinados pela 1ª aresta

Cp nº	Média		Medidas de diâmetro (mm)			Medidas de rugosidade (Ra)		
	d (mm)	Ra	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
1	26,96	2,71	26,96	26,96	26,96	2,59	2,66	2,87
2	26,95	2,62	26,95	26,95	26,95	2,54	2,66	2,66
3	26,94	2,72	26,94	26,94	26,94	2,63	2,91	2,62
4	26,92	2,31	26,92	26,92	26,92	2,31	2,3	2,33
5	26,92	2,07	26,91	26,92	26,92	2,14	2,02	2,04
6	26,91	1,76	26,91	26,91	26,92	1,8	1,72	1,75
7	26,91	1,61	26,91	26,91	26,92	1,61	1,61	1,61
8	26,93	0,98	26,93	26,93	26,93	1,08	0,99	0,87
9	26,92	1,04	26,93	26,92	26,92	0,96	1,08	1,08
10	26,93	1,17	26,93	26,94	26,93	1,4	1	1,11
11	26,93	1,38	26,93	26,93	26,93	1,56	1,16	1,43
12	26,92	1,28	26,92	26,92	26,92	1,2	1,33	1,31
13	26,89	1,7	26,9	26,89	26,89	1,58	1,7	1,82
14	26,88	2,54	26,88	26,88	26,88	2,79	2,38	2,44
15	26,81	2,93	26,81	26,8	26,81	2,87	3,1	2,82
16	26,87	2,61	26,87	26,87	26,87	2,59	2,54	2,71



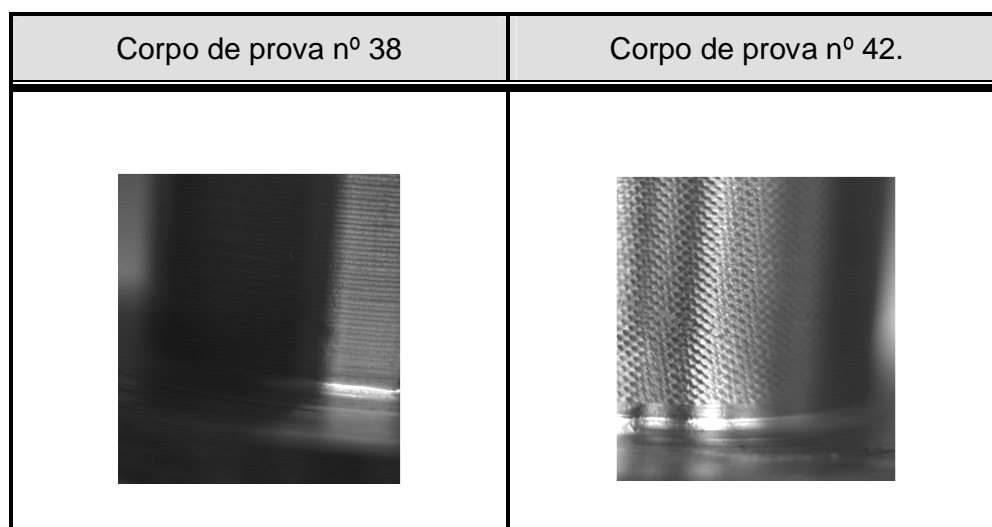
Corpos de prova usinados pela 2ª aresta

Cp nº	Média		Medidas de diâmetro (mm)			Medidas de rugosidade (Ra)		
	d (mm)	Ra	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
17	26,95	2,61	26,95	26,95	26,95	2,57	2,53	2,73
18	26,94	2,77	26,94	26,94	26,94	2,89	2,67	2,74
19	26,92	2,16	26,92	26,92	26,92	2,16	2,18	2,14
20	26,92	1,70	26,92	26,92	26,91	1,63	1,79	1,69
21	26,90	1,69	26,90	26,90	26,90	1,72	1,68	1,67
22	26,90	1,48	26,90	26,90	26,90	1,49	1,50	1,45
23	26,90	1,55	26,90	26,90	26,90	1,54	1,53	1,57
24	26,90	1,38	26,90	26,90	26,90	1,41	1,36	1,37
25	26,90	1,39	26,90	26,90	26,90	1,43	1,40	1,35
26	26,90	1,22	26,90	26,89	26,90	1,31	1,05	1,29
27	26,89	1,28	26,89	26,89	26,89	1,27	1,29	1,29
28	26,88	1,11	26,88	26,88	26,88	1,23	1,04	1,06
29	26,88	1,28	26,88	26,88	26,88	1,50	1,18	1,17
30	26,86	1,23	26,86	26,86	26,86	1,29	1,21	1,18
31	26,88	1,42	26,88	26,89	26,88	1,48	1,32	1,46
32	26,84	2,53	26,84	26,84	26,84	2,51	2,53	2,55



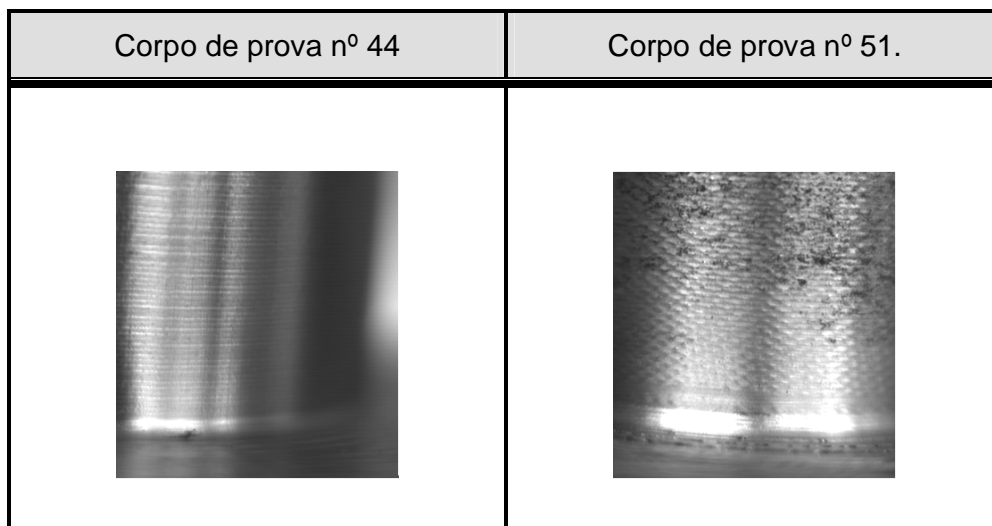
Corpos de prova usinados pela 3ª aresta

Cp nº	Média		Medidas de diâmetro (mm)			Medidas de rugosidade (Ra)		
	d (mm)	Ra	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
33	26,64	2,35	26,64	26,64	26,64	2,57	2,16	2,33
34	26,62	2,37	26,62	26,62	26,62	2,29	2,39	2,44
35	26,62	2,19	26,62	26,62	26,62	2,22	2,01	2,35
36	26,61	2,15	26,61	26,61	26,61	2,09	2,23	2,12
37	26,62	1,6	26,62	26,62	26,62	1,58	1,63	1,59
38	26,58	1,51	26,58	26,58	26,58	1,44	1,72	1,38
39	26,57	1,56	26,57	26,57	26,57	1,56	1,56	1,57
40	26,57	3,4	26,55	26,57	26,58	3,33	3,49	3,39
41	26,55	3,37	26,55	26,55	26,55	3,5	3,335	3,28
42	26,56	3,57	26,56	26,56	26,56	3,48	3,67	3,57

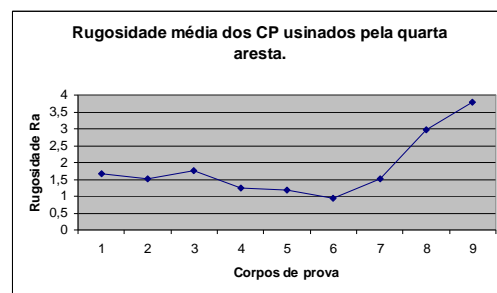
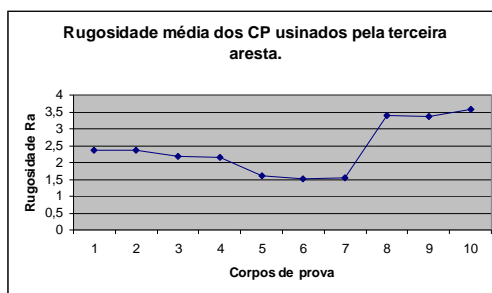
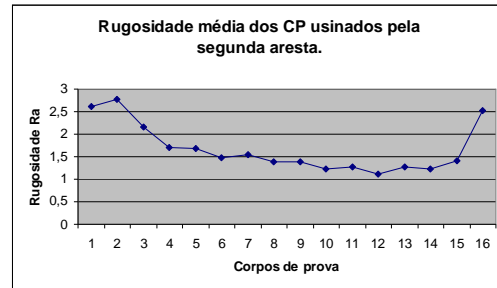
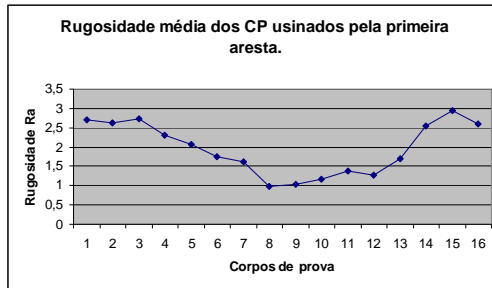


Corpos de prova usinados pela 4ª aresta

Cp nº	Média		Medidas de diâmetro (mm)			Medidas de rugosidade (Ra)		
	d (mm)	Ra	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
43	26,69	1,66	26,69	26,69	26,69	1,62	1,74	1,63
44	26,68	1,53	26,68	26,68	26,68	1,54	1,6	1,46
45	26,67	1,77	26,67	26,67	26,67	1,75	1,76	1,79
46	26,69	1,25	26,69	26,68	26,69	1,22	1,17	1,36
47	26,68	1,19	26,68	26,68	26,68	1,17	1,07	1,33
48	26,66	0,94	26,66	26,66	26,66	0,93	0,85	1,03
49	26,63	1,53	26,63	26,63	26,63	1,79	1,39	1,42
50	26,63	2,98	26,63	26,63	26,63	3,06	2,86	3,02
51	26,63	3,8	26,63	26,63	26,63	4,02	3,77	3,61



Evolução da rugosidade



Observação: Assim como a medida de desgaste VB, a rugosidade também não foi utilizada como critério para o decreto do final de vida da ferramenta, porém, observando-se os gráficos acima, pode-se perceber a rugosidade superficial dos corpos de prova apresentam a mesma tendência, indicando que a troca da aresta, foi realizada em situações muito próximas.

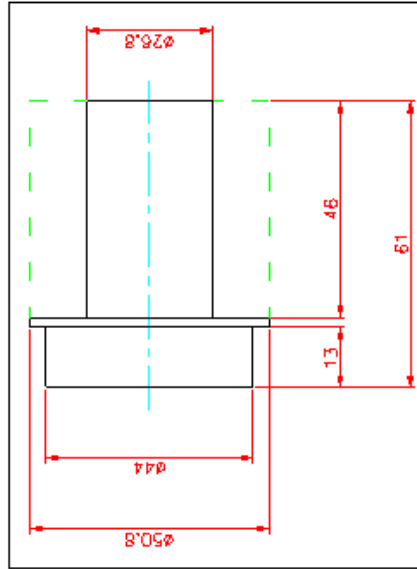
**ANEXO III - PROGRAMA CNC UTILIZADO NA USINAGEM DOS CORPOS
DE PROVA EM LABORATÓRIO.**

Programa CNC utilizado na usinagem dos corpos de prova em laboratório.

N10 ;JOAO-ELE#	N260 G1X40.8#
N20 G99#	N270 Z-46.#
N30 T00;T0101.Fer 01 desbaste#	N280 GX43. Z2.#
N40 G54#	N290 G1X38.8#
N50 GX260.Z44.#	N300 Z-46.#
N60 T0101;DESB#	N310 GX41. Z2.#
N70 M6#	N320 G1X36.8#
N80 M13#	N330 Z-46.#
N90 G96#	N340 GX39. Z2.#
N100 S310.#	N350 G1X34.8#
N110 G92 S3800 M3#	N360 Z-46.#
N120 GX54. Z2.#	N370 GX37. Z2.#
N130 G1X50.8 Z2. F.25#	N380 G1X32.8#
N140 G1X48.8#	N390 Z-46.#
N150 Z-46.#	N400 GX35. Z2.#
N160 GX51. Z2.#	N410 G1X30.8#
N170 G1X46.8#	N420 Z-46.#
N180 Z-46.#	N430 GX33. Z2.#
N190 GX49. Z2.#	N440 G1X28.8#
N200 G1X44.8#	N450 Z-46.#
N210 Z-46.#	N460 GX31. Z2.#
N220 GX47. Z2.#	N470 G1X26.8#
N230 G1X42.8#	N480 Z-46.#
N240 Z-46.#	N490 GX29. Z2.#
N250 GX45. Z2.#	N500 GX200. Z200.#
	N510 M30#

**ANEXO IV - CÓPIAS DAS PLANILHAS ELETRÔNICAS UTILIZADAS NOS
CÁLCULOS DA PEÇA USINADA EM LABORATÓRIO E EM TODAS AS PEÇAS
SIMILARES DESCRITAS NO CAPÍTULO 5.**

Peça VTF P 1



Tempo de Corte (Vc1)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	34,8
d (10)	32,8
d (11)	30,8
d (12)	28,8
d (13)	26,8
d (16)	0
Total	1,50

Tempo de Corte (Vc2)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	34,8
d (10)	32,8
d (11)	30,8
d (12)	28,8
d (13)	26,8
d (16)	0
Total	1,25

Primeiro Ensaio	
VC (1)	175
Lft (1)	8832
Npeças (1)	16
Vida (1)	23,96
t corte (1)	1,50

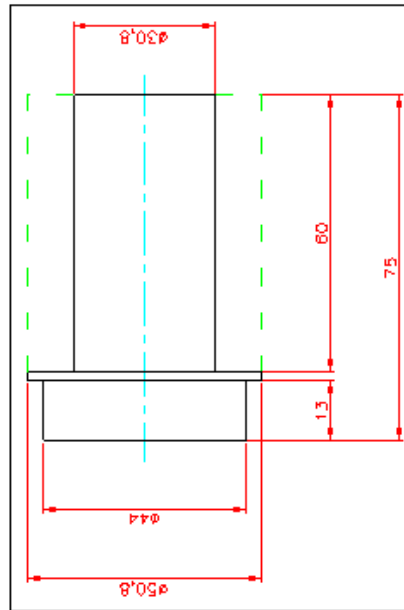
Segundo Ensaio	
VC (2)	210
Lft (2)	4968
Npeças (2)	9
Vida (1)	11,23
t corte (2)	1,25

Dados sobre a peça	
Material :	SAE 4340
Dureza :	305 HB
Sm :	15
Sh :	13,6
tff :	0,58
C3 :	3,56
C2 :	28,6
Lf da peça :	552
Avanço :	0,25
Lf da pass. :	46
N pass. :	12
Cust. Ferr. :	3,28

X e K da equação de Taylor			
x (1) p/ npd	4,16	k corres.	5,02E+10
x (2) p/ lft	4,16	k corres.	5,02E+10
x (3) p/ T	4,16	k corres.	5,02E+10

	Velocidades de Referência		
	1	2	3
Vmc	176	176	176
VmLim	179	179	179
Vmxxp	325	325	325
			Média
			176
			179
			325

Peça VTF P 2



Dados sobre a peça	
Material :	SAE 4340
Dureza :	305 HB
Sm :	15
Sh :	13,6
tff :	0,58
C3 :	3,56
C2 :	28,6
Lf da peça :	600
Avanço :	0,25
Lf da pass.	60
N pass.	10
Cust. Ferr.	3,28

Primeiro Ensaio	
VC (1)	175
Lf (1)	8200,32
Npeças (1)	13,7
Vida (T)	23,42
t corte (1)	1,71

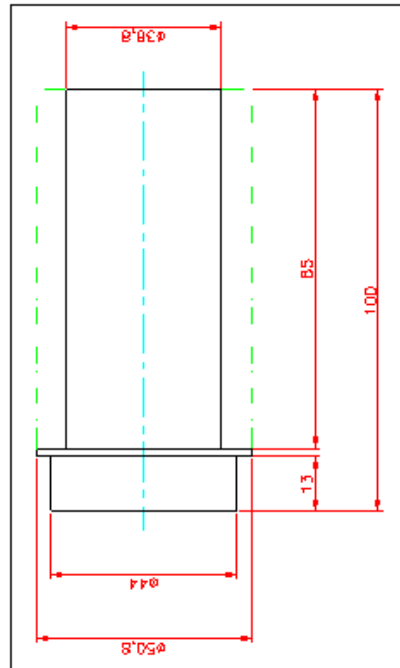
Segundo Ensaio	
VC (2)	210
Lf (2)	4609,12
Npeças (2)	7,68
Vida (T)	10,97
t corte (2)	1,43

Tempo de Corte (Vc1)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	34,8
d (10)	32,8
d (11)	30,8
d (12)	0
d (13)	0
d (16)	0
Total	1,71

Tempo de Corte (Vc2)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	34,8
d (10)	32,8
d (11)	30,8
d (12)	0
d (13)	0
d (16)	0
Total	1,43

X	4,16
K	5,02E+10

Peça VTF P 3



Dados sobre a peça	
Material :	SAE 4340
Dureza :	305 HB
Sm :	15
Sh :	13,6
tff :	0,58
C3 :	3,56
C2 :	28,6
Lf da peça :	680
Avanço :	0,25
Lf da pass. :	85
N pass. :	8
Cust. Ferr. :	3,28

Tempo de Corte (Vc1)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	0
d (10)	0
d (11)	0
d (12)	0
d (13)	0
d (16)	0
Total	1,83

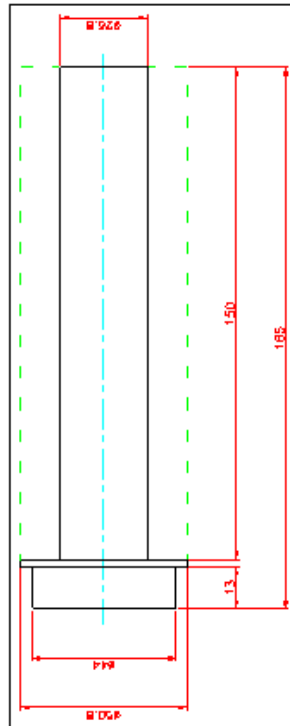
Primeiro Ensaio	
VC (1)	175
Lft (1)	8714,89
Npeças (1)	12,8
Vida (1)	23,42
tcorte (1)	1,83

Segundo Ensaio	
VC (2)	210
Lft (2)	4898,34
Npeças (2)	7,20
Vida (1)	10,97
tcorte (2)	1,52

Tempo de Corte (Vc2)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	0
d (10)	0
d (11)	0
d (12)	0
d (13)	0
d (16)	0
Total	1,52

X	4,16
K	5,02E+10

Peça VTF P 4



Dados sobre a peça	
Material :	SAE 4340
Dureza :	305 HB
Sm :	15
Sh :	13,6
tff :	0,58
C3 :	3,56
C2 :	28,6
Lf da peça :	1800
Avanço :	0,25
Lf da pass.:	150
N pass.:	12
Cust. Ferr.:	3,28

Tempo de Corte (Vc1)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	34,8
d (10)	32,8
d (11)	30,8
d (12)	28,8
d (13)	26,8
d (16)	0
Total	4,88

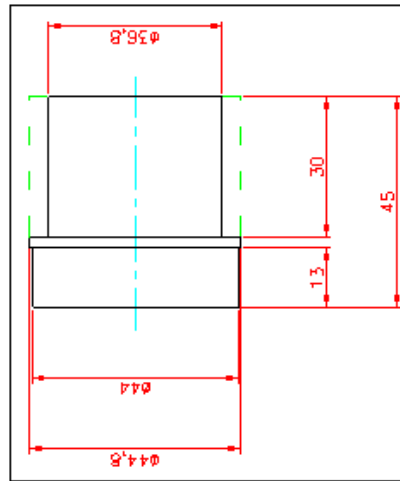
Tempo de Corte (Vc2)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	34,8
d (10)	32,8
d (11)	30,8
d (12)	28,8
d (13)	26,8
d (16)	0
Total	4,07

Primeiro Ensaio	
VC (1)	175
Lft (1)	8634,20
Npeças (1)	4,8
Vida (T)	23,42
tcorte (1)	4,88

Segundo Ensaio	
VC (2)	210
Lft (2)	4852,99
Npeças (2)	2,70
Vida (T)	10,97
tcorte (2)	4,07

X	4,16
K	5,02E+10

Peça VTF P 5



Dados sobre a peça

Material :	SAE 4340
Dureza :	305 HB
Sm :	15
Sh :	13,6
tff :	0,58
C3 :	3,56
C2 :	28,6
Lf da peça :	120
Avanço :	0,25
Lf da pass.:	30
N pass.:	4
Cust. Ferr.:	3,28

Tempo de Corte (Vct)	
d (1)	0
d (2)	0
d (3)	0
d (4)	0
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	0
d (10)	0
d (11)	0
d (12)	0
d (13)	0
d (16)	0
Total	0,34

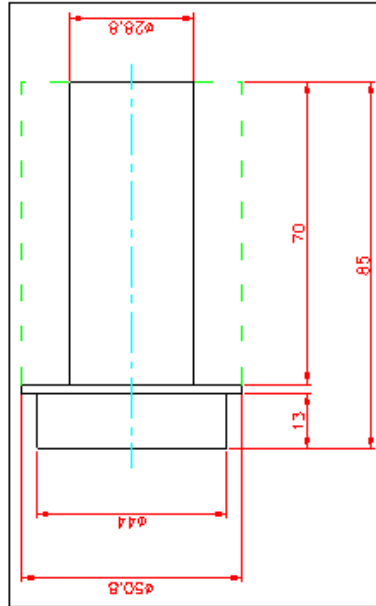
Segundo Ensaio	
VC (2)	210
Lf (2)	4609,12
Npeças (2)	38,41
Vida (1)	10,97
t corte (2)	0,29

Primeiro Ensaio	
VC (1)	175
Lf (1)	8200,32
Npeças (1)	68,3
Vida (1)	23,42
t corte (1)	0,34

Tempo de Corte (Vc2)	
d (1)	0
d (2)	0
d (3)	0
d (4)	0
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	0
d (10)	0
d (11)	0
d (12)	0
d (13)	0
d (16)	0
Total	0,29

X	4,16
K	5,02E+10

Peça VTF P 6



Dados sobre a peça	
Material :	ASTMA353
Dureza :	200 HB
Sm :	15
Sh :	13,6
tff :	0,58
C3 :	3,56
C2 :	28,6
Lf da peça :	770
Avanço :	0,25
Lf da pass.	70
N pass.	11
Cust. Ferr.	3,28

Tempo de Corte (Vc1)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	34,8
d (10)	32,8
d (11)	30,8
d (12)	28,8
d (13)	0
d (16)	0
Total	2,14

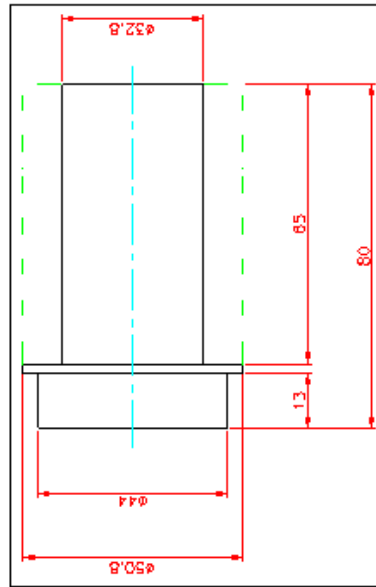
Segundo Ensaio	
VC (2)	210
Lft (2)	10646,45
Npeças (2)	13,83
Vida (1)	24,71
tcorde (2)	1,79

Primeiro Ensaio	
VC (1)	175
Lft (1)	19080,29
Npeças (1)	24,8
Vida (1)	53,13
tcorde (1)	2,14

Tempo de Corte (Vc2)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	34,8
d (10)	32,8
d (11)	30,8
d (12)	28,8
d (13)	0
d (16)	0
Total	1,79

X	4,2
K	1,4E+11

Peça VTF P 7



Dados sobre a peça	
Material :	SAE 1045
Dureza :	150 HB
Sm :	15
Sh :	13,6
tff :	0,58
C3 :	3,56
C2 :	28,6
Lf da peça :	585
Avanço :	0,25
Lf da pass.:	65
N pass.:	9
Cust. Ferr.:	3,28

Primeiro Ensaio	
VC (1)	175
Lf (1)	114054,16
Npeças (1)	195,0
Vida (1)	333,98
tcorte (1)	1,71

Segundo Ensaio	
VC (2)	210
Lf (2)	63640,14
Npeças (2)	108,79
Vida (1)	155,30
tcorte (2)	1,43

Tempo de Corte (Vc1)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	34,8
d (10)	32,8
d (11)	0
d (12)	0
d (13)	0
d (16)	0
Total	1,71

Tempo de Corte (Vc2)	
d (1)	0
d (2)	48,8
d (3)	46,8
d (4)	44,8
d (5)	42,8
d (6)	40,8
d (7)	38,8
d (8)	36,8
d (9)	34,8
d (10)	32,8
d (11)	0
d (12)	0
d (13)	0
d (16)	0
Total	1,43

X	4,2
K	8,8E+11

**ANEXO V - PROGRAMA CNC UTILIZADO NA USINAGEM DO CUBO DE
FREIO EM AMBIENTE FABRIL.**

Programa CNC utilizado na peça cubo de freio.

T21	G1 G96 X469 S600 F.6	N31 T129 X-296 G95
T22	G X481	S550 H31
T23	Z382	G4 X1
T24	N23 T123 X409.5 H23	M11
T25	G96 S550	Z16 T131 M4
T26	Z305	X-296
T27	G1 Z115 F1.15	G96 S600
T28	Z108 B3 F.5	G1 X-366 F.4
T29	X400	G Z36
T30	G1 X395	X-373.2
T31	G Z538	G1 X-369.025 Z34
N5 G40 G90 M80	N25 T125 G95 S155 H25	Z25.9
G59 Z332.5	Z304	X-366.05
G92 S750	G96	Z16
N21 T121 G96 M41 H21	X296.5	X-364
G X449.5 S550 M4	Z24	G Z18
Z305 F.5	G1 Z-7 F.35	N28 T128 X-270 S500
G1 Z296	N30 T130 G X270 H30	H28
G X453 Z300	Z-.5	Z3.5
G1 X402	X285	X-296
Z293	G1 X389 S550 F.4	G1 X-305 Z0 F.4
G X400 Z305	N27 T127 G X354 H27	X-389
N22 T122 X440.8 H22	Z40	G Z-.5
Z298 S660 F.5	S145	N29 X-295 T129 H29
G1 X440.7 Z296	G1 X378.75 F.4	Z22
Z287	Z35.5	G X-313.5 F.4
G X444.3 Z289	N26 T126 G X298 H26	G1 X-298 Z12
X473.8 Z292	Z-8	G Z310
G1 Z257	S600	N40 X-410
G X475 Z292	G1 Z23 F.5	S645 F.33
G1 X470	G X275	G1 Z108 B1 X-410.1
G1 Z256	N33 T125 G Z16.5 H25	X-400
G X472	X280	G Z310 G96 S550
Z281	G1 X357.5 S180 F.45	G53 X1760 Z770 T100
G1 X465.126 Z284	G X352 Z37	M19 S316
X440.8	X368	G4 X5
G3 X440 Z284.4 I0 K.4	G1 Z26.2	/N50 M81
G1 Z298	X365	M73
G X450	Z16.5	M26
N24 T124 X481 H24	X360	N60
Z255	G X364 Z18	M30
X475	M5	

**ANEXO VI - PROGRAMA CNC UTILIZADO NA USINAGEM DO TUBO DE
APOIO EM AMBIENTE FABRIL.**

Programa CNC utilizado na peça tubo de apoio.

```

26.01.2000
%7
(TUBO DE APOIO HSK-696 351 00 06)
(TORNO INDEX CNC GU-800-MBB 18812-C.C.158.4
(TORNEAR EM ACABAMENTO)
G G53 X550 Z 800 T M40
G59 Z739.215
G92 S1200
N4 G95 T404 S800 M4
(DESBASTAR)
G X91 Z-26 M8
G96 S300
G1 Z-32 F.5
X96.5 Z-33.588
Z-54
G2 X100.8 Z-69.157 I54.5 K
G Z4
G42 X78 Z2
G1 X83.6 Z-1 F.4
Z-4
X87.85 Z-5.155
Z-33 F.5
X94.5 Z-34.876
Z-54
G2 X100.8 Z-72.432 I55.5 K
G1 X104 Z-75
G G40 X120 Z-87
X108 Z-109 M8
G1 G42 X104.9 Z-112.576 F.15
G2 X102.838 Z-128.4 I13.35 K-8.819
G1 X107.3 Z132 F.2
Z-201 F.5
G2 X114 Z-217.024 I40 K
G X125
X118 Z-247
G1 X115 Z-249.362 F.4
G2 X115 Z-267 I13.35 K-8.819 F.15
G1 X116 Z-267.5 F.4
Z-282.5
X118
Z-283.8
G2 X128 Z-288.8 I5 K
G1 X137
G G40 X145
Z-273
G42 X125 Z-278.5
G1 X116 Z-280.5
Z-282.5
G2 X119.296 Z-288 I10 K
G2 X125.978 Z-289.8 I3.34 K2.2
G1 X132.5
X139 Z-293
G Z-395
X141.772 Z-398.003
G2 X132.4 Z-409.317 I11.314 K-11.314 F.2
G1 Z-419.427
G2 X138 Z-428.469 I16 K
G G40 X150
Z-595
X138 Z-599
G1 X129.4 Z-618 F.3
Z-622
G G40 X140
X135 Z-619.5
G1 X126.7
GX200
Z-50 M9
N2 G95 T202 S700 M4
(ACABAR DIAM. 100G6)
G X110 Z-64 M8
G96 S300
G42 X99 Z-66
G1 X99.978 Z-71 F.15
X99.978 Z-75
X99.978 Z-121
G G40 X120 Z-127
N20 G95 T220 S700 M4
(ACABAR DIAM. 110G6)
G X115 Z-144 M8
G96 S300
G42 X109.51 Z-202
G1 X109.85 Z-212 F.15
X109.97 Z-215
X109.97 Z-259
G G40 X150
N21 G95 T221 S700 M4
(ACABAR DIAM. 115G6)
G X125 Z-257 M8
G96 S300
G42 X115.09 Z-261
G1 Z-282.7 F.15
G2 X118.386 Z-288.2 I10 K F.1
G2 X125.068 Z-290 I3.34 K2.2
G1 X134
X138 Z-292
G G40 X250 M9
N1 G95 T101 S530 M4
(ACABAR DIAM. 133,225)
G X150 Z-419 M8
G96 S300
X133.2 Z-423
G1 X133.2 Z-619 F.2
G X150 M9
G53 X250 Z800 M5
N3 G95 T303 S600 M3
(ROSCAR M88X1,5)
G X91 Z4 M8
R20 1.5 R21 88 R22 4 R23 1 R24-.92
R25 .05 R26 0 R27 0 R28 4 R29 0
R31 88 R32-31 L97
G X200 M9
G53 X550 Z800 T M5
N30

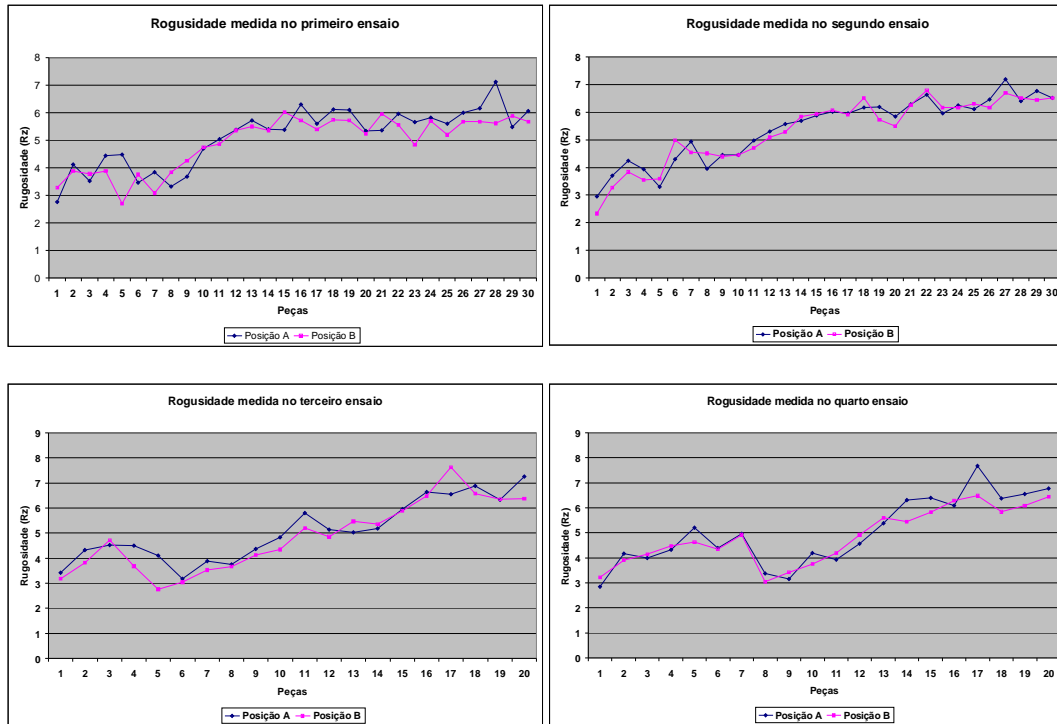
```

**ANEXO VII - RUGOSIDADES MEDIDAS NA USINAGEM DO TUBO DE
APOIO.**

Rugosidade do tubo de apoio.

Rugosidade do tubo de apoio (Rz)								
Vc :	300		300		360		360	
f:	0,15		0,15		0,15		0,15	
Ensaio :	1		2		3		4	
Peça:	Posição:		Posição:		Posição:		Posição:	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1	2,76	3,29	2,94	2,33	3,42	3,18	2,84	3,23
2	4,11	3,88	3,71	3,28	4,33	3,82	4,16	3,91
3	3,52	3,78	4,24	3,84	4,53	4,72	3,99	4,14
4	4,44	3,89	3,94	3,54	4,51	3,68	4,32	4,48
5	4,49	2,71	3,3	3,58	4,11	2,76	5,21	4,64
6	3,46	3,77	4,3	4,99	3,18	3,04	4,38	4,35
7	3,84	3,08	4,93	4,54	3,88	3,54	4,96	4,92
8	3,32	3,84	3,96	4,51	3,76	3,67	3,37	3,04
9	3,68	4,27	4,45	4,4	4,36	4,12	3,15	3,42
10	4,71	4,74	4,45	4,46	4,84	4,34	4,2	3,74
11	5,04	4,86	4,97	4,71	5,81	5,21	3,93	4,2
12	5,38	5,37	5,3	5,09	5,14	4,86	4,56	4,93
13	5,73	5,5	5,58	5,29	5,02	5,46	5,38	5,61
14	5,4	5,37	5,68	5,84	5,18	5,36	6,3	5,44
15	5,38	6,03	5,88	5,94	5,96	5,89	6,39	5,83
16	6,3	5,72	6,02	6,07	6,65	6,49	6,09	6,28
17	5,61	5,4	5,95	5,92	6,56	7,63	7,68	6,48
18	6,13	5,75	6,17	6,52	6,89	6,57	6,38	5,85
19	6,1	5,73	6,19	5,72	6,33	6,35	6,56	6,08
20	5,35	5,25	5,84	5,49	7,26	6,38	6,78	6,44
21	5,37	5,97	6,28	6,27				
22	5,96	5,56	6,64	6,78				
23	5,66	4,84	5,96	6,16				
24	5,83	5,7	6,24	6,16				
25	5,61	5,21	6,11	6,3				
26	6	5,68	6,45	6,17				
27	6,17	5,68	7,2	6,69				
28	7,12	5,63	6,4	6,52				
29	5,49	5,89	6,76	6,44				
30	6,07	5,68	6,52	6,52				
Total :	29		27		17		17	

Evolução da rugosidade.



Observação: Observando-se os gráficos acima, pode-se perceber que a rugosidade superficial das peças apresentam a mesma tendência. Estas rugosidades não foram consideradas no decreto do fim de vida da ferramenta.

ANEXO VIII - TAXA DE CÂMBIO

Taxa de câmbio do US Dólar em maio de 2000.

US\$ 1,00 = R\$ 1,85.

Fonte: Banco do Brasil S.A.

ANEXO IX – FLUXOGRAMA DE CHECAGEM AMPLIADO

(Figura 15 do Trabalho)

