

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA A
INTEGRAÇÃO DE DADOS DE PROJETO, FABRICAÇÃO E MEDIÇÃO DE PEÇAS
TORNEADAS COM ÊNFASE NA SÍNTESE DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS
DETERMINÍSTICAS

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ EDUARDO FERREIRA DE OLIVEIRA

RECIFE, JULHO DE 2009

O48d

Oliveira, José Eduardo Ferreira de.

Desenvolvimento de um programa computacional para a integração de dados de projeto, fabricação e medição de peças torneadas com ênfase na síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas / José Eduardo Ferreira de Oliveira - Recife: O Autor, 2009.

xxxvi, 242 folhas, il : figs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009.

Inclui Bibliografia e Anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2. Programa Computacional. 3. Síntese de Tolerância. 4. Usinagem. 5. Medição Dimensional. I. Título.

UFPE

621

CDD (22. ed.)

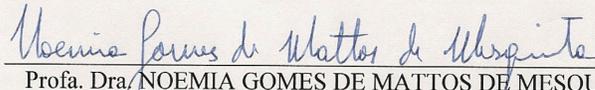
BCTG/2009-160

“DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA A INTEGRAÇÃO DE DADOS DE PROJETO, FABRICAÇÃO E MEDIÇÃO DE PEÇAS TORNEADAS COM ÊNFASE NA SÍNTESE DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS DETERMINÍSTICAS”.

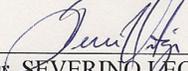
JOSÉ EDUARDO FERREIRA DE OLIVEIRA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

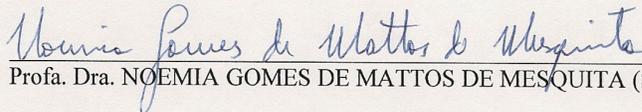


Prof. Dra. NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA
ORIENTADORA/PRESIDENTE

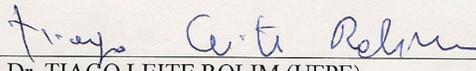


Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO CURSO

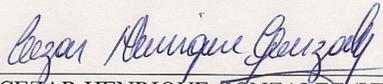
BANCA EXAMINADORA:



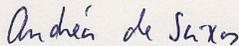
Prof. Dra. NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA (SENAI-PE)



Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM (UFPE)



Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZÁLEZ (UFPE)



Prof. Dra. ANDRÉA DE SEIXAS (UFPE)



Prof. Dr. ANDRÉ ROBERTO DE SCUSA (IF-SC)

Dedico este trabalho

Ao meu filho LEONARDO FERREIRA DE OLIVEIRA por todo amor, carinho, alegria e
por me fazer diariamente feliz.

À minha esposa MARIA AUXILIADORA FERREIRA DE OLIVEIRA, minha alma
gêmea, por todo amor, carinho, dedicação e companheirismo, compartilhando comigo uma
só vida.

Aos meus pais, VALDEMAR MATIAS DE OLIVEIRA e ELISABETE FERREIRA DE
OLIVEIRA por tudo o que me ensinam e por todo amor e dedicação em toda minha vida.

À professora NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA pela expressiva
contribuição à minha formação profissional na graduação, iniciação científica, mestrado e
doutorado.

Projeto de Engenharia é uma atividade orientada para o atendimento das necessidades humanas, principalmente daquelas que podem ser satisfeitas por fatores tecnológicos de nossa cultura. A satisfação dessas necessidades não é peculiar ao projeto de engenharia; pelo contrário; ela é comum a muitas atividades humanas. Uma das principais características do meio social moderno é a necessidade de ganhar-se a vida servindo à causa do bem comum.

Morris Asimow

Agradecimentos

A Deus por ter-me dado forças para não desistir deste sonho, perante tantos obstáculos que enfrentei.

À minha esposa Dôra por sua ajuda e apoio para que eu concluísse este trabalho, pela ajuda na revisão do trabalho impresso e por se privar de tantos momentos de felicidade em prol do meu trabalho.

Aos meus pais, Valdemar e Elisabete, por terem sempre me motivado a estudar mais e mais, acreditando que a educação é o bem mais precioso que alguém pode ter.

Ao meu filho Leonardo por ter-se privado da minha companhia por muitas vezes, em função dos meus estudos, e por toda sua ajuda na impressão das cópias desta tese.

À minha orientadora, Professora Noemia Mesquita por ter sempre me encorajado há um dia fazer doutorado; pelas críticas que foram fundamentais para a estruturação e desenvolvimento deste trabalho; por ter sempre me ajudado a resolver os problemas técnicos e, sobretudo, por ter continuado a orientar este trabalho mesmo estando aposentada.

A minha irmã Elisângela por toda ajuda na solução de vários problemas do dia a dia durante o período do doutorado.

Ao amigo e irmão Augusto Gomes Ferreira por toda sua ajuda durante todo o período do doutorado.

Ao Professor Tiago Rolim por toda ajuda e disposição na fabricação das peças, privando-se do seu tempo livre para ajudar-me, e pela valiosa contribuição dada a este trabalho no exame de qualificação.

Aos Professores Andréa de Seixas e André Roberto de Souza pelas críticas e

sugestões que muito contribuíram para a qualidade deste trabalho.

Ao professores do IFPE, Mauro Milanez, Nelson Gonçalves, Taquarira Falcão, Clovis Lacerda, Paulo Chagas, Gustavo Koury, Saulo Bonifácio e George Marinho por toda ajuda na confecção dos corpos de prova para os ensaios de caracterização da matéria-prima e pelas discussões tão proveitosas.

Aos Engenheiros do Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Paulo Cesar Botelho e Claudio Sales pela ajuda e viabilização da realização dos ensaios de dureza.

Ao professor do CEFET-RJ, Luiz Roberto Oliveira da Silva por toda ajuda e por viabilizar a realização das medições dimensionais na PUC-Rio.

Ao Professor da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Gregório Muñoz por toda ajuda e disposição na realização das medições dimensionais desta tese.

Aos Técnicos do Laboratório de Metrologia Dimensional da PUC-Rio, Luiz Paulo Barcellos e Anderson Viana Neves por toda ajuda na realização das medições dimensionais.

Ao colega de doutorado Carlos Augusto, pela ajuda na realização dos ensaios de tração.

Ao Professor Dário Ferraz e ao torneiro Ivson pela ajuda na fabricação das peças no torno convencional.

Ao Professor do CEFET-RJ, Reinaldo do Nascimento por toda ajuda na interpretação dos dados referentes ao ensaio de tração e pela ajuda com a disciplina Ensaio de Materiais durante a fase final do doutorado.

Aos Professores do CEFET-RJ, Maurício Saldanha e Mariane Amêndola pela ajuda com a disciplina Metrologia durante a fase final do doutorado.

Aos colegas de turma, Alerço dos Prazeres, Euclides Pina e Inaldo Amorim pelos

momentos bons e sofridos que compartilhamos.

Aos Professores da UFPE, Cesar Gonzalez, Yogendra Prasad Yadava, Oscar Olímpio e Severino Urtiga por toda ajuda durante todo o doutorado.

Ao Engenheiro do INMETRO, Paulo Couto, pela ajuda a dúvidas relacionadas com o tema incerteza de medição.

Às instituições: Universidade Federal de Pernambuco, Instituto Federal de Pernambuco, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e à Simisa Simioni Metalúrgica LTDA.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma com este trabalho, mas que não foram nominalmente citados.

Sumário

Lista de Símbolos	xii
Lista de Figuras	xxii
Lista de Tabelas	xxix
Lista de Siglas	xxxii
Resumo	xxxiii
Abstract	xxxv
1. Introdução	1
1.1 Objetivos Gerais	7
1.2 Objetivos Específicos	7
1.3 Estruturação	7
2. Fundamentação Teórica	9
2.1 Tolerâncias Dimensionais	9
2.1.1 Critério de Seleção de Tolerâncias para Peças Intercambiáveis	14
2.1.2 Critério de Seleção de Ajustes para Peças Intercambiáveis	19
2.2 Tolerâncias Geométricas	27
2.3 O Processo de Fabricação por Torneamento	32
2.3.1 Vida da Ferramenta	33
2.3.2 Força de Corte Segundo Kienzle	37
2.3.3 Equações de Vida da Ferramenta	38
2.3.4 Determinação do Tempo Total de Fabricação por Peça	39
2.3.5 Determinação do Custo Total de Fabricação por Peça	40
2.4 Aspectos Gerais da Medição Dimensional	42
2.4.1 Modelo para a Determinação da Incerteza de Medição	

Baseado no ISO GUM	43
2.4.1.1 Incerteza Tipo A	46
2.4.1.2 Distribuição Retangular	47
2.4.1.3 Distribuição Triangular	49
2.4.1.4 Determinação da Incerteza Padronizada Combinada (u_c)	51
2.4.1.5 Determinação da Incerteza de Medição Expandida (U)	52
2.4.1.6 Determinação do Fator de Abrangência (k)	52
2.4.1.7 Determinação do Número de Graus de Liberdade Efetivos (ν_{eff})	55
2.5 Modelos Computacionais de Suporte ao Projeto	55
2.6 Modelo Geral de Programação Linear	56
2.7 Modelos Matemáticos Existentes para a Síntese de Tolerâncias Dimensionais Determinísticas	57
3. Desenvolvimento do Sistema Computacional SGF – Estruturação do Programa	61
3.1 Módulo de Toleranciamento Dimensional	62
3.1.1 Determinação da Tolerância Dimensional em Função da Precisão da Máquina-Ferramenta	63
3.1.2 Determinação da Tolerância Dimensional em Função do Acabamento Superficial	66
3.1.3 Determinação da Tolerância Dimensional de Peças Acopladas, Considerando-se o Sistema Furo Base	71
3.1.4 Determinação da Tolerância Dimensional de Peças Acopladas, Considerando-se o Sistema Eixo Base	74
3.1.5 Determinação da Tolerância Dimensional para a Execução Grosseira de Peças Isoladas	75
3.2 Módulo de Toleranciamento Geométrico	76
3.3 Módulo de Fabricação	85
3.3.1 Avanço Máximo Permitido em Função do Acabamento Superficial	89
3.3.2 Avanço Máximo Permitido em Função da Espessura de Corte	91

3.3.3 Determinação da Profundidade de Corte Máxima Permitida	93
3.3.4 Determinação do Tempo de Vida da Ferramenta por Aresta	96
3.3.5 A Operação de Faceamento	105
3.3.5.1 Determinação da Rotação de Mínimo Custo	105
3.3.5.2 Determinação da Rotação de Máxima Produção	109
3.4 Módulo de Medição	110
3.4.1 Seleção do Sistema de Medição	111
3.4.2 Análise dos Dados de Medição	116
3.4.3 Sistemática para a Determinação da Incerteza de Medição	
Expandida para os Sistemas de Medição Utilizados pelo SGF	119
3.4.4 Expressão do Resultado da Medição	122
3.4.5 Definição do Intervalo de Conformidade	122
3.5 Módulo Educativo	126
3.6 Aspectos Ligados à Segurança do Programa	131
3.7 Fluxograma Geral do SGF	131
4. Modelo Matemático Proposto para a Síntese de Tolerâncias Dimensionais Determinísticas	133
4.1 Definição do Modelo Matemático Proposto para a Síntese de Tolerâncias Dimensionais Determinísticas	133
4.2 Aplicação e Validação Experimental do Modelo Matemático Proposto	142
4.2.1 Caracterização da Matéria-Prima	143
4.2.1.1 Composição Química	145
4.2.1.2 Ensaio de Dureza	145
4.2.1.3 Ensaio de Tração	147
4.2.2 Ensaio de Usinagem	152
4.2.2.1 Fabricação de Peças Utilizando o Torno ROMI Centur – 30D – Torno 1	153
4.2.2.2 Fabricação de Peças Utilizando o Torno Convencional Nardini Mascote – Torno 2	160
4.2.3 Medição das Peças	165
4.2.3.1 Medição da Rugosidade	165

4.2.3.2 Medição dos Comprimentos	173
4.2.3.3 Medição dos Diâmetros	178
4.2.4 Aplicação do Modelo Matemático Proposto	182
5. Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros	188
Referências Bibliográficas	192
Anexo A - Valores do Fator de Abrangência k para a Distribuição t-Student	203
Anexo B - Manual do Usuário do SGF	205
Anexo C - Algumas Aplicações Típicas do Parâmetro de Rugosidade Ra Utilizadas em Projetos de Peças Mecânicas	240
Anexo D - Resultados do Ensaio para a Determinação da Composição Química do Material	241
Anexo E - Dados de Saída do Programa de programação linear LINDO referentes à síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas no projeto das peças fabricadas	242

Lista de Símbolos

$1 - z$		Coeficiente da fórmula de Kienzle
$A_{S(n)}$	μm	Limite superior do furo considerando-se o grau de tolerância padrão IT _n
μ	mm	Média aritmética da população
$\mu(x_i)$		Abcissa do ponto médio da distribuição retangular ou da triangular, ou seja, a expectância da média destas distribuições
α	graus	Ângulo de folga
χ	graus	Ângulo de posição da ferramenta
λ	mm	Incerteza padronizada considerando-se a distribuição retangular ou a triangular
σ	mm	Desvio padrão da população
η		Rendimento da máquina-ferramenta
θ	mm	Desvio de um valor medido em relação ao valor médio verdadeiro
$\sigma^2(y_i)$	mm^2	Variância de y_i
ν_{eff}		Número de graus de liberdade efetivos
ν_i		Número de graus de liberdade associado à i-ésima fonte de incerteza de medição
π		Constante matemática aproximada por 3,14159
A	mm	Metade da distância entre os limites: superior (a_+) e inferior (a_-) de uma dada grandeza de influência
a		Número de escalonamentos do eixo usinado
a_-	mm	Limite inferior para uma dada grandeza de influência
a_+	mm	Limite superior para uma dada grandeza de influência
a_1		Constante
a_{11}	R\$	Custo direto para a geração da superfície 1, utilizando-se a máquina-ferramenta 1
a_{12}	R\$	Custo direto para a geração da superfície 1, utilizando-se a máquina-ferramenta 2
a_{21}	R\$	Custo direto para a geração da superfície 2, utilizando-se a máquina-ferramenta 1

a_{22}	R\$	Custo direto para a geração da superfície 2, utilizando-se a máquina-ferramenta 2
a_{31}	R\$	Custo direto para a geração da superfície 3, utilizando-se a máquina-ferramenta 1
a_{32}	R\$	Custo direto para a geração da superfície 3, utilizando-se a máquina-ferramenta 2
A_c	R\$	Valor de perda em um ou outro limite de especificação, ou seja, representa o custo por se afastar do valor alvo (valor nominal) para o limite de especificação inferior ou o limite de especificação superior
A_g	μm^2	Área do retângulo de altura igual a R_a e comprimento igual ao comprimento de medição
a_{mn}		Coefficientes técnicos
a_{ij}	R\$ ou min	Custo ou tempo total para a geração da dimensão “i”, utilizando-se a máquina-ferramenta ou o processo “j”
a_p	mm	Profundidade de corte
A_p	μm^2	Área de picos
A_v	μm^2	Área de vales
B	mm	Largura de corte
b_1	mm	Afastamento da tolerância funcional da dimensão 1
b_1^*		Constante
b_2	mm	Afastamento da tolerância funcional da dimensão 2
b_3	mm	Afastamento da tolerância funcional da dimensão 3
b_i	mm	Afastamento das tolerâncias funcionais de cada dimensão específica
b_j		Constantes do lado direito das equações
C		Parâmetro da fórmula expandida de Taylor
C_1	R\$/h	Constante de custo independente da velocidade de corte por tempo
c_1'		Coefficiente de sensibilidade associado à primeira grandeza componente
C_2	R\$/h	Soma das despesas totais de mão de obra e salário máquina
c_2'		Coefficiente de sensibilidade associado à segunda grandeza

		componente
C_3	R\$/h	Constante do custo relativo à ferramenta
c_{ij}	R\$	Custo de fabricação do processo “j” usado para produzir a dimensão “i”
C_{ij}	R\$	Custo do componente “i” com a alternativa “j” do processo
c_j		Coefficientes da função objetivo
c_n'		Coefficiente de sensibilidade associado à n-ésima grandeza componente
d	mm	Diâmetro do comprimento paralelo do corpo de prova cilíndrico
D	mm	Dimensão nominal
D'	mm	Média geométrica
D^*	mm	Diâmetro externo do corpo de prova
d^*	mm	Diâmetro instantâneo do eixo, tomado em um ponto do percurso de avanço
d_f	mm	Diâmetro final
d_i	mm	Diâmetro inicial
d_m	mm	Diâmetro médio
e		Constante matemática aproximada por 2,71828
E		Parâmetro da fórmula expandida de Taylor
E_e	μm	Erro de exatidão da máquina de medição por coordenadas
EF		Elemento funcional
E_i	mm	Afastamento inferior do furo
e_i	mm	Afastamento inferior do eixo
e_{ij}	mm	Incerteza expandida oriunda do sistema de medição ou da máquina-ferramenta
E_M	mm	Erro de medição
E_s	μm	Afastamento superior do furo
e_s	μm	Afastamento superior do eixo
E_{SI}	mm	Erro sistemático
f	mm/volta	Avanço
F		Parâmetro da fórmula expandida de Taylor

f^*		Função que descreve a grandeza medida
F_c	kgf	Força de corte
F_f	kgf	Força de avanço
F_p	kgf	Força passiva
F_u	kgf	Força de usinagem
f_{\max}	mm/volta	Avanço máximo permitido
$f(x)$		Função de densidade da probabilidade da distribuição normal
$f(x)'$		Função de densidade da probabilidade da distribuição t-Student
G		Parâmetro da fórmula expandida de Taylor
$G(\theta)$		Distribuição de probabilidades para os erros estatísticos
g_1	mm	Valor inferior do grupo de dimensão
g_2	mm	Valor superior do grupo de dimensão
GF		Grupo funcional
GF_b		Fator limitante da largura de corte
h	mm	Espessura de corte
H		Parâmetro da fórmula expandida de Taylor
i	μm	Fator de tolerância padrão
i_A	mm	Incerteza estatística (tipo A)
i_H	mm	Incerteza padrão herdada do sistema de medição
i_m	μm	Precisão da máquina-ferramenta
i_p	mm	Incerteza expandida do sistema de medição
i_r	mm	Incerteza referente à resolução do sistema de medição
IT		Grau de tolerância padrão
IT_n		N-ésimo grau de tolerância padrão
K	min	Vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1 m/min
k		Fator de abrangência
k^*	R\$/mm ²	Coefficiente de perda
K_c	kgf/mm ²	Pressão específica de corte
K_{cq}	R\$	Custo de controle de qualidade
K_{fa}	R\$	Custo por afiação da ferramenta

K_{ft}	R\$	Custo da ferramenta por vida T
K_{if}	R\$	Custo indireto de fabricação que independe das condições de usinagem
K_m	R\$	Custo da matéria-prima
K_{mi}	R\$	Custo indireto da matéria-prima
k_p	mm	Fator de abrangência relacionado à incerteza expandida do sistema de medição
K_p	R\$	Custo total de fabricação por peça
K_{pfac}	R\$	Custo de faceamento
K_{pi}	R\$	Custo total de cilindramento por peça, considerando-se a usinagem com diferentes passes
K_{s1}	kgf/mm ²	Pressão específica de corte para uma de secção de corte de 1x1 mm ²
K_{uf}	R\$	Custo das ferramentas
K_{um}	R\$	Custo da máquina (juros, depreciação, manutenção, espaço ocupado, energia consumida)
K_{us}	R\$	Custo de mão de obra de usinagem
K_v	R\$	Custo proporcional às variações de custo de operações anteriores ou posteriores
L		Função objetivo
L_0	mm	Comprimento da medida original
L_1	mm	Valor medido na máquina de medição por coordenadas
L_c	mm	Comprimento paralelo
l_e	mm	Comprimento de amostragem
l_f	mm	Comprimento de avanço
l_m	mm	Comprimento de medição
m'		Número de tolerâncias dimensionais
m''		Número de dimensões que serão trabalhadas na peça
N		Número total de fontes de incerteza analisadas
n	rpm	Rotação
n_0	rpm	Rotação de mínimo custo de faceamento

n'		Número de processos utilizáveis para produzir a dimensão “i”
n''		Número de máquinas-ferramenta ou processos possíveis de serem utilizados para a geração das dimensões da peça
n_a		Número de afiações da ferramenta
n_f		Número de vidas da ferramenta
\overline{nf}		Valor médio para o número de resultados, tais que o módulo do desvio médio verdadeiro seja maior que o limite de rejeição de Chauvenet
n_{fp}		Vida média do porta-ferramenta, em quantidade de fios de corte, até sua possível inutilização
n_{mxp}	rpm	Rotação de máxima produção de faceamento
n_s		Número de fios de corte do inserto
P_c	Cv	Potência de corte
$p(x_i)$		Função de probabilidade para a distribuição retangular ou para a triangular
$p_1(x)$	mm	Função de distribuição de probabilidade para a distribuição triangular, considerando-se o intervalo de “0” até “a”
$p_2(x)$	mm	Função de distribuição de probabilidade para a distribuição triangular, considerando-se o intervalo de “a” até “2a”
P_m	Cv	Potência do motor
p_u	mm	Profundidade de corte utilizada
R	mm	Resultado de uma medição
r_ε	mm	Raio de arredondamento da ponta da ferramenta de corte
r^*		Variável utilizada para aplicação do Critério de Chauvenet
R_a	μm	Rugosidade Média Aritmética
R_c		Variável utilizada para aplicação do Critério de Chauvenet
RC	mm	Resultado corrigido
RF		Requisito funcional
R_t	μm	Profundidade de Rugosidade
R_{ZDIN}	μm	Profundidade Média de Rugosidade
R_{Zi}	μm	Profundidade isolada de rugosidade

R_y	μm	Altura máxima do perfil
S	mm^2	Área da secção de corte
$S(x_i)$	mm	Desvio padrão
$S^2(x_i)$	mm^2	Variância experimental
$S^2(\bar{x})$	mm^2	Variância da média
S_h	R\$/hora	Salário homem mais sobretaxas
S_m	R\$/hora	Salário máquina
t	μm	Tolerância dimensional em função do acabamento superficial
T	min	Tempo de vida da ferramenta por aresta
t'	mm	Tolerância dimensional em função da velocidade de corte e do tempo de corte
t_0	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT0
t_{01}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT01
t_{02}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT02
t_{03}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT03
t_{04}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT04
t_{05}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT05
t_{06}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão o IT06
t_{07}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT07
t_{08}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT08
t_{09}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT09
t_{10}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT10
t_{11}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT11
t_{12}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT12
t_{13}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT13
t_{14}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT14
t_{15}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT15
t_{16}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT16
t_{17}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT17

t_{18}	μm	Tolerância dimensional para o grau de tolerância padrão IT18
t_a	min	Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta
t_c	min	Tempo de corte
T_f	mm	Afastamento da tolerância funcional limite ou tolerância funcional total
t_{fa}	min	Tempo de afiação da ferramenta
t_{fac}	min	Tempo de faceamento
t_{ft}	min	Tempo de troca da ferramenta
T_{ij}	mm	Varição normal três sigma do processo "j" usado para produzir a dimensão "i"
T_k	mm	Tolerância da dimensão total da respectiva cadeia dimensional
t_n	μm	Tolerância do grau de tolerância padrão IT _n
t_{n-1}	μm	Tolerância do grau de tolerância padrão IT _{n-1}
t_p	min	Tempo de preparação da máquina-ferramenta
t_s	min	Tempo secundário de usinagem (colocação e fixação da peça em bruto ou semi-acabada, inspeção e retirada da peça acabada)
t_t	min	Tempo total de fabricação por peça
T_w	mm	Tolerância da dimensão total da cadeia dimensional
U	mm	Incerteza expandida de medição
$u(y_i)$	mm	I-ésima fonte de incerteza padrão
u_c	mm	Incerteza padronizada combinada
V	m/min	Velocidade de corte
V_0	m/min	Velocidade de mínimo custo
VB	mm	Desgaste médio de flanco
V_e	m/min	Velocidade efetiva de corte
V_f	mm/min	Velocidade de avanço
V_{ff}	R\$	Valor final da ferramenta
V_{fi}	R\$	Valor inicial de aquisição da ferramenta
VK	mm	Desgaste qualquer da ferramenta (por exemplo, o desgaste de

		flanco)
V_{mxp}	m/min	Velocidade de máxima produção
V_{si}	R\$	Custo de aquisição do porta-ferramentas
VV	mm	Valor verdadeiro de um mensurando
VVC	mm	Valor verdadeiro convencional
W	mm	Grandeza resultante
w		Número de passes
w_{ij}	mm	Valor nominal do componente “i” com a alternativa “j”
X		Expoente da fórmula de Taylor simples
\bar{X}	mm	Média aritmética
x_i	mm	I-ésimo valor da medição efetuada
x^*		Variável aleatória contínua
x_{ij}		1 se o processo “j” é selecionado para a dimensão “i”, e zero caso contrário
x_j		Variáveis de decisão
x_{mv}	mm	Valor médio verdadeiro
y	R\$	Função objetivo que representa a função custo direto de fabricação
Y	μm	Ordenada do perfil
Y_i	μm	Ordenada do perfil discretizado
y^*	R\$ ou min	Função objetivo que representa o custo direto ou o tempo total para se fabricar a peça
y_1	mm	Primeira fonte de incerteza da medição
y_2	mm	Segunda fonte de incerteza da medição
y_{ij}		1 (um) se a máquina-ferramenta ou o processo “j” for selecionado para gerar a dimensão “i” e 0 (zero), caso contrário
y_n	mm	N-ésima grandeza componente com sua respectiva distribuição de probabilidade
Z		Cada um dos valores medidos da função de densidade de probabilidade da distribuição t-Student
z		Quantidade de peças fabricadas
z^*		Variável normal padronizada
z_i	μm	Rugosidade parcial

Z_i	mm	Valor do afastamento da tolerância funcional da dimensão “i”
Z_{ij}		Assume os valores zero ou um
τ	mm	Valor preferível do conjunto

Lista de Figuras

Figura 1.1	Estrutura básica de um sistema de especificação geométrica de produto	2
Figura 1.2	Conceito geral de toleranciamento GPS	3
Figura 1.3	Etapas ligadas à geração de um projeto	4
Figura 1.4	Fatores que exercem influência nas dimensões de peças fabricadas por usinagem	4
Figura 2.1	Relação custo-tolerância	10
Figura 2.2	Estruturação da especificação sistemática de projeto	13
Figura 2.3	Etapas para a determinação da tolerância dimensional	15
Figura 2.4	Grau de tolerância padrão (IT)	16
Figura 2.5	Sistema furo-eixo destacando a dimensão nominal, linha zero, campo de tolerância e afastamentos	19
Figura 2.6	Posições dos campos de tolerância	20
Figura 2.7	Apresentação do processo de torneamento cilíndrico externo	33
Figura 2.8	Desenho esquemático do desgaste de flanco e do desgaste de cratera	34
Figura 2.9	Desenho apresentando a relação entre o desgaste de flanco (VB) e a tolerância dimensional (t')	35
Figura 2.10	Representação gráfica do erro de medição	43
Figura 2.11	Diagrama espinha de peixe para as variáveis de influência no resultado de uma medição	44
Figura 2.12	Fluxograma apresentando as etapas para a expressão da incerteza de medição segundo a metodologia do ISO GUM	45
Figura 2.13	Distribuição retangular	47
Figura 2.14	Distribuição triangular	49
Figura 2.15	Gráfico esquemático da distribuição normal padronizada	53
Figura 3.1	Etapas do SGF	62
Figura 3.2	Possibilidades do módulo de toleranciamento dimensional	63
Figura 3.3	Fluxograma apresentando a metodologia para a determinação da tolerância dimensional em função da precisão da máquina-	

	ferramenta	64
Figura 3.4	Tela do SGF apresentando a determinação da tolerância dimensional em função dos erros da máquina-ferramenta	66
Figura 3.5	Incerteza na medição do tamanho em relação ao parâmetro de rugosidade para uma superfície cilíndrica	66
Figura 3.6	Perfil de rugosidade dividido em cinco regiões para a determinação do parâmetro R_{ZDIN}	67
Figura 3.7	Perfil de rugosidade destacando o parâmetro R_a	68
Figura 3.8	Tela do SGF apresentando a determinação da tolerância dimensional em função do parâmetro de rugosidade R_{ZDIN} para uma dimensão nominal de 20 mm	69
Figura 3.9	Tela do SGF apresentando a determinação da tolerância dimensional em função do parâmetro de rugosidade R_a para uma dimensão nominal de 20 mm	70
Figura 3.10	Etapas realizadas pelo SGF para a determinação da tolerância dimensional em função do acabamento superficial	70
Figura 3.11	Apresentação da tela do SGF para a determinação das tolerâncias de peças acopladas através do sistema furo base	71
Figura 3.12	Algoritmo do SGF para o sistema furo base	73
Figura 3.13	Apresentação da tela do SGF para a determinação das tolerâncias de peças acopladas através do sistema eixo base	74
Figura 3.14	Apresentação da tela do SGF referente à determinação das tolerâncias dimensionais de execução grosseira de peças isoladas	76
Figura 3.15	Opção adicional do SGF para determinação da tolerância dimensional	76
Figura 3.16	Tela inicial do SGF	77
Figura 3.17	Tela principal do módulo de toleranciamento geométrico do SGF	77
Figura 3.18	Tela do SGF para a determinação da tolerância de cilindridade	78
Figura 3.19	Tela do SGF para a determinação da tolerância de forma cilíndrica com variação de dimensões	78
Figura 3.20	Tela do SGF para a determinação da tolerância de circularidade com variação de dimensões	79
Figura 3.21	Tela do SGF para a determinação da tolerância de planeza	79

Figura 3.22	Tela do SGF para a determinação da tolerância de planeza com variação de dimensões	80
Figura 3.23	Tela do SGF para a determinação da tolerância de paralelismo entre duas superfícies planas	80
Figura 3.24	Tela do SGF para a determinação da tolerância de paralelismo com variação de dimensões	81
Figura 3.25	Tela do SGF para a determinação da tolerância de paralelismo de eixos de superfícies de revolução com furação por traçagem	81
Figura 3.26	Tela do SGF para a determinação da tolerância de perpendicularidade da linha de centro de furos com relação a uma superfície plana de referência	82
Figura 3.27	Tela do SGF para a determinação da tolerância de perpendicularidade de eixos ou furos com relação a um plano de referência	82
Figura 3.28	Tela do SGF para a determinação da tolerância de batimento radial para peças presas em placas	83
Figura 3.29	Tela do SGF para a determinação da tolerância de batimento radial com variação de dimensões	83
Figura 3.30	Tela do SGF para a determinação da tolerância de batimento radial com a peça entre centros	84
Figura 3.31	Parte do módulo educativo do SGF sobre batimento radial	84
Figura 3.32	Fluxograma do módulo de fabricação do SGF	86
Figura 3.33	Tela dos dados iniciais do programa destacando a explicação de como o valor do rendimento deverá ser preenchido	87
Figura 3.34	Parâmetros relacionados à ferramenta de corte	88
Figura 3.35	Tela do programa referente ao desgaste de flanco	89
Figura 3.36	Perfil de rugosidade destacando o parâmetro R_y	90
Figura 3.37	Interface do SGF com o usuário para a determinação do avanço máximo permissível	93
Figura 3.38	Tela do SGF para inserção dos parâmetros da Fórmula de Taylor Expandida	97
Figura 3.39	Tela de acesso ao banco de dados da Fórmula de Taylor Expandida do SGF	97

Figura 3.40	Fluxograma do módulo de fabricação do SGF	98
Figura 3.41	Continuação do fluxograma do módulo de fabricação do SGF	99
Figura 3.42	Continuação do fluxograma do módulo de fabricação do SGF	100
Figura 3.43	Continuação do fluxograma do módulo de fabricação do SGF	101
Figura 3.44	Continuação do fluxograma do módulo de fabricação do SGF	102
Figura 3.45	Continuação do fluxograma do módulo de fabricação do SGF	103
Figura 3.46	Peça em perfil destacando o percurso de avanço (l_f) referente ao faceamento	105
Figura 3.47	Etapas que compõem o módulo de medição do SGF	111
Figura 3.48	Tela principal do módulo de medição do SGF	113
Figura 3.49	Fluxograma do SGF apresentando o algoritmo para a verificação de aptidão do sistema de medição ao processo	115
Figura 3.50	Tela do SGF referente à inserção de dados	116
Figura 3.51	Fluxograma descrevendo o algoritmo do SGF para aplicação do critério de Chauvenet	117
Figura 3.52	Medição externa com um paquímetro analógico	120
Figura 3.53	Estabelecimento das zonas de conformidade e não conformidade de acordo com a UNE-EN ISO 14253-1	123
Figura 3.54	Tela do SGF referente à determinação da zona de conformidade	125
Figura 3.55	Fluxograma do SGF descrevendo o algoritmo para o estabelecimento da zona de conformidade	125
Figura 3.56	Tela principal do módulo educativo do SGF	126
Figura 3.57	Sub-tópicos componentes do tópico “Estudo das tolerâncias”	127
Figura 3.58	Exemplos da forma de representação das tolerâncias geométricas	128
Figura 3.59	Forma de representação dos elementos de referência em tolerâncias geométricas	128
Figura 3.60	Forma de indicação da tolerância de posição apresentada pelo SGF	129
Figura 3.61	Exemplo de aplicação de tolerâncias geométricas apresentado pelo SGF	130
Figura 3.62	Apresentação da tela do SGF mostrando o conceito de valor verdadeiro (de uma grandeza)	130
Figura 3.63	Tela do SGF destacando a solicitação da senha de acesso ao	

	mesmo	131
Figura 3.64	Fluxograma geral do SGF	132
Figura 4.1	Etapas para a estruturação do modelo matemático proposto para síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas	134
Figura 4.2	Eixo com a cotagem funcional	137
Figura 4.3	Representação dos parâmetros necessários à síntese de tolerâncias determinísticas	137
Figura 4.4	Tolerâncias após a otimização via programação linear	141
Figura 4.5	Ponta de eixo com suas características funcionais	142
Figura 4.6	Barra cilíndrica sendo cortada na serra alternativa do IFPE	144
Figura 4.7	Corpos de prova destinados aos ensaios de caracterização do material e confecção das peças	144
Figura 4.8	Durômetro utilizado no ensaio de dureza e ao lado, o corpo de prova sendo ensaiado	146
Figura 4.9	Destaque da impressão das calotas esféricas obtidas no ensaio de dureza	146
Figura 4.10	Dimensões da peça bruta para a confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração	148
Figura 4.11	Dimensões do corpo de prova final	148
Figura 4.12	Corpo de prova utilizado no ensaio de tração	149
Figura 4.13	Visão geral da máquina de ensaio de tração do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE	149
Figura 4.14	Foto destacando a fixação do extensômetro no corpo de prova a ser ensaiado	150
Figura 4.15	Curva tensão x deformação, obtida do ensaio de tração no corpo de prova 1	150
Figura 4.16	Curva tensão x deformação, obtida do ensaio de tração no corpo de prova 2	151
Figura 4.17	Torno CNC utilizado para a fabricação de três peças dos experimentos	153
Figura 4.18	Ferramenta de corte e porta-ferramenta utilizados no torno CNC	154
Figura 4.19	Fluxograma de execução do eixo e esquema da peça bruta e acabada	157

Figura 4.20	Tela do simulador apresentando a peça acabada	158
Figura 4.21	Sequência de fabricação no torno CNC	159
Figura 4.22	Cavaco em forma de lascas	160
Figura 4.23	Torno Nardini Mascote utilizado para a fabricação de três peças	161
Figura 4.24	Ferramenta de corte e porta-ferramenta utilizados no torno Nardini	161
Figura 4.25	Gráfico do custo direto para o desbaste referente ao escalonamento 1 em função da velocidade de corte	163
Figura 4.26	Sequência de fabricação no torno Nardini	164
Figura 4.27	Apresentação da peça bruta juntamente com a peça acabada produzida no torno Nardini	165
Figura 4.28	Rugosímetro Taylor Robson utilizado para a medição da rugosidade	166
Figura 4.29	Ilustração de duas diferentes posições na realização da medição de rugosidade	167
Figura 4.30	Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 1 para $f = 0,15$ mm/volta e $r_\epsilon = 0,4$ mm no torno Nardini	168
Figura 4.31	Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 2 para $f = 0,15$ mm/volta e $r_\epsilon = 0,4$ mm no torno Nardini	169
Figura 4.32	Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 3 para $f = 0,15$ mm/volta e $r_\epsilon = 0,4$ mm no torno Nardini	170
Figura 4.33	Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 4 para $f = 0,22$ mm/volta e $r_\epsilon = 0,8$ mm no torno CNC	171
Figura 4.34	Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 5 para $f = 0,22$ mm/volta e $r_\epsilon = 0,8$ mm no torno CNC	172
Figura 4.35	Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 6 para $f = 0,22$ mm/volta e $r_\epsilon = 0,8$ mm no torno CNC	173
Figura 4.36	Apresentação de uma medição de comprimento com paquímetro	174
Figura 4.37	Teste de aptidão do sistema de medição do SGF	175
Figura 4.38	Máquina de medição por coordenadas utilizada para a medição dos diâmetros das peças	178
Figura 4.39	Representação dos parâmetros necessários à síntese das	

	tolerâncias dimensionais determinísticas	183
Figura 4.40	Desenho esquemático da peça após a síntese das tolerâncias	184
Figura 4.41	Representação dos parâmetros necessários à síntese das tolerâncias dimensionais, considerando-se o avanço de 0,10 mm/volta para o torno CNC	185

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Apresentação dos grupos de dimensões nominais	15
Tabela 2.2	Tolerâncias dimensionais para os graus de tolerância padrão de IT5 a IT18	18
Tabela 2.3	Campo de tolerância para furos em função do tipo de ajuste	21
Tabela 2.4	Campo de tolerância para eixos em função do tipo de ajuste	21
Tabela 2.5	Ajustes recomendados para aplicações em mecânica, considerando-se o sistema furo base	26
Tabela 2.6	Ajustes recomendados para aplicações em mecânica, considerando-se o sistema eixo base	26
Tabela 2.7	Desvios permissíveis de forma cilíndrica (cilindricidade)	28
Tabela 2.8	Desvios permissíveis de forma cilíndrica com variações de dimensões	28
Tabela 2.9	Desvios permissíveis de circularidade com variações de dimensões	28
Tabela 2.10	Desvios permissíveis de forma plana (planeza)	29
Tabela 2.11	Desvios permissíveis de forma plana com variações de dimensões	29
Tabela 2.12	Desvios permissíveis de paralelismo entre duas superfícies planas	29
Tabela 2.13	Desvios permissíveis de paralelismo entre duas superfícies planas com variação de dimensões	30
Tabela 2.14	Desvios permissíveis de paralelismo de eixos de superfícies de revolução	30
Tabela 2.15	Desvios permissíveis de perpendicularidade de furos com relação a uma superfície plana de referência	30
Tabela 2.16	Desvios permissíveis de perpendicularidade de eixos ou furos com relação a um plano de referência	31
Tabela 2.17	Desvios máximos permissíveis de batimento radial em torneamento e retificação ou em mandrilamento e retificação interna de furos para peças presas em placas	31
Tabela 2.18	Desvios permissíveis de batimento radial com variação de dimensões	31
Tabela 2.19	Desvios máximos permissíveis de batimento radial com a peça entre centros	32

Tabela 2.20	Valores limites dos desgastes para diferentes ferramentas	36
Tabela 2.21	Percentual do nível de confiança para diferentes valores de k, considerando-se a distribuição t-Student	54
Tabela 2.22	Número de graus de liberdade de acordo com cada fonte de incerteza	55
Tabela 3.1	Relação entre a tolerância ISO e a rugosidade superficial	69
Tabela 3.2	Fator limitante da espessura do cavaco	92
Tabela 3.3	Fator limitante da largura de corte	95
Tabela 3.4	Determinação da variável R_c em função do número de medições realizadas	116
Tabela 4.1	Resultado da otimização via programação linear para a síntese de tolerâncias determinísticas segundo o modelo de Kusiak e Feng	139
Tabela 4.2	Resultado da otimização via programação linear para a síntese de tolerâncias determinísticas, conforme modelo proposto neste trabalho	141
Tabela 4.3	Valores obtidos da análise de composição química	145
Tabela 4.4	Variações de composição para caracterização do aço SAE 1020	145
Tabela 4.5	Resultados do ensaio de dureza Brinell	147
Tabela 4.6	Dados da ferramenta de corte utilizada no torno CNC	154
Tabela 4.7	Dados do porta-ferramenta utilizado no torno CNC	154
Tabela 4.8	Parâmetros ótimos para a fabricação no torno CNC	155
Tabela 4.9	Dados da ferramenta de corte utilizada no torno Nardini	161
Tabela 4.10	Dados do porta-ferramenta utilizado no torno Nardini	162
Tabela 4.11	Parâmetros ótimos para a fabricação no torno Nardini	162
Tabela 4.12	Dados da medição de rugosidade para a peça 1	167
Tabela 4.13	Dados da medição de rugosidade para a peça 2	168
Tabela 4.14	Dados da medição de rugosidade para a peça 3	169
Tabela 4.15	Dados da medição de rugosidade para a peça 4	170
Tabela 4.16	Dados da medição de rugosidade para a peça 5	171
Tabela 4.17	Dados da medição de rugosidade para a peça 6	172
Tabela 4.18	Dados de medição dos comprimentos da peça 1 fabricada no torno Nardini	175
Tabela 4.19	Dados de medição dos comprimentos da peça 2 fabricada no torno	

	Nardini	176
Tabela 4.20	Dados de medição dos comprimentos da peça 3 fabricada no torno Nardini	176
Tabela 4.21	Dados de medição dos comprimentos da peça 4 fabricada no torno CNC	176
Tabela 4.22	Dados de medição dos comprimentos da peça 5 fabricada no torno CNC	177
Tabela 4.23	Dados de medição dos comprimentos da peça 6 fabricada no torno CNC	177
Tabela 4.24	Dados de medição dos diâmetros da peça 1	179
Tabela 4.25	Dados de medição dos diâmetros da peça 2	179
Tabela 4.26	Dados de medição dos diâmetros da peça 3	180
Tabela 4.27	Dados de medição dos diâmetros da peça 4	180
Tabela 4.28	Dados de medição dos diâmetros da peça 5	181
Tabela 4.29	Dados de medição dos diâmetros da peça 6	181
Tabela 4.30	Resultado da otimização para a síntese de tolerâncias determinísticas	184
Tabela 4.31	Novos parâmetros para a fabricação no torno CNC com o avanço de 0,10 mm/volta	185
Tabela 4.32	Resultado da otimização para a síntese de tolerâncias determinísticas, considerando o avanço não otimizado do torno 1 igual a 0,1 mm/volta	186

Lista de Siglas

CAD	Computer Aided Design
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DF	Dimensões Funcionais
EF	Elementos Funcionais
GF	Grupo Funcional
GPS	Geometrical Product Specification
ISO	International Organization for Standardization
ITUC	Instituto Tecnológico PUC-RIO
LIC	Limite Inferior de Controle
LIE	Limite Inferior de Especificação
LINDO	Linear Interactive aNd Discrete Optimizer
LSC	Limite Superior de Controle
LSE	Limite Superior de Especificação
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
RF	Requisitos Funcionais
SAE	Society of Automotive Engineers
SGF	Sistema de Gerenciamento da Fabricação
SI	Sistema Internacional de Unidades
VBA	Visual Basic for Application
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia

Resumo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um programa computacional chamado de Sistema de Gerenciamento da Fabricação – SGF, desenvolvido em Excel com rotinas em *visual basic*, capaz de integrar as três etapas de obtenção de um produto: o projeto, a fabricação (por usinagem) e a medição. Assim sendo, este programa é dividido em três módulos: módulo de projeto, módulo de fabricação e módulo de medição.

Na etapa de projeto é apresentada uma metodologia para a determinação das tolerâncias dimensionais de peças fabricadas por processos de usinagem, bem como dos seus limites superior e inferior. Nesta determinação é levado em consideração se a peça é ou não intercambiável, o tipo de ajuste, o grau de precisão, a precisão da máquina-ferramenta e o acabamento superficial da peça. Além disto, este programa possui um banco de dados de tolerâncias que permite ao usuário o estabelecimento das mesmas, tomando como base, alguns exemplos de peças intercambiáveis para diferentes aplicações.

No tocante ao módulo de fabricação, o programa determina os parâmetros ótimos de fabricação por usinagem (avanço, rotação e/ou velocidade de corte e profundidade de corte) para o torneamento com o objetivo de se determinar o menor custo total de fabricação por peça ou o menor tempo total de fabricação por peça. O programa ainda determina o tempo de corte e o tempo de vida da ferramenta por aresta.

O módulo de medição tem por objetivo inicial realizar a seleção do sistema de medição dimensional mais adequado a uma dada aplicação, considerando-se aqueles mais comumente utilizados na indústria metal-mecânica (escala, trena, paquímetro, micrômetro, traçador de altura, relógio comparador, microscópio de medição e máquina de medição por coordenadas). Tal seleção é feita com base na incerteza de medição que cada um deles apresenta, na resolução, na exatidão e nas tolerâncias funcionais definidas no módulo de projeto. A partir daí, o programa apresenta o resultado da medição com sua respectiva incerteza de medição, bem como a zona de conformidade, juntamente com os limites inferior e superior de controle. A partir deste módulo pode-se acessar, através de módulo complementar chamado de módulo educativo, os principais conceitos relacionados à metrologia, podendo ser acessado de maneira rápida através da busca por meio de palavras-chave.

É apresentado também, um modelo matemático inédito para a síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas. Este modelo usa a Programação Linear para a otimização de tais tolerâncias, com base na minimização do custo ou do tempo necessário à geração das dimensões desejadas. As restrições do modelo são baseadas na incerteza de medição ou na incerteza da máquina-ferramenta. Os modelos adotados até então, para tal objetivo, levam em consideração apenas a variabilidade do processo e os coeficientes de capacidade do mesmo, o que exige a fabricação de uma quantidade de peças, que dependendo do processo, pode ser expressiva. O trabalho apresenta, ainda, a influência dos parâmetros de usinagem na tolerância dimensional, bem como diferenças obtidas nas tolerâncias dimensionais finais, uma vez que as equações do custo ou do tempo na Função Objetivo dependem destes parâmetros. O modelo matemático desenvolvido neste trabalho interliga as três etapas ligadas ao desenvolvimento de um produto: projeto; fabricação e medição. A grande vantagem do modelo proposto é que com ele, o número de peças fabricadas poderá ser reduzido, ao contrário do modelo que trabalha a variabilidade 3σ do processo.

Palavras-chave: Programa computacional, síntese de tolerância, usinagem, medição dimensional

Abstract

The objective of this work was to develop a computer program called Manufacturing Management System – SGF developed with the *Excel* language. This software integrates three stages: design, manufacturing by machining and measurement. So, it's divided in three different and independent modules: design, manufacturing and measurement.

In the design module is presented a methodology for determination of dimensional tolerances and their upper and lower limits of pieces produced by machining processes. In this determination is considered the interchangeability of the pieces, the kind of adjustment, precision degree, the precision of the machine tool, the finish surface and mechanical resistance. This software has a tolerance data bank with some examples of interchangeable pieces in different applications.

In the manufacturing module, the computer program calculates the optimum machining parameters (feed, spindle and/or cutting velocity and cutting depth) of the turning process for determination of the total manufacturing cost and the total manufacturing time by piece. This software still calculates the cutting time and the tool life time.

Initially, the objective of the measurement module is to make the selection of the dimensional measurement system more suited, amongst the more used in industry (scale, tape, caliper, micrometer, height gage, dial indicator, measuring microscope, coordinate measuring machine). This selection is made taking as base the uncertainty of measurement, the resolution of the measuring instrument, accuracy and functional tolerances calculated in the design module. After this, the computer program presents the result of measurement with the uncertainty of measurement and calculates the conformity zone and the upper and lower control limits. This module still presents the main concepts related to metrology, being able to be accessible in a fast way using key words.

Finally, is presented in this work a new mathematical model to the deterministic tolerance synthesis. This model uses Linear Programming to determine such tolerances and the objective function is the minimum fabrication cost or minimum fabrication time necessities for generation of the desired dimensions. The constraints of this model are based on the uncertainty in measurement or machine tool uncertainty. The models

previously adopted consider only the variability of the process and its coefficients of capability. This practical many times will demand the manufacture of a great amount of pieces. This work still presents the influence of the machining parameters in the dimensional tolerances, as well as the differences obtained in the final dimensional tolerances; therefore, the equations of manufacturing cost or manufacturing time by piece presented in the objective function had been conceived in accordance with these parameters. The mathematical model developed in this work reflects the three phases of the product: design, manufacturing and measurement. The great advantage of the considered model is the reduced number of manufactured pieces in contrast of the model that works the variability 3σ of the process.

Keywords: Computer program, tolerance synthesis, machining, dimensional measurement

1. INTRODUÇÃO

No passado era permitido que alguns erros dimensionais só fossem descobertos quando o produto entrava na linha de produção, necessitando muitas vezes realizar modificações no ferramental que provocavam atrasos e aumento dos custos. Hoje, a engenharia moderna trabalha o projeto do produto através de definições e simulações realizadas por computador. No entanto, um dos grandes problemas enfrentados no setor industrial diz respeito ao correto estabelecimento das tolerâncias de projeto, uma vez que, para alcançar tal objetivo, o projeto do produto, algumas vezes chamado de projeto funcional (DEIAB et al, 1997), deverá considerar além das características funcionais, a capacidade de se poder fabricar e também a capacidade de se realizar uma correta medição. Nessa linha, o planejamento do produto que se deseja fabricar deverá ser bem mais elaborado, de acordo com os seguintes requisitos básicos:

- As variações permitidas no tocante à dimensão, forma e posição das peças deverão ser estabelecidas de acordo com critérios de funcionalidade das mesmas;
- Tais variações deverão ser consideradas não apenas na seleção das máquinas-ferramenta capazes de realizar o produto, mas também na seleção dos parâmetros ótimos de fabricação;
- Os parâmetros ótimos de fabricação deverão ser escolhidos considerando-se o mínimo custo total de fabricação ou o mínimo tempo total de fabricação por peça e
- O sistema de medição deverá ser escolhido de forma a realizar a medição com confiabilidade metrológica, sem deixar de considerar a questão do custo dessa medição.

Assim sendo, o projeto deverá ocorrer de maneira integrada com o planejamento do processo, algumas vezes chamado de “projeto de fabricação”, e com o controle dimensional. Essa integração é a estrutura básica de um Sistema de Especificação Geométrica de Produto (GPS – Geometrical Product Specification), conforme apresentado na Figura 1.1 (WANG et al., 2005). Analisando-se a Figura 1.1, constata-se que existe um

elo entre a especificação de um dado produto (fase de projeto) com a funcionalidade do mesmo, o processo de fabricação e o sistema de medição (fase de verificação).

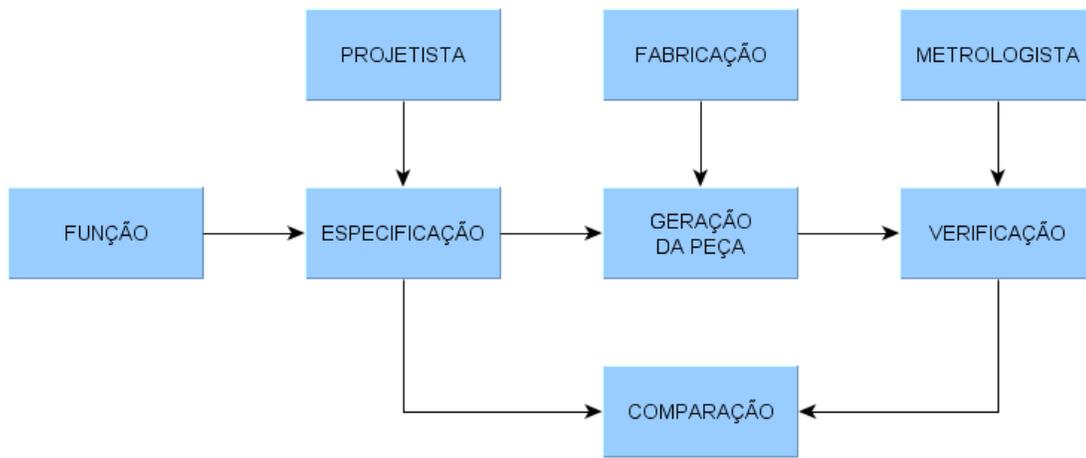


Figura 1.1 – Estrutura básica de um Sistema de Especificação Geométrica de Produto (WANG et al. 2005)

No primeiro estágio de projeto de um componente, o projetista imagina um produto como sendo “ideal”, ou seja, um objeto perfeitamente fabricado. Todas as partes componentes desse produto são consideradas como tendo tamanho e formas perfeitos. No entanto, os processos de fabricação fazem com que esses componentes variem de diversas maneiras diferentes, como por exemplo, variações de dimensão, forma e acabamento. Essas variações podem ter grande efeito na funcionalidade do componente. Deve-se, portanto, compreender e padronizar as definições de geometria, de modo que as variações que são inerentes aos processos de fabricação sejam consideradas para minimizar refugos. Para poder compreender as variações geométricas dentro dos componentes das peças, o GPS cobre formas e dimensões, tolerâncias e propriedades geométricas de superfícies (FLACK et al., 2005), conforme Figura 1.2.

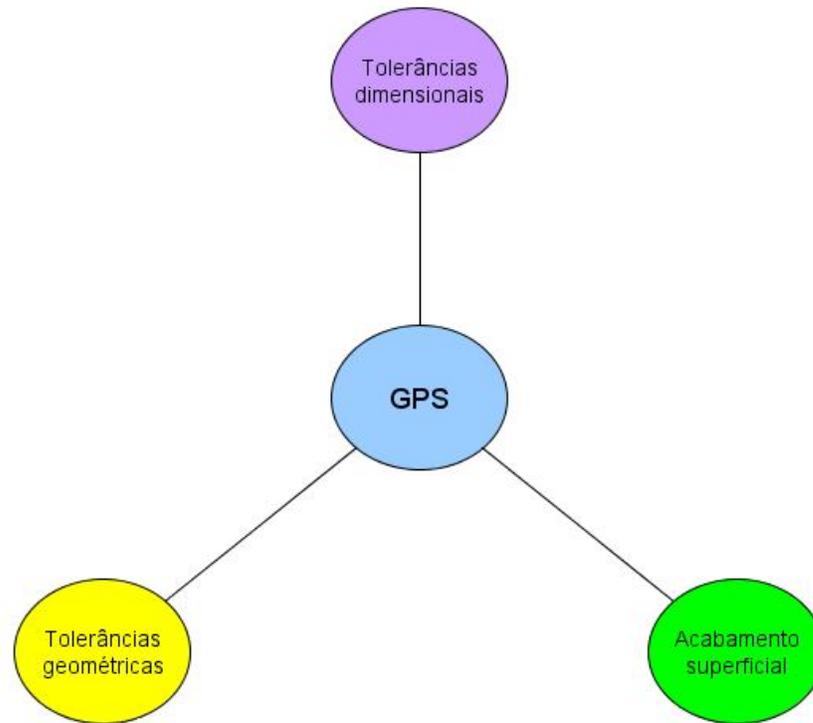


Figura 1.2 – Conceito geral de toleranciamento GPS (FLACK et al., 2005)

A fixação das dimensões funcionais, apresentada pela tolerância dimensional, é determinada na fase de projeto, levando-se em consideração não apenas a função da peça, mas também a fabricação e a medição, conforme apresentado na Figura 1.3.

Analisando-se a Figura 1.3, constata-se que na fase de projeto são fixadas as dimensões nominais, ou seja, as dimensões indicadas no desenho. Na fase de fabricação são geradas as dimensões reais, que são aquelas que a peça tem, mas são desconhecidas. As dimensões efetivas são as dimensões que se obtém medindo-se a peça. Elas nos dão uma idéia das dimensões reais da peça e se aproximam mais dos valores reais, quanto mais exato for o sistema utilizado na medição. A verificação de conformidade ou não conformidade é realizada através de comparação entre as dimensões nominais e efetivas.

Dentro deste contexto, é possível perceber uma série de variáveis de influência na tolerância do produto final das peças fabricadas por usinagem, conforme apresentado na Figura 1.4.

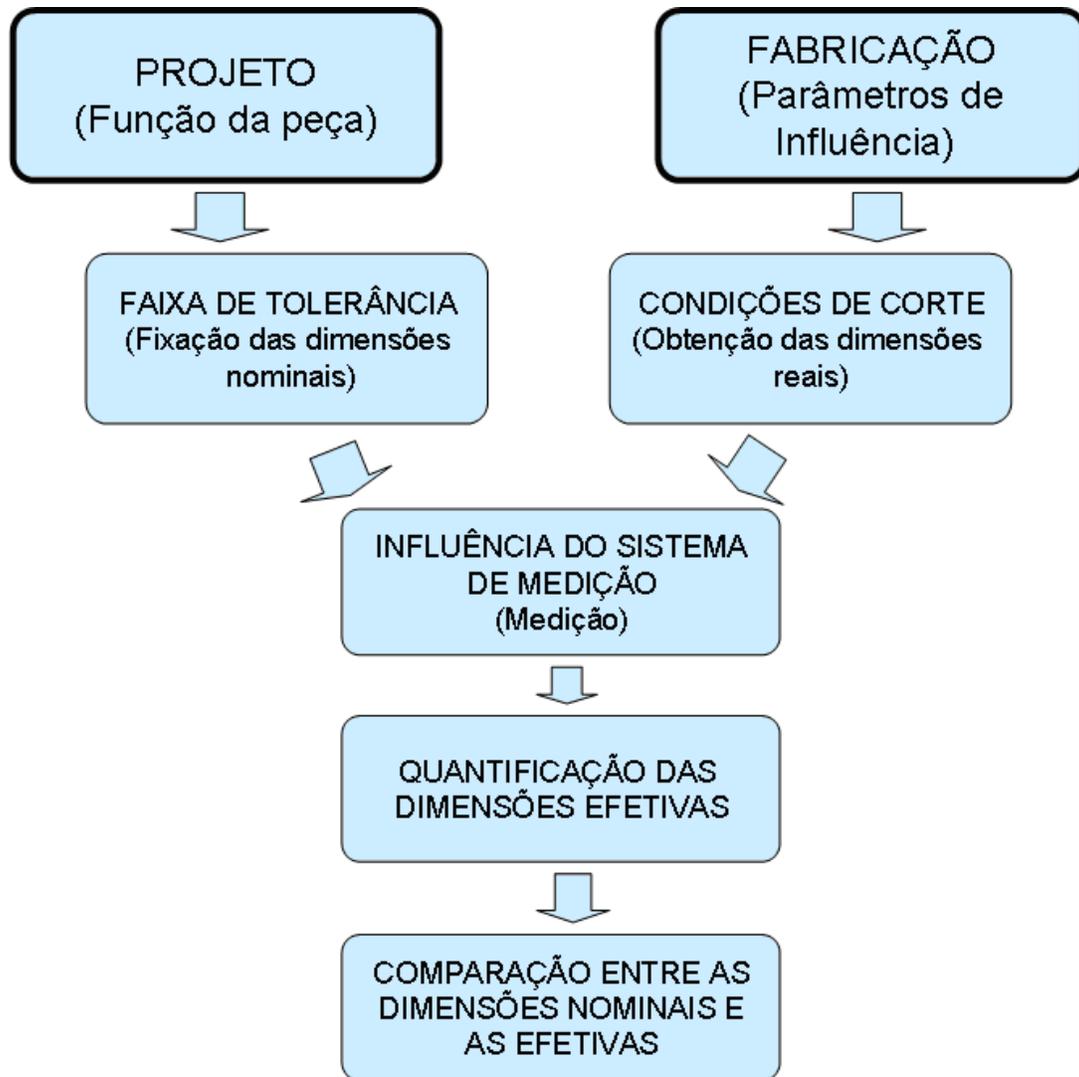


Figura 1.3 – Etapas ligadas à geração de um projeto

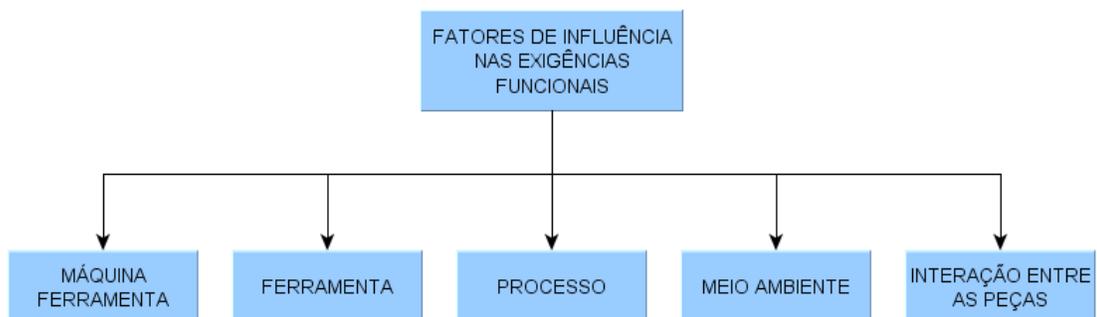


Figura 1.4 – Fatores que exercem influência nas dimensões de peças fabricadas por usinagem

O que ocorre atualmente é que por não serem plenamente conhecidos a função dos componentes nem tampouco as informações do processo, como por exemplo, a precisão das máquinas-ferramenta e a incerteza do sistema de medição, o projetista tende a definir as tolerâncias dimensionais e geométricas, as mais estreitas possíveis, comprometendo muitas vezes, e na grande maioria dos casos desnecessariamente, a fabricação e a medição, além de onerar o ciclo de fabricação do produto, o que poderá impactar expressivamente na sobrevivência da organização. Segundo ZHANG (1997), a análise e o controle de tolerâncias são muito difíceis nas seguintes situações:

- Quando as peças são complexas;
- Quando as tolerâncias de projeto são muito apertadas,
- Quando o número de operações necessárias à fabricação das peças é muito grande e
- Quando as trocas nos dados de usinagem são freqüentes.

Dentro deste contexto de fabricação moderna, há a necessidade, já nas etapas de planejamento e de projeto, de se integrar as etapas de projeto, fabricação e medição em uma única ferramenta através de um programa com o objetivo de se obter uma maior confiabilidade em cada uma das etapas, uma maior possibilidade de otimização não apenas do projeto, mas também de processo, além de uma maior agilidade em todo esse ciclo de fabricação do produto.

Segundo HUNTER et al. (2006), para esta integração, deve-se estabelecer três passos:

- O primeiro é uma completa descrição das características geométricas da peça que se quer fabricar;
- O segundo é a descrição do processo de fabricação desenvolvido e as capacidades da máquina-ferramenta e
- O terceiro é a descrição detalhada da operação, dos parâmetros e dos recursos envolvidos no processo de medição.

Visando dar uma contribuição para esta integração, será apresentado neste trabalho um programa computacional que determina as tolerâncias dimensionais considerando a precisão da máquina-ferramenta, no acabamento superficial, bem como possibilitar o

estabelecimento destas tolerâncias com base no grau de precisão de peças isoladas, ou no caso de peças acopladas, nos sistemas furo-base e/ou eixo-base. Além disso será possível estabelecer as tolerâncias geométricas em função dos desvios máximos permissíveis.

O programa também otimiza os parâmetros de fabricação por usinagem com base no menor custo de fabricação por peça ou no menor tempo total de fabricação por peça, além de selecionar o sistema de medição mais adequado para uma dada aplicação, bem como expressar o resultado da medição com a respectiva incerteza de medição de acordo com o ISO GUM (2003) e determinar o intervalo de conformidade para peças segundo a norma ISO 14253-1 (UNE-EN ISO 14253-1, 1998).

Por fim, durante o processo de toleranciamento funcional, ou seja, durante a determinação das tolerâncias para cada dimensão de uma dada peça com base na função do elemento referente, na grande maioria das vezes, o somatório dos afastamentos das dimensões parciais difere do afastamento da dimensão total que é resultante da soma das dimensões parciais. Quando tal situação ocorre, há a necessidade de se ajustar as tolerâncias parciais de modo que o somatório dos afastamentos superiores das dimensões parciais seja igual ao afastamento superior da dimensão total, bem como que a soma dos afastamentos inferiores das mesmas dimensões parciais seja igual à soma do afastamento inferior da dimensão total. Uma das formas de se realizar tal ajuste é através da otimização das tolerâncias via programação linear. No entanto, as técnicas atualmente apresentadas são baseadas no modelo de qualidade três sigma (3σ) ou nos coeficientes de capacidade do processo, o que requer em muitas situações, que um grande número de peças sejam fabricadas, implicando fatalmente num aumento de custos devido aos ajustes de processo e de ferramental. Isto de certa forma vai de encontro aos sistemas modernos de planejamento de processo, onde há uma tendência à fabricação virtual das peças, desde a fase de projeto até a fase de verificação. Por outro lado, os modelos matemáticos apresentados na literatura, baseiam-se apenas nos custos para geração da referida dimensão (KUSIAK et al., 1995; TEERAVARAPRUG, 2002) (FENG et al., 2001) (HE, 1991). Neste trabalho é apresentado um modelo novo para a síntese de tolerâncias determinísticas, considerando-se ao invés do modelo três sigma (3σ), a precisão da máquina-ferramenta ou a incerteza do sistema de medição, reduzindo assim, o lote experimental a poucas peças a serem fabricadas, após o ajuste da máquina-ferramenta.

1.1 Objetivos Gerais

- Elaborar um programa computacional capaz de integrar três fases do ciclo de desenvolvimento de um produto: projeto, fabricação e medição;
- Desenvolver um modelo matemático com base nas definições de tolerâncias dimensionais determinísticas que proporcione uma melhor confiabilidade na fabricação de peças por usinagem;
- Analisar experimentos e resultados gerados.

1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar e testar um programa computacional com os seguintes módulos principais: tolerância dimensional, tolerância geométrica, fabricação e medição;
- Elaborar um módulo complementar, chamado de módulo educativo, para explicar aspectos relacionados com os módulos principais;
- Desenvolver e validar um modelo matemático para a síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas;
- Testar experimentalmente o programa e o modelo matemático desenvolvidos;
- Desenvolver o módulo de fabricação para o torneamento, aplicado a máquinas-ferramenta com comando numérico computadorizado (CNC);
- Gerar um módulo de medição aplicado à metrologia dimensional;
- Gerar um módulo de medição que determine quantitativamente e por meio gráfico, a zona de conformidade;
- Elaborar critérios de segurança para o programa;
- Elaborar um manual do usuário para o programa.

1.3 Estruturação

Inicialmente foi realizada uma vasta pesquisa bibliográfica a respeito dos principais aspectos ligados ao projeto, fabricação e medição de peças usinadas. Em seguida, foi verificada a existência de programas computacionais que integram o projeto, a fabricação e a medição com o intuito de observar as suas estruturas e os aspectos considerados em cada uma dessas fases. A partir daí, foram levantados os critérios de funcionalidade das

peças que deverão ser consideradas em projeto, a influência das variáveis de fabricação e dos sistemas de medição já na fase de projeto.

Levantadas todas estas características, foi desenvolvido o programa e a sua execução em *Excel* com rotinas em *Visual Basic for Application (VBA)*, programa escolhido por atender plenamente às necessidades do projeto proposto.

A última etapa do projeto foi consequência das etapas anteriores, uma vez que só é possível a síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas, se forem otimizados os parâmetros de processo e escolhido o sistema de medição, de modo que, o mesmo possua confiabilidade metrológica. O modelo matemático proposto neste trabalho considera, diferentemente dos outros modelos existentes, aspectos cruciais ligados à engenharia simultânea.

Uma vez elaborado e testado através de simulações computacionais via programação linear, partiu-se para a validação experimental, tanto do modelo matemático proposto, quanto do programa computacional desenvolvido. Para tanto, foram projetadas, fabricadas e medidas, seis peças em duas máquinas-ferramenta distintas com o objetivo de fundamentar a teoria aqui apresentada.

Dentro deste contexto, o capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do trabalho, envolvendo aspectos ligados às tolerâncias dimensionais e geométricas; à fabricação por usinagem considerando o processo de torneamento; à medição dimensional e à síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas, fazendo uso da programação linear.

O capítulo 3 trata da estruturação do programa computacional SGF – Sistema de Gerenciamento da Fabricação, desenvolvido no âmbito deste trabalho para gerar os dados de projeto, fabricação e medição.

O capítulo 4 apresenta o modelo matemático proposto neste trabalho para a síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas, juntamente com a sua validação teórica e a experimental, através da fabricação de peças por torneamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica, apresentando a fundamentação teórica e o estado da arte, relacionando-os com os objetivos deste trabalho.

2.1 Tolerâncias Dimensionais

Para Maziero et al. (1997), um dos maiores problemas da indústria é o projeto do produto, devendo o mesmo estar cercado de todas as medidas que possibilitem o menor número de erros. No entanto, uma vez que não é possível se obter uma dimensão exatamente igual àquela indicada no projeto, se estabelece uma faixa dentro da qual a referida dimensão poderá variar sem comprometer a funcionalidade da peça. A essa faixa de variação dá-se o nome de tolerância, e quando ela refere-se a uma dimensão, é chamada de tolerância dimensional. Segundo a ASME Y14.5M (ASME Y14.5M, 1994), uma dimensão é definida como sendo um valor numérico expresso em uma unidade de medida apropriada e usada para definir o tamanho, posição, característica geométrica ou rugosidade de uma peça ou de uma parte dela, enquanto que a tolerância é o valor que uma dimensão específica pode variar. A tolerância é a diferença entre os limites máximo e mínimo. A determinação da tolerância e da dimensão média para cada operação representa um papel chave durante o planejamento do processo de uma peça (JI et al., 1995). Uma vez que a tolerância é definida na fase de projeto, ou seja, na especificação, o limite superior é chamado de Limite Superior de Especificação (LSE) e o limite inferior é chamado de Limite Inferior de Especificação (LIE).

A Figura 2.1 apresenta a relação custo-tolerância. Percebe-se, claramente, que à medida que a tolerância vai diminuindo, os custos vão aumentando, pois vai se tornando mais difícil a fabricação, bem como a medição.

O surgimento da tolerância ocorreu no século XVIII, quando o industrial Eli Whitney que foi o fundador da indústria algodoeira dos Estados Unidos, recebeu a missão do governo norte americano de fabricar 10000 mosquetes, visando a eliminação do então lento e custoso trabalho dos armeiros. Inicialmente, ele estudou e idealizou máquinas-ferramenta para aquele fim e introduziu os calibradores (AQUINO, 2003).

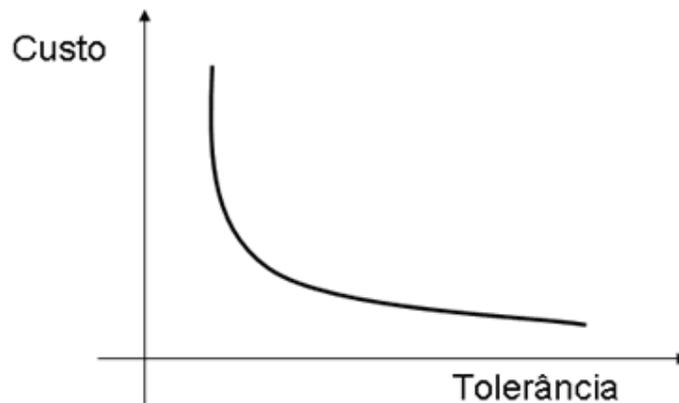


Figura 2.1 – Relação custo-tolerância (HE, 1991)

Segundo Nielsen (2003), antes de 1800, o toleranciamento era realizado pela necessidade de intercambiabilidade de peças, considerando-se apenas as tolerâncias dimensionais. Por volta da segunda guerra mundial surgiram vários rascunhos de normas, definindo linguagens gráficas para as tolerâncias geométricas. Esses padrões se expandiram e se uniram, deixando hoje duas normas de tolerância dimensional e geométrica: a ASME Y14.5M (1994) e a ISO 1101 (2004), sendo essas duas normas conceitualmente similares. Nessa mesma época, as tolerâncias dimensionais tinham estreitado para um nível, onde os erros de forma dos processos de fabricação típicos tornaram-se significantes. Atualmente, chegou-se em um ponto onde as tolerâncias dimensionais e as tolerâncias geométricas de forma encolheram a um nível onde a rugosidade é significativa. Para Donnarumma et al (2002), a tecnologia de toleranciamento é uma ferramenta básica para o estudo de intercambiabilidade e para vários tipos de função mecânica.

A corrida espacial e a guerra fria tiveram um profundo impacto na educação da engenharia moderna (JR, 1999), o que resultou juntamente com a separação física existente do pessoal de engenharia do setor de fabricação, no surgimento de muitas filosofias diferentes de projeto de produto. Tais filosofias incluem:

- Projeto dirigido à engenharia;
- Projeto dirigido ao processo de fabricação e
- Projeto dirigido à inspeção.

Um projeto dirigido à engenharia é baseado na premissa de que o engenheiro projetista pode especificar quaisquer valores de tolerância que julgue necessários para assegurar os requisitos funcionais de um produto, com base na experiência. Segundo Jr (1999), quando as tolerâncias são determinadas, geralmente há uma pequena ou nenhuma comunicação entre a engenharia e os departamentos de fabricação ou inspeção. O ponto fraco desse método é que problemas são sempre descobertos durante ou após a fabricação, gerando assim, custos elevados.

Um projeto dirigido ao processo de fabricação leva em consideração a capacidade do processo.

Um projeto dirigido à inspeção leva em consideração a técnica de medição esperada e o sistema de medição que será usado para inspecionar as peças manufaturadas. De acordo com Jr (1999), quando esse método é usado, os valores de tolerância que são indicados no desenho são derivados da subtração de $\frac{1}{2}$ da incerteza de medição, de cada um dos limites funcionais. Esse baixo valor de tolerância torna-se então, a base para aceitação ou rejeição da peça. Esse método pode ser eficiente quando o projetista e o metrologista trabalham juntos durante o estágio de desenvolvimento do produto. No entanto, o sistema se rompe quando o projetista não tem conhecimento de metrologia, se a técnica de medição proposta não é conhecida ou se as medições não são feitas originalmente como foram concebidas.

As regras de dimensionamento de peças requerem que todo projeto original e/ou as dimensões funcionais e tolerâncias sejam traduzidas para a fabricação e para a inspeção (SFANTSIKOPOULOS et al., 1995). Segundo Deiab et al. (1997), o chamado “projeto concorrente” é o termo usado para expressar que a fase de projeto é desenvolvida concomitantemente com o planejamento de outras fases, como por exemplo, a fase de manufatura. Os benefícios da prática do projeto concorrente incluem as decisões relativamente fáceis de alteração do projeto, obtendo-se o mínimo tempo para se realizar as mudanças de projeto com o menor impacto nos investimentos de fabricação. Uma outra vantagem é que a fase de planejamento da fabricação termina simultaneamente com a fase de projeto, reduzindo assim o tempo de supervisão.

O processamento do projeto pode ser dividido em duas fases principais (DEIAB et al., 1997):

- Projeto do produto, algumas vezes chamado de projeto funcional;
- Projeto do processo, algumas vezes chamado de projeto de fabricação.

A análise de tolerância dimensional é muito importante em ambas as fases, e para se fabricar de forma mais eficiente e econômica, as tolerâncias dimensionais podem ser implementadas em ambas as fases. Assim sendo, dois tipos de tolerâncias dimensionais são freqüentemente utilizadas:

- Tolerâncias de projeto e
- Tolerâncias de usinagem ou de processo.

As tolerâncias de projeto são relatadas por requisitos operacionais ou de um dado componente, enquanto que as tolerâncias de usinagem são idealizadas, principalmente para um plano de processo de usinagem.

Segundo Ngoi et al. (1998), embora o dimensionamento e o toleranciamento estejam no projeto do produto e no planejamento do processo, eles são geralmente independentes e afetam o custo total de fabricação de um produto. As pesquisas nessas áreas são geralmente conduzidas separadamente. Isso ocorre pelo fato de que eles tratam com diferentes tipos de tolerâncias. Enquanto o projeto do produto envolve principalmente as tolerâncias componentes, o pessoal da fabricação faz uso das tolerâncias de processo.

Para satisfazer as funções de projeto, bem como para suprir muitas vezes a falta de pleno conhecimento das exigências funcionais por parte dos projetistas, uma tolerância apertada é geralmente preferida, gerando como consequência, um alto custo de usinagem. Daí, pode-se selecionar a tolerância de projeto para produção econômica, de maneira a minimizar o custo total de fabricação. Na fase de projeto, as tolerâncias de projeto são determinadas considerando-se as funções do produto com base em certos padrões, e na experiência do projetista. Na fase de fabricação, as tolerâncias são simplesmente alocadas para as dimensões de usinagem, tomando como base a experiência ou dados empíricos. Essa forma, por sua vez, não garante ótimas tolerâncias para mínimos custos de fabricação.

Uma vez definidas as principais funções do produto, pode-se iniciar a concepção do projeto, onde a geometria é definida com base nos requisitos de desempenho funcional, restrições de projeto e propriedades do material. Essas definições são obtidas pela análise funcional (PEREIRA et al., 2001), onde se destaca a Especificação Sistemática do Projeto, cujo principal objetivo é identificar as dimensões funcionais que afetam a função do componente ou conjunto, e que merecem atenção especial na especificação das tolerâncias e de seus processos produtivos.

De acordo com Guimarães (1999), a fim de que se possam obter benefícios na determinação de tolerâncias dimensionais, deverão ser considerados os seguintes fatores: a finalidade da peça, considerando-se sua forma de ajuste, importância no conjunto e funcionamento; o processo de fabricação a ser utilizado; os afastamentos máximos e mínimos das cotas; método de medição a ser aplicado; os tipos de máquinas existentes na empresa; a seqüência de operações; os dispositivos de fixação, pois os erros dos mesmos são transferidos para a peça; as ferramentas, uma vez que, o desgaste pode resultar em erros dimensionais da peça e o material a ser usinado, cujas propriedades mecânicas influenciam diferentemente o processo, podendo alterar o resultado final. Dentro deste contexto, a cotação funcional é baseada nas condições de aptidão do produto para a sua utilização, objetivando a determinação das referidas dimensões funcionais, partindo-se de cada função específica, conforme apresentado na Figura 2.2.

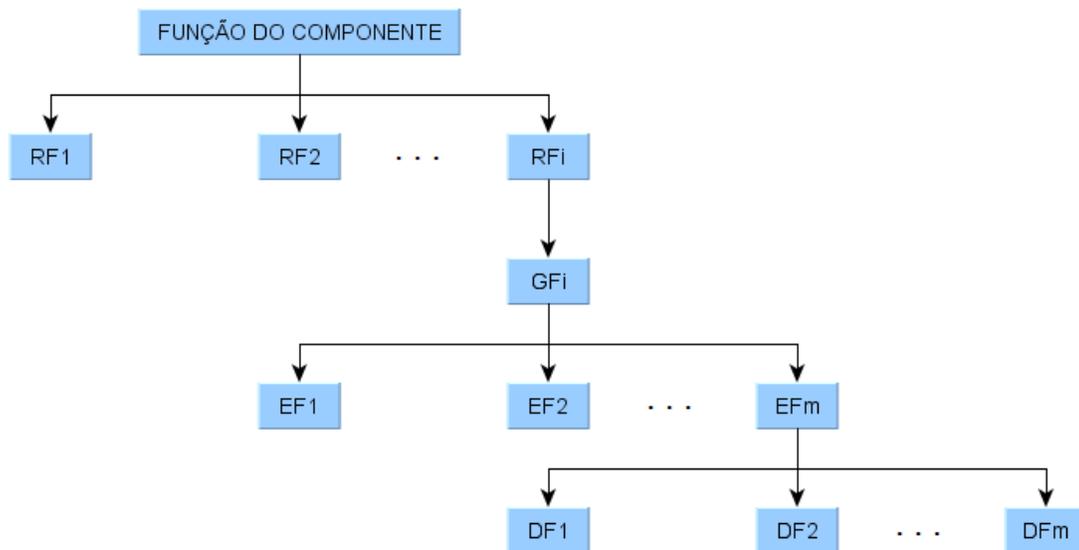


Figura 2.2 – Estruturação da especificação sistemática de projeto

Cada função apresenta um ou mais Requisitos Funcionais (RF) e cada um desses requisitos é satisfeito por um único Grupo Funcional (GF) que é definido como o conjunto de peças que realiza uma dada função mecânica. Para cada grupo funcional existe um dado número de Elementos Funcionais (EF), aos quais estão relacionadas às superfícies funcionais que são caracterizadas pelas Dimensões Funcionais (DF) (PEREIRA et al., 2001).

Na análise funcional, as cotas representativas dessas dimensões possuem um elo

com a função do componente e as mesmas apresentam suas tolerâncias, as mais largas possíveis, sem que haja, no entanto, o comprometimento da funcionalidade do componente.

2.1.1 Critério de Seleção de Tolerâncias para Peças Intercambiáveis

Um sistema de tolerâncias é um conjunto de princípios, regras, fórmulas e tabelas que permite a escolha racional de tolerâncias para a produção econômica de peças mecânicas intercambiáveis (PROVENZA, 1995). De acordo com o Sistema ISO, para a determinação das tolerâncias deverão ser seguidas as etapas apresentadas na Figura 2.3. Antes, porém é fundamental apresentar os seguintes conceitos relacionados às dimensões (PROVENZA, 1995):

- dimensões limites são os valores máximo e mínimo admissíveis para a dimensão efetiva;
- dimensão máxima é o máximo valor admissível para a dimensão efetiva;
- dimensão mínima é o mínimo valor admissível para a dimensão efetiva;
- eixo é o termo convencionalmente aplicado para fins de tolerâncias e ajustes, como sendo qualquer parte de uma peça cuja superfície externa é destinada a alojar-se na superfície interna de outra e
- furo é o termo convencionalmente aplicado para fins de tolerâncias e ajustes, como sendo todo espaço delimitado por superfície interna de uma peça e destinado a alojar o eixo.

Analisando-se a Figura 2.3, percebe-se que a tolerância dimensional depende da dimensão nominal da superfície a ser cotada. Essa dimensão nominal é enquadrada em um dos grupos de dimensão nominal da Tabela 2.1 (NBR 6158, 1995). A partir daí, calcula-se a média geométrica (D') dos dois valores extremos do respectivo grupo de dimensão, conforme equação (2.1). De posse do valor de D' , obtém-se o fator de tolerância padrão (i), como mostrado na equação (2.2).

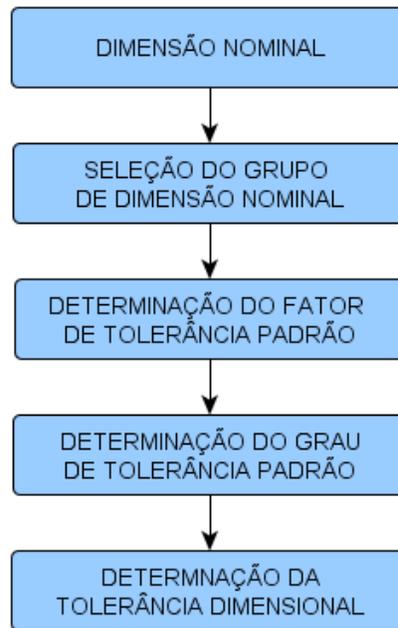


Figura 2.3 – Etapas para a determinação da tolerância dimensional

$$D' = \sqrt{g_1 \times g_2} \quad (2.1)$$

$$i = 0,45 \sqrt[3]{D'} + 0,001.D' \quad (2.2)$$

Tabela 2.1: Apresentação dos grupos de dimensões nominais (NBR 6158, 1995)

Até 3 mm	> 80 e ≤ 100 mm	> 355 e ≤ 400 mm	> 1250 e ≤ 1400 mm
> 3 e ≤ 6 mm	> 100 e ≤ 120 mm	> 400 e ≤ 450 mm	> 1400 e ≤ 1600 mm
> 6 e ≤ 10 mm	> 120 e ≤ 140 mm	> 450 e ≤ 500 mm	> 1600 e ≤ 1800 mm
> 10 e ≤ 14 mm	> 140 e ≤ 160 mm	> 500 e ≤ 560 mm	> 1800 e ≤ 2000 mm
> 14 e ≤ 18 mm	> 160 e ≤ 180 mm	> 560 e ≤ 630 mm	> 2000 e ≤ 2240 mm
> 18 e ≤ 24 mm	> 180 e ≤ 200 mm	> 630 e ≤ 710 mm	> 2240 e ≤ 2500 mm
> 24 e ≤ 30 mm	> 200 e ≤ 225 mm	> 710 e ≤ 800 mm	> 2500 e ≤ 2800 mm
> 30 e ≤ 40 mm	> 225 e ≤ 250 mm	> 800 e ≤ 900 mm	> 2800 e ≤ 3150 mm
> 40 e ≤ 50 mm	> 250 e ≤ 280 mm	> 900 e ≤ 1000 mm	-
> 50 e ≤ 65 mm	> 280 e ≤ 315 mm	> 1000 e ≤ 1120 mm	-
> 65 e ≤ 80 mm	> 315 e ≤ 355 mm	> 1120 e ≤ 1250 mm	-

Para a fixação de cada grupo apresentado na Tabela 2.1, os critérios adotados foram os seguintes:

- até 180 mm, a divisão é baseada em normas de vários países;

- de 180 a 500 mm, a divisão é baseada nos números normalizados da série Renard R10 e
- a subdivisão a partir de 140 mm corresponde aproximadamente à série Renard R20.

Uma vez calculado o fator de tolerância padrão, deve-se definir o grau de precisão com o qual poderá ser trabalhada a peça. Este, por sua vez, é expresso pelo grau de tolerância padrão (IT) que dependendo do tipo de aplicação, poderá variar de IT01 a IT18, conforme mostrado na Figura 2.4.

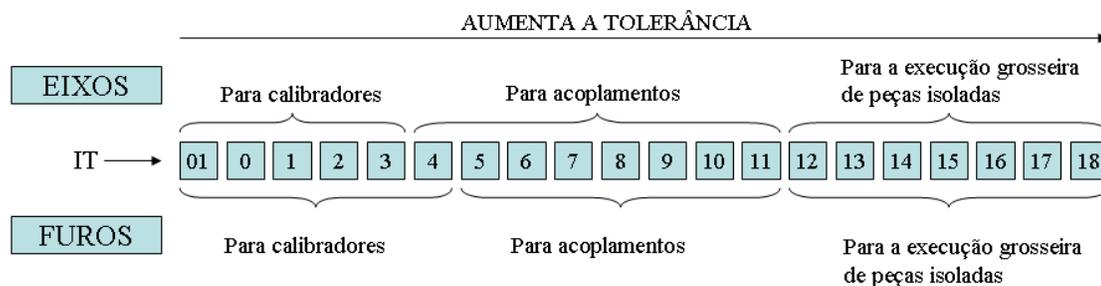


Figura 2.4 – Grau de tolerância padrão (IT)

De acordo com Provenza (1995), considerando-se eixos e furos, os graus de tolerância padrão para a execução grosseira de peças isoladas deverá variar de IT12 a IT16, uma vez que o mesmo não apresenta os graus IT17 e IT18. Este trabalho considera os graus IT17 e IT18 apresentados na NBR 6158 (NBR 6158, 1995) para a execução grosseira de peças isoladas. De acordo com esta norma, existem descontinuidades e fórmulas diferentes para graus de tolerância padrão (IT) acima de 500 mm. Nesta situação, até 3150 mm, inclusive, os valores das tolerâncias padrão foram desenvolvidos para propósitos experimentais e quando aceitos pela indústria, foram incorporados pelo sistema ISO. Segundo esta norma, os valores para os graus IT0 e IT1 têm pequeno uso na prática, mesmo assim, serão considerados neste trabalho.

A cada grau de tolerância padrão está associada uma tolerância, expressas pelas equações (2.3) a (2.12), além das equações contidas na Tabela 2.2. Partindo-se de aplicações como o caso de calibradores, onde a tolerância é bastante apertada, em função da exigência de uma alta exatidão dimensional, até as tolerâncias dimensionais mais folgadas, como no caso de aplicações para a execução grosseira de peças isoladas, à medida que se aumenta o número indicativo desse grau, aumenta-se a tolerância dimensional.

Para o grau de tolerância padrão IT01, a tolerância dimensional (t_{01}) em μm é dada pela equação (2.3) (NBR 6158, 1995).

$$t_{01} = 0,3 + 0,001.D' \quad (2.3)$$

Para IT0, tem-se (t_0), dada pela equação (2.4).

$$t_0 = 0,5 + 0,012.D' \quad (2.4)$$

Para IT1, tem-se (t_1), dado por:

$$t_1 = 0,8 + 0,020.D' \quad (\text{para dimensões até } 500 \text{ mm}) \quad (2.5)$$

$$t_1 = 2.i \quad (\text{para dimensões acima de } 500 \text{ mm até } 3150 \text{ mm}) \quad (2.6)$$

Para as dimensões até 500 mm, a tolerância para IT2 (t_2) é igual ao segundo termo da progressão geométrica, calculada através da interpolação dos cinco termos entre a_1 , dado pela tolerância fundamental correspondente a IT1 (t_1), e o último termo a_5 , dado pela tolerância correspondente a IT5 (t_5) (PROVENZA, 1995). Esta tolerância pode ser representada pela equação (2.7).

$$t_2 = t_1 \cdot 4 \sqrt[4]{\frac{t_5}{t_1}} \quad (2.7)$$

Para dimensões acima de 500 mm até 3150 mm, t_2 é dada por:

$$t_2 = 2,7.i \quad (2.8)$$

Já a tolerância t_3 referente ao grau de tolerância padrão IT3 é dada por:

$$t_3 = t_1 \cdot \sqrt{\frac{t_5}{t_1}} \quad (\text{para dimensões até } 500 \text{ mm (PROVENZA, 1995)}) \quad (2.9)$$

$$t_3 = 3,7.i \text{ (para dimensões acima de 500 mm até 3150 mm (NBR 6158, 1995))} \quad (2.10)$$

Para o grau de tolerância padrão IT4, a tolerância t_4 é dada pela equação (2.11).

$$t_4 = t_1 \cdot \sqrt{\frac{t_5}{t_1}} \cdot \sqrt[4]{\frac{t_5}{t_1}} \text{ (para dimensões até 500 mm (PROVENZA, 1995))} \quad (2.11)$$

$$t_4 = 5.i \text{ (para dimensões acima de 500 mm até 3150 mm (NBR 6158, 1995))} \quad (2.12)$$

A Tabela 2.2, por sua vez, apresenta as tolerâncias dimensionais para os graus de tolerância padrão variando de IT5 a IT18.

Tabela 2.2: Tolerâncias dimensionais para os graus de tolerância padrão de IT5 a IT18

Grau de tolerância padrão	Tolerância dimensional (μm)
IT5	$t_5 = 7.i$
IT6	$t_6 = 10.i$
IT7	$t_7 = 16.i$
IT8	$t_8 = 25.i$
IT9	$t_9 = 40.i$
IT10	$t_{10} = 64.i$
IT11	$t_{11} = 100.i$
IT12	$t_{12} = 160.i$
IT13	$t_{13} = 250.i$
IT14	$t_{14} = 400.i$
IT15	$t_{15} = 640.i$
IT16	$t_{16} = 1000.i$
IT17	$t_{17} = 1600.i$
IT18	$t_{18} = 2500.i$

2.1.2 Critério de Seleção de Ajustes para Peças Intercambiáveis

Em função do grau de tolerância padrão determina-se a tolerância dimensional, mas não se especifica a posição da mesma em relação à linha zero, que é a linha que nos desenhos fixa a dimensão nominal e serve de origem aos afastamentos. A Figura 2.5 apresenta, para um sistema furo-eixo, a dimensão nominal, a linha zero, o campo de tolerância e o afastamento superior e o inferior para o eixo e para o furo.

Através da figura constata-se que o afastamento superior é dado pela diferença entre a dimensão máxima e a nominal, enquanto que o afastamento inferior é definido, como sendo a diferença entre a dimensão mínima e a nominal. A relação entre os afastamentos e a tolerância dimensional está apresentada nas equações (2.13) e (2.14) (GUIMARÃES, 1999).

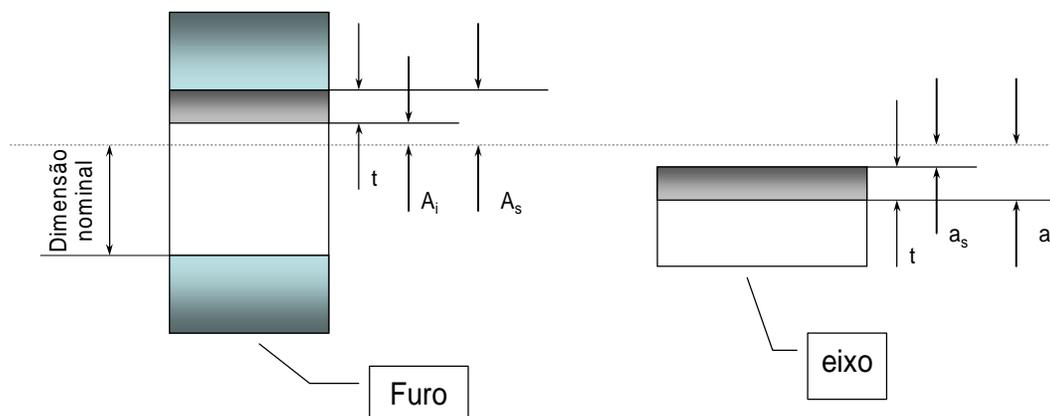


Figura 2.5 – Sistema furo-eixo destacando a dimensão nominal, linha zero, campo de tolerância e afastamentos

$$t = A_s - A_i \quad (2.13)$$

$$t = a_s - a_i \quad (2.14)$$

Na especificação das possíveis posições do campo de tolerância são utilizadas letras maiúsculas para a representação dos furos e letras minúsculas para a representação de eixos, conforme apresentado na Figura 2.6.

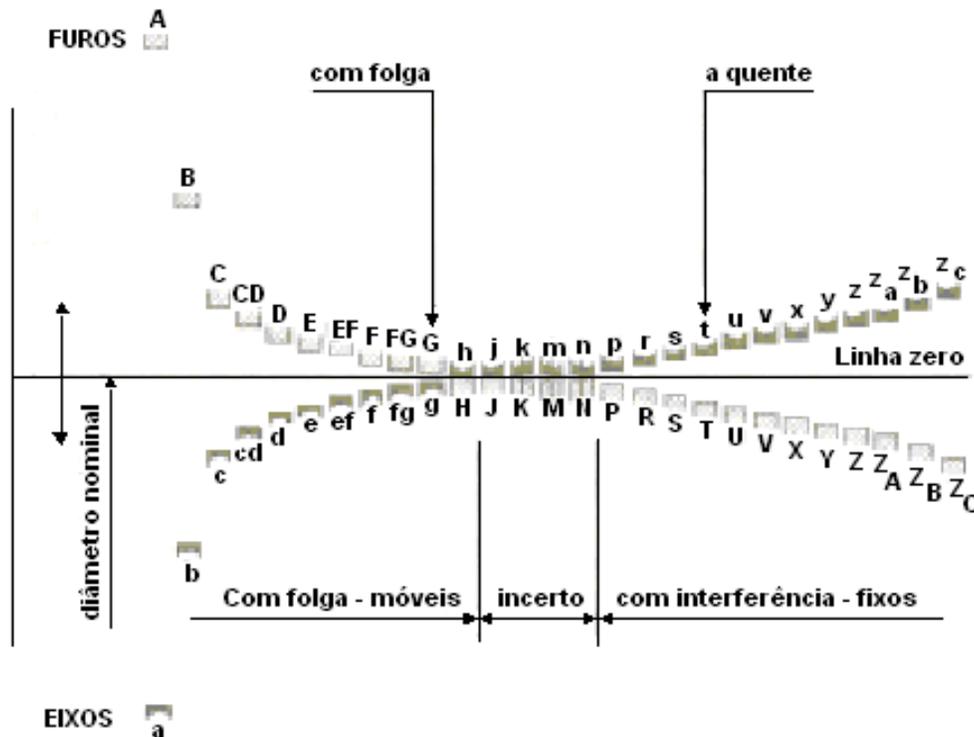


Figura 2.6 – Posições dos campos de tolerância (PROVENZA, 1995)

Examinando-se esta figura, constata-se que para o caso de eixos, as posições de “a” até “g” possuem afastamento de referência superior e negativo. Já as posições de “j” até “zc” possuem afastamento de referência inferior e positivo. Com relação aos furos, para as posições de “A” até “G”, o afastamento de referência é inferior e positivo, enquanto que para as posições de “J” a “ZC”, esse afastamento é superior e negativo. Na posição “h” para eixos e “H” para furos, verifica-se a característica de apresentarem-se na posição limite coincidente com a linha zero onde os limites de tolerância são exclusivamente referidos ao grau de precisão exigido. Quando a linha zero coincide com o limite inferior da tolerância do furo, ou seja, quando a sua dimensão mínima coincide com a dimensão nominal, o sistema é chamado de “sistema furo-base”. Nesse sistema, o furo assume a posição “H” e o eixo assume qualquer posição entre “a” e “zc”. Por outro lado, quando a linha zero coincide com o limite superior da tolerância do eixo, ou seja, quando a sua dimensão máxima coincide com a dimensão nominal, dá-se o nome de “sistema eixo-base”.

Um ajuste é o acoplamento de dois elementos com a mesma dimensão. Segundo GUIMARÃES (1999), um ajuste caracteriza-se pelas tolerâncias adotadas, grau de precisão exigido para a execução das peças e a diferença entre as dimensões efetivas do

eixo e do furo. A disposição do eixo com relação ao furo gera como resultado, três possíveis condições de ajuste (PROVENZA, 1995):

- ajuste com folga;
- ajuste com interferência e
- ajuste incerto.

O ajuste com folga é aquele no qual o afastamento superior do eixo é menor ou igual ao afastamento inferior do furo. O ajuste com interferência é aquele no qual o afastamento superior do furo é menor ou igual ao afastamento inferior do eixo. Quando o afastamento superior do eixo é maior que o afastamento inferior do furo e, além disso, o afastamento superior do furo é maior que o afastamento inferior do eixo, tem-se um ajuste incerto. Dependendo do ajuste requerido, o campo de tolerância poderá situar-se mais próximo ou mais afastado, acima ou abaixo da linha zero. As Tabelas 2.3 e 2.4 apresentam as posições nos campos de tolerância para furos e eixos, respectivamente, de acordo com o ajuste requerido.

Tabela 2.3: Campo de tolerância para furos em função do tipo de ajuste

Ajuste	Posição no campo de tolerância
Com folga	A, B, C, CD, D, E, EF, F, FG, G, H.
Incerto	J (aderente), K (fixo leve), M (fixo normal), N (fixo duro).
Com interferência	P (fixo duro), R (fixo prensado), S (fixo prensado), T (a quente), U, V, X, Y, Z, ZA, ZB, ZC.

Tabela 2.4: Campo de tolerância para eixos em função do tipo de ajuste

Ajuste	Posição no campo de tolerância
Com folga	a, b, c, cd, d, e, ef, f, fg, h.
Incerto	j, k, m, n.
Com interferência	p, r, s, t, u, v, x, y, z, za, zb, zc.

Os valores dos afastamentos de referência para eixos são dados pelas equações que

variam de (2.15) a (2.44), conforme NBR 6158 (NBR 6158, 1995). Para a posição “a”, tem-se o afastamento superior em micrometros, dado pela equação (2.15), caso a dimensão nominal seja menor ou igual a 120 mm, e pela equação (2.16), caso a dimensão seja superior a 120 mm até 500 mm.

$$e_s = -(265 + 1,3 \times D') \quad (2.15)$$

$$e_s = -3,5 \times D' \quad (2.16)$$

Com relação à posição “b”, caso a dimensão nominal seja menor ou igual a 160 mm, o afastamento superior será dado pela equação (2.17). Acima de 160 mm até 500 mm, este afastamento será dado pela equação (2.18).

$$e_s = -140 + 0,85 \times D' \quad (2.17)$$

$$e_s = -1,8 \times D' \quad (2.18)$$

Para a posição “c”, caso a dimensão nominal seja igual ou inferior a 40 mm, o afastamento superior é dado pela equação (2.19). Acima deste valor até 500 mm, ter-se-á a equação (2.20). Já para a posição “cd”, o afastamento superior é dado pela média geométrica entre os valores de e_s , de “c” e de “d”.

$$e_s = -52 \times (D')^{0,2} \quad (2.19)$$

$$e_s = -(95 + 0,8 \times D') \quad (2.20)$$

Para a posição “d”, o afastamento superior é dado pela equação (2.21), e para a posição “e”, pela equação (2.22), ambos válidos para a dimensão nominal até 3150 mm. Para a posição “f”, o afastamento superior é obtido através da equação (2.23). Por sua vez, para a posição “ef”, esse afastamento é obtido pela média geométrica entre os valores dos afastamentos superiores, previstos para “e” e “f”. Com relação à posição “g”, o afastamento superior é determinado pela equação (2.24), para dimensões nominais até 3150 mm.

$$e_s = -16 \times (D')^{0,44} \quad (2.21)$$

$$e_s = -11 \times (D')^{0,41} \quad (2.22)$$

$$e_s = -5,5 \times (D')^{0,41} \quad (2.23)$$

$$e_s = -2,5 \times (D')^{0,34} \quad (2.24)$$

Para a posição “h”, o afastamento superior é igual a zero, enquanto que para o ajuste k, o afastamento inferior também é igual a zero, para dimensões nominais maiores que 500 mm até 3150 mm. Para as dimensões nominais entre 0 e 500 mm, o afastamento inferior é obtido pela equação (2.25), e para o ajuste j5, os afastamentos são simétricos e estabelecidos através das equações (2.26) e (2.27).

$$e_i = +0,6 \times \sqrt[3]{D'} \quad (2.25)$$

$$e_s = +0,5 \times t_5 \quad (2.26)$$

$$e_i = -0,5 \times t_5 \quad (2.27)$$

Para a posição “m”, o afastamento inferior é dado pela equação (2.28), para dimensões nominais entre 0 e 500 mm. Acima de 500 e até 3150 mm, o afastamento inferior é dado pela equação (2.29).

Com relação à posição “n”, para dimensões nominais variando entre 0 e 500 mm, o afastamento inferior é obtido através da equação (2.30). Para valores acima de 500 mm e até 3150 mm, este afastamento é obtido pela equação (2.31).

Para a posição “p”, o afastamento inferior é dado pela equação (2.32), caso a dimensão nominal esteja situada entre 0 e 500 mm. Se a mesma estiver no intervalo compreendido entre um valor acima de 500 mm até 3150 mm, o referido afastamento será dado pela equação (2.33). No caso da posição “r”, o afastamento inferior é obtido através da média geométrica entre os valores dos afastamentos inferiores de “p” e “s”. Já para a

posição “s”, o afastamento inferior é dado pela equação (2.34), se a dimensão nominal for menor ou igual a 50 mm. Caso contrário, este afastamento será dado pela equação (2.35).

$$e_i = +(t_7 - t_6) \quad (2.28)$$

$$e_i = 0,02 \times D' + 12,6 \quad (2.29)$$

$$e_i = +5 \times (D')^{0,34} \quad (2.30)$$

$$e_i = 0,04 \times D' + 21 \quad (2.31)$$

$$e_i = +t_7 + (\text{um valor de 0 a 5}) \quad (2.32)$$

$$e_i = 0,072 \times D' + 37,8 \quad (2.33)$$

$$e_i = +t_8 + (\text{um valor de 0 a 4}) \quad (2.34)$$

$$e_i = t_7 + (0,4 \times D') \quad (2.35)$$

Com relação às posições “t”, “u”, “v”, “x”, “y”, “z”, “z_a”, “z_b” e “z_c”, para dimensões nominais menores ou iguais a 500 mm, os valores dos afastamentos inferiores são dados, respectivamente, pelas equações (2.36) a (2.44).

$$e_i = +t_7 + (0,63 \times D') \quad (2.36)$$

$$e_i = t_7 + D' \quad (2.37)$$

$$e_i = t_7 + (1,25 \times D') \quad (2.38)$$

$$e_i = t_7 + (1,6 \times D') \quad (2.39)$$

$$e_i = t_7 + (2 \times D') \quad (2.40)$$

$$e_i = t_7 + (2,5 \times D') \quad (2.41)$$

$$e_i = t_8 + (3,15 \times D') \quad (2.42)$$

$$e_i = t_9 + (4 \times D') \quad (2.43)$$

$$e_i = t_{10} + (5 \times D') \quad (2.44)$$

Com relação aos afastamentos de referência para furos são válidas as seguintes regras (NBR 6158, 1995):

- Os limites dos furos são exatamente simétricos em relação à linha zero, aos dos eixos com a mesma letra e qualidade, ou seja, E_i é igual a a_s do eixo da mesma letra e qualidade, porém com o sinal trocado e
- Para “N9” até “N16” com as dimensões nominais acima de 3 mm até 500 mm, o afastamento superior é igual a zero.

Há ainda uma regra especial adotada para diâmetros nominais superiores a 3 mm. De acordo com essa regra, para furos “J” a “N” até a qualidade 8 inclusive, e para as posições “P” a “Z_C” até a qualidade 7 inclusive, vale a equação (2.45) (PROVENZA, 1995).

$$E_{s(n)} = -e_{i(n-1)} + [t_n + t_{n-1}] \quad (2.45)$$

De acordo com as condições de ajustes são previstas três classes de ajustes:

- móveis (com folga);
- incertos e
- fixos (com interferência).

Por outro lado, é bastante utilizada na prática, a seguinte classificação quanto ao grau de precisão dos acoplamentos:

- extra preciso;
- preciso;
- médio e
- grosseiro.

As Tabelas 2.5 e 2.6 apresentam alguns ajustes recomendados para atender às necessidades correntes da mecânica (PROVENZA, 1995), em função da classe de ajuste e do grau de precisão requeridos, considerando-se os sistemas furo-base e eixo-base.

Tabela 2.5: Ajustes recomendados para aplicações em mecânica, considerando-se o sistema furo base (PROVENZA, 1995)

GRAU DE PRECISÃO	FURO BASE	EIXO		
		MÓVEIS	INCERTOS	FIXOS
Extra-preciso	H6	e7 - f6 - g5 - h5	j5 - k5 - m5 - n5	p5 - r5 - s5 - t5 - u5 v5 - x5
Preciso	H7	a9 - b9 - b8 - c9 c8 - d9 - d8 - e8 f7 - g6 - h6	j6 - k6 - m6 - n6	p6 - r6 - s6 - t6 u6 - v6 - x6 - y6 - z6
Médio	H8	d10 - e9 - f8 - h8 h7	j7 - k7 - m7 - n6	p6 - r7 - s7 - t7 - u7 v7 - x7 - y7 - z7
Grosseiro	H11	a11 - b11 - c11 d11 - h11		

Tabela 2.6: Ajustes recomendados para aplicações em mecânica, considerando-se o sistema eixo base (PROVENZA, 1995)

GRAU DE PRECISÃO		EIXO BASE	FURO		
			MÓVEIS	INCERTOS	FIXOS
Extra-preciso		h5	E7 - F6 - G6 - H6	J6 - K6 - M6 - N6	P6 - R6 - S6 - T6 U6 - V6 - X6
Precisão	Superior	h6	A9 - B9 - B8 - C9 C8 - D9 - D8 - E8 F7 - G7 - H7	J7 - K7 - M7 - N7	P7 - R7 - S7 - T7 U7 - V7 - X7 Y7 - Z7
	Inferior	h7	A9 - B9 - B8 - C9 C8 - H8	J8 - K8 - M8 - N8	
Médio	Superior	h8	A9 - B9 - B8 - C9 C8 - D10 - E9 F8 - H8		
	Inferior	h9	D10 - E9 - F8 - H8		
Grosseiro		h11	A11 - B11 - C11 D11 - H11		

2.2 Tolerâncias Geométricas

Apenas a determinação das tolerâncias dimensionais não garante a funcionalidade para uma determinada peça, uma vez que segundo Novaski (1994), no processo de fabricação de peças surgem desvios provocados por:

- Falta de rigidez da máquina-ferramenta;
- Problemas na fixação das peças;
- Dispositivo de fixação;
- Desgaste da ferramenta de corte, etc.

Tais desvios deverão ser enquadrados em tolerâncias que garantam a funcionalidade da peça ou do conjunto. Estas tolerâncias relacionadas com os desvios de forma, de posição ou combinados são chamadas de tolerâncias geométricas.

De acordo com a NBR 6409 (1980), a finalidade principal de se aplicar tais tolerâncias é assegurar condições corretas de funcionamento e intercambiabilidade de elementos mecânicos. No entanto, essas tolerâncias só deverão ser prescritas se elas forem indispensáveis para assegurar o perfeito desempenho das peças em seus acoplamentos determinados.

Outro aspecto de grande relevância apresentado na NBR 6409 (1980) é que desde que apenas uma tolerância dimensional seja prescrita, deve-se entender que ela limita também alguns erros de forma e de posição, como por exemplo, a planeza e o paralelismo. No entanto, as superfícies reais das peças podem se afastar da forma geométrica especificada desde que permaneçam enquadradas no interior da tolerância dimensional e do campo de precisão das medidas efetuadas no controle das peças, de acordo com a norma ASME Y14.5M (1994). Por outro lado, uma tolerância de forma e/ou posição pode ser especificada ainda que alguma tolerância dimensional não seja prescrita.

A falta de indicação de uma tolerância de forma ou de posição não implica, necessariamente, no uso de um processo particular de fabricação ou de medição.

A literatura apresenta os desvios de forma, de posição e combinados típicos para diferentes situações de fabricação de peças, considerando as dimensões e o processo de fabricação.

AGOSTINHO et al. (1977) apresenta vários valores máximos permissíveis para desvios geométricos, de acordo com as Tabelas 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 e 2.19.

Tabela 2.7: Desvios permissíveis de forma cilíndrica (cilindricidade)

MÁQUINA	PEÇA		DESVIO (0,001 mm)		
	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Ovalização	Concavidade	Conicidade
Torno com altura entre centros					
até 180 mm	-	300	5	20	10
até 400 mm	-	300	10	20	20
até 1000 mm	-	300	20	20	20
Torno revólver	-	-	10	20	30
Torno frontal	até 300	300	30	60	30
Torno vertical com uma coluna usinando com cabeçotes verticais	acima de 800	300	20	20	-
Torno vertical com uma coluna usinando com cabeçotes frontais	acima de 800	1000	20	-	-
Mandriladora vertical com dois cabeçotes	até 300	300	20	20	20
Mandriladora vertical com dois cabeçotes	acima de 300	100	30	30	30
Retificadora cilíndrica	-	300	5	-	10

Tabela 2.8: Desvios permissíveis de forma cilíndrica com variações de dimensões

DIÂMETRO (mm)	USINAGEM EXTERNA (EIXOS)		USINAGEM INTERNA (FUROS)		
	Torneamento	Retificação	Torneamento	Retificação	Mandrilamento
Até 50	0,01	0,003	0,02	0,003	0,020
De 50 a 120	0,02	0,005	0,03	0,005	0,025
De 120 a 250	0,04	0,06	0,05	0,008	0,040
De 250 a 500	0,05	0,01	-	-	-

Dimensões dadas em milímetros

Tabela 2.9: Desvios permissíveis de circularidade com variações de dimensões

DIÂMETRO	OPERAÇÕES DE USINAGEM				
	TORNEAMENTO		RETIFICAÇÃO		
	Entre pontos	Na placa ou mandril	Entre pontos	Na placa ou mandril	Sem centros
Até 10	0,003	0,005	0,002	0,003	0,003
De 10 a 50	0,005	0,015	0,002	0,005	0,005
De 50 a 120	0,008	0,030	0,003	0,008	0,008
De 120 a 250	0,010	0,050	0,005	0,010	0,010

Dimensões dadas em milímetros

Tabela 2.10: Desvios permissíveis de forma plana (planeza)

OPERAÇÕES DE USINAGEM	PRECISÃO DE FABRICAÇÃO	
	DESVIOS DE PLANICIDADE POR 100 mm	
	Valores econômicos	Valores máximos
Aplainamento de superfícies planas e canais	0,3	0,1
Idem para plaina vertical	0,05 por 300 mm	0,02 por 300 mm
Fresamento com fresa de disco	0,3	0,08
Fresamento com fresa de topo	0,05	0,03
Torneamento em torno horizontal ou vertical	0,05	0,02
Retificação em retificadora de superfície		
em sentido contrário ao avanço	0,1	0,05
no mesmo sentido do avanço	0,05	0,02
Retificação com a face lateral de rebolos	0,03 por 300 mm	0,01 por 300 mm
Retificação com diâmetro externo de rebolos	0,03	0,01
Retificação em desbaste	0,2 por 300 mm	-
Brochamento	0,005	-

Tabela 2.11: Desvios permissíveis de forma plana com variações de dimensões

MAIOR COMPRIMENTO L DA SUPERFÍCIE A SER USINADA	OPERAÇÕES DE USINAGEM				
	Lapidação	Retificação	Fresamento	Torneamento	Aplainamento
Até 10	0,002	0,005	0,015	0,020	0,040
De 10 a 25	0,004	0,015	0,030	0,040	0,080
De 25 a 50	0,006	0,030	0,045	0,080	0,160
De 50 a 120	0,012	0,060	0,070	0,140	0,360
Dimensões dadas em milímetros					
Os valores são válidos para uma fixação					

Tabela 2.12: Desvios permissíveis de paralelismo entre duas superfícies planas

OPERAÇÕES DE USINAGEM	PRECISÃO DE FABRICAÇÃO	
	DESVIOS DE PLANICIDADE POR 100 mm	
	Valores econômicos	Valores máximos
Aplainamento de superfícies planas e canais	0,100	0,050
Idem para plaina vertical	0,1 por 1000 mm	0,02 por 1000 mm
Fresamento com fresa de disco	0,100	0,030
Fresamento com fresa de topo	0,050	0,020
Retificação em retificadora de superfície		
em sentido contrário ao avanço	0,100	0,030
no mesmo sentido do avanço	0,030	0,010
Retificação com a face lateral de rebolos	0,010	0,003
Retificação com diâmetro externo de rebolos	0,050	0,010
Retificação em desbaste	0,200	-

Tabela 2.13: Desvios permissíveis de paralelismo entre duas superfícies planas com variação de dimensões

MAIOR COMPRIMENTO L DA SUPERFÍCIE A SER USINADA	OPERAÇÕES DE USINAGEM			
	Torneamento	Fresamento	Aplainamento	Retificação
Até 10	0,03	0,05	0,10	0,01
De 10 a 25	0,05	0,05	0,20	0,02
De 25 a 30	0,10	0,10	0,30	0,05
De 50 a 120	0,10	0,15	0,45	0,08
De 120 a 250	0,15	0,20	0,50	0,10
Dimensões dadas em milímetros				
Os valores são válidos para uma fixação				

Tabela 2.14: Desvios permissíveis de paralelismo de eixos de superfícies de revolução

SISTEMA DE FURAÇÃO	DIÂMETRO DA BROCA d (mm)	PRECISÃO DE FABRICAÇÃO (mm)			
		USUAL		MÁXIMA	
		DESVIO DE DISTÂNCIA ENTRE CENTROS	DESVIO DE PARALELISMO POR 100 mm	DESVIO DE DISTÂNCIA ENTRE CENTROS	DESVIO DE PARALELISMO POR 100mm
Furação por traçagem	Até 3	± 0,5		± 0,2	
	3 a 6	± 0,6		± 0,25	
	6 a 10	± 0,8		± 0,3	
	10 a 18	± 1	0,5	± 0,35	0,3
	18 a 30	± 1,2		± 0,4	
	30 a 50	± 1,6		± 0,45	
	50	± 2		± 0,5	

Tabela 2.15: Desvios permissíveis de perpendicularidade de furos com relação a uma superfície plana de referência

OPERAÇÕES DE USINAGEM	PRECISÃO DE FABRICAÇÃO	
	ECONÔMICA	MÁXIMA
	Desvio de paralelismo por 100 mm	
Furação		
por traçagem	0,50	0,30
com dispositivo	0,10	0,10
Mandrilamento		
em torno com a peça centrada por traçagem	1,00	0,50
centragem em placa angular	0,05	0,02
em mandriladora ou fresadora horizontal	0,05	0,02

Tabela 2.16: Desvios permissíveis de perpendicularidade de eixos ou furos com relação a um plano de referência

OPERAÇÕES DE USINAGEM	PRECISÃO DE FABRICAÇÃO	
	VALORES ECONÔMICOS	VALORES MÁXIMOS
	Erro de perpendicularismo por 100 mm	
Furação		
com traçagem	0,50	0,30
com dispositivo	0,10	-
Usinagem em torno		
montagem ou traçagem	1,00	0,50
verificado com relógio comparador	0,50	0,20
furo e face em uma única usinagem	0,20	0,05
Usinagem de furo em fresadora vertical com a peça		
presa na mesa da máquina	0,05	0,02
Usinagem de furo em fresadora horizontal com a peça		
presa em ângulo com a mesa	0,08	0,03
Retificação interna com a peça presa em dispositivo	0,08	0,03

Tabela 2.17: Desvios máximos permissíveis de batimento radial em torneamento e retificação ou em mandrilamento e retificação interna de furos para peças presas em placas

TIPO DE CENTRAGEM DA PEÇA	PRECISÃO DE FABRICAÇÃO			
	USINAGEM EXTERNA		USINAGEM INTERNA	
	TORNEAMENTO	RETIFICAÇÃO	MANDRILAMENTO	RETIFICAÇÃO
Usinagem em placa universal				
sem centragem subsequente	1,00	0,50	1,00	0,60
Idem com centragem com graminho	1,00	-	1,00	-
Idem com centragem com relógio indicador	0,10	0,05	0,10	0,06
Idem para operação com castanhas moles	0,07	-	0,08	-

Tabela 2.18: Desvios permissíveis de batimento radial com variação de dimensões

DIÂMETRO	OPERAÇÕES DE USINAGEM				
	TORNEAMENTO		RETIFICAÇÃO		
	Entre pontos	Na placa ou mandril	Entre pontos	Na placa ou mandril	Sem centros
Até 5	0,030	0,050	0,005	0,030	0,030
De 5 a 10	0,050	0,080	0,010	0,050	0,050
De 10 a 50	0,080	0,100	0,015	0,100	0,100
De 50 a 120	0,100	0,150	0,020	0,150	0,150
De 120 a 250	0,150	0,200	0,025	0,200	0,200
Dimensões dadas em milímetros					

Tabela 2.19: Desvios máximos permissíveis de batimento radial com a peça entre centros

TIPO DE USINAGEM	PRECISÃO DE USINAGEM (mm)	
	TORNEAMENTO	RETIFICAÇÃO
Usinagem entre centros com uma operação	0,030	0,010
Usinagem entre centros com duas operações	0,050	0,015
Idem para duas operações com centro temperado sem lapidação posterior	-	0,050
Fixação em mandril previamente retificado	0,080	0,020
Idem para mandril sem retificação com ponto retificado ou torneado	0,100	0,040
Idem para mandril sem retificação e centro temperado sem retificação posterior	0,150	0,080

2.3 O Processo de Fabricação por Torneamento

Define-se torneamento como sendo o processo mecânico de usinagem que é destinado à obtenção de superfícies de revolução, empregando-se uma ou mais ferramentas monocortantes. A peça gira em torno do seu eixo principal e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo (FERRARESI, 1977). As operações de torneamento podem ser subdivididas em duas classes (DOYLE, 1962):

- As realizadas com a peça presa entre centros e
- As realizadas com a peça presa à placa em uma de suas extremidades, com ou sem suporte na outra extremidade.

Entre as diversas operações de torneamento existentes é abordado neste trabalho, apenas o torneamento cilíndrico externo, conforme Figura 2.7.

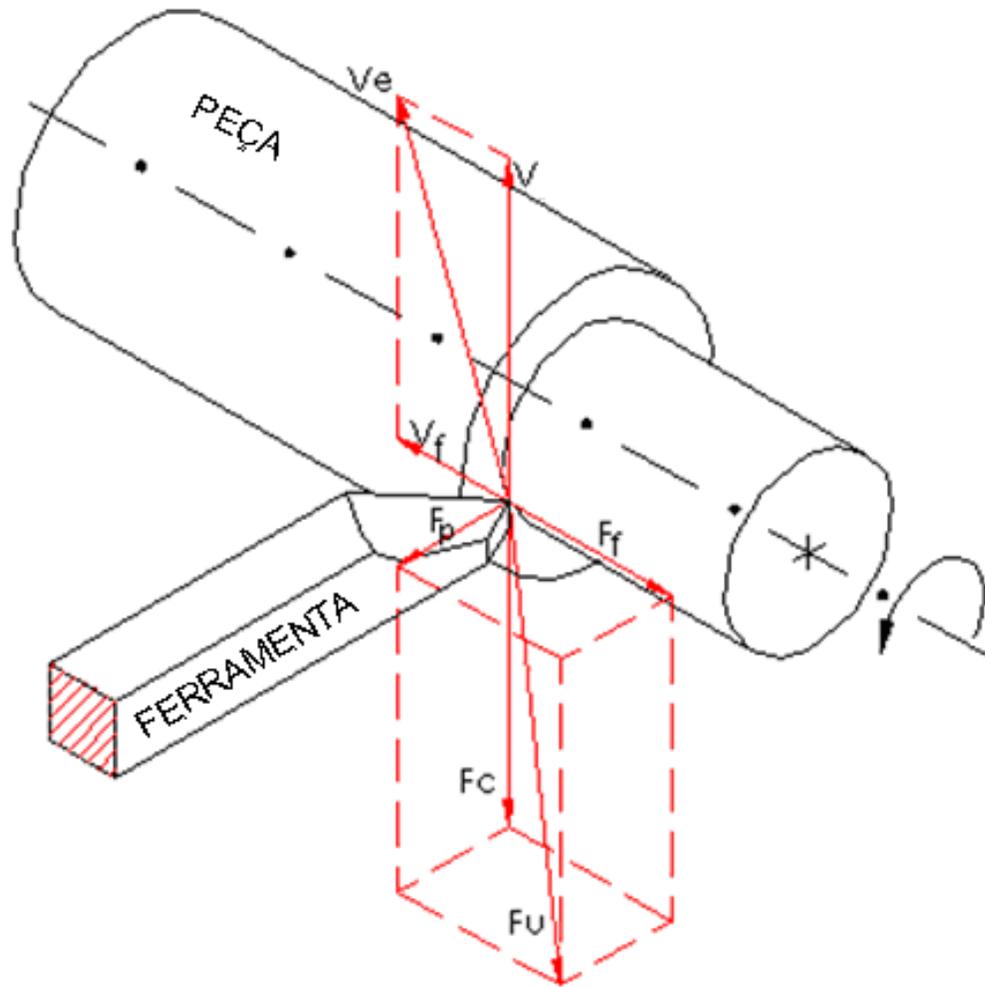


Figura 2.7 – Apresentação do processo de torneamento cilíndrico externo

2.3.1 Vida da Ferramenta

A quebra da ferramenta é o caso mais crítico de avaria que se pode ter. Ela pode ser prematura ou ser causada por um desgaste excessivo da ferramenta. O desgaste, por sua vez, aumenta gradualmente e causa o aumento da força de corte e da vibração na máquina ferramenta; a piora do acabamento superficial da peça; a variação dimensional da peça ou a sobrecarga do sistema de acionamento. Uma vez que o desgaste da ferramenta evolui de maneira gradual e contínua, torna-se necessária a definição de grandezas mensuráveis para quantificar o dano causado por ele, assim como, se definir um critério de fim de vida da ferramenta, ou seja, um valor máximo de desgaste a partir do qual a ferramenta tornar-se-á imprópria para o desempenho da função. De acordo com a norma ISO 3685 (ISO 3685,

1993), o critério de fim de vida da ferramenta é definido como um predeterminado valor limiar da quantidade de desgaste da ferramenta.

O desgaste ocorre através dos seguintes mecanismos: cisalhamento de microsoldas, abrasão mecânica, difusão intermetálica e oxidação (FERRARESI, 1989). Estes fatores estão relacionados com a temperatura de corte que depende, principalmente, da velocidade de corte.

Os principais tipos de desgaste, que são de flanco e de cratera, estão apresentados na Figura 2.8.

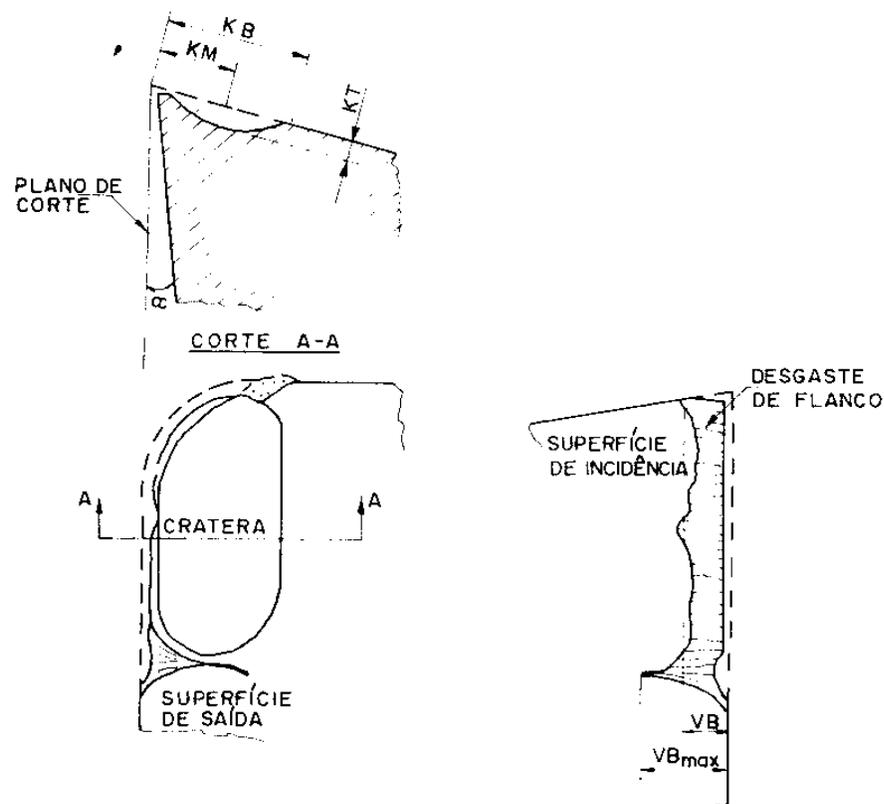


Figura 2.8 – Desenho esquemático do desgaste de flanco e do desgaste de cratera (ISO 3685, 1993)

De acordo com Kumar et al. (2006), o desgaste da ferramenta afeta as dimensões e o acabamento superficial da peça, sendo também um importante critério para determinação do fim de vida da ferramenta. Segundo ele, o desgaste da ferramenta é geralmente um processo gradual e a sua taxa depende do material da ferramenta e da peça, dos parâmetros de processo, da geometria da ferramenta, dos fluidos de corte e das características da

máquina-ferramenta. Segundo KUMAR et al. (2004), o desgaste adversamente afeta a vida da ferramenta, a qualidade da superfície usinada, sua exatidão dimensional e, conseqüentemente, a economia das operações de corte. Os efeitos do desgaste de flanco afetam a tolerância dimensional das peças. O desgaste de flanco é geralmente atribuído ao atrito da ferramenta ao longo da superfície usinada e altas temperaturas, gerando um desgaste por abrasão e/ou aderência nas ferramentas cerâmicas. Ele é usualmente caracterizado por entalhes e sulcos na superfície de flanco (KUMAR et al., 2006).

O desgaste de flanco é medido na superfície de folga (flanco da ferramenta), enquanto que o desgaste de cratera é medido na superfície de saída. Ele é obtido, conforme apresentado na Figura 2.9, de acordo com a equação (2.46).

$$VB = \frac{t'}{2 \times \operatorname{tg} \alpha} \quad (2.46)$$

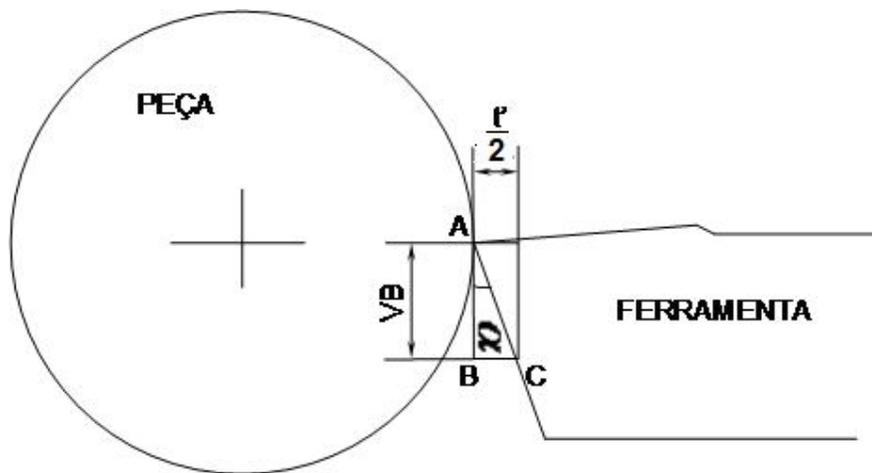


Figura 2.9 – Desenho apresentando a relação entre o desgaste de flanco (VB) e a tolerância dimensional (t')

KUMAR et al. (2006) estudou a usinagem de aços endurecidos (HRC 60) com ferramentas cerâmicas, determinando o desgaste de flanco e de cratera em função da velocidade de corte e do tempo de corte, com o objetivo de gerar um modelo generalizado de desgaste, baseado na equação de Taylor para a vida da ferramenta. As constantes desse modelo são encontradas usando análise de regressão múltipla com os dados de desgaste coletados com várias velocidades de corte e vários tempos de corte. A equação (2.47) expressa o modelo.

$$VB = a_1 \cdot v^{b_1} \cdot t_c^{c_1} \quad (2.47)$$

O estudo proposto por OLIVEIRA et al. (2007) apresenta valores de tolerâncias dimensionais em função da velocidade de corte e do tempo de corte, através da equação (2.48), obtida pela substituição do valor de VB da equação (2.47) na equação (2.46).

$$t' = 2 \times a_1 \times V^{b_1} \times t_c^{c_1} \times \operatorname{tg} \alpha \quad (2.48)$$

A Tabela 2.20 apresenta valores limites do desgaste de flanco e de cratera, considerando operações de desbaste e acabamento. Estes valores foram os utilizados neste trabalho.

Tabela 2.20 - Valores limites dos desgastes para diferentes ferramentas (FERRARESI, 1989)

Ferramenta	Desgaste	Operação de acabamento	Operação de desbaste
Aço rápido	VB	0,2 - 0,3	0,35 - 1,0
	VBmax	-	0,4 - 1,4
	KT	-	0,1 - 0,3
Metal duro	VB	0,1 - 0,25	0,3 - 0,5*
	VBmax	-	0,5 - 0,8*
	KT	-	0,1 - 0,2
Metal duro com revestimento	VB	0,1 - 0,25	0,3 - 0,5
	VBmax	-	0,4 - 0,7
	KT	-	0,1 - 0,15
Material cerâmico (Al ₂ O ₃)	VB	0,1 - 0,2	0,25 - 0,3
	KT	-	0,1
Material cerâmico (Si ₃ N ₄)	VB	0,1 - 0,2	0,25 - 0,5
	KT	-	0,1 - 0,15

(*) para pastilhas soldadas aumentar 30%.

2.3.2 Força de Corte Segundo Kienzle

A pressão específica de corte (K_c) é definida como sendo a relação entre a força de corte (F_c) e a área da secção de corte (S), conforme equação (2.49), (FERRARESI, 1977).

$$K_c = \frac{F_c}{S} \quad (2.49)$$

A pressão específica de corte (K_c) depende dos seguintes fatores (FERRARESI, 1977): material da peça, secção de corte, geometria da ferramenta, afiação da ferramenta, velocidade de corte, fluido de corte e rigidez da ferramenta.

As dimensões de corte, isto é, a espessura de corte h e a largura de corte b são os fatores de grande influência na força e na determinação da potência consumida (STEMMER, 1989). A área da secção de corte (S) é definida como a área calculada da secção de cavaco que será retirado, medida no plano normal à direção de corte. A espessura de corte (h) é dada pelo produto do avanço (f) pelo seno do ângulo de posição (χ) da ferramenta, de acordo com a equação (2.50), enquanto que a largura de corte (b) é obtida, dividindo-se a profundidade de corte (a_p) pelo seno do ângulo de posição da ferramenta, como mostrado na equação (2.51). Por sua vez, a equação (2.52) representa a área da secção de corte (S).

$$h = f \times \text{sen} \chi \quad (2.50)$$

$$b = \frac{a_p}{\text{sen} \chi} \quad (2.51)$$

$$S = b \times h = f \times a_p \quad (2.52)$$

Dentre os vários modelos para determinação da pressão específica de corte, um dos mais divulgados na literatura foi proposto por Kienzle. Este modelo é bastante empregado por ser simples e preciso para se calcular a força de corte (KIENZLE, 1952). De acordo com este modelo, a força de corte é apresentada na equação (2.53).

A equação (2.54) apresenta a equação de Kienzle em função dos parâmetros de usinagem, obtidos das equações (2.50) e (2.51).

$$F_c = K_{s1} \times h^{1-z} \times b \quad (2.53)$$

$$F_c = K_{s1} \times (f \times \text{sen}\chi)^{1-z} \times \frac{a_p}{\text{sen}\chi} \quad (2.54)$$

A potência de corte (P_c) por sua vez é dada pela seguinte equação (2.55):

$$P_c = \frac{F_c \times V}{60 \times 75} \quad (2.55)$$

2.3.3 Equações de Vida da Ferramenta

Ferraresi (1977) define como vida da ferramenta, o tempo em que a mesma trabalha efetivamente produzindo cavaco (deduzidos os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Este critério pode dizer respeito aos valores de desgaste máximos admissíveis.

A expressão empírica que relaciona o tempo de vida da ferramenta por aresta em função da velocidade de corte foi apresentada pela primeira vez por Taylor, conforme equação (2.56).

$$T \times V^x = K \quad (2.56)$$

A utilização desta equação nos cálculos de otimização acarreta o problema de que a mesma só é válida para um único avanço e uma única profundidade de corte. No entanto, foi desenvolvida uma outra equação que relaciona o tempo de vida com a velocidade de corte, porém, de maneira generalizada. Tal equação é chamada de fórmula expandida de Taylor, e é apresentada na equação (2.57).

$$V = C \times f^E \times a_p^F \times T^G \times VK^H \quad (2.57)$$

A vantagem de se trabalhar com a equação (2.57) é que apesar de ser necessária uma maior quantidade de pontos para a determinação de seus parâmetros (MESQUITA, 1980; LINDSTRÖM, 1989), uma vez determinados, a mesma poderá ser utilizada para quaisquer valores de avanço e profundidade de corte, o que se torna à alternativa mais interessante em otimização dos parâmetros de usinagem, em função das combinações necessárias entre avanços e rotações. Neste trabalho é considerada apenas a fórmula expandida de Taylor no módulo de fabricação.

2.3.4 Determinação do Tempo Total de Fabricação por Peça

A determinação dos parâmetros ótimos de usinagem consiste em se expressar quantitativamente os valores de avanço, velocidade de corte e profundidade de corte que garantirão uma fabricação otimizada, de acordo com duas situações distintas:

- Necessidade da máxima produção ou
- Produção com o mínimo custo.

O critério de máxima produção é estabelecido, quando se trabalha com o menor tempo total de fabricação por peça, considerando-se os diversos tempos existentes no chão-de-fábrica para a confecção de um lote de z peças. A equação (2.58) apresenta o tempo total utilizado para a fabricação de uma peça, em um lote de z peças (FERRARESI, 1977). A equação (2.58) pode ser reescrita, em função dos parâmetros de usinagem, de acordo com a equação (2.59).

$$t_t = t_c + \left[t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right] + \left(\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) \times [t_{ft} + t_{fa}] \quad (2.58)$$

$$t_t = \frac{l_f \times \pi \times d}{1000 \times f \times V_c} + \left[t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right] + \left(\frac{l_f \times \pi \times d \times V_c^{x-1}}{1000 \times f \times K} - \frac{1}{Z} \right) \times [t_{ft} + t_{fa}] \quad (2.59)$$

O tempo de preparação (t_p) deverá ser trabalhado no sistema produtivo no sentido de sua minimização. Segundo Fleischer et al. (2008), como promotor da flexibilidade, o processo de preparação possui um significado especial sob dois aspectos. Por um lado,

trata-se de um elemento fundamental do sistema de produção. Por outro lado, completa uma lacuna nas atividades de aperfeiçoamento das linhas produtivas, uma vez que muitas empresas se concentram exclusivamente na otimização dos tempos principais de operação da máquina-ferramenta para aumentar a produtividade.

Para a obtenção da velocidade de máxima produção, basta derivar a função tempo total de fabricação por peça da equação (2.59) em relação à velocidade de corte e igualar o resultado a zero, obtendo, portanto, a equação (2.60) (FERRARESI, 1977).

$$V_{mxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \times (t_{fi} + t_{fa})}} \quad (2.60)$$

2.3.5 Determinação do Custo Total de Fabricação por Peça

A equação (2.61) representa a equação mais geral do custo total de fabricação de uma peça, considerando-se um lote de Z peças (FERRARESI, 1977).

$$K_p = (K_m + K_{mi}) + (K_{us} + K_{um} + K_{uf}) + (K_{cq} + K_{if} + K_v) \quad (2.61)$$

Os custos K_{us} , K_{um} e K_{uf} são dependentes da velocidade de corte e necessitam de um estudo minucioso. Os outros custos são considerados constantes, ou seja, independentes da velocidade de corte.

O custo K_{us} é dado pela equação (2.62). As sobretaxas acrescidas ao salário homem incluem supervisão, serviços gerais, administração técnica e geral da fábrica, podendo variar entre, aproximadamente, 85 a 100% do salário base. O custo da máquina por peça fabricada é dado pela equação (2.63). Enquanto que o custo da ferramenta por vida é obtido de acordo com as seguintes situações: para ferramentas de aço rápido ou pastilhas soldadas, o custo é obtido através da equação (2.64), e para insertos reversíveis, esse custo é dado pela equação (2.65). Por sua vez, o custo da ferramenta é obtido através da equação (2.66).

$$K_{us} = t_t \times \frac{Sh}{60} \quad (2.62)$$

$$K_{um} = \frac{t_t}{60} \times S_m \quad (2.63)$$

$$K_{ft} = \frac{1}{n_f} \times (V_{fi} - V_{ff}) + K_{fa} \times \frac{n_a}{n_f} \quad (2.64)$$

$$K_{ft} = \frac{1}{n_{fp}} \times V_{si} + \frac{K_s}{n_s} \quad (2.65)$$

$$K_{uf} = K_{ft} \times \frac{t_c}{T} \quad (2.66)$$

Substituindo-se as equações (2.62), (2.63) e (2.66) na equação (2.61), obtém-se a seguinte equação do custo total de fabricação por peça (K_p):

$$K_p = (K_m + K_{mi}) + t_t \times \frac{S_h}{60} + t_t \times \frac{S_m}{60} + K_{ft} \times \frac{t_c}{T} + (K_{cq} + K_{if} + K_v) \quad (2.67)$$

A equação geral do custo total de fabricação por peça é dada, a partir da equação (2.67), pela equação (2.68), sendo a constante C_2 obtida pela equação (2.69) e a constante C_3 obtida através da equação (2.70).

$$K_p = C_1 + \frac{\pi \times d \times l_f}{60 \times 1000 \times f \times V_c} \times C_2 + \frac{\pi \times d \times l_f}{1000 \times f \times V_c \times T} \times C_3 \quad (2.68)$$

$$C_2 = S_h + S_m \quad (2.69)$$

$$C_3 = K_{ft} + \frac{t_{ft} + t_{fa}}{60} \times (S_h + S_m) \quad (2.70)$$

Derivando-se a equação (2.68) em relação à velocidade de corte, obtém-se a velocidade de mínimo custo, conforme apresentado na equação (2.71).

$$V_0 = x \sqrt{\frac{C_2 \times K}{60 \times (X - 1) \times C_3}} \quad (2.71)$$

2.4 Aspectos Gerais da Medição Dimensional

A metrologia, ciência da medição, abrange todos os aspectos teóricos e práticos, em quaisquer campos da ciência ou da tecnologia (VIM, 2000). A medição, por sua vez, é um conjunto de operações que tem por objetivo determinar um valor de uma grandeza. Logo, se faz necessário saber que uma grandeza é um atributo de um fenômeno que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado (VIM, 2000).

Na prática, é impossível a obtenção de uma medição perfeita, uma vez que toda ela sofre vários tipos de influências. Em função disto, não se consegue determinar o valor verdadeiro para uma grandeza qualquer. No entanto, mesmo adotando-se um “valor verdadeiro convencional” que é um valor atribuído a uma grandeza específica e aceito, às vezes por convenção, como tendo uma incerteza apropriada para uma dada finalidade (VIM, 2000), existe sempre presente, mesmo em quantidade que muitas vezes não se consegue mensurar, o erro de medição (E_M) que é obtido subtraindo-se o resultado de uma medição (R) do valor verdadeiro do mensurando (VV), conforme equação (2.72).

O erro de medição pode ser dividido em duas parcelas, conforme apresentado na equação (2.73): o erro sistemático (E_{SI}) e o erro aleatório (E_A).

$$E_M = R - VV \quad (2.72)$$

$$E_M = E_{SI} + E_A \quad (2.73)$$

O erro sistemático de um dado sistema de medição é teoricamente definido pela média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando (VIM, 2000). Na prática, esse erro geralmente não é constante em toda a faixa de indicação do sistema de medição, mas pode ser estimado.

Realizando-se repetidas medições sob as mesmas condições, verificam-se variações desordenadas nos valores obtidos com relação ao valor médio das indicações, tanto para valores abaixo do médio quanto para valores acima. Essa aleatoriedade de como os valores

individuais se comportam com relação ao valor médio dá origem ao chamado erro aleatório que teoricamente é o resultado de uma medição menos a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade (VIM, 2000). Resumidamente, o erro de medição é expresso conforme representado na Figura 2.10.

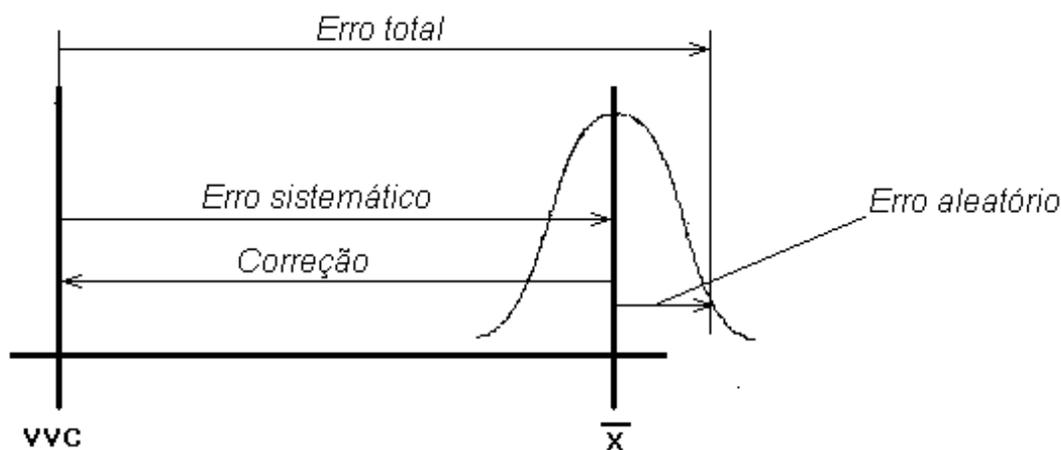


Figura 2.10 – Representação gráfica do erro de medição (COUTO, 2002).

Ao contrário do erro sistemático, o erro aleatório é imprevisível, sendo influenciado pelas condições ambientais, instrumento ou sistema de medição, procedimento de medição, objeto de medição e o executor da medição. Devido ao seu caráter aleatório, esse erro estará sempre presente no resultado de uma medição como parte da incerteza de medição.

2.4.1 Modelo para a Determinação da Incerteza de Medição Baseado no ISO GUM

Em processos industriais, a garantia da qualidade é avaliada por resultados que não são reais, uma vez que é impossível se obter, por medição, o valor exato de um mensurando que é a grandeza específica submetida à medição (VIM, 2000). Tal fato ocorre em função de existirem agentes que exercem influência no resultado da medição, conforme apresentado na Figura 2.11.

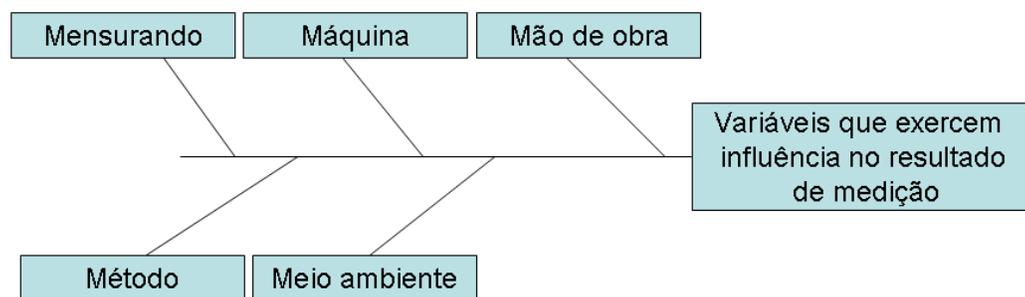


Figura 2.11 – Diagrama espinha de peixe para as variáveis de influência no resultado de uma medição (Figura adaptada de OLIVEIRA (2008))

Em função da grande quantidade de variáveis de influência sobre uma medição, é fundamental se estabelecer um intervalo, em torno do resultado da medição, que possa abranger, com uma probabilidade específica, os valores que podem ser atribuídos ao mensurando. Este intervalo é chamado de incerteza de medição e é definido como o parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando (VIM, 2000). A incerteza é um conceito chave para a expressão do resultado da medição (MAURIS, 2006). Segundo Wang (2005), a incerteza é usada como uma ferramenta econômica para estabelecer a alocação ótima de recursos entre a especificação, a fabricação e a verificação.

A incerteza de medição é um valor que se origina da combinação de vários componentes que podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados de séries de medições, caracterizadas pelo desvio padrão experimental (incerteza tipo A) e através de distribuições de probabilidades consideradas, com base em informações, e na experiência adquirida. Logo, o número de fontes de incerteza de medição dependerá do conhecimento e da experiência adquirida no processo de medição. A metodologia para a expressão da incerteza de medição é padronizada pelo ISO GUM (ISO GUM, 2003), sendo apresentada esquematicamente na Figura 2.12, onde inicialmente, são levantadas as fontes individuais de incerteza de medição e atribuída uma distribuição probabilística a cada uma delas. Em seguida, as mesmas são combinadas para a obtenção de uma única incerteza com aproximadamente 68% de confiabilidade (incerteza combinada) para ser expandida, através do fator de abrangência, obtendo-se assim, uma incerteza de medição para uma confiabilidade de aproximadamente 95% (incerteza expandida).

O ISO GUM provê as bases para o uso das medições e suas incertezas (SLEELE, 2006). Ele recomenda o uso de uma incerteza padronizada combinada para expressar a incerteza de medição (WOOD et al., 1998).

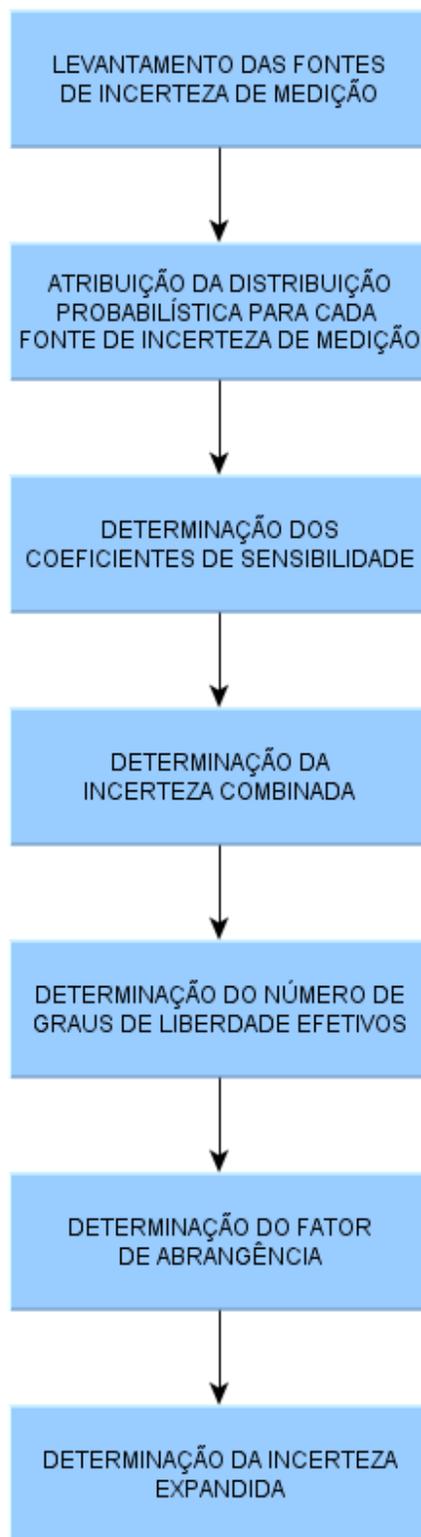


Figura 2.12 – Fluxograma apresentando as etapas para a expressão da incerteza de medição segundo a metodologia do ISO GUM (ISO GUM, 2003)

2.4.1.1 Incerteza Tipo A

A incerteza do tipo A é expressa pela raiz quadrada da variância experimental. Mesmo sendo a variância a grandeza mais fundamental, o desvio padrão é mais utilizado para expressar a dispersão das medições, por se apresentar na mesma dimensão dos valores medidos. O desvio padrão $S(x_i)$, por sua vez, é dado pela equação (2.74).

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.74)$$

Como há a necessidade de se determinar a dispersão dos valores obtidos em torno da média, utiliza-se a variância em torno da média $S^2(\bar{x})$ como uma melhor estimativa da variância experimental $S^2(x_i)$. Para a obtenção da variância em torno da média, basta dividir a variância experimental pelo número de medições realizadas, de acordo com a equação (2.75).

$$S^2(\bar{x}) = \frac{S^2(x_i)}{n} \quad (2.75)$$

Assim, o desvio padrão da média é obtido, extraindo-se a raiz quadrada de $S^2(\bar{x})$, obtendo-se, portanto, a equação (2.76).

$$S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{S^2(x_i)}{n}} = \frac{S(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (2.76)$$

O desvio padrão da média é uma fonte de incerteza de medição padronizada referente a um desvio padrão, ou seja, com aproximadamente 68% de confiabilidade, sendo denominado de incerteza tipo A. A incerteza tipo A é a incerteza associada à média das indicações.

Existem várias fontes de incerteza de medição além da incerteza referente ao desvio padrão. Se o laboratório responsável pela realização de uma dada medição tivesse um tempo irrestrito e recursos suficientes para uma minuciosa e longa investigação estatística

de tais fontes, com diferentes instrumentos ou sistemas de medição, diferentes metodologias de medição e diferentes condições ambientais, tais fontes poderiam ser determinadas por análise estatística, sendo todas do tipo A. Como o custo e o elevado tempo inviabilizam tal procedimento, há a necessidade da quantificação das mesmas através da atribuição de uma distribuição probabilística ao estímulo causador do desvio. Por não serem do tipo A, tais incertezas de medição são chamadas de tipo B. As distribuições probabilísticas mais utilizadas nas medições dimensionais com os sistemas de medição propostos neste trabalho são a distribuição retangular e a triangular, uma vez que é muito comum em medições, se trabalhar com fontes de incerteza onde só é possível se estimar o limite superior e o inferior ou certos casos em que mesmo existindo o desvio, a probabilidade de que o mesmo encontre-se próximo da média é maior que em um dos limites extremos.

2.4.1.2 Distribuição Retangular

Em grande parte dos casos, pode ser possível estimar o limite superior e o inferior para uma dada grandeza de influência. Neste caso, pode-se afirmar que a probabilidade de que o valor da grandeza esteja dentro do valor compreendido por a_- (limite inferior) até a_+ (limite superior) é igual a um e, conseqüentemente, que a probabilidade do valor da grandeza estar fora deste intervalo é zero. Como não se conhece o comportamento da grandeza dentro do intervalo, considera-se que é igualmente provável que o referido valor esteja em qualquer lugar dentro dele. Este tipo de distribuição é conhecida como distribuição retangular e é apresentada na Figura 2.13.

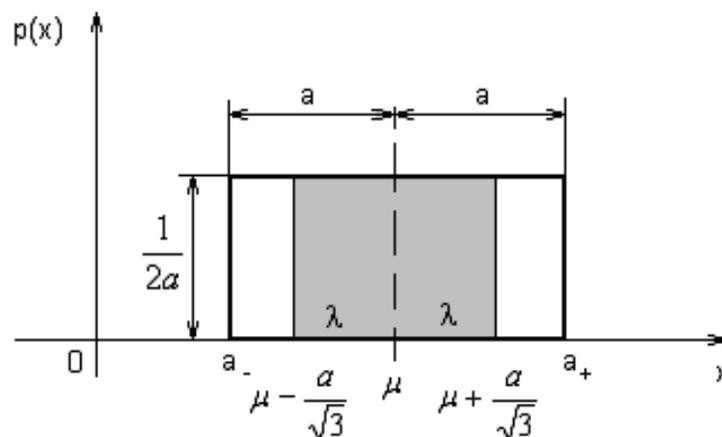


Figura 2.13 – Distribuição retangular

Nesta distribuição, a função $p(x)$ é uma reta horizontal variando de a_- até a_+ , com intervalo $2a$. Como a área do retângulo é unitária, $p(x)$ é dada pela equação (2.77). Por sua vez, a abscissa do ponto médio da distribuição é obtida através da equação (2.78), (POTTER, 2000).

$$p(x) = \frac{1}{2 \times a} \quad (2.77)$$

$$\mu(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx = \int_0^{2a} x \frac{1}{2a} dx \quad (2.78)$$

O resultado da equação (2.78) é apresentado pela equação (2.79) (LINK, 2000).

$$\mu(x) = \frac{1}{2a} \times \frac{x^2}{2} \Big|_0^{2a} = \frac{4a^2}{4a} = a \quad (2.79)$$

A região da Figura 2.13 demarcada em tom cinza corresponde a uma probabilidade de aproximadamente 68%. A distância entre o ponto médio e a linha correspondente a essa probabilidade é representada pela equação (2.80) (LINK, 2000). O primeiro termo desta equação é obtido através da equação (2.81), cujo resultado é mostrado na equação (2.82), (POTTER, 2000).

$$\lambda^2 = \mu(x^2) - [\mu(x)]^2 \quad (2.80)$$

$$\mu(x^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x)dx = \int_0^{2a} x^2 \frac{1}{2a} dx \quad (2.81)$$

$$\mu(x^2) = \frac{1}{2a} \cdot \frac{x^3}{3} \Big|_0^{2a} = \frac{8a^3}{6a} = \frac{4a^2}{3} \quad (2.82)$$

Substituindo-se as equações (2.79) e (2.82) em (2.80), obtém-se a equação (2.83). O valor da incerteza de medição padronizada com aproximadamente 68% de confiabilidade da grandeza “x”, considerando-se uma distribuição retangular é obtida extraindo-se a raiz quadrada de λ na equação (2.83), obtendo-se, portanto, a equação (2.84).

$$\lambda^2 = \frac{4a^2}{3} - a^2 \quad (2.83)$$

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.84)$$

2.4.1.3 Distribuição Triangular

Existem situações, no entanto, que mesmo havendo o desvio, a probabilidade de que o mesmo encontre-se próximo da média é maior que nos extremos a^- e a^+ . Em tais situações é mais prudente substituir a distribuição retangular por uma distribuição triangular, conforme Figura 2.14.

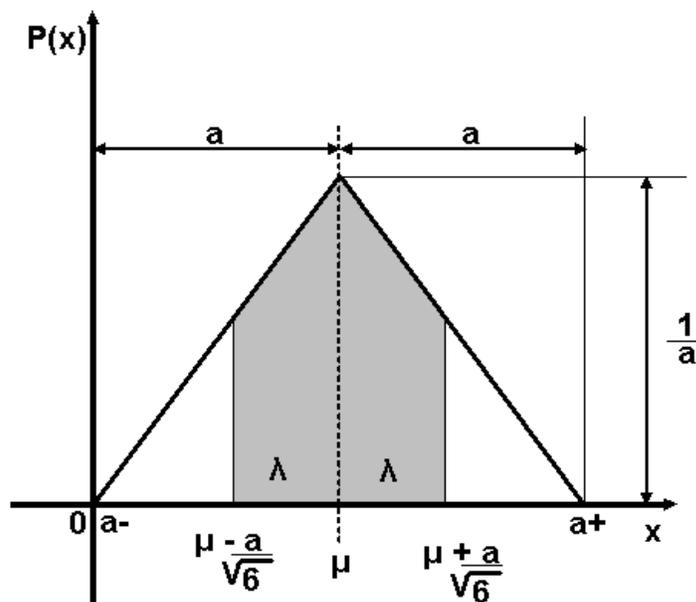


Figura 2.14 – Distribuição triangular

Neste caso, como a função $p(x)$ não é contínua no intervalo compreendido de a^- até a^+ , ou seja, no intervalo de 0 até $2a$, a integração deverá ocorrer nos intervalos de a^- ao centro, ou seja, de “0” até “ a ”, e do centro até a^+ , ou seja, de “ a ” até “ $2a$ ”. Para o intervalo de “0” até “ a ”, a função de densidade de probabilidade $p_1(x)$ é dado pela equação (2.85). Já para o trecho de “ a ” até “ $2a$ ”, a equação (2.86) apresenta o valor da função densidade de probabilidade $p_2(x)$ para este intervalo (LINK, 2000).

$$\frac{p_1(x)}{x} = \frac{1/a}{a} \therefore p_1(x) = \frac{x}{a^2} \quad (2.85)$$

$$\frac{p_2(x)}{(2a-x)} = \frac{1/a}{a} \therefore p_2(x) = \frac{(2a-x)}{a^2} \quad (2.86)$$

A abscissa do ponto médio da distribuição, tomando-se como base a equação (2.78) e adaptando-a para os dois trechos, é dada pela equação (2.87). O resultado desta equação é apresentado pelas equações (2.88) e (2.89).

$$\mu(x) = \int_0^a xp_1(x)dx + \int_a^{2a} xp_2(x)dx = \int_0^a x \cdot \frac{x}{a^2} dx + \int_a^{2a} x \cdot \frac{(2a-x)}{a^2} dx \quad (2.87)$$

$$\mu(x) = \frac{x^3}{3a^2} \Big|_0^a + \left[\frac{2a \cdot x^2}{2a^2} - \frac{x^3}{3a^2} \right] \Big|_a^{2a} \quad (2.88)$$

$$\mu(x) = \frac{a}{3} + 4a - \frac{8a}{3} - a + \frac{a}{3} = a \quad (2.89)$$

A distância entre o ponto médio e a linha correspondente a um dos extremos da região onde a probabilidade é de aproximadamente 68% (região em tom cinza), é dada pela equação (2.80), e para se obter o valor de λ , há a necessidade de se determinar o valor de $\mu(x^2)$, conforme equações (2.90) e (2.91), tomando-se como base a equação (2.78). O valor de $\mu(x^2)$ é apresentado na equação (2.92).

$$\mu(x^2) = \int_0^a x^2 \cdot \frac{x}{a^2} dx + \int_a^{2a} x^2 \cdot \frac{(2a-x)}{a^2} dx \quad (2.90)$$

$$\mu(x^2) = \frac{x^4}{4a^2} \Big|_0^a + \left[\frac{2a \cdot x^3}{3a^2} - \frac{x^4}{4a^2} \right] \Big|_a^{2a} \quad (2.91)$$

$$\mu(x^2) = \frac{a^2}{4} + \frac{16a^2}{3} - \frac{16a^2}{4} - \frac{2a^2}{3} + \frac{a^2}{4} = \frac{7a^2}{6} \quad (2.92)$$

Substituindo-se as equações (2.89) e (2.92) na equação (2.80), obtém-se:

$$\lambda^2 = \mu(x^2) - [\mu(x)]^2 = \frac{7a^2}{6} - a = \frac{a^2}{6} \quad (2.93)$$

O valor da incerteza de medição padronizada considerando-se uma distribuição triangular é obtido, extraindo-se a raiz quadrada de λ na equação (2.93), chegando-se à equação (2.94).

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2.94)$$

2.4.1.4 Determinação da Incerteza Padronizada Combinada (u_c)

Cada uma das fontes individuais de incerteza de medição apresenta uma distribuição que lhe é característica. Logo, como o próprio nome já diz, a incerteza padronizada combinada é a incerteza resultante da combinação dessas fontes individuais. Tais parcelas de contribuição de incerteza de cada uma dessas fontes são dadas através de suas variâncias e co-variâncias.

A possibilidade dessa combinação pode ser explicada pelo teorema do limite central. Considere a equação (2.95):

$$W = c_1' y_1 + c_2' y_2 + \dots + c_n' y_n \quad (2.95)$$

Se todos os y_i são caracterizados por distribuições normais, então, a distribuição resultante W também será normal. No entanto, mesmo que as distribuições de y_1, y_2, \dots, y_n não sejam normais, a distribuição resultante W tenderá a se aproximar de uma normal se os termos y_1, y_2, \dots, y_n forem independentes uns dos outros e a variância da distribuição resultante W for muito maior que qualquer componente obtido pelo produto $\left(\frac{\partial f^*}{\partial y_i}\right)^2 \times \sigma^2(y_i)$, onde f^* é a função que descreve a grandeza medida, $\sigma^2(y_i)$ é a variância de y_i e a distribuição associada a y_i sendo não normal. Logo, a incerteza

padronizada combinada, com aproximadamente 68% de confiabilidade, é expressa pela equação (2.96).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f^*}{\partial y_i} \right)^2 \times u^2(y_i) \quad (2.96)$$

A fração $\frac{\partial f^*}{\partial y_i}$ pode ser representada por c_n , chamado de coeficiente de sensibilidade, e mostra o quanto a saída f , que representa uma dada função a ser estudada, é influenciada pelo fator de entrada y_i .

A equação (2.96) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$u_c(y) = \sqrt{c_1^2 \cdot u^2(x_1) + c_2^2 \cdot u^2(x_2) + \dots + c_n^2 \cdot u^2(x_n)} \quad (2.97)$$

2.4.1.5 Determinação da Incerteza de Medição Expandida (U)

A incerteza combinada, discutida no item anterior, representa um intervalo no qual o valor mais provável de uma dada medição pode variar com confiabilidade de aproximadamente 68%. Porém, na grande maioria das aplicações, faz-se necessário expressar tal incerteza com confiabilidade de aproximadamente 95%. Logo, a incerteza expandida (U) é obtida através da incerteza combinada, multiplicando-a por um fator de abrangência (k), conforme apresentado na equação (2.98), fornecendo assim, um nível de confiança de aproximadamente 95%.

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.98)$$

2.4.1.6 Determinação do Fator de Abrangência (k)

A distribuição normal ou distribuição de Gauss é essencialmente importante na estatística, por três razões principais (LEVINE et al., 2000):

- inúmeros fenômenos contínuos parecem segui-la ou podem ser aproximados por meio dela;

- pode-se utilizá-la para aproximar várias distribuições de probabilidade discretas e
- ela oferece a base para a inferência estatística clássica devido à sua afinidade com o teorema do limite central.

A expressão matemática que representa a função de densidade da probabilidade para esta distribuição, podendo a variável aleatória contínua x^* assumir qualquer valor no intervalo $-\infty < x^* < +\infty$ (LEVINE et al., 2000), é apresentada na equação (2.99).

$$f(x^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^*-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.99)$$

Utilizando-se a fórmula da transformação, qualquer variável normal x^* pode ser convertida em uma variável normal padronizada z^* , conforme equação (2.100).

$$z^* = \frac{x^* - \mu}{\sigma} \quad (2.100)$$

A variável aleatória padronizada z^* terá sempre média aritmética μ igual a zero e desvio padrão σ igual a um. Logo, a função de densidade de probabilidade de uma variável normal padronizada é dada pela equação (2.101). A Figura 2.15 apresenta o gráfico da distribuição de probabilidades padronizada.

$$f(z^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\cdot z^{*2}} \quad (2.101)$$

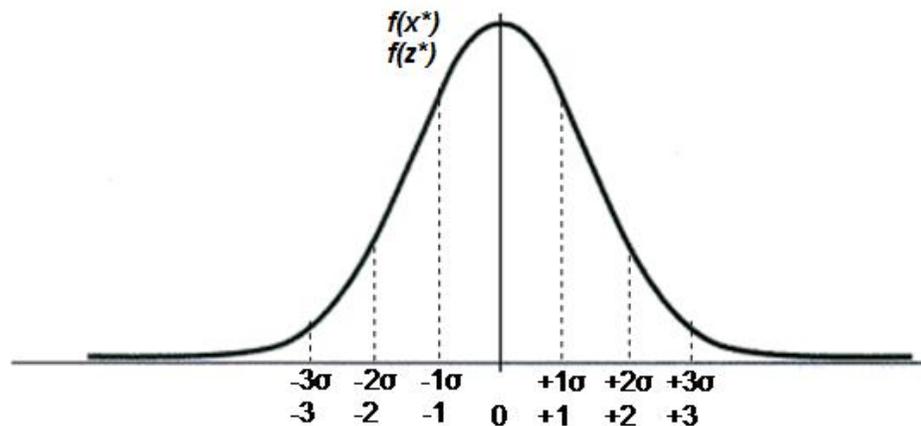


Figura 2.15 – Gráfico esquemático da distribuição normal padronizada

O fator de abrangência (k), por sua vez, é um fator numérico utilizado como multiplicador da incerteza combinada para obter uma incerteza expandida (UNE-EN ISO 14253-1, 1998). Esse fator é determinado de acordo com a confiabilidade requerida. Na grande maioria dos casos, ele situa-se entre 2 e 3. Como em medições dimensionais o espaço amostral é pequeno, ou seja, são realizadas poucas medições para uma mesma dimensão, a curva que melhor descreve tal situação não é uma distribuição normal, mas sim uma distribuição t-Student, cuja função de densidade de probabilidade é apresentada na equação (2.102), (KREYSZIG, 1985). A Tabela 2.21 apresenta o percentual do nível de confiança para diferentes valores de k , e a função gama Γ é dada pela equação (2.103).

$$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{n\pi}\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{z^2}{n}\right)^{\frac{n+1}{2}}} \quad (2.102)$$

$$\Gamma(n+1) = n! \quad (2.103)$$

Tabela 2.21: Percentual do nível de confiança para diferentes valores de k , considerando-se a distribuição t-Student

k	Nível de confiança (%)
1	68,27
2	95,45
3	99,73

À medida que se aumenta o número de medições, a distribuição t-Student tenderá a uma normal. Para um tamanho de amostra menor que 120, o desvio padrão amostral “S” se torna uma melhor estimativa do desvio padrão da população “ σ ” (LEVINE et al., 2000).

Para a determinação de k , se faz necessária a determinação do número de graus de liberdade efetivos, considerando-se a distribuição t-Student, obtido pela equação de Welch Satterwaite (ISO GUM, 2003).

2.4.1.7 Determinação do Número de Graus de Liberdade Efetivos (ν_{eff})

O número de graus de liberdade efetivos é obtido por meio da equação (2.104). O valor do número de graus de liberdade associado a cada fonte de incerteza dependerá do tipo de incerteza, ou seja, se ela é do tipo A ou do tipo B, como apresentado na Tabela 2.22.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(x)}{\nu_i}} \quad (2.104)$$

Tabela 2.22: Número de graus de liberdade de acordo com cada fonte de incerteza

Tipo de incerteza	Graus de liberdade
tipo A	$\nu = n - 1$, onde n é o número de medições realizadas.
tipo B	$\nu = \infty$

A partir do valor de ν_{eff} , o valor de k poderá ser obtido diretamente do *Excel* utilizando a função INVT que retorna o valor da distribuição t-Student como uma função da probabilidade e dos graus efetivos de liberdade, de acordo com o seguinte exemplo: para uma probabilidade de 95,45%, coloca-se INVT (0,0455; ν_{eff}). Os valores do fator de abrangência para diferentes graus de liberdade podem ser visualizados no anexo A.

2.5 Modelos Computacionais de Suporte ao Projeto

Existem vários modelos de suporte ao projeto com base na determinação das tolerâncias com o auxílio do computador. Maziero et al. (1997) apresentam um banco de dados para tolerâncias, ajustes e aplicações características, integrado a um sistema CAD (Computer Aided Design) com o objetivo de obter e organizar informações e cadastrá-las no computador. Um outro exemplo é o CADP (ZHANG et al., 1992) que é um programa de planejamento dimensional utilizado para ajustar as tolerâncias, de acordo com as operações ligadas à fabricação. No sistema TVCAPP (ABDOU et al., 1993) as tolerâncias de projeto e as tolerâncias de controle que caracterizam a garantia da máquina-ferramenta

O escalar L é descrito por uma função linear que representa a “Função Objetivo”. Os coeficientes c_j são chamados de coeficientes da “Função Objetivo”. As incógnitas, x_j , são as chamadas variáveis de decisão. Os coeficientes, a_{mn} , são os coeficientes técnicos, enquanto que os coeficientes b_i são chamados de constantes do lado direito das equações, requerimentos ou disponibilidades, dependendo do caso.

2.7 Modelos Matemáticos Existentes para a Síntese de Tolerâncias Dimensionais Determinísticas

Uma cuidadosa análise nas tolerâncias dimensionais pré-estabelecidas pode reduzir expressivamente os custos de fabricação. Usualmente, um projetista seleciona as tolerâncias com base na sua experiência e na funcionalidade do produto (KUSIAK et al, 1995). Usualmente, um estreitamento das tolerâncias é usado para compensar a carência de conhecimento da fabricação, bem como da função do produto e da sua medição.

Há dois processos básicos a considerar em tolerância de projeto (KUSIAK et al, 1995; TEERAVARAPRUG, 2002):

- Análise e
- Síntese.

Na “análise de tolerância”, as tolerâncias componentes são especificadas e a variação do conjunto resultante é calculada. Uma abrangente revisão do estado da arte de modelos de análise de tolerâncias foi apresentado por WU et al. (1988). A “síntese de tolerâncias”, por sua vez, envolve a alocação de um conjunto específico de tolerâncias, dentro das dimensões componentes de um conjunto, para assegurar uma produção específica. Segundo Teeravaraprug (2007), a síntese de tolerância é um procedimento que distribui as tolerâncias do conjunto entre componentes. Outra maneira de se explicar tal situação, é quando, por exemplo, se determinam as tolerâncias componentes e a tolerância da dimensão total em separado. Quando as tolerâncias componentes são somadas, percebe-se que a mesma apresenta-se diferente da tolerância da dimensão total, quando na verdade, deveriam ter o mesmo valor. Neste caso, pode-se utilizar a programação linear para otimização das tolerâncias componentes, de tal maneira que o somatório das mesmas seja

igual à tolerância da dimensão total. A síntese de tolerâncias tem sido bastante estudada por diversos pesquisadores (VOELCKER, 1993; JUSTER, 1992; CHASE et al., 1991) e dentro deste contexto, duas categorias de objetivos têm sido usadas no projeto de tolerâncias:

- a minimização do custo direto de fabricação, isto é, o projeto de tolerâncias em função do custo e
- a minimização da sensibilidade de tolerâncias de acordo com variações nos processos de fabricação e ambiente de serviço, isto é, o projeto de tolerâncias em função da qualidade e da confiabilidade.

Por sua vez, os métodos de projeto de tolerâncias são classificados como:

- determinísticos ou
- probabilísticos.

Um modelo determinístico é definido por LAW et al. (2000) como sendo aquele que não contém qualquer componente probabilístico, ou seja, as entradas e as saídas são numéricas, não tendo qualquer relação com funções probabilísticas.

Segundo Silva (2005), os métodos determinísticos pressupõem que todos os dados necessários para a descrição do modelo sejam conhecidos. No entanto, dificilmente se conhece todos esses valores com absoluta certeza, necessitando-se avaliar situações em que algumas variáveis possuam valores aleatórios. Dentro deste contexto, segundo Harrel et al. (2000), os métodos probabilísticos são definidos como sendo aqueles em que uma ou mais variáveis de entrada são aleatórias, assumindo uma distribuição de probabilidades que pode ser conhecida ou não.

Entre os métodos determinísticos, a programação linear e a programação não linear têm sido freqüentemente usadas. A programação inteira em síntese de tolerâncias discretas foi usada pela primeira vez por Ostwald & Huang (OSTWALD et al., 1977). O trabalho de Monte & Datseris (MONTE et al., 1982) é uma extensão da programação inteira apresentada por Ostwald & Huang (OSTWALD et al., 1977) para resolver uma larga escala de problemas de toleranciamento determinístico utilizando a programação linear. Kim & Knott (KIM et al., 1988) propuseram uma aproximação pseudo-booleana para

determinar as tolerâncias em função do mínimo custo de geração da superfície. Lee et al. (1989) propuseram um modelo discreto de custo-tolerância para a seleção otimizada de tolerâncias, envolvendo vários processos de fabricação. Smathers et al. (1972) usaram o princípio de Bellman para selecionar o custo mais eficiente de processos para encontrar os requisitos de montagem em um conjunto de processos. Segundo Ngoi et al. (1998), o modelo Monte Carlo foi elaborado para fornecer a simulação mais próxima da tolerância de montagem atual, mas a simulação exigiu que a completa informação das distribuições das tolerâncias componentes fossem conhecidas.

Partindo-se do pressuposto que a tolerância tem uma dependência do processo de fabricação, e usando a programação linear, Kusiak & Feng (KUSIAK et al, 1995) propuseram o seguinte método para síntese de tolerâncias determinísticas:

Minimizar

$$y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.106)$$

Sujeita a

$$\sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{n'} T_{ij} x_{ij} \leq T_k \quad (2.107)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2.108)$$

$$x_{ij} = 0,1 \quad \forall i, j \quad (2.109)$$

A equação (2.106) minimiza o custo direto de fabricação. A equação (2.107) garante que o somatório das tolerâncias parciais não exceda a tolerância da dimensão total. A equação (2.108) assegura que apenas um processo seja selecionado para gerar cada tolerância. A equação (2.109), por sua vez, é fundamental para garantir que x_{ij} seja zero ou um. No entanto, este modelo considera que os valores nominais dos componentes alternativos são iguais. Teeravaraprug (2002) apresenta um modelo para síntese das tolerâncias determinísticas com base no modelo de Kusiak & Feng (KUSIAK et al., 1995),

neste caso, considerando os valores nominais, tomando como base, a Função Perda de Taguchi, cujo indicador almeja medir o nível de conformidade através de um valor monetário, ou seja, visa determinar o custo para cada nível de conformidade dentro da especificação (BULBA, 1998). O modelo proposto por Teeravaraprug (2002) é apresentado a seguir.

Minimizar

$$TC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} Z_{ij} + k * \left[\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} Z_{ij} - \tau \right)^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{T_{ij} Z_{ij}}{3} \right)^2 \right] \quad (2.110)$$

Sujeita a

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} Z_{ij} \leq T_w \quad (2.111)$$

$$\sum_{j=1}^m Z_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2.112)$$

$$Z_{ij} = 0,1 \quad \forall i, j \quad (2.113)$$

Onde:

$$k^* = \frac{A_c}{T_w^2} \quad (2.114)$$

Analisando-se os dois modelos, percebe-se que ambos são idênticos, com exceção, do segundo termo da função objetivo, que leva em consideração os valores nominais.

3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA COMPUTACIONAL SGF – ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA

A fabricação moderna vem passando por expressivas transformações nas últimas décadas, alicerçadas pelos seguintes fatores:

- necessidade de se fabricar com o menor custo possível;
- necessidade de uma maior exatidão dimensional de peças intercambiáveis e isoladas;
- os lotes cada vez mais diversificados e mais complexos em termos de geometria;
- a necessidade de se usinar materiais cada vez mais resistentes e com elevadas velocidades de corte;
- a busca pela confiabilidade nas medições e
- a necessidade de se fazer o menor ajuste possível das peças, do ferramental e das máquinas-ferramenta na fase de projeto.

Dentro deste contexto, o computador vem exercendo um papel de suma importância no sentido de otimizar todos esses fatores de maneira a se ter atualmente, lotes cada vez mais virtuais na fase de projeto, antes de se colocar a matéria-prima em regime de fabricação. Assim sendo, a etapa da determinação das tolerâncias dimensionais envolve o conhecimento não apenas das exigências funcionais do produto a ser fabricado, mas também dos parâmetros ótimos de fabricação, da máquina-ferramenta utilizada e dos dados do sistema de medição, tais como a exatidão e a incerteza de medição. No entanto, não existe um programa computacional que trabalhe de forma integrada as etapas de projeto, fabricação e medição, ou seja, é comum se encontrar no mercado programas isolados para o cálculo de tolerâncias, outros para a determinação dos parâmetros ótimos de usinagem e outros ainda, para o gerenciamento das medições. Logo, um dos objetivos deste trabalho foi desenvolver um programa computacional chamado de Sistema de Gerenciamento da Fabricação – SGF, capaz de integrar estas etapas para o processo de torneamento. O

programa é dividido em quatro módulos principais e um módulo complementar, conforme apresentado na Figura 3.1.

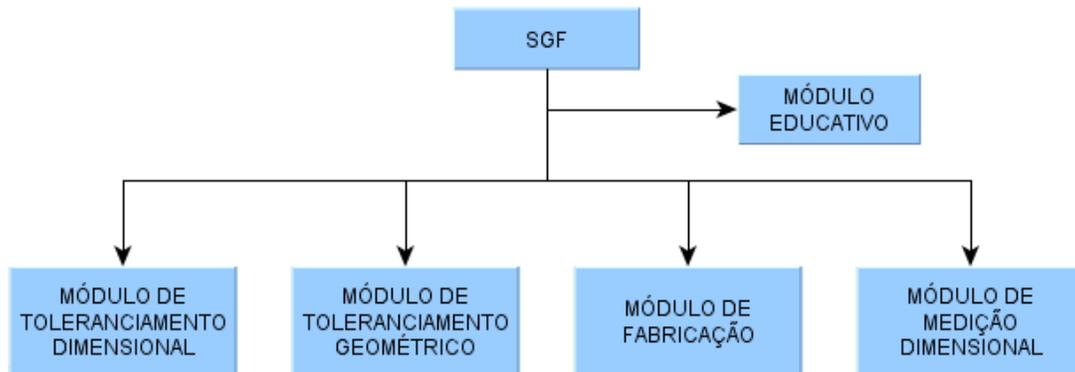


Figura 3.1 – Etapas do SGF

A seguir serão discutidos os módulos do programa.

3.1 Módulo de Toleranciamento Dimensional

O SGF é um programa computacional que segue a metodologia do toleranciamento definido pela função da peça, considerando as variáveis ligadas à fabricação, analisando-se a possibilidade da garantia da manufatura, e considerando também as variáveis ligadas à medição, verificando assim, a possibilidade de se medir com confiabilidade metrológica. Mesmo trabalhando de forma integrada, os módulos do SGF também poderão ser executados em separado. Tal situação poderá ser necessária, por exemplo, no caso de se desejar apenas o sistema de medição mais adequado a um dado processo ou mesmo a determinação dos parâmetros ótimos de usinagem.

No módulo de toleranciamento dimensional do SGF, a tolerância dimensional é determinada de acordo com cinco possibilidades como mostrado na Figura 3.2. A tolerância dimensional da peça fabricada por usinagem poderá ser determinada em função da incerteza da máquina-ferramenta; do acabamento superficial ao qual deverá estar sujeito o componente ou a superfície; do acoplamento, considerando-se o sistema furo base ou o eixo base; e da tolerância dimensional de peças isoladas, com base no grau de precisão que as suas superfícies deverão apresentar.

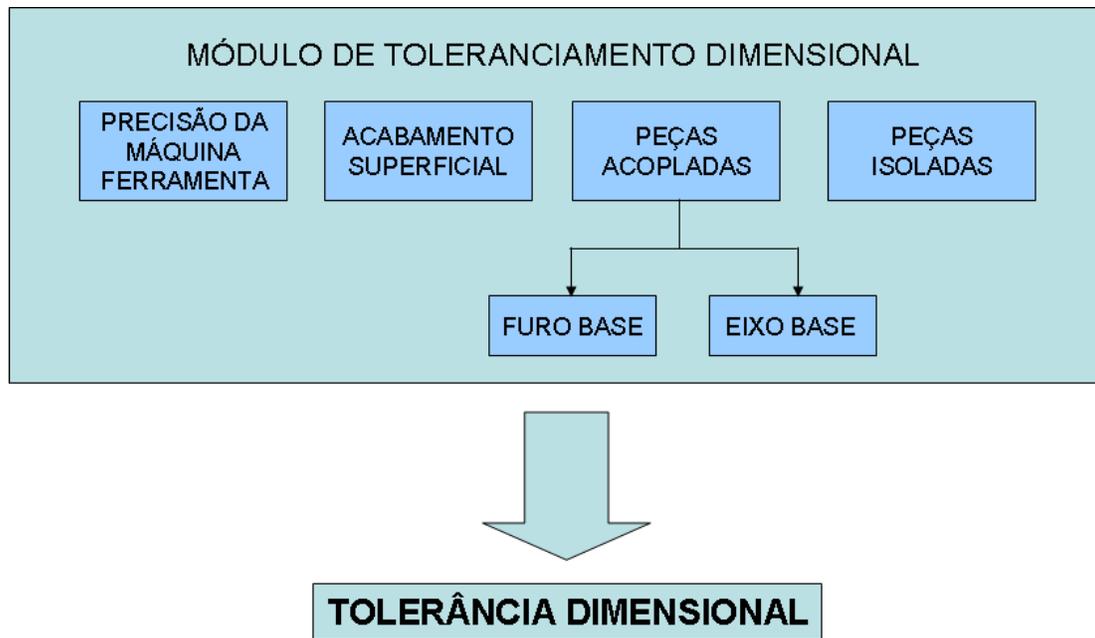


Figura 3.2 – Possibilidades do módulo de toleranciamento dimensional

É comum ocorrer o caso de que uma dada superfície seja dependente de mais de uma forma de toleranciamento, como por exemplo, a determinação de uma tolerância de uma dada dimensão deva considerar não apenas o sistema furo base, mas também o acabamento superficial. Neste caso, o programa seleciona a menor tolerância das duas, pois a mesma atenderá, simultaneamente às duas exigências.

3.1.1 Determinação da Tolerância Dimensional em Função da Precisão da Máquina-Ferramenta

Para o ensaio de uma máquina-ferramenta, o estágio avançado da técnica para a avaliação geométrica é o da medição dos desvios com aparelhos correspondentes, como por exemplo: as verificações do movimento retilíneo de um eixo a partir de um padrão de retitude, do posicionamento com interferômetro a *LASER* e da perpendicularidade entre dois eixos com um esquadro de precisão. Mas, infelizmente, para calibrar totalmente uma máquina há a necessidade de inúmeras medições, o que demanda bastante tempo, além da necessidade de se tirar conclusões confiáveis dos resultados (WEGENER et al., 2007). Para a realização bem sucedida do ensaio são necessários três componentes:

- Estratégia de medição;
- Aparelho de medição e
- Modelo de compensação.

O objetivo desta parte do programa é a determinação da tolerância dimensional da peça considerando-se a aleatoriedade da variação dimensional na direção e sentido de deslocamento da ferramenta para gerar a dimensão. Esta variação é obtida através de um estudo para determinação dos erros da máquina-ferramenta. Tal proposição apenas será válida se os erros sistemáticos forem compensados através de correções.

A Figura 3.3 apresenta o fluxograma para a determinação da tolerância dimensional considerando-se a precisão da máquina-ferramenta. Esta opção possibilitará ao projetista realizar uma comparação entre a tolerância atribuída a uma determinada dimensão e a variação obtida em função da adoção de uma determinada máquina-ferramenta. Trata-se, portanto, de uma opção que dará uma visão ao projetista das disponibilidades de máquinas-ferramenta existentes para a execução da peça por ele projetada.

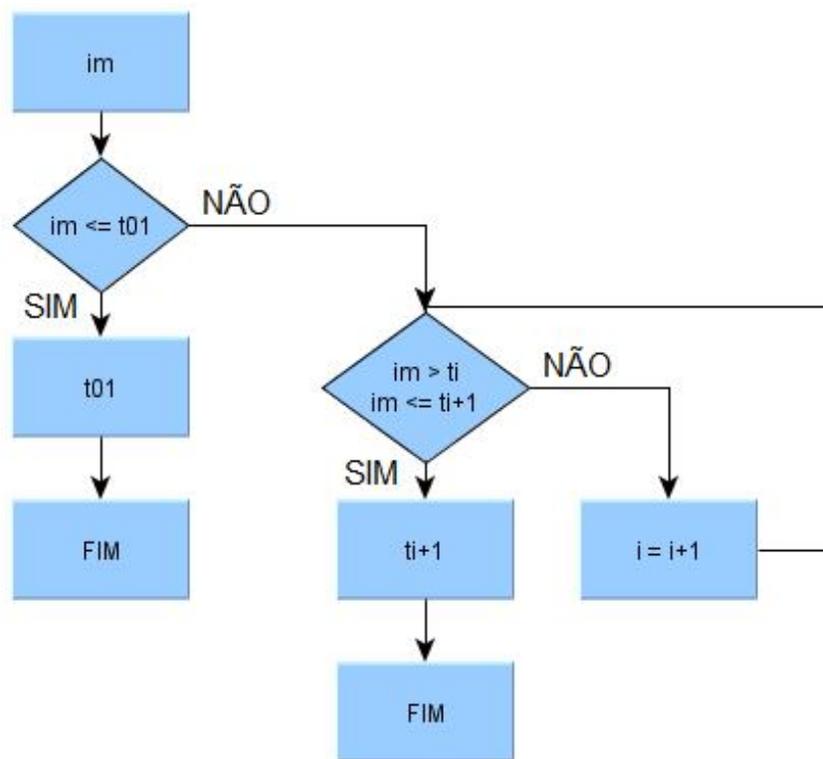


Figura 3.3 – Fluxograma apresentando a metodologia para a determinação da tolerância dimensional em função da precisão da máquina-ferramenta

Nesta opção do SGF, insere-se, inicialmente, o valor da precisão da máquina-ferramenta (i_m) com relação ao deslocamento do eixo em questão, bem como a dimensão nominal cuja tolerância será determinada. A partir daí, esta dimensão nominal deverá ser enquadrada em um dos grupos de dimensões, conforme apresentado na Tabela 2.1. Caso a dimensão nominal seja superior a 3150 mm, o programa apresentará a seguinte mensagem: CÁLCULO NÃO PERMITIDO. Com os valores extremos do respectivo grupo de dimensões é calculada a média geométrica D' conforme equação (2.1) para a partir daí, se calcular o fator de tolerância padrão de acordo com a equação (2.2). De posse deste valor, o SGF determina o grau de tolerância padrão, para a tolerância dimensional imediatamente superior à precisão da máquina-ferramenta, garantindo assim, em relação à máquina-ferramenta, a possibilidade de fabricação da peça.

Inicialmente, o programa calcula a tolerância t_{01} e verifica se a precisão da máquina é menor ou igual a este valor, conforme apresentado na Figura 3.3. Em caso positivo, a tolerância dimensional adotada será t_{01} . Caso contrário, o SGF toma a tolerância superior t_0 e realiza a mesma verificação, até obter a tolerância dimensional imediatamente superior ao valor da precisão da máquina-ferramenta, atribuindo à dimensão, os afastamentos superior e inferior a partir desta tolerância. Tais limites são obtidos dividindo-se a tolerância dimensional por dois.

A tolerância dimensional para cada grau de tolerância padrão está apresentada nas equações que variam de (2.3) a (2.12), além das equações contidas na Tabela 2.2. A Figura 3.4 apresenta a tela do programa referente a esta opção, destacando um exemplo onde a dimensão nominal é igual a 70 mm, e a precisão da máquina-ferramenta é igual a 0,010 mm. Neste caso, o grau de tolerância padrão foi a IT5 e a tolerância dimensional foi igual a aproximadamente 0,014 mm e o valor da dimensão sendo igual a $70 \pm 0,0068$ mm. Percebe-se logo ao lado do campo de colocação da dimensão nominal o texto SIGA EM FRENTE, uma vez que, o valor foi inferior a 3150 mm.

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA FABRICAÇÃO - SGF

INICIAL

CLIQUE NOS ÍCONES PARA ACESSÁ-LOS


Educativo
Tolerâncias Geométricas
Sobre o Programa
Ajuda

MÓDULO DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS - DADOS INICIAIS

ENTRE COM A DIMENSÃO NOMINAL (mm) SIGA EM FRENTE

ENTRE COM A PRECISÃO DA MÁQUINA (micrometros)

TOLERÂNCIA (t)

IT = IT10

t = 0,124489 mm

TOLERÂNCIA EM FUNÇÃO DA PRECISÃO DA MÁQUINA-FERRAMENTA

GRAU DE TOLERÂNCIA PADRÃO = IT5

VALOR DA DIMENSÃO (mm) = 70 ± 0,0068

TOLERÂNCIA DIMENSIONAL (mm) = 0,013616038

Figura 3.4 – Tela do SGF apresentando a determinação da tolerância dimensional em função dos erros da máquina-ferramenta

3.1.2 Determinação da Tolerância Dimensional em Função do Acabamento Superficial

Há uma relação direta entre a tolerância dimensional de uma peça e a sua rugosidade permissível (MACHINING DATA HANDBOOK, 1980). Se os desvios induzidos pelo acabamento superficial excederem aqueles permitidos pela tolerância dimensional, a dimensão estará sujeita a uma incerteza além da tolerância, como mostrado na Figura 3.5.

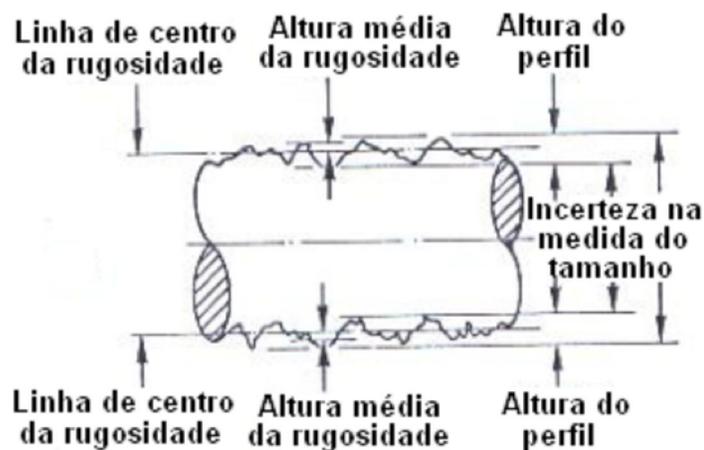


Figura 3.5 – Incerteza na medição do tamanho em relação ao parâmetro de rugosidade para uma superfície cilíndrica (Adaptado de MACHINING DATA HANDBOOK, 1980)

Neste caso, o SGF determina a tolerância dimensional com base em dois parâmetros de rugosidade:

- Profundidade média de rugosidade R_{ZDIN} e
- Rugosidade média aritmética R_a .

O programa calcula a tolerância dimensional em função do R_{ZDIN} dada pela equação (3.1), de acordo com (NOPPEN et al., 1985), através da equação (3.2). O R_{ZDIN} é a média aritmética das profundidades isoladas de rugosidade dos cinco comprimentos de amostragem (l_e) apresentados na Figura 3.6, contidos no comprimento de medição (l_m) (ABNT 6405, 1988; DIN 4768, 1974; BET, 1999). O limite superior e o inferior de especificação são obtidos dividindo-se o valor da tolerância encontrada por dois.

$$R_{ZDIN} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 R_{z_i} \quad (3.1)$$

$$t \cong 2 \times R_{ZDIN} \quad (3.2)$$

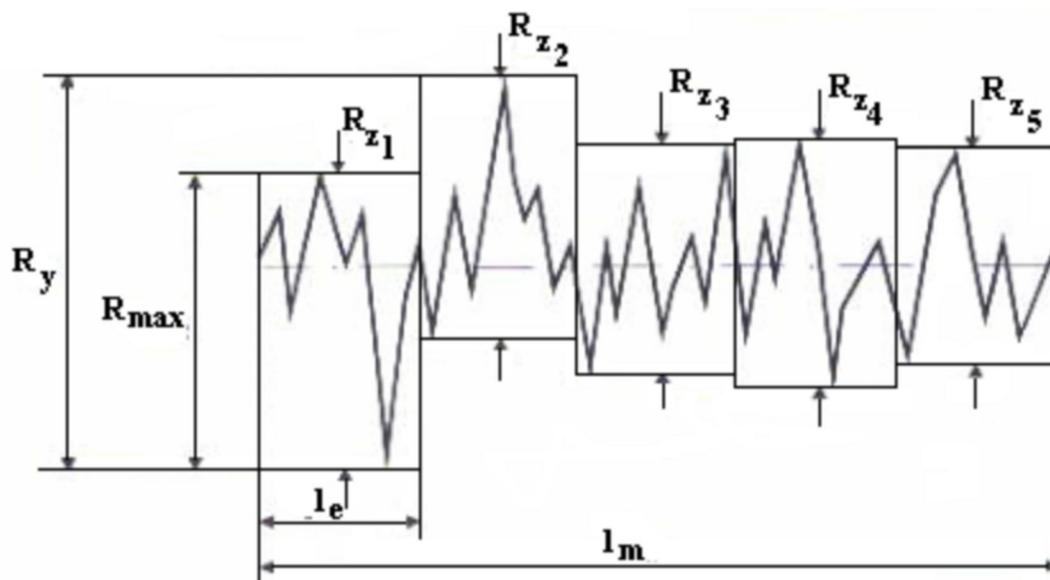


Figura 3.6 – Perfil de rugosidade dividido em cinco regiões para a determinação do parâmetro R_{ZDIN} (BET, 1999)

O desvio médio aritmético de rugosidade ou valor médio de rugosidade (R_a) é definido como a média aritmética do valor absoluto das ordenadas “Y” do perfil de rugosidade, dentro do comprimento de medição l_m , tomando como referência a linha média, ou seja, a linha paralela à direção geral do perfil, dentro do comprimento de medição, que divide o perfil de rugosidade de modo que a soma das áreas superiores (áreas dos picos ou saliências) seja exatamente igual à soma das áreas inferiores (áreas dos vales ou reentrâncias). Isto equivale à altura de um retângulo de comprimento igual ao comprimento de medição l_m , com área igual à soma das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e a linha média, conforme mostrado na Figura 3.7. O valor de R_a é obtido da equação (3.3) (BET, 1999), onde $\Sigma A_{pi} = \Sigma A_{vi}$ e $A_g = \Sigma A_{pi} + \Sigma A_{vi} = R_a \times l_m$.

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |Y(x)| dx \text{ ou } R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad (3.3)$$

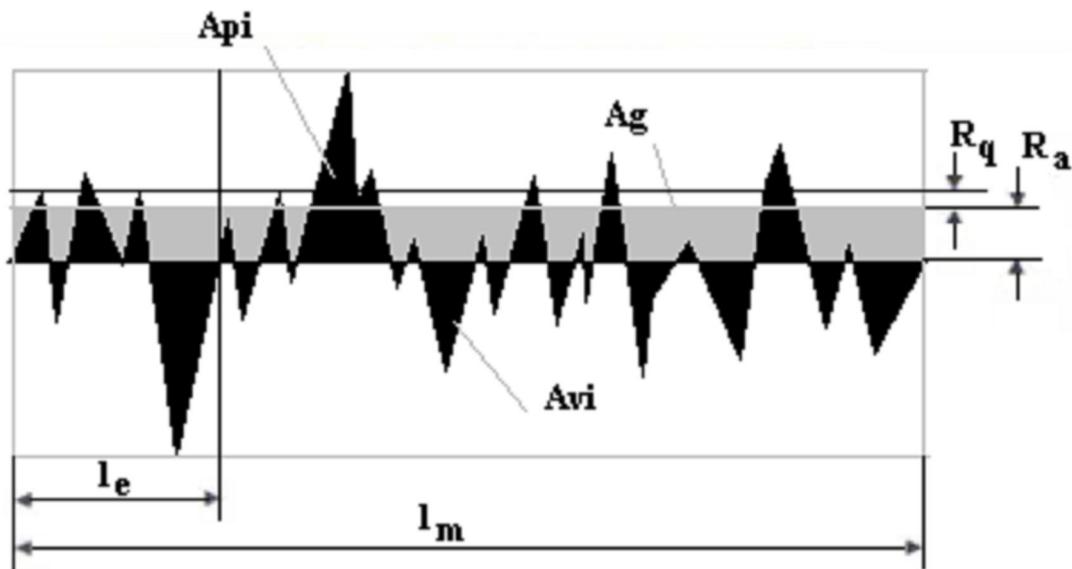


Figura 3.7 – Perfil de rugosidade destacando o parâmetro R_a (BET, 1999)

Para a determinação da tolerância dimensional em função do R_a , a Tabela 3.1 relaciona este parâmetro de rugosidade com a tolerância (t) (AGOSTINHO et al., 1977).

Tabela 3.1: Relação entre a tolerância ISO e a rugosidade superficial

ISO	Ra (MICROMETROS)				
	DIMENSÕES (MILÍMETROS)				
	3	3 - 18	18 - 80	80 - 250	250
IT6	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2
IT7	0,3	0,5	0,8	1,2	2
IT8	0,5	0,8	1,2	2	3
IT9	0,8	1,2	2	3	5
IT10	1,2	2	3	5	8
IT11	2	3	5	8	11
IT12	3	5	8	12	20
IT13	5	8	12	20	-
IT14	8	12	20	-	-

Admitindo-se que a rugosidade R_a seja a máxima admissível para uma dada tolerância, vale a relação aproximada da equação (3.4) (AGOSTINHO et al., 1977). É importante salientar que mesmo existindo essa relação, os conceitos de rugosidade e tolerância são completamente distintos.

$$R_a \cong \frac{1}{30} \cdot t \quad (3.4)$$

A Figura 3.8 apresenta a tela do SGF para a determinação da tolerância dimensional em função do acabamento superficial considerando como critério de toleranciamento, o parâmetro R_{ZDIN} . Analisando-se esta figura, constata-se que para um valor de R_{ZDIN} igual a 30 μm , a tolerância dimensional é igual a 0,06 mm.

DETERMINAÇÃO DA TOLERÂNCIA EM FUNÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL

ENTRE COM O VALOR DO Rz PRETENDIDO (micrometros)

ENTRE COM O VALOR DO Ra PRETENDIDO (micrometros)

VALOR DA DIMENSÃO (mm) = 20 +

TOLERÂNCIA DIMENSIONAL (mm) =

Figura 3.8 – Tela do SGF apresentando a determinação da tolerância dimensional em função do parâmetro de rugosidade R_{ZDIN} para uma dimensão nominal de 20 mm

Por sua vez, a Figura 3.9 apresenta a mesma opção de toleranciamento, só que considerando o parâmetro de rugosidade R_a , sendo o mesmo igual a $3\mu\text{m}$. Neste caso, a tolerância dimensional foi igual a $0,09\text{ mm}$.

DETERMINAÇÃO DA TOLERÂNCIA EM FUNÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL	
ENTRE COM O VALOR DO R_z PRETENDIDO (micrometros)	<input type="text"/>
ENTRE COM O VALOR DO R_a PRETENDIDO (micrometros)	<input type="text" value="3"/>
VALOR DA DIMENSÃO (mm) =	20 + <input type="text" value="0,045"/>
TOLERÂNCIA DIMENSIONAL (mm) =	<input type="text" value="0,09"/>

Figura 3.9 – Tela do SGF apresentando a determinação da tolerância dimensional em função do parâmetro de rugosidade R_a para uma dimensão nominal de 20 mm

Para a obtenção dos valores de tolerância, o programa processa os dados, conforme fluxograma da Figura 3.10, onde ao se entrar com o valor de R_a , R_{ZDIN} ou ambos, obtém-se como dado de saída a tolerância dimensional de acordo com as equações (3.2) e (3.4). Caso ambos os resultados dos parâmetros de rugosidade estejam presentes, o programa atribui o menor valor de tolerância, pois a mesma atenderá a ambas as situações.

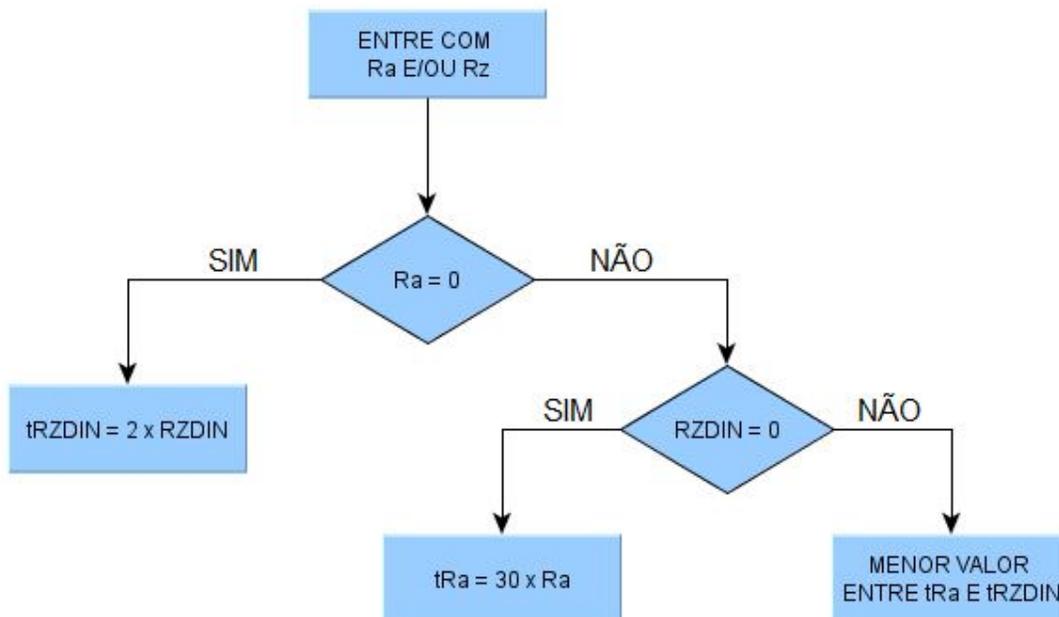


Figura 3.10 – Etapas realizadas pelo SGF para a determinação da tolerância dimensional em função do acabamento superficial

3.1.3 Determinação da Tolerância Dimensional de Peças Acopladas, Considerando-se o Sistema Furo Base

Para peças acopladas considerando o sistema furo base, muito comum na prática, a tolerância dimensional é selecionada com base no grau de precisão que se deseja para o conjunto (extra preciso, preciso, médio e grosseiro) e na classe de ajuste (móvel, inserto ou fixo), conforme apresentado na Tabela 2.5. O SGF calcula para cada posição apresentada nesta tabela, não apenas a tolerância dimensional do eixo e do furo, mas também os afastamentos para eixos e furos e as dimensões máximas e mínimas, conforme mostrado na Figura 3.11. Analisando-se esta figura, percebe-se que as entradas do programa são exatamente as posições com suas respectivas qualidades de trabalho, tanto para eixos quanto para furos e selecionadas através de barras de rolagem, bem como pela definição do tipo de ajuste.

SELEÇÃO DOS AJUSTES ATRAVÉS DO SISTEMA FURO BASE

FURO	H7(preciso)	EIXO	g6	Tipo de ajuste	
			g8	<input checked="" type="radio"/> Móvel	
			h11	<input type="radio"/> Incerto	
			h5	<input type="radio"/> Fixo	
			h6	ajustes	
			h7		
			h8		
			j5		
			j6		

TOLERÂNCIA DO FURO (mm)	0,018349		
TOLERÂNCIA DO EIXO (mm)	0,011468		

DIMENSÃO DO FURO (mm) =	+ 0,018349298	Dmax =	15,01835 mm
	15	Dmin =	15 mm
	- 0		
DIMENSÃO DO EIXO (mm) =	+ -0,006399972	dmax =	14,9936 mm
	15	dmin =	14,98213 mm
	- -0,017868283		

Figura 3.11 – Apresentação da tela do SGF para a determinação das tolerâncias de peças acopladas através do sistema furo base

Os afastamentos são obtidos de acordo com as equações (2.15) a (2.44). Já as tolerâncias são calculadas em função do grau de tolerância padrão pretendido, conforme

equações que variam de (2.3) a (2.12) e das equações contidas na Tabela 2.2, a partir da determinação do fator de tolerância padrão, conforme equação (2.2).

É importante salientar que para a parcela da equação (2.32), referente à posição “p”, o afastamento inferior que pode variar de 0 a 5. Para este caso específico, o programa atribui o valor médio de 2,5, enquanto que para a parcela da equação (2.34) que pode variar de 1 a 4, o programa também atribui o valor médio de 2,5.

A seleção das posições no campo de tolerância pode também ser realizada com base no banco de dados de aplicações do SGF que apresenta várias situações de aplicações (PROVENZA, 1995; GUIMARÃES, 1999), conforme apresentado na tabela 1 do manual do usuário do SGF no anexo B. Além disto, clicando-se no ícone “ajustes”, conforme mostrado na Figura 3.11, o SGF disponibiliza os tipos de acoplamentos possíveis, de acordo com a tabela 2.5.

A Figura 3.12 apresenta o fluxograma com o algoritmo do programa desenvolvido nesta pesquisa para a determinação da tolerância dimensional para o sistema furo base.

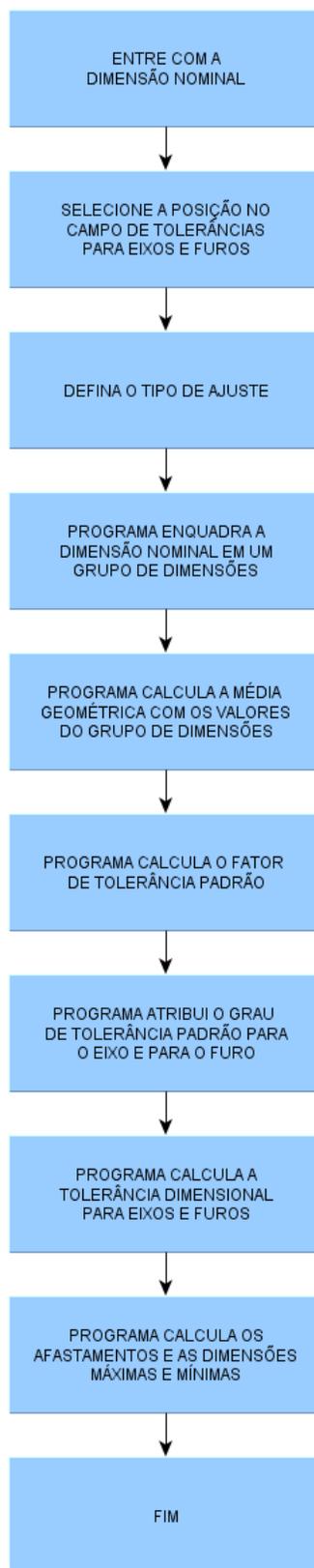


Figura 3.12 – Algoritmo do SGF para o sistema furo base

3.1.4 Determinação da Tolerância Dimensional de Peças Acopladas, Considerando-se o Sistema Eixo Base

O processamento neste caso é similar ao sistema furo base apresentado no item anterior. No entanto, as possíveis combinações para eixos e furos estão apresentadas na Tabela 2.6. Neste caso, a determinação dos afastamentos se dá de acordo com as regras apresentadas no tópico 2.1.2 e da equação (2.45). Também neste caso, obtêm-se os seguintes parâmetros de saída:

- Tolerância dimensional do eixo e do furo;
- Afastamento superior do eixo e do furo;
- Afastamento inferior do eixo e do furo;
- Dimensão máxima do eixo e do furo e
- Dimensão mínima do eixo e do furo.

A Figura 3.13 apresenta a tela do SGF para esta opção, considerando-se uma dimensão nominal igual a 20 mm e um acoplamento móvel h5E7.

Analisando-se esta figura, constata-se que além das tolerâncias e afastamentos para eixos e furos, o programa ainda apresenta as suas dimensões máximas e mínimas.

SELEÇÃO DOS AJUSTES ATRAVÉS DO SISTEMA EIXO BASE

EIXO: h5(extra-preciso) FURO: E7

Tipo de Ajuste:
 Móvel
 Incerto
 Fixo
 ajustes

TOLERÂNCIA DO FURO (mm): 0,020129
 TOLERÂNCIA DO EIXO (mm): 0,008806

DIMENSÃO DO FURO (mm) = 20
 0,0582938 Dmax = 20,058294 mm
 0,038165139 Dmin = 20,038165 mm

DIMENSÃO DO EIXO (mm) = 20
 0 dmax = 20 mm
 -0,008806289 dmin = 19,991194 mm

Figura 3.13 – Apresentação da tela do SGF para a determinação das tolerâncias de peças acopladas através do sistema eixo base

3.1.5 Determinação da Tolerância Dimensional para a Execução Grosseira de Peças Isoladas

A quinta possibilidade do módulo de toleranciamento dimensional (Figura 3.2) é definida pela tolerância dimensional de peças isoladas.

Analisando-se a Figura 2.4, constata-se que as qualidades de trabalho utilizadas para a execução grosseira de peças isoladas variam de IT12 a IT18. Nesta situação, a metodologia proposta neste trabalho classifica a tolerância dimensional em função do grau de precisão em:

- Pouco grosseira;
- Intermediariamente grosseira e
- Muito grosseira .

Para uma peça isolada pouco grosseira, o programa atribui o grau de tolerância padrão IT12, para uma peça intermediariamente grosseira IT15 e para a muito grosseira, o grau de tolerância padrão IT18. A Figura 3.14 apresenta a tela do SGF para a execução desta opção. Analisando-se esta figura, constata-se que há a possibilidade de escolha por uma única opção quanto ao grau de precisão da peça a ser fabricada. Nesta figura está apresentado um exemplo onde a dimensão nominal é igual a 70 mm e optou-se pelo grau de precisão menos grosseiro, o que corresponde a um grau de tolerância padrão IT18 que é automaticamente atribuído pelo programa. A equação para o cálculo da tolerância (t_{18}) é dada na Tabela 2.2 e neste caso, o seu valor é igual a 0,311 mm.

É importante se realizar uma análise crítica em valores de tolerância dimensional elevados, pois, de acordo com a NBR ISO 2768-1 (2001), acima de certos valores de tolerância, não há normalmente ganho de economia na fabricação, quando se aumenta a tolerância. Essa norma acrescenta como exemplo, que uma determinada peça com diâmetro de 35 mm poderá ser fabricada com um alto nível de conformidade em uma oficina com qualidade normal média. Logo, a especificação de uma tolerância de ± 1 mm não trará nenhuma vantagem para essa oficina em particular, caso o valor de tolerância de $\pm 0,3$ mm seja facilmente conseguido.

TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO GROSSEIRA DE PEÇAS ISOLADAS

Grau de precisão

Menos grosseira

Intermediariamente grosseira

Mais grosseira possível

TOLERÂNCIA DIMENSIONAL (mm) 0,311223717

VALOR DA DIMENSÃO (mm) 70 ± 0,15561

Figura 3.14 – Apresentação da tela do SGF referente à determinação das tolerâncias dimensionais de execução grosseira de peças isoladas

O programa apresenta ainda uma opção adicional para determinação da tolerância dimensional com base apenas no grau de tolerância padrão, ou seja, basta digitar a dimensão nominal e selecionar o grau de tolerância padrão, e o dado de saída será a tolerância dimensional. A Figura 3.15 apresenta a parte do SGF referente a esta opção. No exemplo em questão, para uma dimensão nominal de 20 mm e atribuindo-se o grau de tolerância padrão IT10, a tolerância dimensional é igual a aproximadamente 0,081 mm.

MÓDULO DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS - DADOS INICIAIS

ENTRE COM A DIMENSÃO NOMINAL (mm) 20 SIGA EM FRENTE

ENTRE COM A INCERTEZA DA MÁQUINA (micrometros) 10

TOLERÂNCIA (t)

IT = IT10

t = 0,080515 mm

Opção adicional

Figura 3.15 – Opção adicional do SGF para determinação da tolerância dimensional

3.2 Módulo de Toleranciamento Geométrico

Este módulo tem por objetivo a determinação das tolerâncias geométricas de forma, posição e batimento, de acordo com os desvios máximos permitidos, conforme apresentados nas Tabelas 2.7 a 2.19.

Ao se clicar no ícone circulado “tolerâncias geométricas” da Figura 3.16 aparecerá a tela principal do módulo de toleranciamento geométrico, de acordo com a Figura 3.17, onde são apresentadas as opções de tolerâncias geométricas. A partir daí, ao se clicar em cada uma das opções de toleranciamento aparecerá uma tela específica solicitando ao usuário, as informações necessárias para que o programa determine a respectiva tolerância geométrica. As informações, em linhas gerais, são referentes à:

- Precisão na fabricação (valores econômicos ou valores máximos);
- Processo de fabricação utilizado;
- Tipo da usinagem;
- Dimensões da peça e
- Tipo de centragem.



Figura 3.16 – Tela inicial do SGF

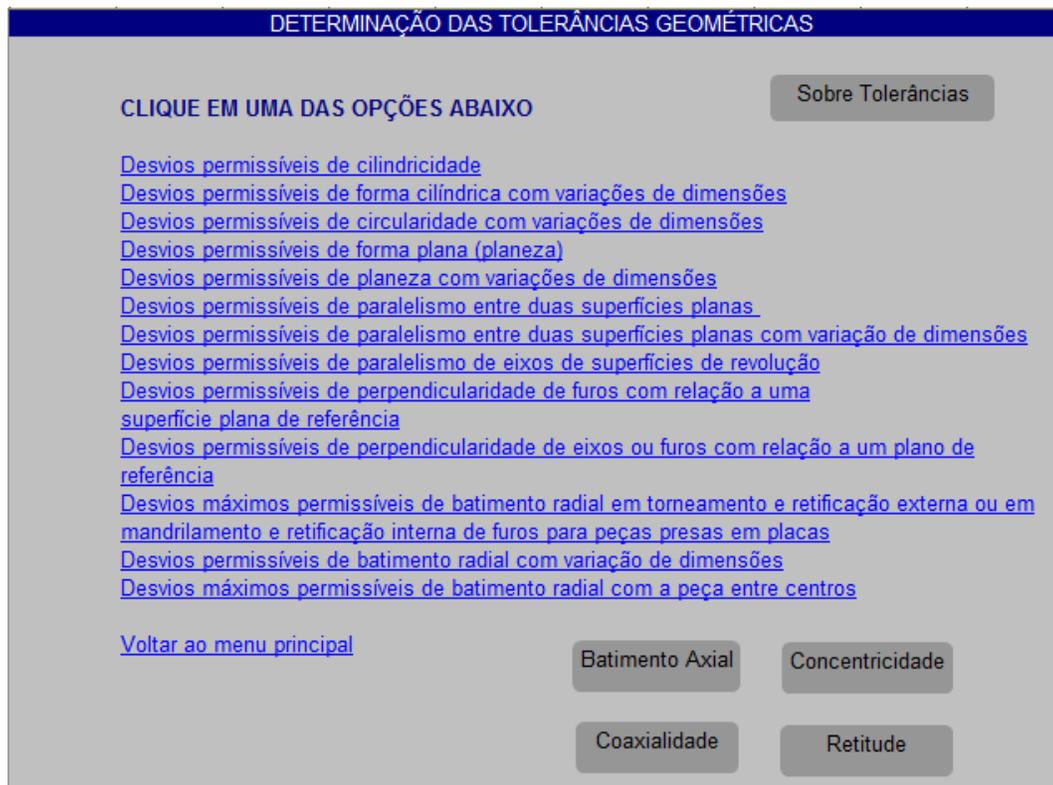


Figura 3.17 – Tela principal do módulo de toleranciamento geométrico do SGF

As Figuras 3.18 a 3.30 apresentam as telas do SGF referentes a cada uma das possibilidades de toleranciamento geométrico. As informações referentes ao manuseio deste módulo estão no manual do usuário no anexo B.

É importante salientar que o SGF possibilita a atualização dos valores apresentados para cada uma das possibilidades de toleranciamento geométrico.

DESVIOS PERMISSÍVEIS DE CILINDRICIDADE

ENTRE COM O COMPRIMENTO DA PEÇA mm Sobre o Desvio

Máquina-ferramenta responsável pela fabricação

- Torno com altura entre centros até 180 mm
- Torno com altura entre centros até 400 mm
- Torno com altura entre centros até 1000 mm
- Torno revolver
- Torno vertical com uma coluna usinando com cabeçotes transversais (diâmetro acima de 800 mm)
- Torno vertical com uma coluna usinando com cabeçotes frontais (diâmetro acima de 800 mm)
- Mandriladora vertical com dois cabeçotes (diâmetro até 300 mm)
- Mandriladora vertical com dois cabeçotes (diâmetro acima de 300 mm)
- Retificadora cilíndrica

DESVIO MÁXIMO PERMITIDO mm

[Voltar](#)

Figura 3.18 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de cilindridade

DESVIOS PERMISSÍVEIS DE FORMA CILÍNDRICA COM VARIAÇÕES DE DIMENSÕES

Selecione o processo de fabricação

- Torneamento (usinagem externa)
- Retificação (usinagem externa)
- Torneamento (usinagem interna)
- Retificação (usinagem interna)
- Mandrilamento (usinagem interna)

Selecione o diâmetro da peça

- até 50 mm
- > 50 a 120 mm
- > 120 a 250 mm
- > 250 a 500 mm

DESVIO DE FORMA CILÍNDRICA mm Sobre o Desvio

[Voltar](#)

Figura 3.19 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de forma cilíndrica com variação de dimensões

DESVIOS PERMISSÍVEIS DE CIRCULARIDADE COM VARIAÇÕES DE DIMENSÕES

Selecione o processo de fabricação

- Torneamento (entre pontos)
- Torneamento (na placa ou mandril)
- Retificação (entre pontos)
- Retificação (na placa ou mandril)
- Retificação (sem centros)

Selecione o diâmetro da peça

- até 10 mm
- > 10 a 50 mm
- > 50 a 120 mm
- > 120 a 250 mm

DESVIO DE CIRCULARIDADE mm

[Sobre o Desvio](#)

[Voltar](#)

Figura 3.20 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de circularidade com variação de dimensões

DESVIO PERMISSÍVEL DE PLANEZA

Selecione o processo de fabricação

- Torneamento em torno vertical ou horizontal
- Fresamento com fresa de disco
- Fresamento com fresa de topo
- Brochamento
- Retificação em retífica de superfície em sentido contrário ao avanço
- Retificação em retífica de superfície no mesmo sentido do avanço
- Retificação com a face lateral de rebolos
- Retificação com o diâmetro externo de rebolos
- Aplainamento de superfícies planas e canais
- Aplainamento de superfícies planas e canais (plana vertical)
- Retificação em deesbaste

DESVIO DE PLANEZA POR 100 mm (VALORES ECONÔMICOS)

 mm

DESVIO DE PLANEZA POR 100 mm (MAIOR PRECISÃO)

 mm

[Voltar](#)

[Sobre o Desvio](#)

Figura 3.21 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de planeza

DESVIO PERMISSÍVEL DE PLANEZA COM VARIAÇÕES DE DIMENSÕES

Selecione o processo de fabricação

- Torneamento
- Fresamento
- Aplainamento
- Retificação
- Lapidação

Selecione o comprimento da superfície a ser usinada

- até 10 mm
- de 10 a 25 mm
- > 25 a 50 mm
- > 50 a 120 mm

DESVIO DE FORMA PLANA

0,04 mm

Sobre o Desvio

[Voltar](#)

Figura 3.22 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de planeza com variação de dimensões

DESVIO PERMISSÍVEL DE PARALELISMO ENTRE DUAS SUPERFÍCIES PLANAS

Selecione o processo de fabricação

- Aplainamento de superfícies planas e canais
- Aplainamento de superfícies planas e canais para plaina vertical
- Fresamento com fresa de disco
- Fresamento com fresa de topo
- Retificação em retífica de superfície em sentido contrário ao avanço
- Retificação em retífica de superfície no mesmo sentido do avanço
- Retificação com a face lateral de rebolos
- Retificação com o diâmetro externo de rebolos
- Retificação em desbaste

Sobre o Desvio

DESVIO DE PARALELISMO POR 100 mm (VALORES ECONÔMICOS)

0,1 mm

DESVIO DE PARALELISMO POR 100 mm (MAIOR PRECISÃO)

0,03 mm

[Voltar](#)

Figura 3.23 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de paralelismo entre duas superfícies planas

DESVIO PERMISSÍVEL DE PARALELISMO COM VARIAÇÕES DE DIMENSÕES

Selecione o processo de fabricação

Torneamento

Fresamento

Aplainamento

Retificação

Selecione o comprimento da superfície a ser usinada

até 10 mm

de 10 a 25 mm

> 25 a 50 mm

> 50 a 120 mm

> 120 a 250 mm

DESVIO DE PARALELISMO

0,3 mm

Sobre o Desvio

[Voltar](#)

Figura 3.24 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de paralelismo com variação de dimensões

DESVIOS PERMISSÍVEIS DE PARALELISMO DE EIXOS DE SUPERFÍCIES DE REVOLUÇÃO COM FURAÇÃO POR TRAÇAGEM

Selecione o diâmetro da broca

até 3 mm

> 3 a 6 mm

> 6 a 10 mm

> 10 a 18 mm

> 18 a 30 mm

> 30 a < 50 mm

50 mm

Sobre o Desvio

DESVIO DE DISTÂNCIA ENTRE CENTROS (FABRICAÇÃO USUAL)

0,8 mm

DESVIO DE DISTÂNCIA ENTRE CENTROS (FABRICAÇÃO COM MAIOR PRECISÃO)

0,3 mm

DESVIO DE PARALELISMO POR 100 mm (FABRICAÇÃO USUAL)

0,5 mm

DESVIO DE PARALELISMO POR 100 mm (FABRICAÇÃO COM MAIOR PRECISÃO)

0,3 mm

[Voltar](#)

Figura 3.25 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de paralelismo de eixos de superfícies de revolução com furação por traçagem

DESVIOS PERMISSÍVEIS DE PERPENDICULARIDADE DE FUROS COM RELAÇÃO A UMA SUPERFÍCIE PLANA DE REFERÊNCIA

Selecione a operação de usinagem

- Furação por traçagem
- Furação com dispositivo
- Mandrilamento em torno com a peça centrada por traçagem
- Mandrilamento com centragem em placa angular
- Mandrilamento em mandriladora ou fresadora horizontal

DESVIO DE PERPENDICULARIDADE POR 100 mm (VALORES ECONÔMICOS) mm

DESVIO DE PERPENDICULARIDADE POR 100 mm (MAIOR PRECISÃO) mm

[Voltar](#) Sobre o Desvio

Figura 3.26 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de perpendicularidade da linha de centro de furos com relação a uma superfície plana de referência

DESVIOS PERMISSÍVEIS DE PERPENDICULARIDADE DE EIXOS OU FUROS COM RELAÇÃO A UM PLANO DE REFERÊNCIA

Selecione a operação de usinagem

- Furação por traçagem
- Furação com dispositivo
- Torneamento (com montagem ou traçagem)
- Torneamento (verificado com relógio comparador)
- Torneamento (furo e face numa única usinagem)
- Furação em fresadora vertical com a peça presa na mesa da máquina
- Furação em fresadora horizontal com a peça presa em ângulo com a mesa
- Retificação interna com a peça presa em dispositivo

DESVIO DE PERPENDICULARIDADE POR 100 mm (VALORES ECONÔMICOS) mm

DESVIO DE PERPENDICULARIDADE POR 100 mm (MAIOR PRECISÃO) mm

[Voltar](#) Sobre o Desvio

Figura 3.27 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de perpendicularidade de eixos ou furos com relação a um plano de referência

DESVIOS MÁXIMOS PERMISSÍVEIS DE BATIMENTO RADIAL PARA PEÇAS PRESAS EM PLACAS

Selecione o processo de fabricação

- Torneamento (usinagem externa)
- Retificação (usinagem externa)
- Mandrilamento (usinagem interna)
- Retificação (usinagem interna)

Tipo de centragem da peça (usinagem em placa universal)

- sem centragem subsequente
- com centragem com graminho
- com centragem com relógio comparador
- para operação com castanhas moles

DESVIO DE BATIDA RADIAL mm

[Voltar](#) Sobre o Desvio

Figura 3.28 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de batimento radial para peças presas em placas

DESVIOS MÁXIMOS PERMISSÍVEIS DE BATIMENTO RADIAL COM VARIAÇÃO DE DIMENSÕES

Selecione o processo de fabricação

- Torneamento (entre pontos)
- Torneamento (na placa ou mandril)
- Retificação (entre pontos)
- Retificação (na placa ou mandril)
- Retificação (sem centros)

Selecione o diâmetro da peça

- até 5 mm
- > 5 a 10 mm
- > 10 a 50 mm
- > 50 a 120 mm
- > 120 a 250 mm

DESVIO DE BATIMENTO RADIAL mm

[Voltar](#) Sobre o Desvio

Figura 3.29 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de batimento radial com variação de dimensões

DESVIOS MÁXIMOS PERMISSÍVEIS DE BATIMENTO RADIAL COM A PEÇA ENTRE CENTROS

Selecione o processo de fabricação

Torneamento

Retificação

Sobre o Desvio

Selecione o tipo de usinagem

Usinagem entre centros com uma operação

Usinagem entre centros com duas operações

Usinagem entre centros para duas operações com centro temperado sem lapidação posterior

Fixação em mandril previamente retificado

Fixação em mandril sem retificação com ponto retificado ou torneado

Fixação em mandril sem retificação e centro temperado sem retificação posterior

DESVIO DE BATIMENTO RADIAL mm

[Voltar](#)

Figura 3.30 – Tela do SGF para a determinação da tolerância de batimento radial com a peça entre centros

Tomando-se como exemplo a Figura 3.29, para uma peça torneada com fixação em placa, com um diâmetro de 30 mm, (> 10 a 50 mm), a tolerância de batimento radial será de 0,08 mm.

Clicando-se no ícone “Sobre o Desvio”, o usuário acessa informações do módulo educativo, conforme mostrado na Figura 3.31.

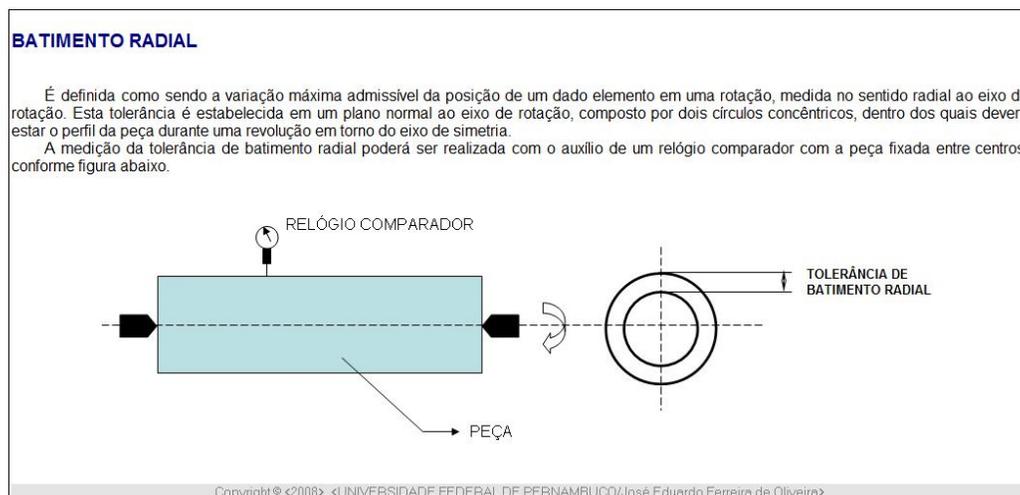


Figura 3.31 – Parte do módulo educativo do SGF sobre batimento radial

3.3 Módulo de Fabricação

A otimização da fabricação é realizada com o objetivo de se determinar as condições de corte que permitirão o controle pré-definido de um dado projeto, através do controle de variáveis como o tempo e o custo de fabricação de uma peça e o grau de utilização da informação tecnológica (KRAUSE et al., 1996). Segundo GRUESO et al. (2009), geralmente uma taxa elevada de produção equivale a baixos custos associados. No entanto, a análise de custos na produção pode ser um tema complexo e que muitas vezes aplica-se apenas à operação em estudo.

Quando conveniente, deve-se sempre optar pela minimização do custo total de fabricação por peça. No entanto, quando isto não for adequado, deve-se considerar a função tempo total de fabricação por peça. A velocidade de corte ideal deve estar entre a velocidade econômica de corte e a velocidade de máxima produção, quando não for igual a uma delas. Verifica-se, portanto, nas equações (2.59) e (2.68), que tanto este tempo total quanto o custo total de fabricação por peça são determinados através do estabelecimento de uma série de variáveis, aqui chamadas de variáveis de processo. Tais variáveis, por sua vez, são determinadas através de equacionamento matemático, o que faz com que o uso de um programa computacional para a determinação destes parâmetros torne-se imprescindível. Dentro deste contexto, o objetivo deste módulo de fabricação do SGF é determinar os parâmetros otimizados para o processo de torneamento, de forma rápida e confiável. A estrutura deste módulo está apresentada, em linhas gerais, no fluxograma da Figura 3.32.

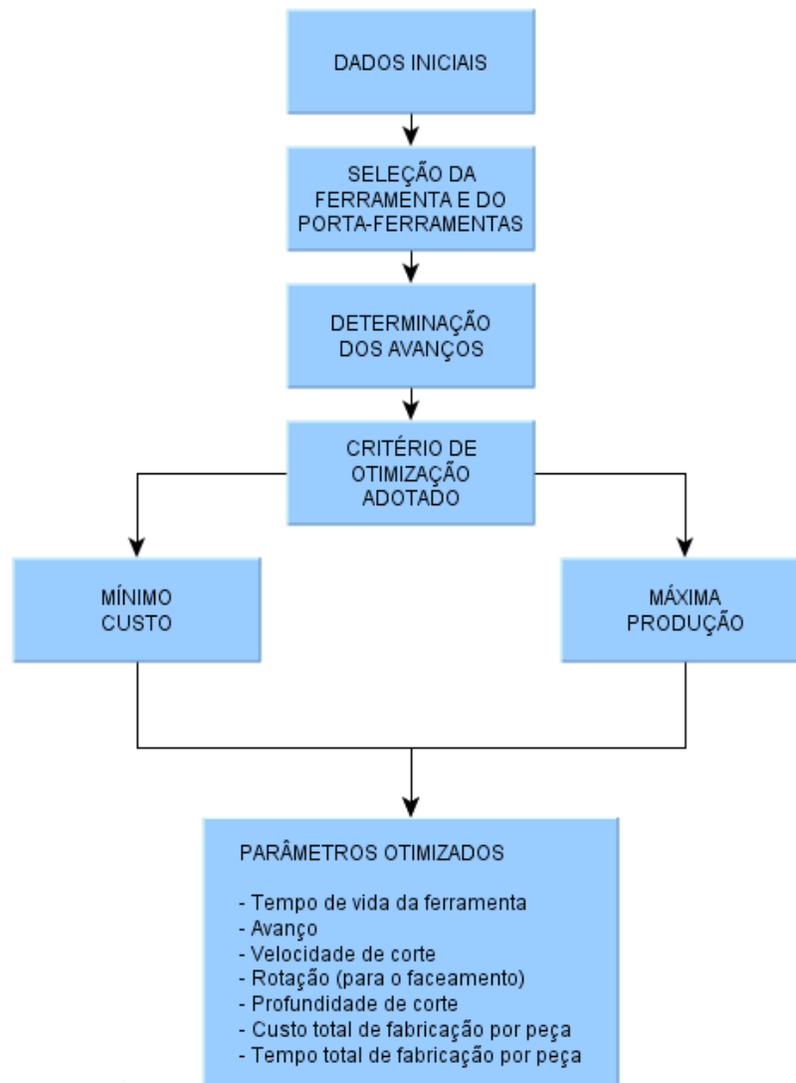


Figura 3.32 – Fluxograma do módulo de fabricação do SGF

Os dados iniciais a serem manualmente inseridos no programa são:

- Potência do motor da máquina-ferramenta;
- Rendimento da máquina-ferramenta;
- Comprimento de avanço;
- Coeficiente $KS1$ e $1-z$ da fórmula de Kienzle, de acordo com a equação (2.54);
- Diâmetros inicial e final da peça;
- Salário-homem;
- Salário-máquina;
- Ângulo de posição da ferramenta;

- Ângulo de saída da ferramenta;
- Ângulo de folga da ferramenta;
- Número de peças a serem fabricadas;
- Parâmetros C, E, F, G e H da fórmula expandida de Taylor, conforme equação (2.57);
- Tempo de troca da ferramenta;
- Tempo de afiação da ferramenta (quando existir afiação);
- Tempo improdutivo;
- Tempo de preparação da máquina-ferramenta;
- Preço por quilograma da matéria-prima;
- Densidade da matéria-prima e
- Comprimento da matéria-prima.

É importante salientar que o SGF possui explicações em algumas variáveis, necessárias ao preenchimento do campo, como por exemplo, a informação de que o valor de rendimento da máquina-ferramenta a ser inserido, não deverá ser um valor percentual, conforme apresentado na Figura 3.33.

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS DE FABRICAÇÃO

MANUFATURA

DADOS INICIAIS - TORNEAMENTO

ENTRE COM A POTÊNCIA DO MOTOR (CV)

ENTRE COM O RENDIMENTO DA MÁQUINA Valor não percentual.
Ex: 0,8

ENTRE COM O COEFICIENTE KS1 DA FÓRMULA DE KIENZLE Kienzle

ENTRE COM O COEFICIENTE 1-z DA FÓRMULA DE KIENZLE

ENTRE COM O COMPRIMENTO DA MATERIA-PRIMA (mm)

ENTRE COM O DIÂMETRO DA MATERIA-PRIMA (mm)

ENTRE COM O SALÁRIO-HOMEM (\$/hora)

ENTRE COM O SALÁRIO-MÁQUINA (\$/hora)

ENTRE COM O VALOR DO ÂNGULO DE POSIÇÃO DA FERRAMENTA

ENTRE COM O VALOR DO ÂNGULO DE SAÍDA DA FERRAMENTA

ENTRE COM O VALOR DO ÂNGULO DE FOLGA DA FERRAMENTA

ENTRE COM O VALOR DO Nº DE PEÇAS A SEREM FABRICADAS

Figura 3.33 – Tela dos dados iniciais do programa destacando a explicação de como o valor do rendimento deverá ser preenchido

O passo seguinte consiste na seleção da ferramenta, de acordo com uma das possíveis possibilidades: ferramenta de aço rápido ou um inserto reversível. Uma vez

selecionada a ferramenta, devem-se inserir os dados da mesma, necessários à otimização, conforme apresentado na Figura 3.34. Tais dados servem para a determinação do custo da ferramenta por vida, conforme equações (2.64) e (2.65).

SELEÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE

Critério de Seleção de Ferramentas

Aço rápido

ENTRE COM O Nº DE AFIAÇÕES DA FERRAMENTA

ENTRE COM O VALOR DE AQUISIÇÃO DA FERRAMENTA (\$)

ENTRE COM O VALOR FINAL DA FERRAMENTA (\$)

ENTRE COM O CUSTO POR AFIAÇÃO DA FERRAMENTA (\$)

Inseto reversível

ENTRE COM O CUSTO DE AQUISIÇÃO DO INSERTO (\$)

ENTRE COM O CUSTO DE AQUISIÇÃO DO PORTA-FERRAMEN. (\$)

ENTRE COM O Nº DE FIOS DE CORTE DO INSERTO

ENTRE COM O Nº DE FIOS DE CORTE DO PORTA-FERRAMENTA

ATÉ A SUA POSSIVEL INUTILIZAÇÃO

ENTRE COM O VALOR DO RAIOS DE ARREDONDAMENTO DA PONTA DA FERRAMENTA (mm)

Figura 3.34 – Parâmetros relacionados à ferramenta de corte

A partir daí, o SGF determina o desgaste de flanco da ferramenta, conforme apresentado na Figura 3.35. Analisando-se esta figura, verifica-se que o dado inicial a ser considerado para a determinação deste desgaste é a tolerância dimensional do diâmetro, uma vez que o máximo desgaste de flanco será alcançado quando metade desta tolerância for estabelecida sem a compensação de posicionamento da ferramenta, conforme apresentado na Figura 2.9. O desgaste de flanco é então calculado através da equação (2.46). No entanto, verifica-se na Figura 3.35 que se deve inserir o dado referente ao tipo de ferramenta e o tipo de operação (desbaste ou acabamento). Esta operação se torna necessária, pois, de acordo com a Tabela 2.20 são estabelecidos valores limites do desgaste de flanco. Logo, o SGF compara o valor do desgaste de flanco obtido através da equação (2.46) com o desgaste de flanco obtido através da Tabela 2.20. O desgaste de flanco a ser adotado será o menor deles, pois atende simultaneamente aos dois critérios.

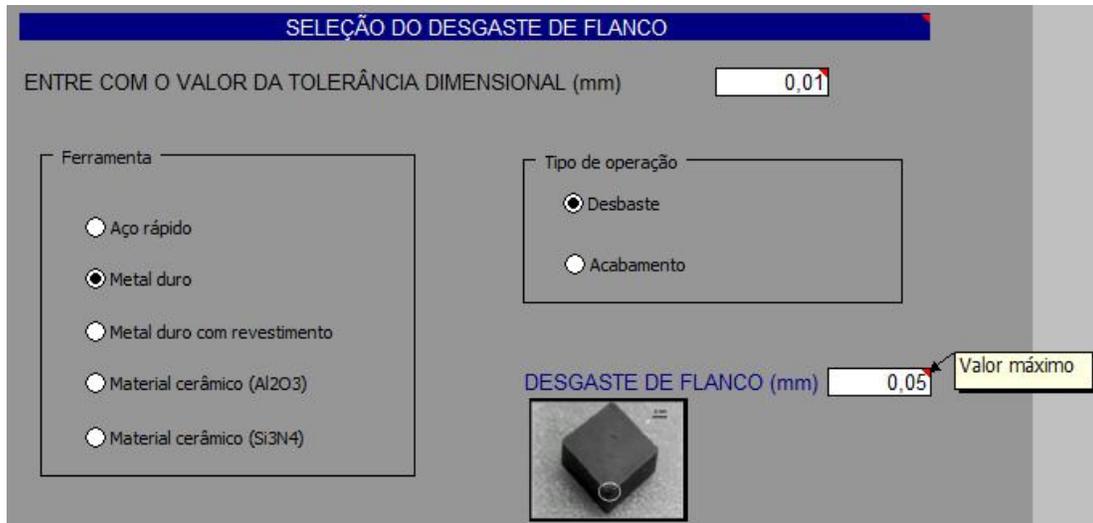


Figura 3.35 – Tela do programa referente ao desgaste de flanco

Um dos parâmetros de maior influência no custo total de fabricação por peça é o avanço. Com relação à qualidade do produto acabado, o avanço exerce influência direta no acabamento superficial e, além disto, ele exerce significativa influência na força e potência de corte e uma menor influência no desgaste da ferramenta, quando comparado com a velocidade de corte. O máximo valor permitido para esse avanço é calculado pelo SGF, de acordo com duas possíveis restrições:

- Restrição referente ao acabamento superficial e
- Restrição referente aos fatores limitantes da espessura de corte.

3.3.1 Avanço Máximo Permitido em Função do Acabamento Superficial

O SGF fixa o acabamento superficial de acordo com dois parâmetros de rugosidade: (R_y) e (R_a). A altura máxima do perfil (R_y) é definida como sendo a distância entre o pico mais elevado e o vale mais profundo, conforme apresentado na Figura 3.36. Este parâmetro possui o mesmo significado da profundidade de rugosidade (R_z) (DIN 4762, 1989), cujo uso foi abandonado em 1978 (BET, 1999).

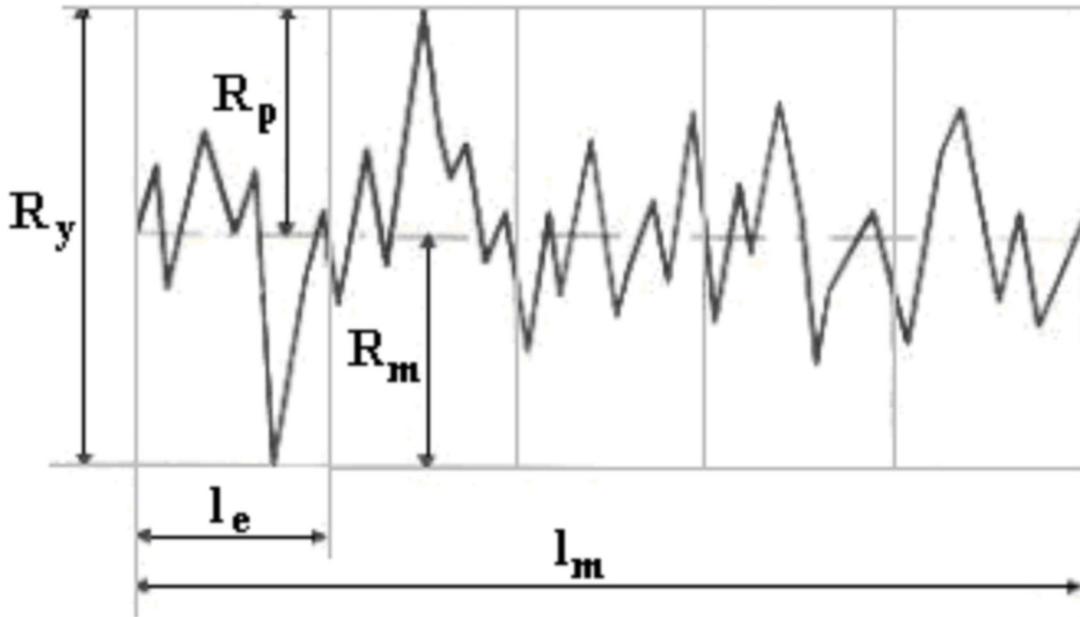


Figura 3.36 – Perfil de rugosidade destacando o parâmetro R_y (BET, 1999)

Para uma determinada peça a ser submetida a um torneamento cilíndrico externo com uma ferramenta pré-definida, pode-se relacionar o parâmetro R_y com o avanço, através da equação (3.5) (BRAMMERTZ, 1961; KÖNIG, 1984; TOOL AND MANUFACTURING, 1983). Esta equação é válida apenas para $f \leq 2.r_\epsilon \cdot \cos \chi$. Para avanços muito pequenos, há uma considerável divergência entre os valores experimentais e os valores calculados, devido ao esmagamento proporcionado pela ponta da ferramenta na superfície da peça. Substituindo-se na equação (3.5) o máximo valor de R_y , obtém-se, para uma dada ferramenta de corte, o avanço máximo permitido, conforme equação (3.6).

$$R_y = 1000 \times \frac{f^2}{8 \times r_\epsilon} \quad (3.5)$$

$$f_{\max} = \sqrt{8 \times r_\epsilon \times R_y} \quad (3.6)$$

Por outro lado, considerando-se o valor máximo do parâmetro R_a , o avanço máximo permitido pode ser obtido pela equação (3.7) (CASSIER, 1986) e pela equação (3.8) (PRASAD, 1997).

$$f_{\max} = \sqrt{31 \times (R_a / 1000) \times r_\epsilon} \quad (3.7)$$

$$f_{\max} = \sqrt{18 \times \sqrt{3} \times (R_a / 1000) \times r_\epsilon} \quad (3.8)$$

3.3.2 Avanço Máximo Permitido em Função da Espessura de Corte

Um outro critério de seleção do avanço máximo permitido é obtido através do ângulo de posição (χ) da ferramenta, raio de arredondamento da ponta da ferramenta (r_ϵ) e de um fator empírico limitante da espessura do cavaco (GF_h), conforme apresentado na equação (3.9) (JUNIOR, 1995).

$$f_{\max} = GF_h \times \frac{r_\epsilon}{\text{sen}\chi} \quad (3.9)$$

O fator limitante da espessura do cavaco é obtido através da Tabela 3.2, em função da forma do inserto e do ângulo de saída da ferramenta, se positivo ou negativo (JUNIOR, 1995).

A Figura 3.37 apresenta a interface do SGF com o usuário, na qual percebe-se que além de escolher o tipo de geometria da ferramenta e informar o tipo de inserto quanto ao ângulo de saída, o usuário poderá selecionar o avanço, também em função do parâmetro de rugosidade R_a , do parâmetro R_t ou de ambos os parâmetros. O programa, no entanto, seleciona o menor avanço de todos, pois o mesmo atenderá a todas estas restrições.

A partir daí, conforme apresentado na Figura 3.32, o SGF determina a velocidade de corte ótima com base nas condições econômicas de corte e toma, inicialmente, o menor dentre os avanços possíveis. Em seguida, determina a profundidade de corte e calcula os seguintes parâmetros: tempo de vida da ferramenta por aresta, tempo de corte, custo total de fabricação por peça e tempo total de fabricação por peça, armazenando estes dados e passando para o avanço seguinte e repete a mesma operação até o avanço máximo permitido. Quando se chegar ao último avanço, o programa apresenta a melhor situação de fabricação, ou seja, os melhores parâmetros de fabricação com base ou no mínimo custo de fabricação por peça ou no menor tempo total de fabricação por peça de acordo com o

critério de otimização adotado. Os dados de saída são, portanto:

- Custo total de fabricação por peça, de acordo com a equação (2.68);
- Tempo total de fabricação por peça, conforme equação (2.59);
- Tempo de vida da ferramenta por aresta, conforme equação (2.56);
- Tempo de corte;
- Profundidade de corte utilizada por passe;
- Velocidade de corte e
- Avanço.

Para o caso das máquinas-ferramenta CNC, uma vez programada uma velocidade de corte constante, o controle da máquina altera automaticamente a rotação de forma a manter essa velocidade inalterada, até a rotação máxima permitida.

A profundidade de corte a ser utilizada na máquina para cada passe dependerá de algumas situações consideradas pelo SGF, como apresentadas a seguir.

Tabela 3.2 – Fator limitante da espessura do cavaco (OLIVEIRA, 1999)

FORMA DO INSERTO		Fator limitante pela forma do inserto	
		GF_h	
		Negativa	Positiva
DN	 DP	0,70	0,60
IN	 IP	0,70	0,60
CN	 CP	0,75	0,65
SN	 SP	0,80	0,70

DETERMINAÇÃO DO AVANÇO MÁXIMO PERMISSÍVEL

Escolha a geometria da ferramenta

IN IP

GEOMETRIA 1

SN SP

GEOMETRIA 2

CN CP

GEOMETRIA 3

DN DP

GEOMETRIA 4

Ângulo de saída

Positivo

Negativo

ENTRE COM O COMPRIMENTO DA ARESTA (mm)

Valor máximo do parâmetro de rugosidade

Rt (micrometros)

Ra (micrometros)

Considere ambos os parâmetros

AVANÇO MÁXIMO PERMISSÍVEL (mm/volta)

Figura 3.37 – Interface do SGF com o usuário para a determinação do avanço máximo permitido

3.3.3 Determinação da Profundidade de Corte Máxima Permitida

Há uma tendência mundial de se trabalhar cada vez mais com a menor quantidade de sobremetal nas matérias-primas a serem usinadas, uma vez que, grande parte das mesmas que eram anteriormente usinadas por completo, hoje são trabalhadas com o mínimo de usinagem que possibilite alcançar os acabamentos superficiais e as tolerâncias dimensionais pretendidas. Isso se dá, principalmente por causa do crescimento e aprimoramento dos processos de conformação mecânica. No entanto, mesmo que alguns pesquisadores afirmem que nem sempre a usinagem com um simples passe seja a mais produtiva (ERMER et al., 1981), segundo Ferraresi (1977), a profundidade de corte a ser colocada na máquina-ferramenta deverá ser a máxima permitida, visando a usinagem com o número mínimo de passes, o que gera como consequência, a diminuição do custo de

usinagem.

O SGF determina a profundidade de corte a ser utilizada na máquina com base em duas possíveis situações:

- Considerando a potência fornecida pela máquina-ferramenta e o seu rendimento e
- Percentual máximo do comprimento do gume que pode ser utilizado.

Para o torneamento cilíndrico, a potência de avanço pode ser desprezada em comparação à potência de corte. Logo, a potência efetiva de corte nesta situação poderá ser considerada como sendo aproximadamente igual à potência de corte, conforme apresentada na equação (2.55). Substituindo-se nesta equação, a força de corte dada pela equação (2.54), obtém-se a equação (3.10).

$$P_c = \frac{K_{s1} \times (f \times \text{sen}\chi)^{1-z} \times a_p \times V}{\text{sen}\chi \times 60 \times 75} \quad (3.10)$$

Por outro lado, a relação entre a potência de corte e a potência do motor é estabelecida através da inequação (3.11). Igualando-se as expressões (3.10) e (3.11), obtém-se a equação (3.12).

$$P_c \leq P_m \times \eta \quad (3.11)$$

$$P_m \times \eta \leq \frac{K_{s1} \times (f \times \text{sen}\chi)^{1-z} \times a_p \times V}{\text{sen}\chi \times 60 \times 75} \quad (3.12)$$

O primeiro membro da expressão (3.12) representa a potência fornecida pela máquina-ferramenta, enquanto que o segundo membro expressa a potência que a máquina-ferramenta irá consumir de acordo com os parâmetros de usinagem nela colocados, ou seja, é a potência de corte. No entanto, a única variável que possui mobilidade, isto é, a única variável que poderá variar livremente de modo a no máximo estabelecer a igualdade entre o primeiro e o segundo membro da expressão (3.12) é a profundidade de corte, pois o avanço está condicionado ao acabamento superficial pretendido e a velocidade de corte deverá se situar dentro do intervalo de máxima eficiência, que é o intervalo definido pela

velocidade de mínimo custo e a velocidade para a máxima produção. Portanto, a máxima profundidade de corte é obtida na situação onde o primeiro membro da expressão (3.12) se igual ao segundo. Explicitando-se esta profundidade de corte máxima da expressão (3.12), obtém-se a equação (3.13).

$$a_{p \max} = \frac{P_m \times \eta \times \text{sen} \chi \times 60 \times 75}{K_{S1} \times (f \times \text{sen} \chi)^{1-z} \times V} \quad (3.13)$$

Um outro limitante da profundidade de corte máxima permitida diz respeito ao percentual máximo do comprimento do gume da ferramenta que é limitado pela forma do inserto e pelo ângulo de saída da ferramenta, através do chamado fator limitante da largura de corte. Este limitante está correlacionado com a máxima profundidade de corte através da equação (3.14) (JUNIOR, 1995). O fator limitante da largura de corte GF_b é determinado em função da forma do inserto e do ângulo de saída da ferramenta, de acordo com a Tabela 3.3.

$$a_{p \max} = GF_b \times l \times \text{sen} \chi \quad (3.14)$$

Tabela 3.3: Fator limitante da largura de corte (OLIVEIRA, 1999)

FORMA DO INSERTO		Fator limitante pela forma do inserto	
		Negativa	Positiva
DN	DP 	0,55	0,45
IN	IP 	0,60	0,45
CN	CP 	0,80	0,70
SN	SP 	0,80	0,74

O SGF determina a profundidade de corte utilizada como ponto de partida para a otimização como sendo a menor profundidade obtida comparando-se as equações (3.13) e (3.14).

3.3.4 Determinação do Tempo de Vida da Ferramenta por Aresta

A fórmula de Taylor simples apresentada na equação (2.56) relaciona o tempo de vida da ferramenta por aresta com a velocidade de corte. No entanto, esta equação só é válida para um dado avanço e uma dada profundidade de corte. Como o SGF determina tanto o menor custo total quanto o menor tempo total de fabricação por peça considerando-se diferentes avanços, velocidades de corte e profundidades de corte, a utilização desta equação não atende a tal condição. Para solucionar esse problema, utiliza-se a fórmula expandida de Taylor, conforme equação (2.57). Comparando-se as equações (2.56) e (2.57), pode-se determinar os parâmetros x e K da fórmula de Taylor simples em função dos parâmetros da fórmula de Taylor expandida, conforme equações (3.15) e (3.16). Com base nos parâmetros x e K determinados através destas duas equações, o tempo de vida da ferramenta por aresta é determinado explicitando-se o seu valor na equação (2.56), gerando-se assim, a equação (3.17).

$$x = -\frac{1}{G} \quad (3.15)$$

$$K = (C \times f^E \times a_p^F \times VK^H)^x \quad (3.16)$$

$$T = \frac{K}{V^x} \quad (3.17)$$

A Figura 3.38 apresenta a tela do programa onde são inseridos os parâmetros da fórmula de Taylor expandida. O ícone “Valores da Taylor Expandida” apresenta um banco de dados de parâmetros da fórmula de Taylor Expandida com base no manual da WIDIA (WIDIA, 1990), conforme mostrado na Figura 3.39.

DADOS REFERENTES À FÓRMULA EXPANDIDA DE TAYLOR	
ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO G	-0,35
ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO C	754
ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO E	-0,15
ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO F	-0,1
ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO H	0

$$V = C \times f^E \times a_p^F \times T^G \times VK^H$$

Valores da Taylor Expandida

Figura 3.38 – Tela do SGF para inserção dos parâmetros da Fórmula de Taylor Expandida

Banco de Dados da Fórmula Expandida de Taylor	
FERRAMENTA	TTS
MATÉRIA - PRIMA	1010
<p>Condições</p> <p><input type="radio"/> Matéria-prima com carepa de fundição, laminação ou forjamento</p> <p><input checked="" type="radio"/> Usinagem pesada (desbaste)</p> <p><input type="radio"/> Usinagem leve (acabamento)</p> <p><input type="radio"/> Torneamento interno</p> <p><input type="radio"/> Corte interrompido</p> <p><input type="radio"/> Máquina-ferramenta em bom estado</p> <p><input type="radio"/> Máquina-ferramenta em mau estado</p>	
$V_c = W_s \times C \times a_p^F \times f^E \times T^G$ <p>V_c = velocidade de corte (m/min) a_p = profundidade de corte (mm) f = avanço (mm/volta) T = tempo de vida da ferramenta (min) W_s = fator de correção</p> <p>W_s = 0,875</p>	
<p>Resultados</p> <p>C = 780 F = -0,11</p> <p>E = -0,17 G = -0,38</p>	
<p>Faixa de validade dos resultados</p> <p>ap (mm) = 1 a 12</p> <p>f (mm/volta) = 0,15 a 1,2</p> <p>T (min) = 6 a 100</p> <p>VB (mm) = 0,4 a 0,5</p>	

Figura 3.39 – Tela de acesso ao banco de dados da Fórmula de Taylor Expandida do SGF

O banco de dados funciona para as seguintes ferramentas de corte: TTI, TTX, TTS, TTR, TK 15, TN 25, TR, TN 35, THF, AT 10, AT 15 e HK 15 (WIDIA, 1990).

Para a obtenção dos parâmetros, basta selecionar o tipo da ferramenta, o material da peça a ser usinada e uma das seguintes condições de usinagem que define o fator de correção W_s.

A fim de que se possa verificar o algoritmo completo do SGF referente a este módulo de fabricação, as Figuras 3.40, 3.41, 3.42, 3.43, 3.44 e 3.45 apresentam a seqüência de otimização adotada, considerando todas as possibilidades do mesmo.

Caso este banco de dados da Fórmula Expandida de Taylor seja utilizado, o parâmetro “C” a ser inserido na tela da Figura 3.38 deverá ser obtido pelo produto CxW_s tomado na tela da Figura 3.39.

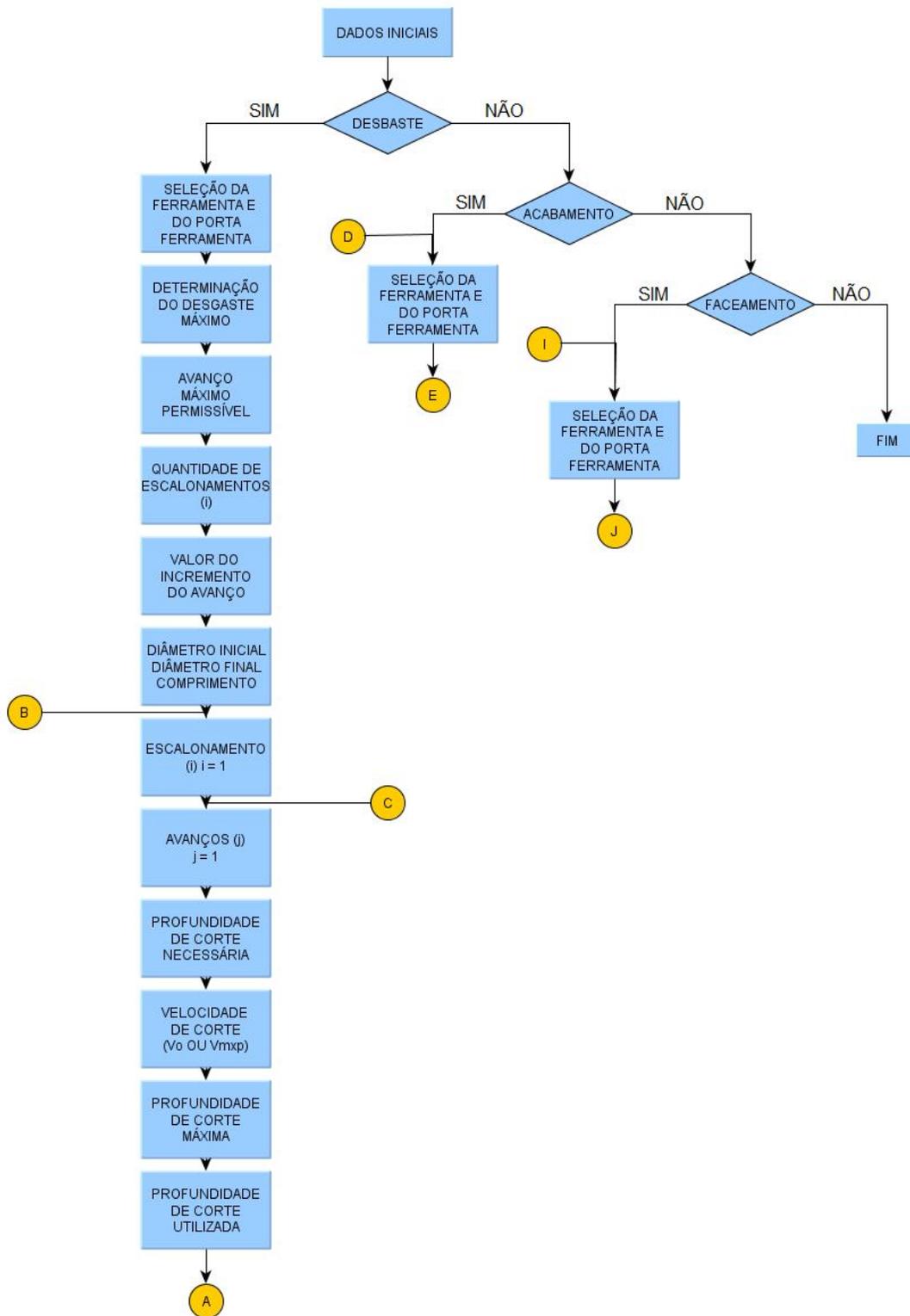


Figura 3.40 – Fluxograma do módulo de fabricação do SGF

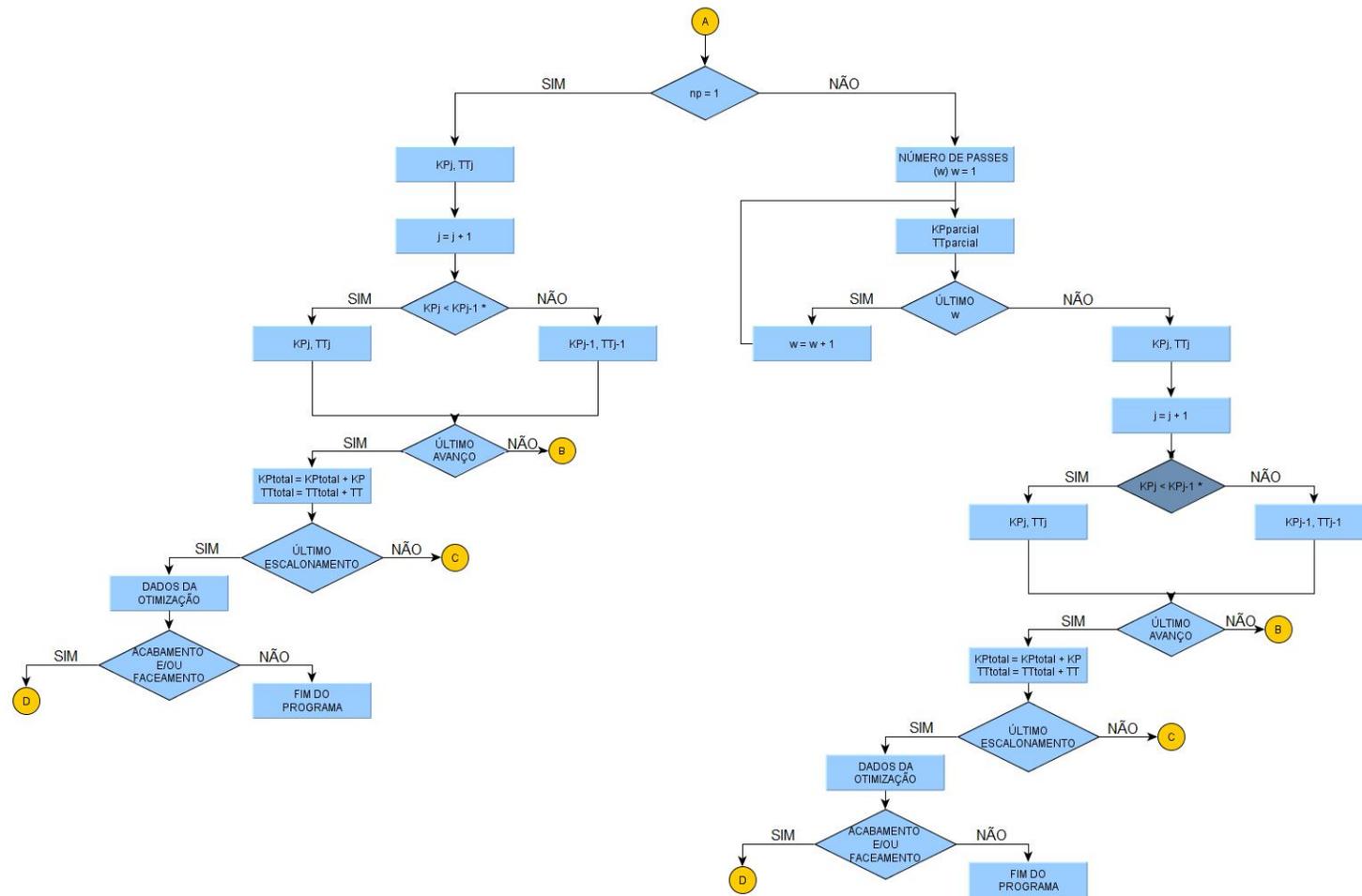


Figura 3.41 – Continuação do fluxograma do módulo de fabricação do SGF

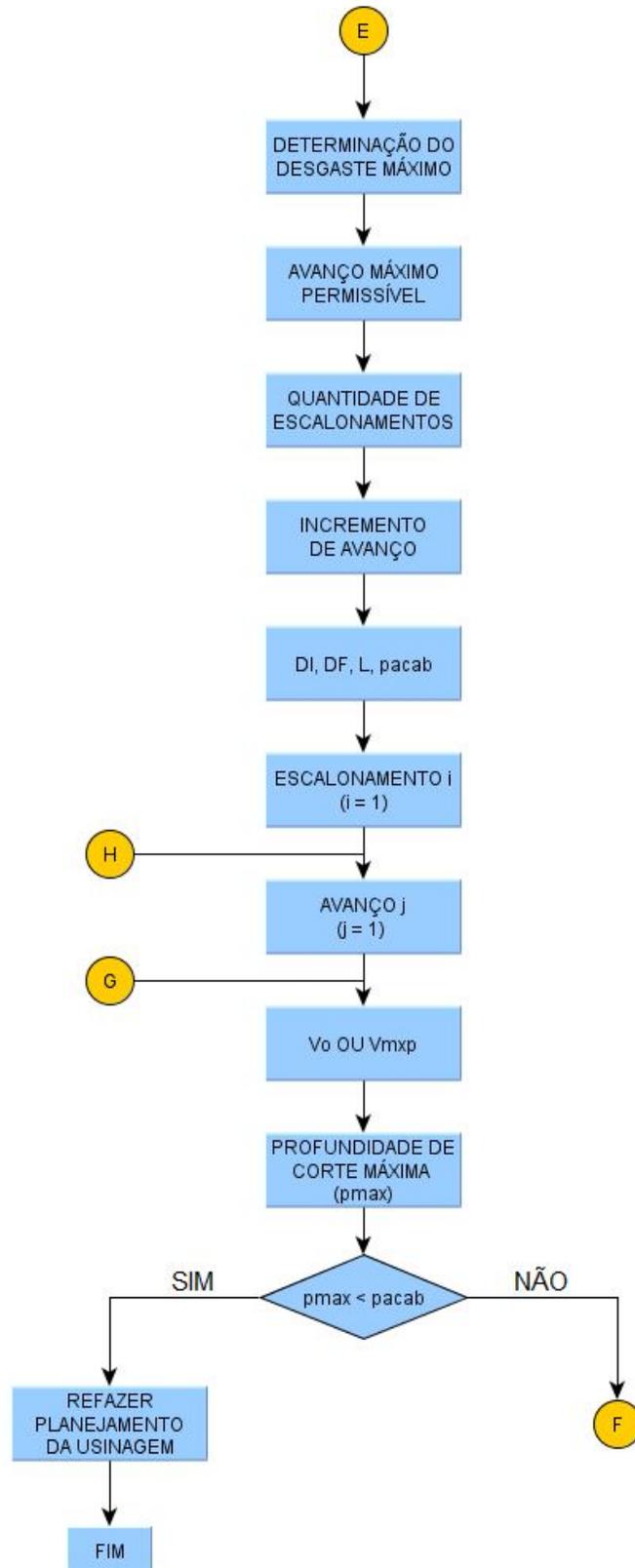


Figura 3.42 - Continuação do fluxograma do módulo de fabricação do SGF

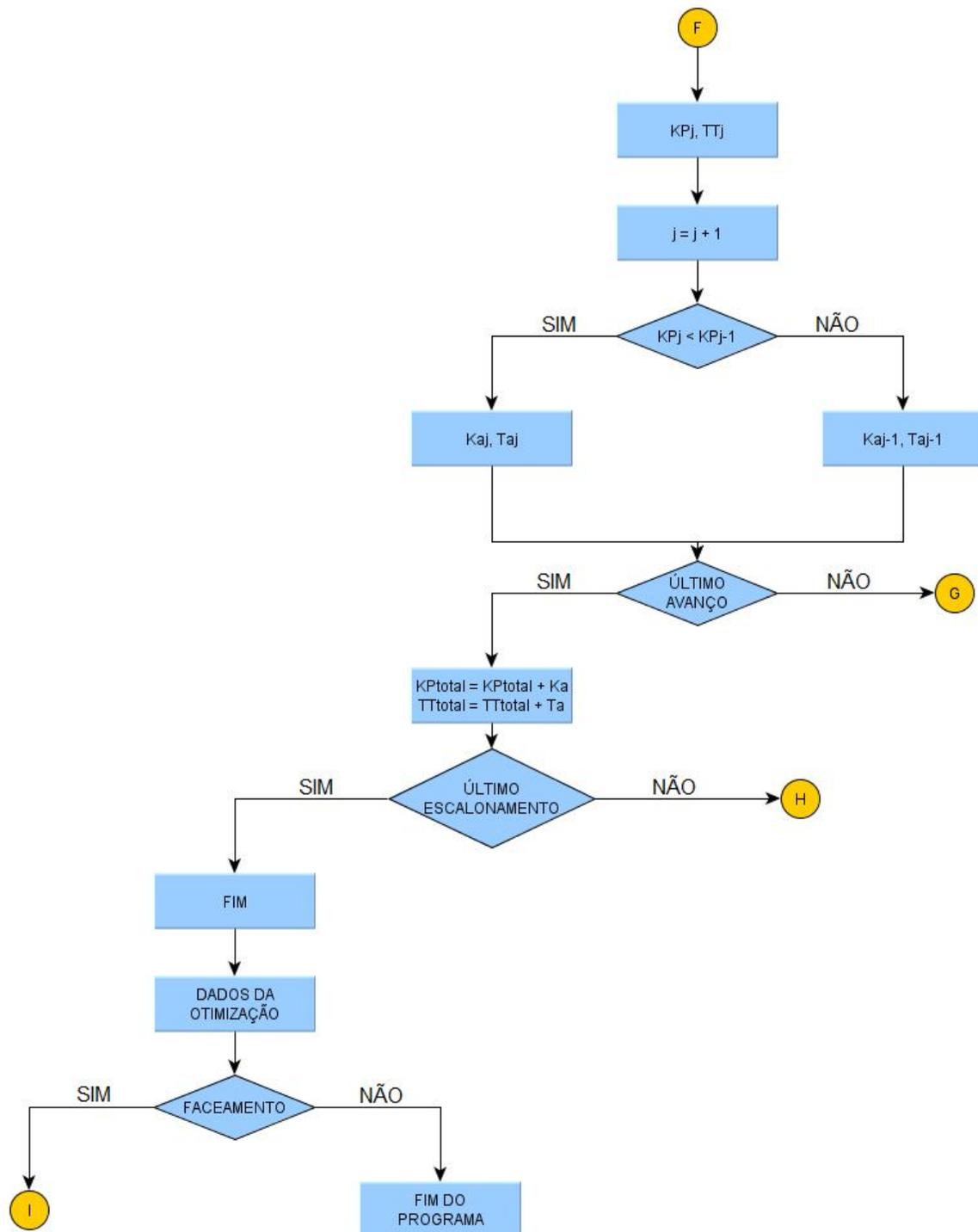


Figura 3.43 - Continuação do fluxograma do módulo de fabricação do SGF

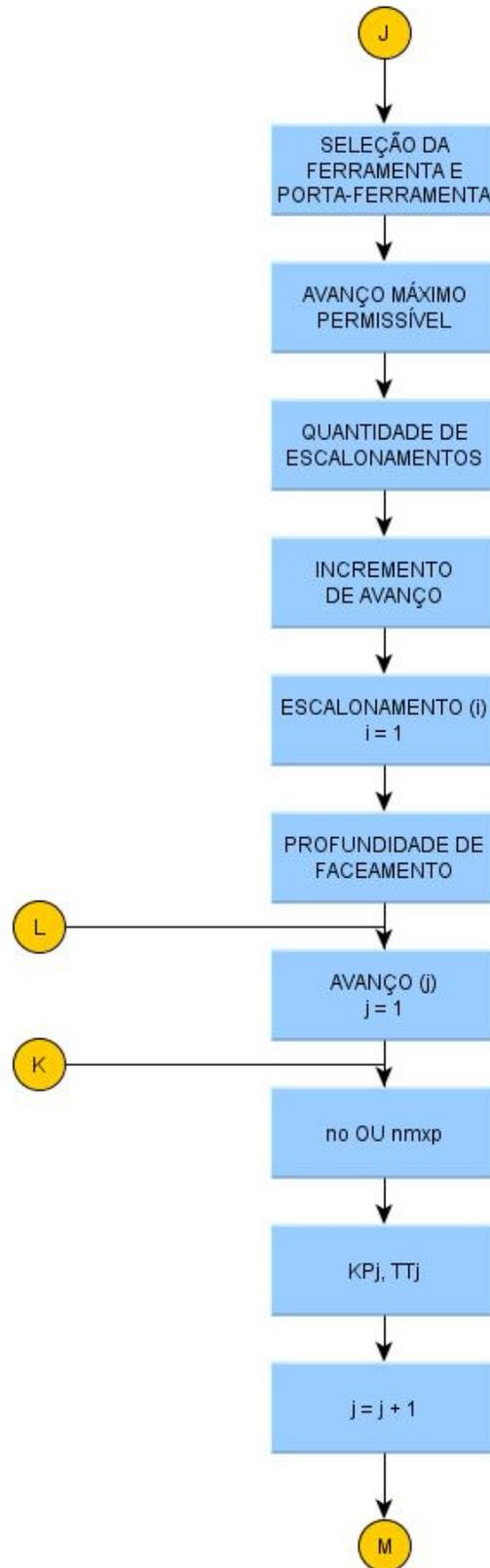


Figura 3.44 - Continuação do fluxograma do módulo de fabricação do SGF

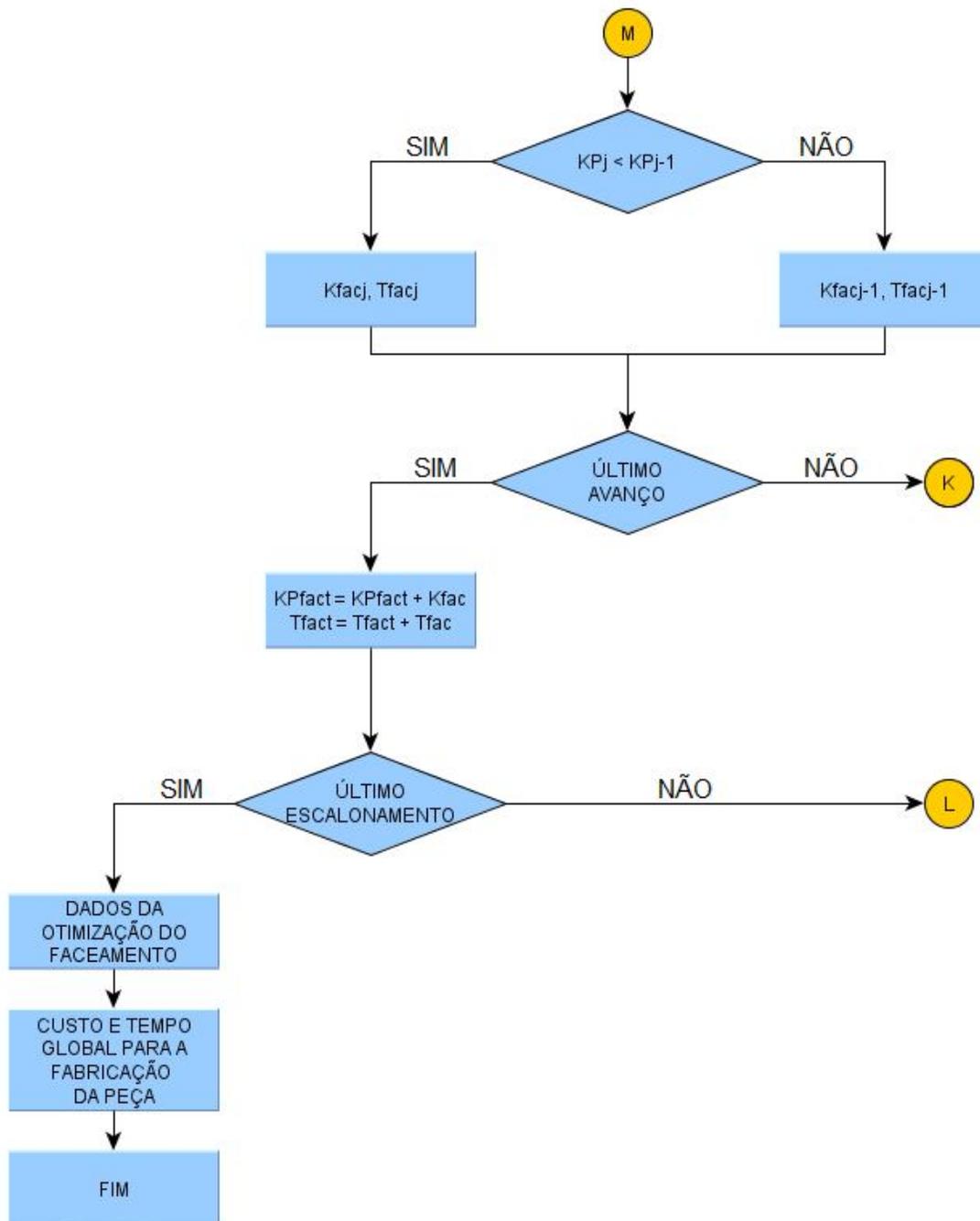


Figura 3.45 - Continuação do fluxograma do módulo de fabricação do SGF

Analisando-se as Figuras 3.40 a 3.45, constata-se que inicialmente, deve-se inserir os dados iniciais que permeiam todas as operações possíveis: desbaste, acabamento e faceamento. A partir daí, o usuário seleciona uma destas operações com sua respectiva

ferramenta e porta-ferramenta, e o programa determina o desgaste de flanco máximo que a ferramenta poderá alcançar e o avanço máximo permitido.

De posse deste avanço máximo, o usuário insere no programa os seguintes dados:

- Quantidade de escalonamentos do eixo a ser torneado;
- Valor do incremento de avanço, ou seja, o valor da menor variação de avanço que a máquina-ferramenta possui.

Em seguida, o programa seleciona o primeiro escalonamento; solicita o diâmetro inicial e o final, e o comprimento de avanço e toma o primeiro avanço possível. De acordo com o critério de otimização utilizado, mínimo custo ou máxima produção, o SGF determina os seguintes parâmetros:

- Profundidade de corte máxima;
- Profundidade de corte utilizada;
- Custo para a geração da dimensão e
- Tempo para a geração da dimensão.

Logo após, o programa guarda todos os valores gerados e parte para o segundo avanço, repete toda a operação e compara o custo ou o tempo, dependendo do critério de otimização adotado, com o anterior, e seleciona o menor custo ou o menor tempo. Esta operação é repetida com todos os possíveis avanços e ao se processar o último deles, o programa apresenta os parâmetros ótimos de fabricação (avanço, velocidade de corte e profundidade de corte para o escalonamento em questão). O SGF ainda guarda os valores ótimos do custo e do tempo referentes ao escalonamento.

A partir daí, o SGF passa ao escalonamento seguinte, caso o mesmo exista, e repete toda a operação para cada um deles e para todas as operações que estejam presentes na confecção da peça específica (desbaste, acabamento e faceamento).

Tanto a função custo total de fabricação por peça quanto a função tempo total de fabricação por peça levam em consideração o fato da superfície em questão não poder ser confeccionada em um único passe. Por exemplo, a função custo é dada pela equação (3.18), onde “w” representa o número de passes e “a” refere-se ao número de escalonamentos que o eixo possui (BATISTA, 2005).

$$K_{pi} = C_1 + \sum_{i=1}^a \left(\sum_{w=1}^{np} (d_i - (2 \cdot w - 2) \cdot p_u) l_f \cdot \left(\frac{\pi \cdot C_2}{60000 \cdot f \cdot V} + \frac{\pi \cdot V^{x-1} \cdot C_3}{1000 \cdot f \cdot K} \right) \right) \quad (3.18)$$

Ao final do ciclo de otimização, o programa apresenta além dos parâmetros ótimos de cada operação, o custo total de fabricação por peça e o tempo total de fabricação por peça.

3.3.5 A Operação de Faceamento

Ao contrário do cilindramento, o critério de otimização para a operação de faceamento não se considera a velocidade de mínimo custo ou a velocidade de máxima produção, e sim a rotação de mínimo custo ou a rotação de máxima produção, pois nesta situação, a velocidade de corte é variável, uma vez que o percurso de avanço se dá sobre o raio do eixo. Portanto, houve a necessidade neste trabalho, de se determinar estas rotações.

3.3.5.1 Determinação da Rotação de Mínimo Custo

Inicialmente, deve-se considerar o percurso de avanço referente ao faceamento, conforme apresentado na Figura 3.46.

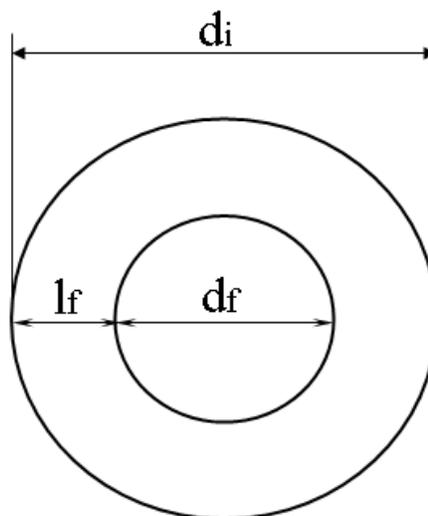


Figura 3.46 – Peça em perfil destacando o percurso de avanço (l_f) referente ao faceamento

Nesta situação mais geral, a ferramenta se deslocará de acordo com a equação (3.19). Além desta situação mais geral, o programa pode considerar ainda o diâmetro final sendo igual a zero, como é o caso do faceamento na extremidade com ou sem furo de centro.

$$l_f = \frac{d_i - d_f}{2} \quad (3.19)$$

O tempo de corte para a execução desta operação é dado pela equação (3.20).

$$t_c = \frac{l_f}{f \cdot n} \quad (3.20)$$

Substituindo-se a equação (3.19) na equação (3.20), obtém-se a seguinte equação:

$$t_c = \frac{(d_i - d_f)}{2 \cdot f \cdot n} \quad (3.21)$$

A equação (2.68) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$K_p = C_1 + \left(\frac{t_c}{60} \times C_2 \right) + \left(\frac{t_c}{T} \times C_3 \right) \quad (3.22)$$

O valor do tempo de corte da equação (3.21) quando substituído na equação (3.22), e retirando-se a constante dos custos indiretos C_1 , que será inserida apenas no custo total de fabricação, resulta na equação (3.23) que representa apenas o custo de faceamento K_{pfac} .

$$K_{pfac} = \frac{(d_i - d_f)}{2 \times f \times n \times 60} \times C_2 + \frac{(d_i - d_f)}{2 \times f \times n \times T} \times C_3 \quad (3.23)$$

Especificamente para o faceamento, a velocidade de corte pode ser dada pela equação (3.24), onde d^* é o diâmetro instantâneo do eixo, tomado em um ponto do percurso de avanço.

$$V = \frac{\pi \cdot d^* \cdot n}{1000} \quad (3.24)$$

Explicitando-se o tempo de vida da ferramenta por aresta T na equação (2.56) e substituindo-o na equação (3.23), obtém-se a equação (3.25).

$$K_{pfac} = \frac{(d_i - d_f)}{2 \times f \times n \times 60} \times C_2 + \frac{(d_i - d_f) \times V^X}{2 \times f \times n \times K} \times C_3 \quad (3.25)$$

Substituindo-se a equação (3.24) na equação (3.25), obtém-se a equação (3.26).

$$K_{pfac} = \frac{(d_i - d_f)}{2 \times f \times n \times 60} \times C_2 + \frac{(d_i - d_f) \times \left(\frac{\pi \times n}{1000}\right)^X}{2 \times f \times n \times K} \times d^{*X} \times C_3 \quad (3.26)$$

Para a obtenção do custo de faceamento, faz-se necessário integrar a equação (3.26) em função do diâmetro d^* , pois os outros parâmetros são constantes.

$$K_{pfac}(n) = \int_{d_i}^{d_f} K_{pfac}(n, d^*) \partial d^* \quad (3.27)$$

$$K_{pfac} = \int_{d_i}^{d_f} \left(\frac{(d_i - d_f)}{2 \times f \times n \times 60} \times C_2 + \frac{(d_i - d_f) \times \left(\frac{\pi \times n}{1000}\right)^X}{2 \times f \times n \times K} \times C_3 \times d^{*X} \right) \partial d^* \quad (3.28)$$

$$K_{pfac} = \frac{(d_i - d_f) \times C_2}{2 \times f \times n \times 60} \times d^* \Big|_{d_f}^{d_i} + \frac{(d_i - d_f) \times \left(\frac{\pi \times n}{1000}\right)^X \times C_3}{2 \times f \times n \times K} \times \frac{d^{X+1}}{X+1} \Big|_{d_f}^{d_i} \quad (3.29)$$

$$K_{pfac} = \frac{(d_i - d_f) \times C_2}{2 \times f \times n \times 60} \times (d_i - d_f) + \left(\frac{(d_i - d_f) \times \left(\frac{\pi \times n}{1000}\right)^X \times C_3}{2 \times f \times n \times K \times (X+1)} \times d_i^{X+1} - \frac{(d_i - d_f) \times \left(\frac{\pi \times n}{1000}\right)^X \times C_3}{2 \times f \times n \times K \times (X+1)} \times d_f^{X+1} \right) \quad (3.30)$$

O custo de faceamento é portanto, dado pela equação (3.31).

$$K_{pfac} = \frac{(d_i - d_f)^2 \times C_2}{2 \times f \times n \times 60} + \frac{(d_i - d_f) \times \left(\frac{\pi \times n}{1000}\right)^X \times C_3}{2 \times f \times n \times K \times (X + 1)} \times (d_i^{X+1} - d_f^{X+1}) \quad (3.31)$$

A equação (3.31) pode ser reescrita, conforme equação (3.32).

$$K_{pfac} = \frac{(d_i - d_f)^2 \times C_2}{2 \times f \times 60} \times n^{-1} + \frac{(d_i - d_f) \times \pi^X \times C_3 \times (d_i^{X+1} - d_f^{X+1})}{2 \times f \times K \times (X + 1) \times 1000^X} \times n^{X-1} \quad (3.32)$$

Como o avanço é constante nesta operação, o custo de faceamento será função da rotação colocada na máquina-ferramenta. Assim sendo, o valor mínimo de K_{pfac} é obtido quando a sua derivada em relação à rotação “n” for nula. Logo, derivando-se a equação (3.32) em relação à rotação e igualando-se o resultado a zero, obtém-se:

$$\frac{\partial K_{pfac}}{\partial n} = \frac{-1 \times (d_i - d_f)^2 \times C_2 \times n^{-2}}{2 \times f \times 60} + \frac{(d_i - d_f) \times \pi^X \times C_3 \times (d_i^{X+1} - d_f^{X+1}) \times (X - 1) \times n^{X-2}}{2 \times f \times K \times (X + 1) \times 1000^X} \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial K_{pfac}}{\partial n} = 0 \quad (3.34)$$

Igualando-se as equações (3.33) e (3.34), obtém-se:

$$\frac{(d_i - d_f)^2 \times C_2 \times n^{-2}}{2 \times f \times 60} = \frac{(d_i - d_f) \times \pi^X \times C_3 \times (d_i^{X+1} - d_f^{X+1}) \times (X - 1)}{2 \times f \times K \times (X + 1) \times 1000^X} \times n^{X-2} \quad (3.35)$$

$$n^X = \frac{(d_i - d_f) \times C_2 \times K \times (X + 1) \times 1000^X}{60 \times \pi^X \times C_3 \times (d_i^{X+1} - d_f^{X+1}) \times (X - 1)} \quad (3.36)$$

O valor da rotação para o mínimo custo é então:

$$n_0 = \frac{1000}{\pi} \times \sqrt[X]{\frac{(d_i - d_f) \times C_2 \times K \times (X + 1)}{60 \times C_3 \times (d_i^{X+1} - d_f^{X+1}) \times (X - 1)}} \quad (3.37)$$

3.3.5.2 Determinação da Rotação de Máxima Produção

A equação que representa a rotação de máxima produção no faceamento é obtida de maneira análoga à rotação de mínimo custo. A única diferença é que ao invés de se trabalhar com a função custo total de fabricação por peça, trabalha-se com a função tempo total de fabricação por peça.

Partindo-se da equação (2.59), retira-se a parcela de tempos improdutivos que será computada apenas no final do ciclo de otimização, a não ser que a única operação para a fabricação da peça seja o faceamento. Substituindo-se a equação (3.24) na equação (2.59), obtém-se a equação (3.38) que representa o tempo de faceamento t_{fac} .

$$t_{fac} = \frac{(d_i - d_f)}{2 \times f \times n} + \left(\frac{(d_i - d_f) \times \left(\frac{\pi \times n \times d^*}{1000} \right)^X}{2 \times f \times n \times K} - \frac{1}{z} \right) \times (t_{ft} + t_{fa}) \quad (3.38)$$

De maneira análoga ao que foi feito considerando-se a rotação de mínimo custo, integrando-se a equação do tempo de faceamento ao longo do percurso da ferramenta, conforme apresentado na equação (3.39), obtém-se a expressão do tempo de faceamento em função apenas da rotação, conforme equação (3.40).

$$t_{fac}(n) = \int_{d_i}^{d_f} t_{fac}(n, d^*) \partial d^* \quad (3.39)$$

$$t_{fac} = \frac{(d_i - d_f)^2}{2 \times f \times n} + \left(\frac{(d_i - d_f)^{X+2} \times \pi^X \times n^{X-1}}{2 \times f \times 1000^X \times (X + 1) \times K} - \frac{(d_i - d_f)}{z} \right) \times (t_{ft} + t_{fa}) \quad (3.40)$$

A rotação de máxima produção é obtida derivando-se a equação (3.40) em relação à rotação “n” e igualando-se a zero.

$$\frac{\partial t_{fac}}{\partial n} = \frac{-(d_i - d_f)^2}{2 \times f \times n^2} + \left(\frac{(X-1) \times (d_i - d_f)^{X+2} \times \pi^X \times n^{X-2}}{2 \times f \times 1000^X \times (X+1) \times K} \right) \times (t_{ft} + t_{fa}) = 0 \quad (3.41)$$

$$\frac{(d_i - d_f)^2}{2 \times f \times n^2} = \frac{(X-1) \times (d_i - d_f)^{X+2} \times \pi^X \times n^{X-2}}{2 \times f \times 1000^X \times (X+1) \times K} \times (t_{ft} + t_{fa}) \quad (3.42)$$

Explicitando-se a rotação na equação (3.42), obtém-se a rotação de máxima produção n_{mvp} , de acordo com a equação (3.43).

$$n_{mvp} = \frac{1000}{(d_i - d_f) \times \pi} \times \sqrt[X]{\frac{(X+1) \times K}{(X-1) \times (t_{ft} + t_{fa})}} \quad (3.43)$$

3.4 Módulo de Medição

Uma vez projetado e fabricado, a terceira etapa do ciclo do produto é a medição. O módulo de medição do programa computacional SGF visa alcançar os objetivos apresentados na Figura 3.47.

Existem inicialmente, cadastrados no SGF os seguintes sistemas de medição: traçador de altura, trena, escala e paquímetro, micrômetro, relógio comparador, microscópio de medição e máquina de medição por coordenadas.

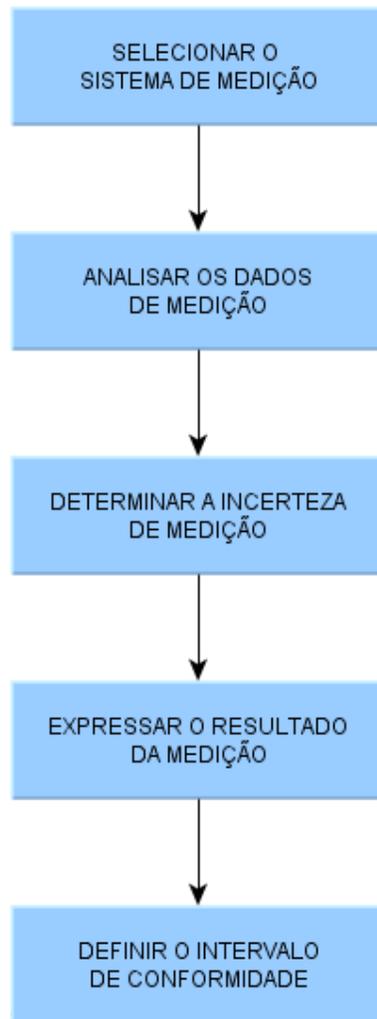


Figura 3.47 – Etapas que compõem o módulo de medição do SGF

3.4.1 Seleção do Sistema de Medição

Historicamente, a tarefa de definir o processo de medição mais adequado para uma atividade particular se baseava em uma relação entre tolerância de projeto e incerteza de medição. No entanto, existem outras variáveis que influenciam na escolha do processo de medição mais adequado, como a variabilidade do processo de fabricação e os custos associados aos erros de classificação (URRUTIA, 2000). Dentro deste contexto, os métodos atualmente empregados para adequação dos sistemas de medição ao processo são dados de acordo com:

- Resolução do instrumento – considera adequada a utilização de instrumentos de medição com resolução entre 10% a 33% da tolerância;
- Erro máximo do instrumento – considera adequada a utilização de instrumentos de medição com erro máximo dentro da faixa de medição de 25% da tolerância e
- Incerteza do instrumento de medição – considera adequada a utilização de instrumentos de medição com incerteza entre 10% a 33% da tolerância (ISO/ABNT NBR 10012-1, 1993).

A Figura 3.48 apresenta a tela principal do módulo de medição, na qual verifica-se que inicialmente, seleciona-se um sistema de medição e em seguida, em relação ao sistema de medição inicialmente escolhido, inserem-se os seguintes dados:

- Incerteza de medição expandida do sistema de medição;
- Fator de abrangência referente à incerteza expandida do sistema de medição;
- Exatidão do sistema de medição que geralmente é informado pelo fabricante (MITUTOYO, 2000) ou obtido do certificado de calibração do referido equipamento;
- Resolução adotada para o sistema de medição em questão.

Com base na resolução adotada, erro máximo e incerteza expandida do sistema de medição, o SGF trabalha da seguinte forma:

- A incerteza expandida do sistema de medição deverá ser menor ou igual a $\frac{1}{4}$ da tolerância da respectiva dimensão a ser medida, uma vez que o valor de 25% encontra-se na faixa utilizada de 10% a 33%, e normas internacionais consideram suficiente o valor de $\frac{1}{4}$ (ROLIM, 2003);
- O erro de indicação deverá ser menor ou igual a $\frac{1}{4}$ da tolerância e
- A resolução adotada deverá ser menor ou igual a $\frac{1}{6}$ da tolerância.

Caso todas as três condições acima citadas sejam simultaneamente atendidas, o sistema de medição é considerado apto. Analisando-se ainda a Figura 3.48 percebe-se uma ligação direta com o módulo de toleranciamento dimensional, uma vez que, para atender

ao critério de se comparar a incerteza expandida do sistema de medição com a tolerância de processo, poder-se-á adotar uma das seguintes alternativas:

- tolerância em função da incerteza da máquina-ferramenta;
- tolerância em função do ajuste através do sistema furo-base;
- tolerância em função do ajuste através do sistema eixo-base;
- tolerância em função do acabamento superficial;
- tolerância considerando-se tanto a incerteza da máquina-ferramenta quanto o acabamento superficial;
- tolerância para a execução grosseira de peças isoladas ou
- simplesmente inserindo-se um valor qualquer de tolerância.

MÓDULO DE MEDIÇÃO

SISTEMA DE MEDIÇÃO (SM)

	FATOR
ENTRE COM A INCERTEZA EXPANDIDA DE MEDIÇÃO DO SM (mm)	0,001
ENTRE COM O FATOR DE ABRANGÊNCIA (k)	2
ENTRE COM O ERRO MÁXIMO DO SM (mm)	0,003
ENTRE COM A RESOLUÇÃO ADOTADA PARA O SM (mm)	0,001

Critérios utilizados para a determinação da tolerância

Incerteza da máquina-ferramenta

Ajuste através do sistema furo base

Ajuste através do sistema eixo base

Acabamento superficial

Erro da máquina-ferramenta e acabamento superficial

Execução grosseira de peças isoladas

Entre com uma tolerância específica (mm)

RESULTADO DA ESCOLHA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO
O MICRÔMETRO É UM SM APTO

Figura 3.48 – Tela principal do módulo de medição do SGF

Uma vez que seja selecionada a opção da tolerância considerando-se tanto a incerteza da máquina-ferramenta quanto o acabamento superficial, o SGF automaticamente

selecionará o menor valor comparando-se as duas situações, pois este valor atenderá a ambas.

Pode-se constatar através da Figura 3.48 que existe ao lado da célula referente à entrada dos valores para a incerteza do sistema de medição, exatidão do sistema de medição e resolução adotada; uma coluna para o “FATOR” que representa o quanto cada item acima citado deverá ser menor que a tolerância para a cota que se deseja medir. Portanto, para a incerteza do sistema de medição este fator poderá variar entre 3 e 10, o que corresponde à variação de 10% a 33%. Para a exatidão do sistema este valor não poderá ultrapassar 4 e para a resolução adotada, este fator deverá se situar entre 3 e 10. Caso o usuário não preencha este fator, o programa automaticamente atribuirá o fator 4 para a incerteza do sistema de medição e para a exatidão, e atribuirá o fator 6 à resolução. A Figura 3.49 apresenta o algoritmo referente à seleção do sistema de medição.

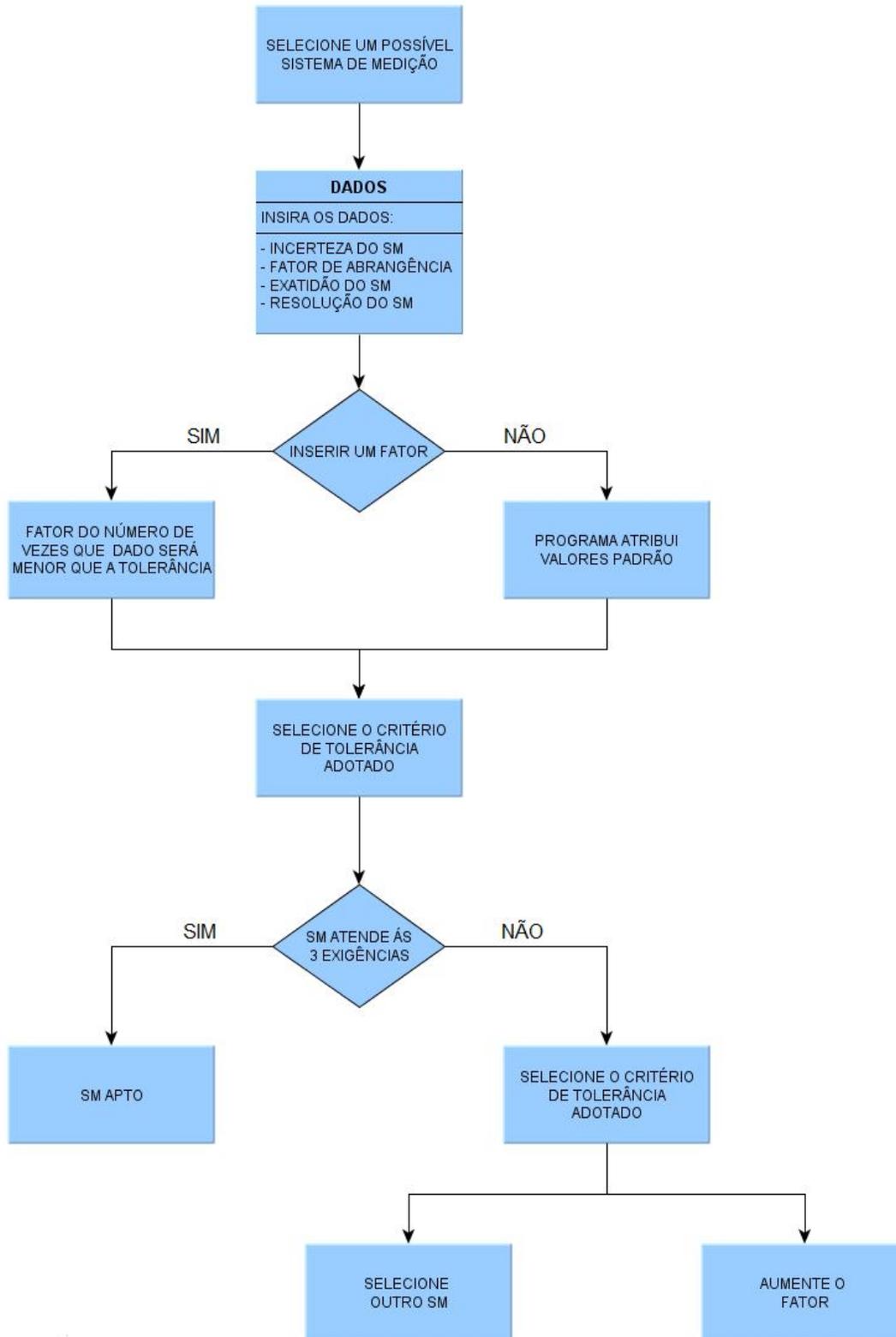


Figura 3.49 – Fluxograma do SGF apresentando o algoritmo para a verificação de aptidão do sistema de medição ao processo

3.4.2 Análise dos Dados de Medição

Uma vez realizadas as medições, os dados deverão ser inseridos nos espaços apresentados na Figura 3.50. No entanto, algum valor individual poderá apresentar uma variação expressiva em relação aos demais. Caso tal valor realmente não pertença ao conjunto, o mesmo deverá ser eliminado. Um critério bastante utilizado para decidir sobre a eliminação ou não de dados é o chamado Critério de Chauvenet (LINK, 2000). Considerando-se “ r^* ” uma variável determinada através da equação (3.44), um dado valor de medida x_i deverá ser eliminado, se o valor de “ r^* ” for maior que o valor de R_c , chamado de limite de rejeição de Chauvenet (VUOLO, 1996), apresentado na Tabela 3.4, que é determinado em função do número de medições efetuadas.

ENTRE COM OS VALORES DE MEDIÇÃO EM CADA UMA DAS CÉLULAS ABAIXO (mm)

20,001						
20,002						
20,002						
20,001						
20,001						

ENTRE COM A TEMPERATURA MÉDIA DURANTE AS MEDIÇÕES (°C)

ENTRE COM O COEFIC DE DILATAÇÃO LINEAR DA MATÉRIA-PRIMA (1/°C)

ALGUNS VALORES DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO LINEAR

ESCOLHA O NÍVEL DE CONFIANÇA PARA O RESULTADO

RESULTADO DA MEDIÇÃO (mm) **20,001** ± **0,002** k =

Figura 3.50 – Tela do SGF referente à inserção de dados

$$r^* = \frac{|x_i - \bar{X}|}{S(x)} \quad (3.44)$$

Tabela 3.4: Determinação da variável R_c em função do número de medições realizadas (LINK, 2000)

n	2	3	4	5	6	7	10	15	25	50	100
R_c	1,15	1,38	1,54	1,65	1,73	1,80	1,96	2,13	2,33	2,57	2,81

O SGF analisa ponto a ponto e aplica este critério, conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.51.

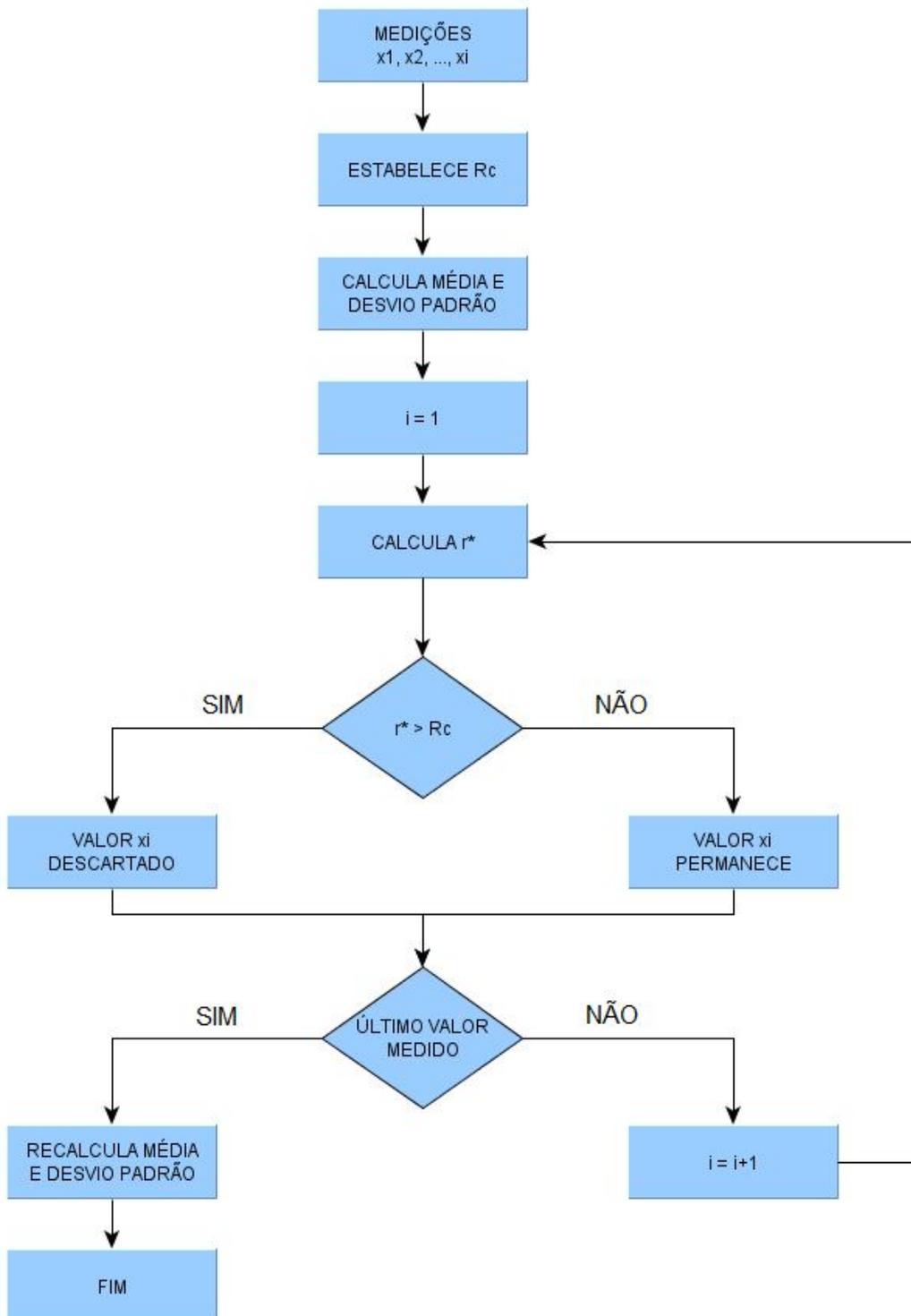


Figura 3.51 – Fluxograma descrevendo o algoritmo do SGF para aplicação do critério de Chauvenet

Caso algum valor deva ser eliminado, ele automaticamente o faz e recalcula tanto a média aritmética quanto o desvio padrão. Caso o valor de “n” não esteja na Tabela 3.4, o programa determina o valor de R_c por meio de interpolação linear.

A fundamentação desse critério está baseada no fato de que um dado valor x_i de um conjunto de “n” medições deverá ser rejeitado se o módulo do desvio for maior que o limite de rejeição de Chauvenet (VUOLO, 1996).

Considerando desvios $\theta = (x_i - x_{mv})$, onde x_{mv} é o valor médio verdadeiro, a probabilidade de ocorrer um desvio com módulo maior que R_c é dada por:

$$p_0 = \int_{-\infty}^{-R_c} G(\theta)d\theta + \int_{+R_c}^{+\infty} G(\theta)d\theta = 1 - \int_{-R_c}^{+R_c} G(\theta)d\theta \quad (3.45)$$

Considerando-se “n” medições, o valor médio para o número de resultados, tais que $|\theta| > R_c$ é dado por:

$$\overline{nf} = p_0.n \quad (3.46)$$

Para um dado R_c , espera-se que em média, \overline{nf} resultados ocorram fora dos limites de Chauvenet ($|\theta| > R_c$). Nesse critério, o valor de R_c é calculado de forma que o número esperado de resultados fora dos limites seja 0,5. Logo: $\overline{nf} = p_0.n = 0,5$. Daí, tem-se:

$$p_0 = \frac{1}{2.n} \quad (3.47)$$

Substituindo-se a equação (3.47) na equação (3.45), obtém-se:

$$p_0 = 1 - \int_{-R_c}^{+R_c} G(\theta)d\theta = \frac{1}{2.n} \quad (3.48)$$

Os valores de R_c poderão ser calculados em função do número de medições, se a distribuição $G(\theta)$ for conhecida. A Tabela 3.4 mostra os resultados para a distribuição gaussiana.

3.4.3 Sistemática para a Determinação da Incerteza de Medição Expandida para os Sistemas de Medição Utilizados pelo SGF

O programa SGF determina a incerteza de medição de acordo com o ISO GUM (ISO GUM, 2003), cujo fluxograma é apresentado na Figura 2.13, para cada um dos sistemas de medição disponíveis, considerando-se as seguintes fontes de incerteza:

- incerteza herdada do sistema de medição adotado;
- incerteza estatística;
- incerteza devida à resolução do sistema de medição;
- incerteza devida ao afastamento da temperatura de referência e
- incerteza devida à diferença de temperatura entre o sistema de medição e a peça a ser medida.

A incerteza herdada (tipo B) é dada pela equação (3.49). Por sua vez, a incerteza estatística, a única do tipo A é determinada através da equação (3.50).

$$i_H = \frac{i_p}{k_p} \quad (3.49)$$

$$i_A = \frac{S(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (3.50)$$

A incerteza devida à resolução do sistema de medição (tipo B) é dada pela equação (3.51), onde “r” é a resolução adotada.

$$i_r = \frac{r}{2 \times \sqrt{3}} \quad (3.51)$$

A temperatura de referência para medições dimensionais neste caso é igual a 20°C (A2LA, 2002). Considerando-se, por exemplo, um paquímetro, conforme Figura 3.52, tem-se que o comprimento da peça a ser medida é igual a l_m , e a indicação do paquímetro foi igual a l_p . Neste caso, como as peças a serem medidas poderão ter coeficientes de dilatação

linear diferentes do mesmo, deve-se levar este fato em consideração. Por outro lado, deve-se considerar também o efeito do afastamento da temperatura de referência durante a medição.

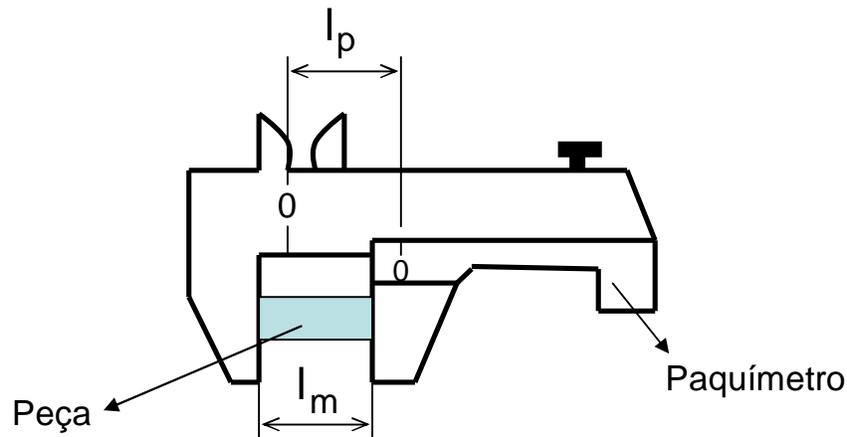


Figura 3.52 – Medição externa com um paquímetro analógico

A dilatação linear da matéria-prima é, portanto, dada pela seguinte equação:

$$\Delta l_m = l_{0m} \cdot \alpha_m \cdot (t_m - 20) \quad (3.52)$$

Por sua vez, a dilatação linear sofrida pelo paquímetro é dada pela seguinte equação:

$$\Delta l_p = l_{0p} \cdot \alpha_p \cdot (t_m - 20) \quad (3.53)$$

Para o caso de paquímetros ou traçadores de altura, o coeficiente de dilatação linear adotado será igual $11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (EA 4/02, 1999). A dilatação total ΔL é obtida pelo desenvolvimento das equações (3.54) e (3.55).

$$\Delta L = \Delta l_m - \Delta l_p \quad (3.54)$$

$$\Delta L = (l_{0m} \cdot \alpha_m \cdot \Delta t) - (l_{0p} \cdot \alpha_p \cdot \Delta t) \quad (3.55)$$

Mesmo tendo-se dilatações diferentes para a matéria-prima e o paquímetro ou traçador de altura, as indicações são as mesmas, ou seja:

$$l_{0m} = l_{0p} \quad (3.56)$$

Logo, a equação (3.54) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta L = (l_{0p} \cdot \alpha_m - l_{0p} \cdot \alpha_p) \cdot \Delta t \quad (3.57)$$

$$\Delta L = (\alpha_m - \alpha_p) \cdot l_{0p} \cdot \Delta t \quad (3.58)$$

$$\Delta \alpha = \alpha_m - \alpha_p \quad (3.59)$$

$$\Delta L = \Delta \alpha \cdot l_{0p} \cdot \Delta t \quad (3.60)$$

Para a fonte de incerteza de medição padrão associada ao afastamento da temperatura de referência, assume-se uma distribuição retangular dada por:

$$i_t = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}} = \frac{l_{0p} \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \quad (3.61)$$

Por sua vez, a incerteza devida à diferença de temperatura entre o sistema de medição e a matéria-prima é dada pela equação (3.62). O coeficiente de dilatação linear médio $\bar{\alpha}$ é dado pela equação (3.63). Algumas referências atribuem valores para ∂t , como por exemplo, 0,3 K ou 0,2 °C (LINK, 2000; LINK, 1997). Para o caso específico, o SGF atribui o valor de 0,3 °C ou solicita que seja inserido outro valor.

$$i_D = \frac{l_{0p} \cdot \bar{\alpha} \cdot \partial t}{\sqrt{3}} \quad (3.62)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_m + \alpha_p}{2} \quad (3.63)$$

Uma vez determinadas as incertezas padrão para cada uma das fontes de incerteza consideradas, a determinação da incerteza expandida é dada seguindo-se as etapas constantes nos tópicos que variam de 2.4.1.4 a 2.4.1.7 deste trabalho.

Aplicando-se a equação (2.104) para este caso, e considerando-se que todas as fontes de incerteza, com exceção de i_A , possuem graus de liberdade iguais a ∞ , obtém-se:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y) \cdot v_A}{i_A^4} \quad (3.64)$$

3.4.4 Expressão do Resultado da Medição

O erro sistemático pode ser corrigido, aplicando-se a chamada “correção” que conceitualmente é o valor adicionado algebricamente ao resultado não corrigido de uma medição para compensar um erro sistemático (VIM, 2000).

A correção é igual ao erro sistemático ou à “tendência” do instrumento de medição, só que com o sinal trocado. É importante salientar que como o erro sistemático não é plenamente conhecido, a correção do mesmo não é plenamente realizada.

O resultado obtido através da medição sem que seja aplicada a respectiva correção é chamado de “resultado não corrigido”. Uma vez aplicada a correção, obtém-se o chamado “resultado corrigido”. A expressão do “resultado de medição”, calculado pelo SGF, leva em consideração não apenas o resultado corrigido, mas também a incerteza de medição, conforme apresentado na equação (3.65).

$$R = RC \pm U \quad (3.65)$$

3.4.5 Definição do Intervalo de Conformidade

Segundo Bennich (2003), as indústrias estão em muitos casos, medindo características erradas com alta precisão e estão tomando decisões sobre a qualidade do

produto nessas bases. Por outro lado, é uma prática muito comum nas indústrias a aprovação de peças quando a medição cai dentro da zona de especificação ou intervalo de especificação que é definido como a zona dentro da qual variam os valores da característica da peça e que inclui os limites de especificação (UNE-EN ISO 14253-1, 1998); desconsiderando assim, a faixa de incerteza de medição deste instrumento ou sistema de medição. Tal prática poderá levar essa organização a dois tipos de problema:

- reprovação de peças boas ou
- aprovação de peças defeituosas.

O primeiro caso impacta diretamente na organização e o segundo afeta diretamente o cliente e indiretamente, a própria organização.

Para minimizar tais problemas, a norma ISO 14253-1 (UNE-EN ISO 14253-1, 1998) apresenta uma sistemática para a verificação de que uma dada característica atenderá ou não a uma determinada especificação, só que desta vez, considerando-se não apenas os limites de especificação, mas também a influência do sistema de medição, através da incerteza expandida de medição. Graficamente, esta sistemática é apresentada na Figura 3.53.

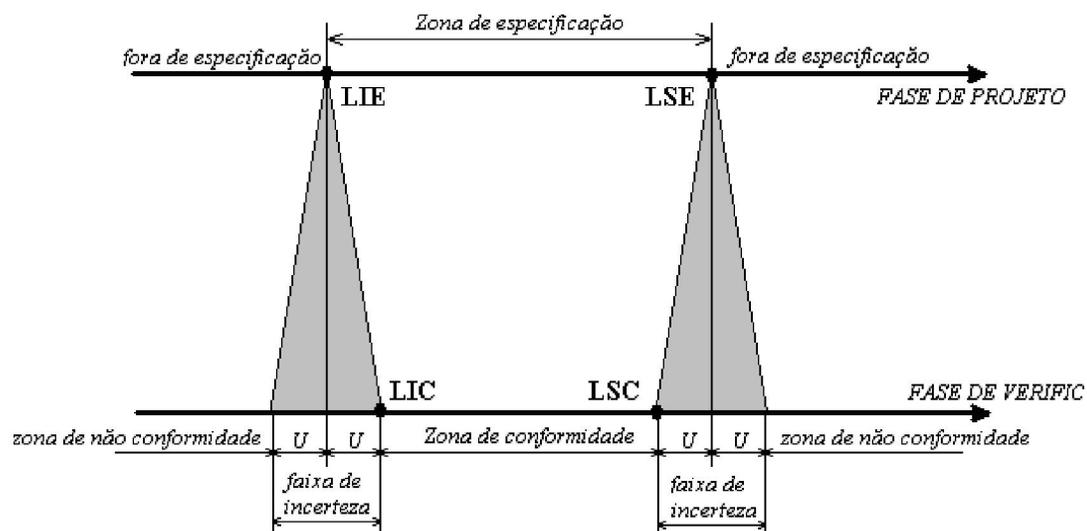


Figura 3.53 – Estabelecimento das zonas de conformidade e não conformidade de acordo com a UNE-EN ISO 14253-1 (1998)

Analisando-se a Figura 3.53, constata-se que a mesma é dividida em duas fases (projeto e verificação) e em quatro zonas:

- zona de especificação;
- zona ou faixa de incerteza;
- zona de conformidade e
- zona de não conformidade.

Na fase de projeto é estabelecida a zona de especificação que tem como valores extremos, o limite superior de especificação (LSE) e o limite inferior de especificação (LIE). No entanto, caso o valor medido recaia sobre um destes limites, dever-se-á considerar mais ou menos a incerteza expandida de medição, o que gera a zona de conformidade que é a zona onde se terá a garantia de que determinada característica atenderá ao requisito dimensional de projeto; bem como a zona de não conformidade que é o não cumprimento ao requisito especificado (ISO 8402, 1994).

Através da correta implementação desse modelo, constata-se um sensível ganho na fabricação do produto de acordo com a especificação, o que impacta no comércio e nas disputas (NIELSEN, 1999).

A Figura 3.54 apresenta a tela do SGF onde é determinada a zona de conformidade em função dos limites de especificação e da incerteza de medição, de acordo com o sistema de medição selecionado no mesmo programa computacional como mostrado anteriormente.

Analisando-se a Figura 3.54, verifica-se que o SGF define numericamente e através de cores, as seguintes zonas: zona de especificação (em azul), zona de incerteza (em amarelo), zona de não conformidade (em vermelho) e zona de conformidade (em verde). Além disto, o programa apresenta a seguinte mensagem: A fim de garantir a conformidade do produto, o resultado de medição deverá apresentar-se dentro do intervalo compreendido entre (limite inferior de especificação + incerteza expandida de medição) e o (limite superior de especificação – incerteza expandida de medição). A Figura 3.55 apresenta o algoritmo do SGF para o estabelecimento da zona de conformidade.

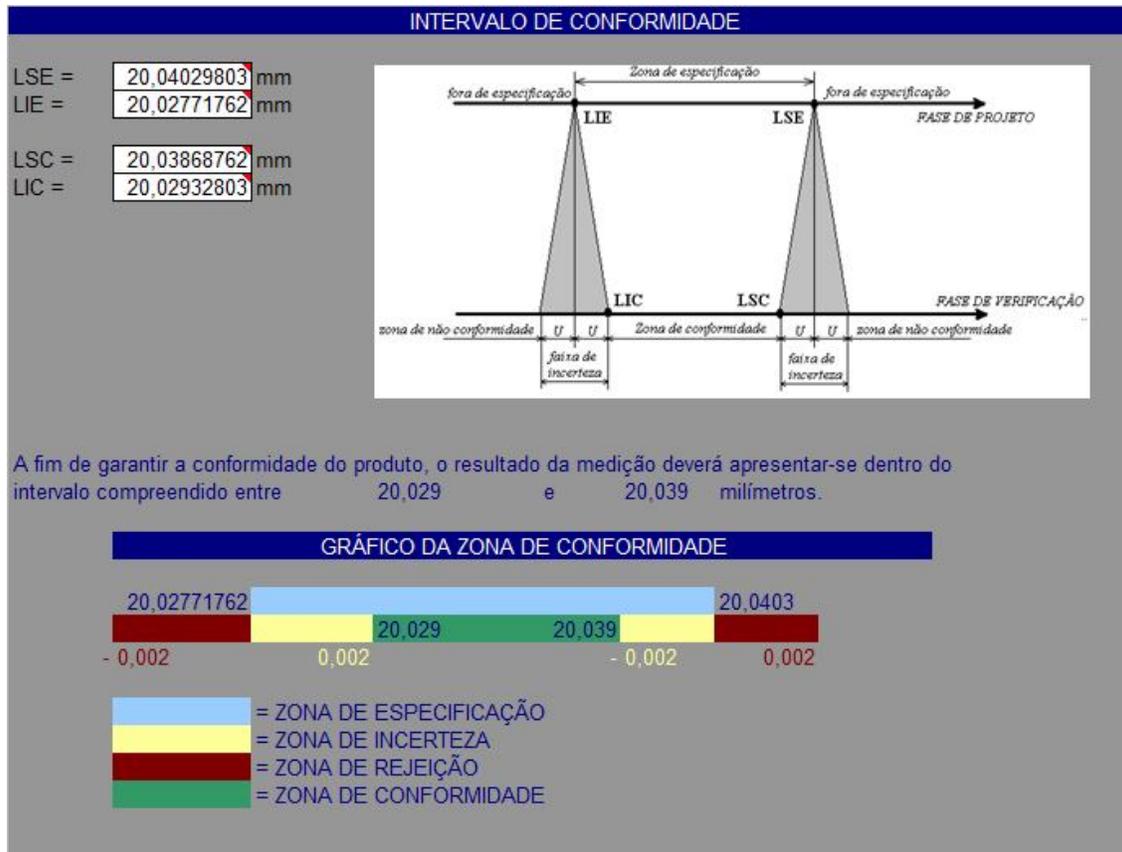


Figura 3.54 – Tela do SGF referente à determinação da zona de conformidade

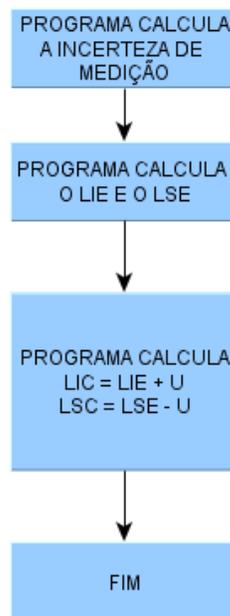


Figura 3.55 – Fluxograma do SGF descrevendo o algoritmo para o estabelecimento da zona de conformidade

3.5 Módulo Educativo

Na definição da estrutura do SGF, houve a preocupação de se disponibilizar de forma clara e objetiva, alguns conceitos ligados à tolerância dimensional e geométrica, bem como conceitos metrológicos citados no próprio programa, e, sobretudo, utilizados no ambiente metrológico industrial, utilizando referências que são bastante difundidas atualmente (ASME Y14.5M, 1994; GUIMARÃES, 1999; PROVENZA, 1995; JR, 1999; WEISSMANN, 1978; VIM, 2000; NBR 6409, 1997, NOVASKI, 1994; SCHNEIDER, 2005; SRIRAMAN et al., 1999; NBR ISO 2768-2, 2001). Dentro deste contexto, para a confecção deste módulo foi utilizado um programa que gera arquivos de ajuda em *html*. O arquivo gerado foi compilado, e este último, por sua vez, é acessado diretamente do módulo de toleranciamento que é o primeiro módulo do programa. A Figura 3.56 apresenta a tela principal deste módulo, sendo possível a seleção das seguintes possibilidades: estudo das tolerâncias; conceitos metrológicos; incerteza de medição; critério de Chauvenet e acabamento superficial.

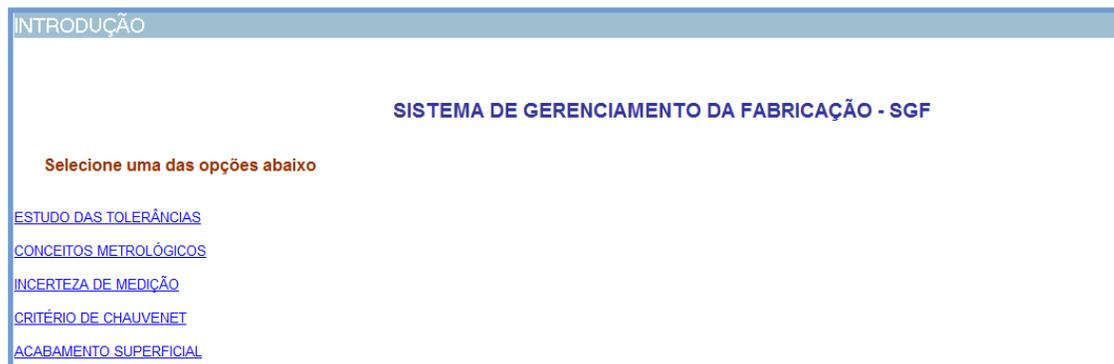


Figura 3.56 – Tela principal do módulo educativo do SGF

Acessando-se a opção “Estudo das tolerâncias”, pode-se selecionar qualquer uma das possibilidades apresentadas na Figura 3.57. O primeiro item diz respeito aos exemplos de representação das tolerâncias geométricas, como mostrado em parte da tela do programa na Figura 3.58. Em seguida, o programa apresenta a forma correta de indicação dos elementos de referência, como pode ser mostrado na Figura 3.59. O terceiro sub-tópico refere-se à forma de indicação da tolerância de posição, conforme apresentado na Figura 3.60. O próximo sub-tópico apresenta exemplos de aplicação das tolerâncias geométricas de acordo com os conceitos acima citados. A Figura 3.61 mostra um destes exemplos.

ESTUDO DAS TOLERÂNCIAS

Estudo das Tolerâncias Geométricas

Na fabricação de uma peça, as tolerâncias dimensionais são insuficientes para caracterizá-la. Os desvios da peça projetada para a peça fabricada podem ser indicados previamente, através das tolerâncias geométricas, representadas pelos desvios de forma e posição, os quais são originários em função de:

- falta de rigidez da máquina-ferramenta;
- dispositivos de fixação;
- desgaste da ferramenta e
- outros fatores que exercem influência direta na qualidade final de uma peça usinada.

Esses erros deverão ser enquadrados e limitados em **tolerâncias geométricas** que não prejudiquem o funcionamento, montagem e resistência da peça acabada.

Para mais informações, selecione um dos seguintes itens abaixo:

[Exemplos de Representação](#)

[Indicação dos Elementos de Referência](#)

[Indicação da Tolerância de Posição](#)

[Exemplos de Aplicação](#)

[Escolha da Tolerância](#)

[Classes de Ajustes](#)

[Voltar](#)

Figura 3.57 – Sub-tópicos componentes do tópico “Estudo das tolerâncias”

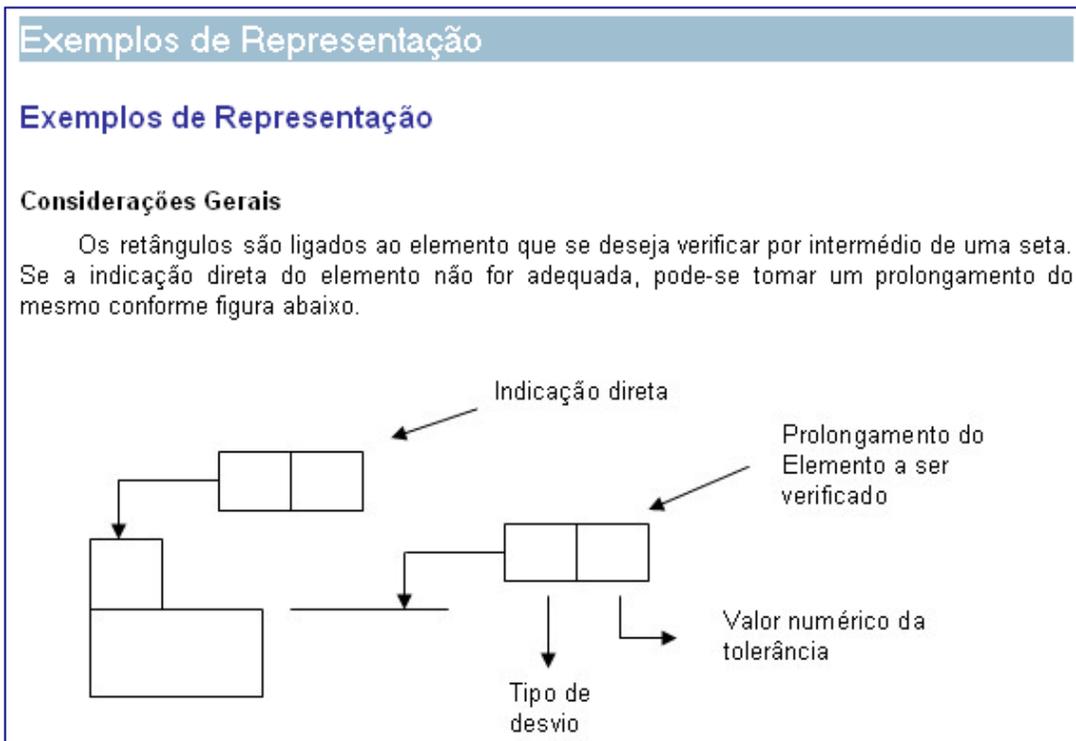


Figura 3.58 – Exemplos da forma de representação das tolerâncias geométricas

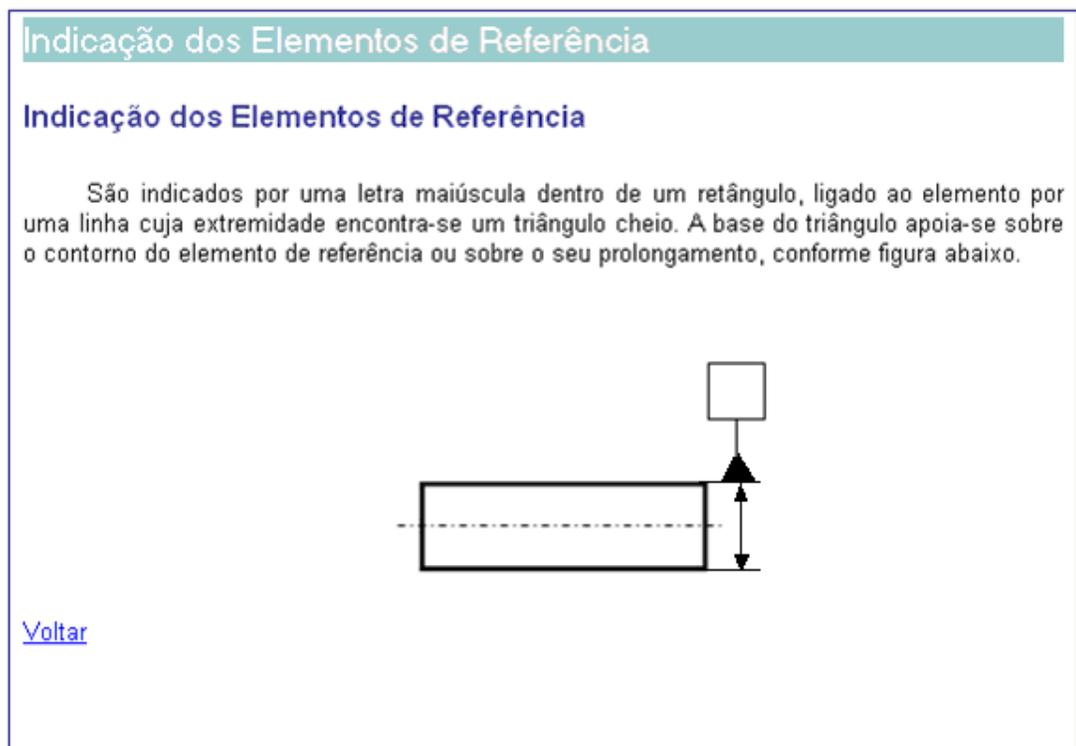
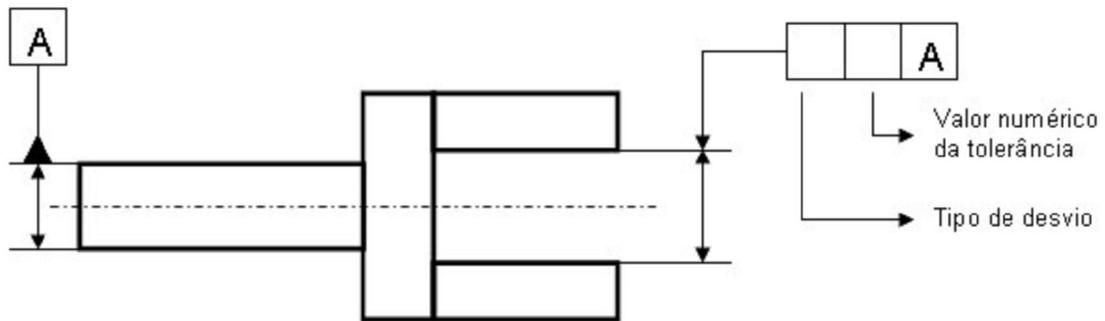


Figura 3.59 – Forma de representação dos elementos de referência em tolerâncias geométricas

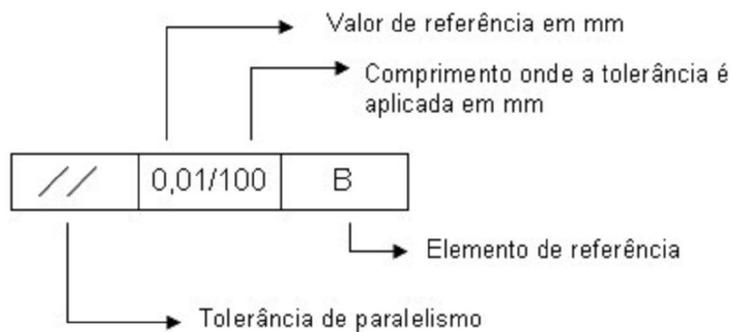
Indicação da Tolerância de Posição

Indicação da Tolerância de Posição

Para a indicação da tolerância de posição, deve-se indicar tanto o elemento a ser controlado, quanto o elemento de referência, conforme apresentado no exemplo abaixo.



Se a tolerância se aplicar a um comprimento determinado, o valor desse comprimento deve ser apresentado após o valor da tolerância, separado por um traço, conforme exemplo abaixo.



[Voltar](#)

Figura 3.60 – Forma de indicação da tolerância de posição apresentada pelo SGF

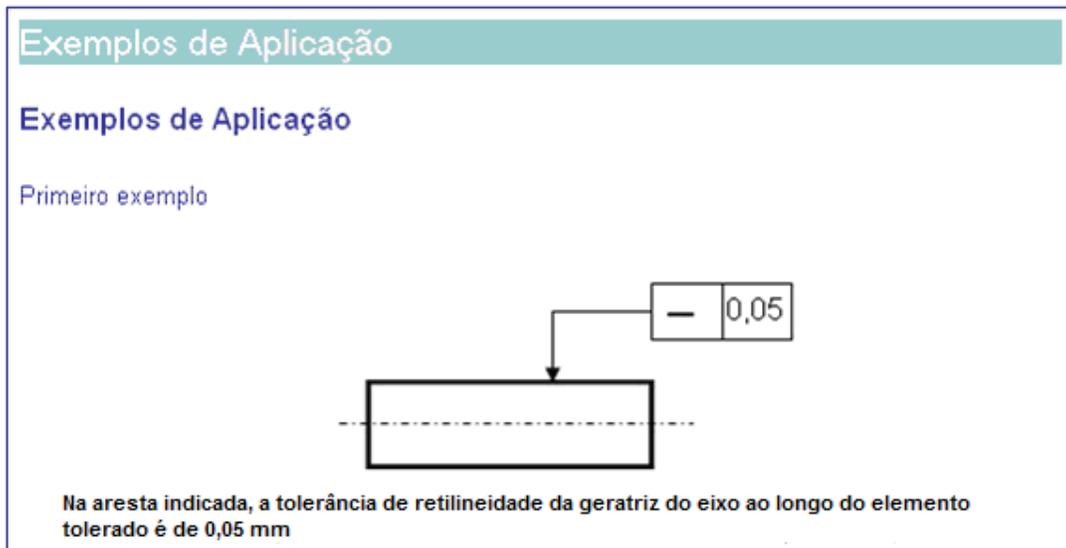


Figura 3.61 – Exemplo de aplicação de tolerâncias geométricas apresentado pelo SGF

A Figura 3.62 mostra a forma de apresentação dos conceitos metroológicos.

valor verdadeiro

Valor Verdadeiro (de uma Grandeza) - True Value (of a Quantity) - Valeur Vraie (d'une Grandeur)

Valor consistente com a definição de uma dada grandeza específica.

OBSERVAÇÕES:

- 1 - É um valor que seria obtido por uma medição perfeita.
- 2 - Valores verdadeiros são, por natureza, indeterminados.

[Voltar](#)

Figura 3.62 – Apresentação da tela do SGF mostrando o conceito de valor verdadeiro (de uma grandeza)

O tópico incerteza de medição do módulo educativo apresenta a sistemática para determinação da incerteza de medição de acordo com o ISO GUM (ISO GUM, 2003), enquanto que o tópico “Critério de Chauvenet” descreve este critério. Já o tópico “Acabamento Superficial” apresenta algumas aplicações típicas relacionadas ao parâmetro

de rugosidade R_a , utilizado pelo SGF tanto como critério de toleranciamento quanto na determinação do avanço máximo permissível em operações de torneamento. O anexo C apresenta valores de R_a a serem utilizados em projetos de peças mecânicas.

3.6 Aspectos Ligados à Segurança do Programa

O SGF foi elaborado com dois níveis de senha de proteção. O primeiro deles diz respeito à segurança dos algoritmos do programa e o segundo refere-se ao acesso aos módulos do mesmo.

Todas as informações referentes à manipulação das equações do programa, inclusive a sua visualização estão protegidas por senha, não sendo possível ao usuário, portanto, alterar qualquer parte do programa. Esta senha visa garantir a confidencialidade das informações do programa.

Por outro lado, o acesso ao SGF é protegido por senha que é criada aleatoriamente para cada licença concedida. Ao se tentar acessar o programa aparecerá uma janela solicitando a senha de acesso, conforme mostrado na Figura 3.63. Tal senha foi criada com o propósito do usuário controlar o acesso ao programa.

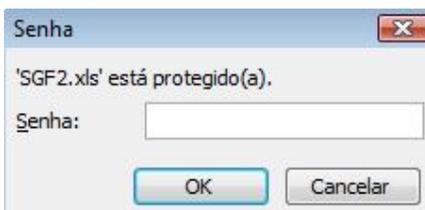


Figura 3.63 – Tela do SGF destacando a solicitação da senha de acesso ao mesmo

3.7 Fluxograma Geral do SGF

Uma vez definidas, em separado, cada uma das etapas do SGF, a Figura 3.64 apresenta o fluxograma de funcionamento integrado do mesmo.

Inicialmente, seleciona-se os módulos de toleranciamento (dimensional e geométrico), e em seguida, o módulo de fabricação. Logo após, aciona-se o módulo de medição e através dele seleciona-se o sistema de medição mais adequado e inserem-se os dados de medição. Caso seja esta a situação onde a primeira peça fabricada seja medida, talvez haja a necessidade de se determinar a incerteza expandida de medição de cada uma

das cotas da peça com o intuito de se realizar a síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas para o ajuste das mesmas, como será abordado no capítulo 4. Caso contrário, o SGF determina o resultado da medição e estabelece a zona de conformidade para as demais peças a serem fabricadas.

É importante salientar que cada um destes módulos poderá trabalhar isoladamente. Por exemplo, mesmo em se tratando de um programa computacional destinado à fabricação por usinagem, tanto os módulos de tolerância dimensional e geométrica quanto o módulo de medição poderão ser utilizados em uma indústria de conformação mecânica.

A forma de manipulação do SGF está detalhada no manual do usuário, conforme apresentado no anexo B.

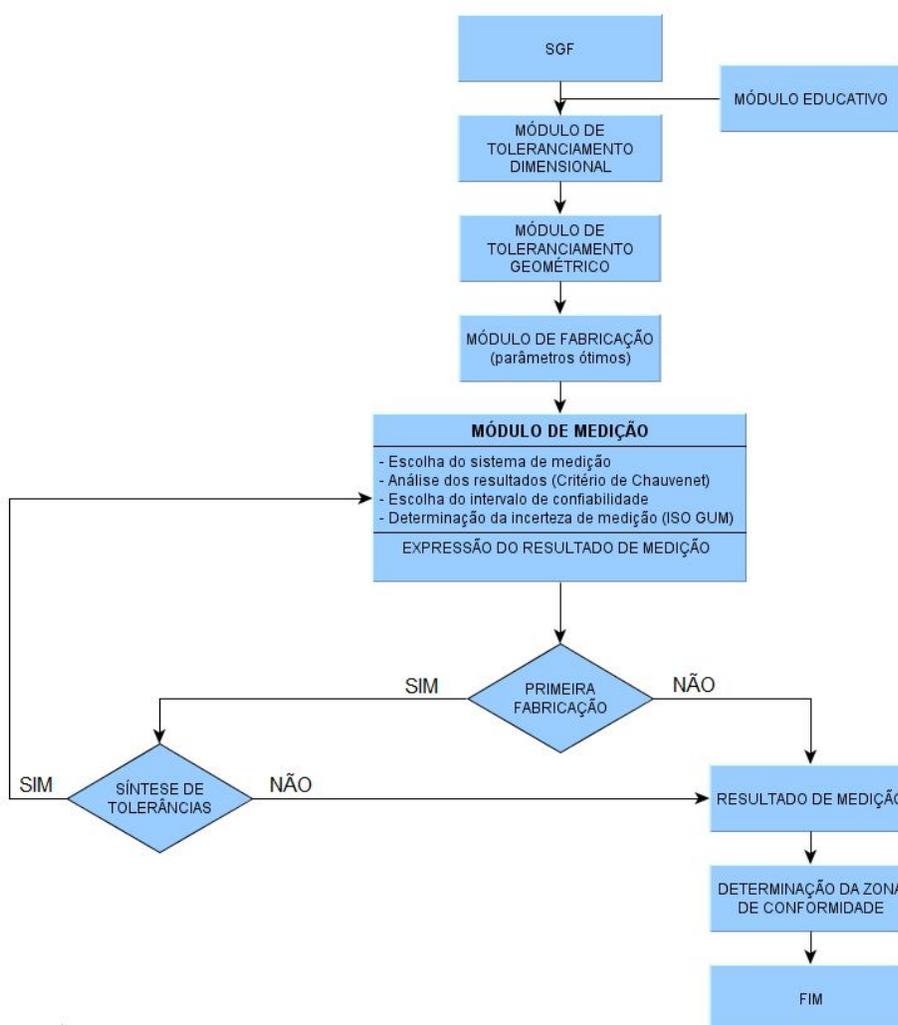


Figura 3.64 – Fluxograma geral do SGF

4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA A SÍNTESE DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS DETERMINÍSTICAS

Este capítulo apresentará a definição do modelo matemático proposto neste trabalho para a síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas, realizará uma comparação com um modelo tradicional para síntese de tolerâncias e apresentará um estudo experimental para validação do modelo proposto.

Dentro deste contexto, este capítulo está dividido nos seguintes tópicos:

- Definição do modelo matemático proposto para a síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas e
- Aplicação e validação experimental do modelo matemático proposto.

4.1 Definição do Modelo Matemático Proposto para a Síntese de Tolerâncias Dimensionais Determinísticas

A Figura 4.1 apresenta as etapas da estruturação do modelo para a síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas desenvolvido no âmbito deste trabalho.

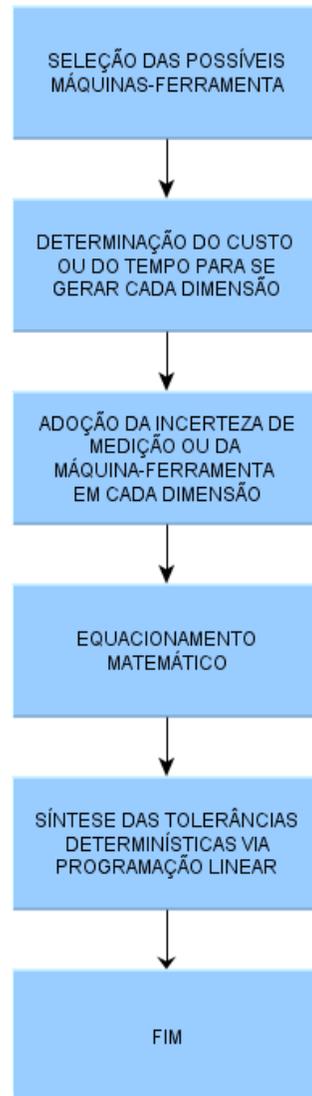


Figura 4.1 – Etapas para a estruturação do modelo matemático proposto para síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas

O referido modelo é composto pelo seguinte equacionamento por programação linear:

Minimizar

$$y^* = \sum_{i=1}^{m''} \sum_{j=1}^{n''} a_{ij} y_{ij} \quad (4.1)$$

Sujeita a

$$\sum_{i=1}^{m''} Z_i \leq T_f \quad (4.2)$$

$$\sum_{j=1}^{n''} y_{ij} = 1 \quad (4.3)$$

$$\sum_{j=1}^{n''} e_{1j} y_{1j} \leq Z_1$$

$$\sum_{j=1}^{n''} e_{2j} y_{2j} \leq Z_2 \quad (4.4)$$

⋮

$$\sum_{j=1}^{n''} e_{ij} y_{ij} \leq Z_i$$

$$Z_1 \leq b_1$$

$$Z_2 \leq b_2 \quad (4.5)$$

⋮

$$Z_i \leq b_i$$

$$y_{ij} = 0-1 \quad (\text{zero ou um}) \quad (4.6)$$

A base deste modelo foi inspirada no trabalho de Kusiak e Feng (KUSIAK et al., 1995) que otimiza a tolerância para processos diferentes. Este trabalho, por sua vez, otimiza a tolerância dimensional, considerando um único processo e máquinas-ferramenta diferentes. Por exemplo, uma peça que deverá ser torneada e existem várias opções de tornos, um único torno será selecionado para a realização da usinagem.

É importante salientar que caso existam processos diferentes no ciclo de fabricação do produto, deverá ser estabelecido um modelo matemático para cada ciclo, a não ser que os diferentes processos possam ser realizados nas mesmas máquinas-ferramenta, como por exemplo, o torneamento cilíndrico externo e o faceamento.

Fundamentalmente existem três diferenças entre este método e o método proposto por Kusiak e Feng (KUSIAK et al., 1995):

- na função objetivo, equação (4.1), os coeficientes a_{ij} podem representar não apenas o custo direto para geração da dimensão “i”, como também pode ser o tempo direto para a geração dessa mesma dimensão;
- o conjunto de equações (4.4) e (4.5) não existem nos modelos anteriormente apresentados e
- a variação normal três sigma do processo “j”, utilizado para produzir a dimensão “i” (T_{ij} e w_{ij}), foi substituído pela variável e_{ij} que representa a incerteza expandida de medição ou a incerteza da máquina-ferramenta.

A mudança mais significativa na proposição deste método diz respeito à mudança da variável que representa a variação normal três sigma do processo pela variável que reflete a incerteza expandida da medição ou a incerteza da máquina-ferramenta, de acordo com a proposição do ISO GUM (ISO GUM, 2003). Tal mudança pode ser justificada pela necessidade de se otimizar o processo e o projeto, com o menor lote possível, o que passa a ser uma exigência nos projetos de engenharia moderna. Considerando-se a variação três sigma do processo, haverá a necessidade de se trabalhar, inicialmente, e dependendo do processo, com um grande número de peças do lote para cada um dos processos, pois só assim se perceberá a sua variabilidade, ao passo que, utilizando-se a incerteza de medição ou a precisão da máquina-ferramenta, será necessário se fabricar uma pequena quantidade de peças para se obter tal variável, minimizando assim, o tempo de fabricação de possíveis peças a serem ajustadas, e, fundamentalmente minimizando os custos envolvidos com tais alterações. A metodologia para a determinação da variável “ e_{ij} ” segue a proposição mostrada na Figura 2.13.

Uma outra mudança que pode ser percebida entre os dois modelos diz respeito à inserção das equações (4.2), (4.4) e (4.5) no lugar da equação (2.107), apresentada no modelo de Kusiak e Feng (KUSIAK et al., 1995). Tais equações foram adicionadas com o intuito de garantirem que a tolerância obtida dessa otimização via programação linear, não ultrapasse as tolerâncias funcionais estabelecidas para cada dimensão componente. Com o intuito de constatar esta afirmação será apresentado a seguir, um exemplo de síntese de tolerâncias determinísticas via programação linear, comparando-se o modelo de Kusiak e Feng (KUSIAK et al., 1995) com o modelo proposto neste trabalho.

Considere o eixo da Figura 4.2, cujas superfícies 1, 2, e 3 são as superfícies funcionais. Para execução da referida peça poderão ser utilizados três tornos, cujos custos diretos necessários para a geração de cada uma das três dimensões componentes, bem como a variação três sigma das mesmas com cada máquina-ferramenta estão apresentadas na Figura 4.3.

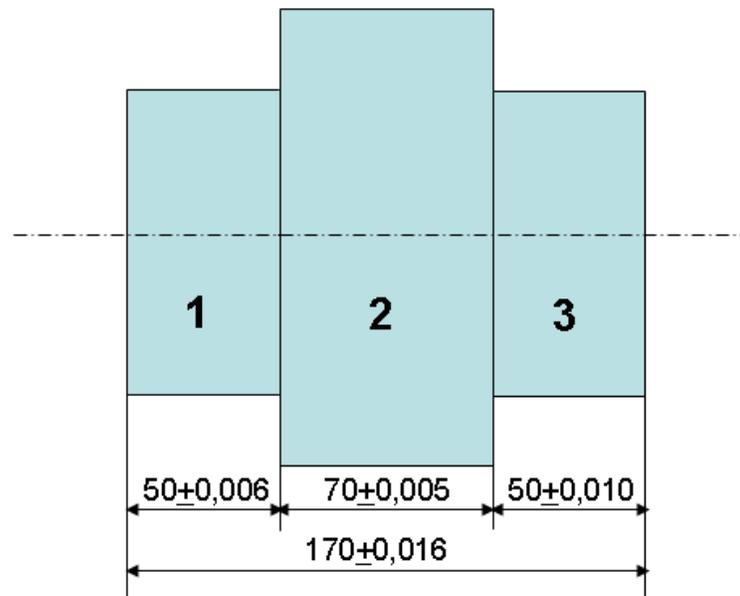


Figura 4.2 – Eixo com a cotagem funcional

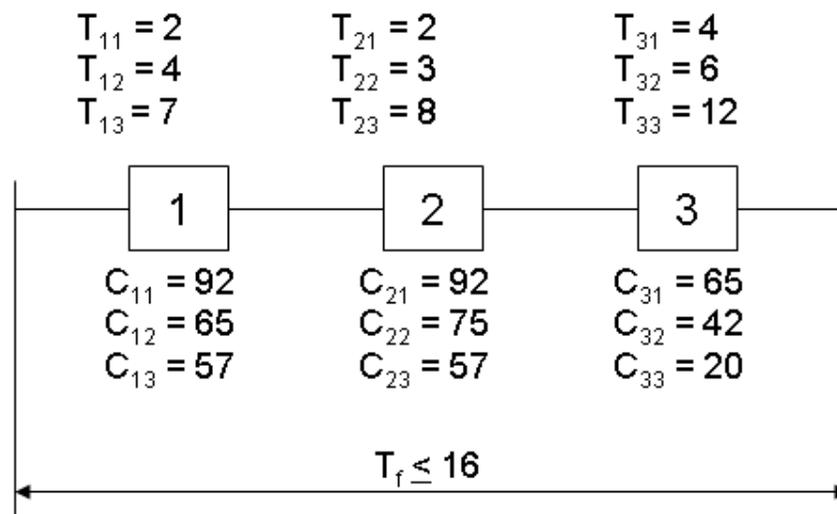


Figura 4.3 – Representação dos parâmetros necessários à síntese de tolerâncias determinísticas (KUSIAK et al., 1995).

Observa-se que a soma dos afastamentos das dimensões que compõem o eixo ($0,006+0,005+0,010 = 0,021$ mm) é maior que o valor do afastamento da dimensão total que vale 0,016 mm. Em função disto, há a necessidade de se compor esses afastamentos de maneira que o somatório dos afastamentos componentes seja no máximo igual ao valor do afastamento da dimensão total T_f .

Conforme apresentado no modelo matemático proposto por Kusiak e Feng (KUSIAK et al., 1995), T_{ij} representa a variação três sigma do processo “j” para gerar a dimensão “i”, e neste caso específico, os valores apresentados na Figura 4.3 estão em micrometros. Logo, $T_{21} = 2$ significa que três vezes o desvio padrão do processo 1 para gerar a dimensão 2 é igual a 2 μm . Por outro lado, $C_{32} = 42$ significa, por exemplo, que o custo direto para a geração da dimensão 3, utilizando-se o processo 2 é igual a R\$ 42,00. Utilizando o programa LINDO (Linear Interactive And Discrete Optimizer) for windows, o equacionamento matemático utilizado para o referido problema pelo método de Kusiak e Feng (KUSIAK et al., 1995) é apresentado abaixo.

O resultado desta otimização é apresentado na Tabela 4.1. O valor da função objetivo foi $y^* = 174$. Isto significa que de acordo com a referida otimização, gerou-se um custo de R\$ 174,00 para geração da peça da Figura 4.2, considerando-se os custos gerais indiretos, como por exemplo, o custo de aquisição da matéria-prima.

```
MIN 92X11+65X12+57X13+92X21+75X22+57X23+65X31+42X32+20X33
```

```
ST
```

```
2X11+4X12+7X13+2X21+3X22+8X23+4X31+6X32+12X33<=16
```

```
X11+X12+X13=1
```

```
X21+X22+X23=1
```

```
X31+X32+X33=1
```

```
END
```

```
GIN X11
```

```
GIN X12
```

```
GIN X13
```

```
GIN X21
```

```
GIN X22
```

```
GIN X23
```

```
GIN X31
```

```
GIN X32
```

```
GIN X33
```

Tabela 4.1: Resultado da otimização via programação linear para a síntese de tolerâncias determinísticas segundo o modelo de Kusiak e Feng (Kusiak et al., 1995)

Variável	Valor
X11	0
X12	0
X13	1
X21	0
X22	1
X23	0
X31	0
X32	1
X33	0

Analisando-se a Tabela 4.1 constata-se que os valores unitários apareceram exatamente nas variáveis X13, X22 e X32. Isto significa que para a dimensão 1, o afastamento superior e o inferior da tolerância serão iguais a T_{13} que vale $7 \mu\text{m}$. Isto quer dizer também que para se obter um menor custo, a dimensão 1 deverá ser realizada pelo processo 3. Por outro lado, a dimensão 2 deverá ser realizada pelo processo 2, e a tolerância desta dimensão terá afastamentos iguais à $T_{22} = 3 \mu\text{m}$. A dimensão 3, por sua vez, também será realizada pelo processo 2 e a sua tolerância dimensional será igual a T_{32} que é igual a $6 \mu\text{m}$. Vê-se, portanto, que o modelo matemático em foco não apenas apresenta a síntese de tolerâncias, como também mostra o custo direto para a fabricação da peça desejada. No entanto, analisando-se a Figura 4.2, constata-se que a tolerância funcional da dimensão 1 foi de $\pm 0,006 \text{ mm}$ e no resultado, a tolerância passou a ser igual a $\pm 0,007 \text{ mm}$. Isso só poderia ocorrer, se a tolerância desta dimensão não fosse uma tolerância funcional. Pressupondo-se que as respectivas tolerâncias apresentadas na figura foram obtidas de acordo com as exigências funcionais da peça, na síntese das tolerâncias, os valores obtidos da otimização, poderiam ser menores que as tolerâncias funcionais, mas jamais maiores.

A fim de solucionar esse problema, o modelo proposto neste trabalho, substituiu a equação (2.107) pelas equações (4.2), (4.4) e (4.5). Dentro deste contexto, o novo equacionamento matemático aqui proposto é apresentado a seguir. Para efeito de

comparação nos dois equacionamentos matemáticos, considerando-se o modelo de Kusiak e Feng (KUSIAK et al., 1995) e o proposto neste trabalho, serão utilizados os mesmos valores da Figura 4.3.

```

MIN 92X11+65X12+57X13+92X21+75X22+57X23+65X31+42X32+20X33
ST
Z1<=6
Z2<=5
Z3<=10
Z1+Z2+Z3<=16
2X11+4X12+7X13-Z1<=0
2X21+3X22+8X23-Z2<=0
4X31+6X32+12X33-Z3<=0
X11+X12+X13=1
X21+X22+X23=1
X31+X32+X33=1
END
GIN X11
GIN X12
GIN X13
GIN X21
GIN X22
GIN X23
GIN X31
GIN X32
GIN X33

```

O resultado da otimização pelo novo modelo matemático é apresentado na Tabela 4.2. Neste caso, ao contrário do equacionamento anterior, o valor da função objetivo foi de R\$ 182,00. Analisando-se a Tabela 4.2, constata-se que as variáveis unitárias são exatamente: X12, X22 e X32. Isto significa que para a geração das dimensões 1, 2 e 3 utilizou-se a mesma máquina-ferramenta, ou seja, a máquina 2. As tolerâncias das dimensões 1, 2 e 3 são respectivamente: $\pm 4 \mu\text{m}$, $\pm 3 \mu\text{m}$ e $\pm 6 \mu\text{m}$. Percebe-se, portanto, que mesmo com um aumento do custo direto de fabricação da peça de R\$ 8,00, se vê que as tolerâncias das dimensões ficaram todas dentro dos limites de tolerâncias funcionais especificados no desenho da Figura 4.2, ao contrário do equacionamento anterior, cujo valor da tolerância da dimensão 1 foi igual a $\pm 7 \mu\text{m}$, superior à tolerância da dimensão funcional que é igual a $6 \mu\text{m}$, conforme Figura 4.2. Logo, com base no mínimo custo, a síntese de tolerâncias estabeleceu uma nova configuração de cotagem, conforme Figura 4.4. Verifica-se ainda, que neste caso, a tolerância limite T_f encurtou, passando de $\pm 16 \mu\text{m}$ para $\pm 13 \mu\text{m}$, o que justifica o incremento no custo direto de fabricação.

Tabela 4.2: Resultado da otimização via programação linear para a síntese de tolerâncias determinísticas, conforme modelo proposto neste trabalho

Variável	Valor
X11	0
X12	1
X13	0
X21	0
X22	1
X23	0
X31	0
X32	1
X33	0
Z1	4
Z2	5
Z3	6

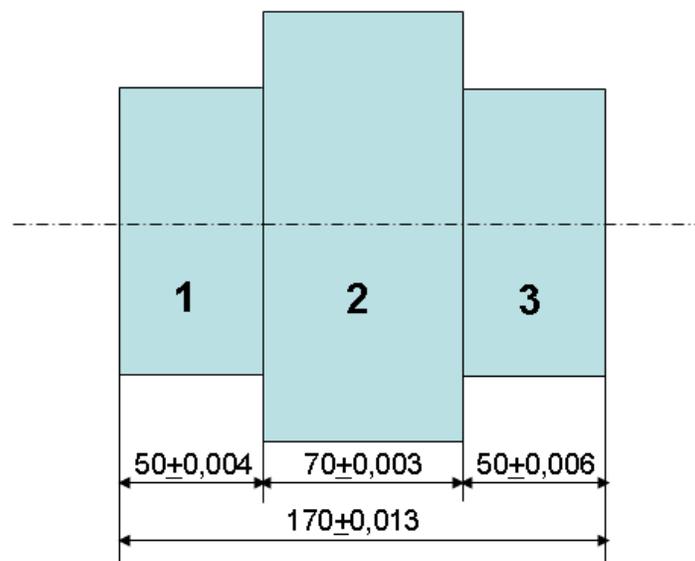


Figura 4.4 – Tolerâncias após a otimização via programação linear

Um outro aspecto que também deve ser levado em consideração quando são analisados os resultados apresentados na Tabela 4.1 é que na prática, muito provavelmente esta peça não será feita em duas máquinas diferentes. Essa situação poderia ocorrer na

prática, se fossem considerados processos diferentes, como por exemplo: aplainamento, fresamento e retificação. Em se tratando do mesmo processo, variando-se apenas os tipos das máquinas-ferramenta com suas características, não faz sentido se fabricar esta peça utilizando-se dois tornos diferentes.

É importante salientar ainda, que a função objetivo, ou seja, a função que se deseja minimizar poderá ser o tempo total de fabricação por peça. Esta opção poderá ser utilizada quando existir uma perspectiva de demanda altíssima, ficando a empresa impossibilitada de trabalhar dentro das condições de mínimo custo.

O modelo matemático apresentado a seguir é inovador, uma vez que apresenta uma forma para determinar as tolerâncias dimensionais finais com base na incerteza expandida de medição ou na incerteza da máquina-ferramenta. Além disto, este modelo garante que as tolerâncias parciais determinísticas, jamais ultrapassarão as tolerâncias funcionais estabelecidas na fase de projeto.

4.2 Aplicação e Validação Experimental do Modelo Matemático Proposto

A fim de realizar uma aplicação não apenas do modelo matemático proposto como também do uso das funcionalidades do SGF, foram realizados experimentos, nos quais foram torneadas peças de aço ABNT 1020, a partir de eixos com 51,70 mm de diâmetro e comprimento de 73,80 mm. O desenho da peça final está apresentado na Figura 4.5.

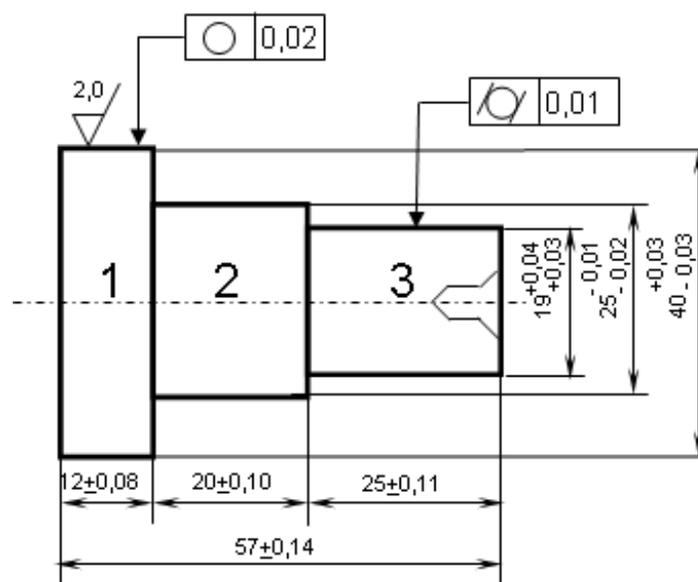


Figura 4.5 – Ponta de eixo com suas características funcionais

Para a fabricação destas peças foram considerados os seguintes aspectos determinados pelo SGF:

- Para a superfície 1, a tolerância dimensional foi expressa em função do acabamento superficial, cujo valor máximo de R_a será igual a $2 \mu\text{m}$ (superfícies usinadas em geral, eixos, chavetas de precisão, alojamentos de rolamentos, conforme apresentado no tópico “Acabamento Superficial” do módulo educativo);
- As superfícies 2 e 3 trabalharão com buchas;
- O ajuste da superfície 2 é H7g6 (com folga);
- O ajuste da superfície 3 é H7r6 (por interferência);
- A fixação da peça será realizada com placa e contra-ponto;
- O desvio permissível de circularidade na superfície 1 = 0,02 mm;
- O desvio máximo permissível de cilindridade na superfície 3 = 0,01 mm;
- A profundidade de corte no acabamento = 1 mm e
- Para as tolerâncias de comprimento, as superfícies são consideradas como peças isoladas e as respectivas dimensões 1, 2, 3 e 4 (comprimento total) são enquadradas na classificação menos grosseira possível (IT12).

4.2.1 – Caracterização da Matéria-Prima

Inicialmente, o material foi cortado para a confecção dos corpos de prova para os ensaios de composição química, dureza Brinell e tração; bem como para a confecção das peças obtidas por torneamento que serão utilizadas nos experimentos.

A máquina utilizada para serrar todo o material foi uma serra alternativa pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, conforme apresentado na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Barra cilíndrica sendo cortada na serra alternativa do IFPE

Os corpos de prova foram cortados de uma mesma barra cilíndrica, sendo cinco deles destinados aos ensaios de tração, sete para a confecção das peças e dois para os ensaios de dureza e composição química. A Figura 4.7 apresenta os corpos de prova após o corte.

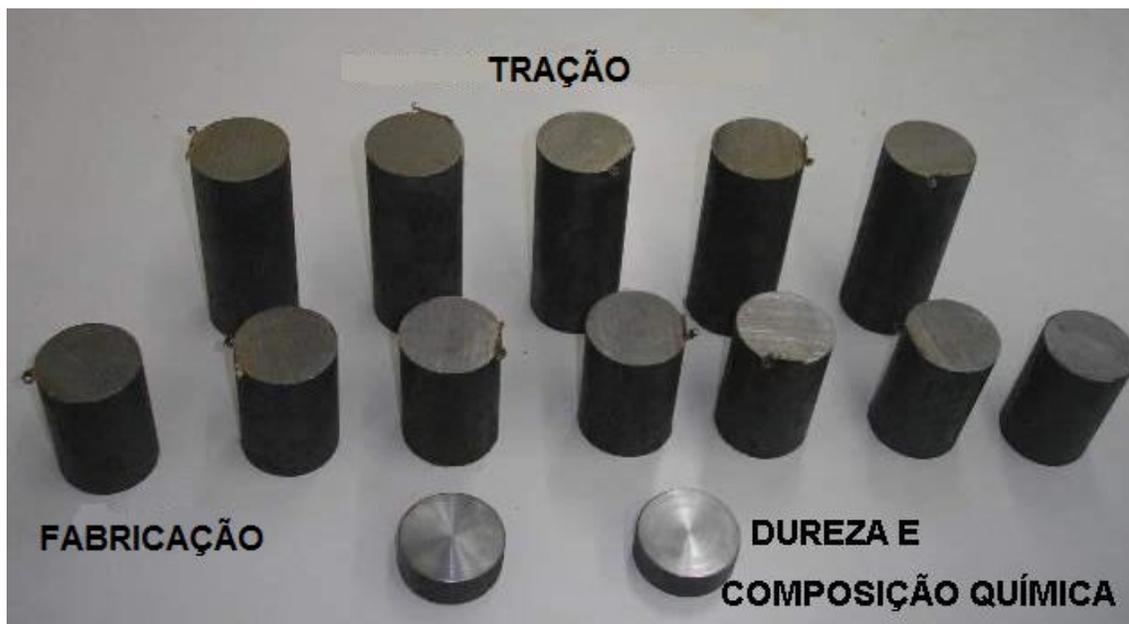


Figura 4.7 – Corpos de prova destinados aos ensaios de caracterização do material e confecção das peças

4.2.1.1 – Composição Química

A análise para determinação da composição química do material foi realizada na SIMISA SIMIONI METALÚRGICA LTDA, localizada no Cabo de Santo Agostinho – PE, utilizando um espectrômetro computadorizado. O relatório de ensaio encontra-se no anexo D. A Tabela 4.3 apresenta os resultados da análise.

Tabela 4.3: Valores obtidos da análise de composição química

AMOSTRA	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	%Cu	%V
1	0,22	0,18	0,51	0,019	0,031	0,06	0,14	0,03	0,003	0,21	0,001

De acordo com a norma SAE J 403 (2001), para que um aço seja caracterizado como SAE 1020, o mesmo deverá possuir seus elementos com valores dentro das faixas apresentadas na Tabela 4.4. Assim sendo, como todos os valores encontraram-se dentro das faixas permissíveis de variação, o material poderá ser caracterizado com um aço **SAE 1020**.

Tabela 4.4: Variações de composição para caracterização do aço SAE 1020 (SAE J 403, 2001)

SAE N°	Limites de composição química %C	Limites de composição química %Mn	Valor máximo da composição química %P	Valor máximo da composição química %S
1020	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,050

4.2.1.2 – Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado no Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP, utilizando-se um durômetro WOLPERT – Süssen, tipo HT-1A, conforme apresentado na Figura 4.8, de acordo com a NBR NM/87-1 (1999).

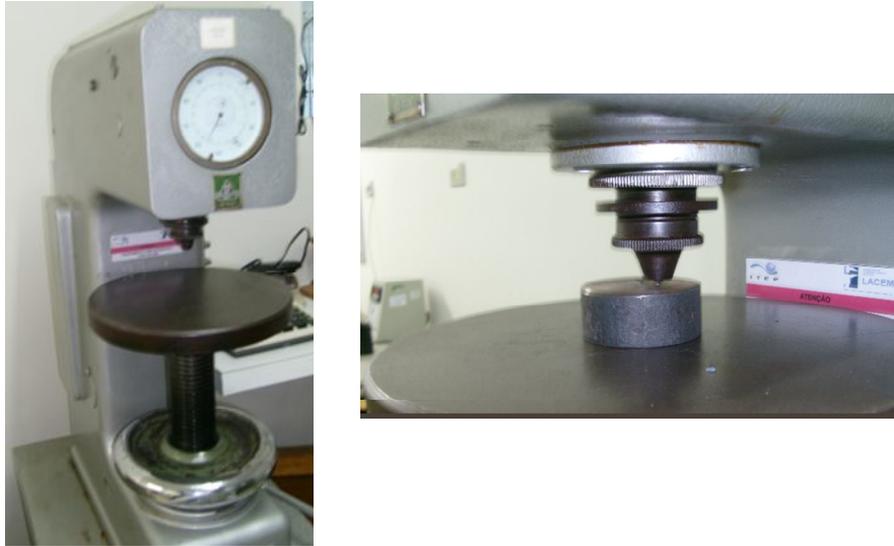


Figura 4.8 – Durômetro utilizado no ensaio de dureza e ao lado, o corpo de prova sendo ensaiado

A metodologia de ensaio consistiu, inicialmente, em aplicar uma pré-carga de 10 kgf com uma esfera de 2,5 mm de diâmetro. A carga de ensaio foi igual a 187,5 kgf. Foram realizadas doze medições nos pontos d1, d2, d3, d4, e1, e2, e3, e4, f1, f2, f3 e f4, variando do centro da barra cilíndrica às extremidades, conforme apresentado na Figura 4.9.

Os resultados deste ensaio são apresentados na Tabela 4.5. O valor médio das medições realizadas é igual a 142 HB. O resultado da medição é $(142 \pm 1,28)$ HB, para $k = 2,25$. A faixa de dureza Brinell para um aço SAE 1020 é de 137 a 174 HB (FERRARESI, 1977)



Figura 4.9 – Destaque da impressão das calotas esféricas obtidas no ensaio de dureza

Tabela 4.5: Resultados do ensaio de dureza Brinell

PONTOS	SEQUÊNCIA 1 (HB)	SEQUÊNCIA 2 (HB)	SEQUÊNCIA 3 (HB)
1	d1 = 145	e1 = 143	f1 = 140
2	d2 = 140	e2 = 140	f2 = 143
3	d3 = 143	e3 = 140	f3 = 143
4	d4 = 145	e4 = 143	f4 = 140
MÉDIA	$\cong 143$	$\cong 142$	$\cong 142$

4.2.1.3 – Ensaio de Tração

Inicialmente, há a necessidade de se apresentar alguns conceitos relacionados ao corpo de prova, de acordo com a NBR ISO 6892 (2002). São eles:

- Comprimento da medida original (L_0) – é o comprimento da medida antes da aplicação da força;
- Comprimento paralelo (L_c) – é a parte paralela da seção reduzida do corpo de prova;
- r – raio de concordância;
- D^* – diâmetro externo do corpo de prova;
- d – diâmetro do comprimento paralelo do corpo de prova cilíndrico

A metodologia utilizada para a confecção do corpo de prova baseou-se na NBR ISO 6892 (2002) e nas limitações dimensionais da máquina de tração utilizada, cujo diâmetro a ser fixado na garra deveria ser de 10 mm, em função das limitações dimensionais da máquina de tração. A Figura 4.10 apresenta a peça bruta para a confecção dos corpos de prova e a Figura 4.11, as dimensões do corpo de prova. Analisando-se as duas figuras, percebe-se que houve um grande trabalho de usinagem, pois se partiu de uma barra cilíndrica com diâmetro igual a 44,45 mm para o diâmetro de 4 mm. Tal situação ocorreu em função dos corpos de prova terem sido confeccionados a partir da mesma barra das peças a serem fabricadas.

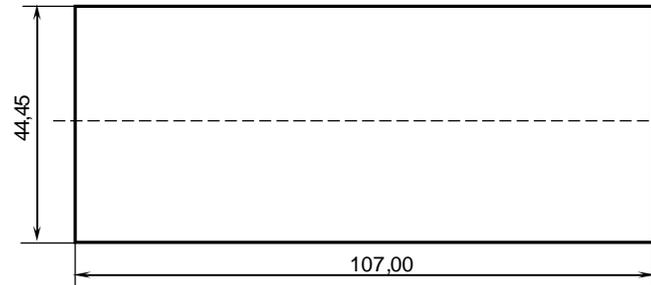


Figura 4.10 – Dimensões da peça bruta para a confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração

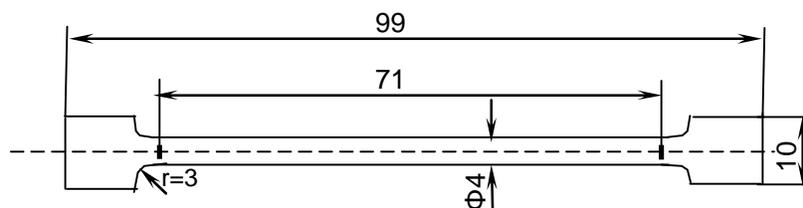


Figura 4.11 – Dimensões do corpo de prova final

Partindo-se de $D^* = 10$ mm sabendo-se que o mínimo raio de concordância é dado pela equação (4.7), obtém-se o diâmetro “d”.

$$r = 0,75 \times d \quad (4.7)$$

De acordo com a Figura 4.11, verifica-se que há uma relação entre os diâmetros “ D^* ” e “d”, dada pela equação (4.8).

$$d + (2 \times r) = D^* \quad (4.8)$$

A partir da equação (4.8), determina-se o diâmetro “d”, cujo valor mínimo deverá ser igual a 4 mm (NBR ISO 6892, 2002), conforme equação (4.9). A área da secção transversal original do comprimento paralelo é obtida conforme equação (4.10). O corpo de prova usinado é apresentado na Figura 4.12.

$$d + 2 \times (0,75 \times d) = 10$$

$$d + (1,5 \times d) = 10 \quad (4.9)$$

$$d = 4\text{mm}$$

$$S_0 = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{\pi \times 4^2}{4} \cong 12,57\text{mm}^2 \quad (4.10)$$



Figura 4.12 – Corpo de prova utilizado no ensaio de tração

A máquina de tração utilizada para a realização dos ensaios foi da marca INSTRON, modelo 8801, com capacidade de 100 kN, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco. A Figura 4.13 apresenta uma visão geral da máquina de tração no momento do ensaio de um dos corpos de prova.



Figura 4.13 – Visão geral da máquina de ensaio de tração do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE

A Figura 4.14 apresenta uma foto destacando a fixação do extensômetro no corpo de prova a ser ensaiado.



Figura 4.14 – Foto destacando a fixação do extensômetro no corpo de prova a ser ensaiado

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam os gráficos de dois corpos de prova ensaiados. Os dados dos ensaios foram fornecidos pelo programa da máquina de ensaio.

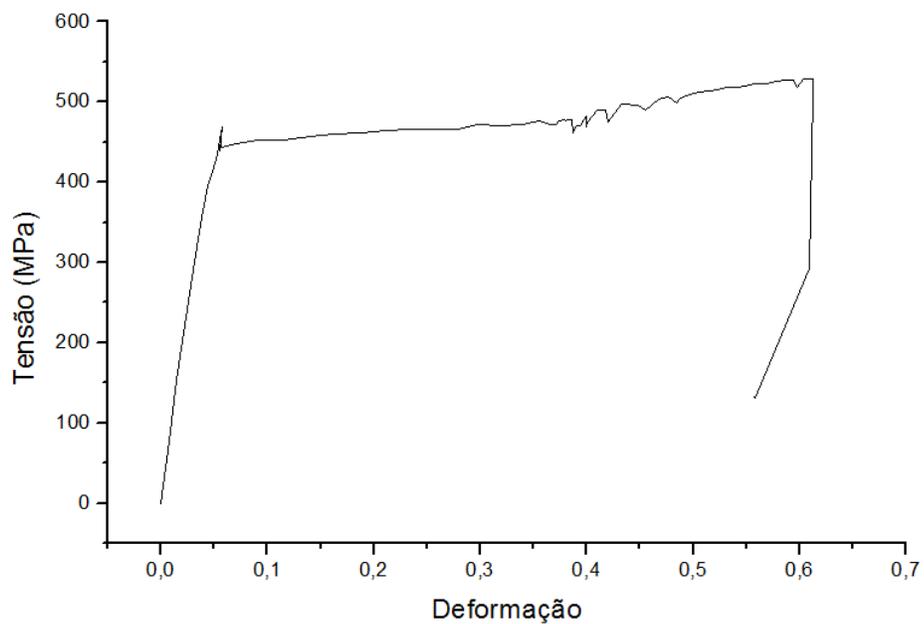


Figura 4.15 – Curva tensão x deformação, obtida do ensaio de tração no corpo de prova 1

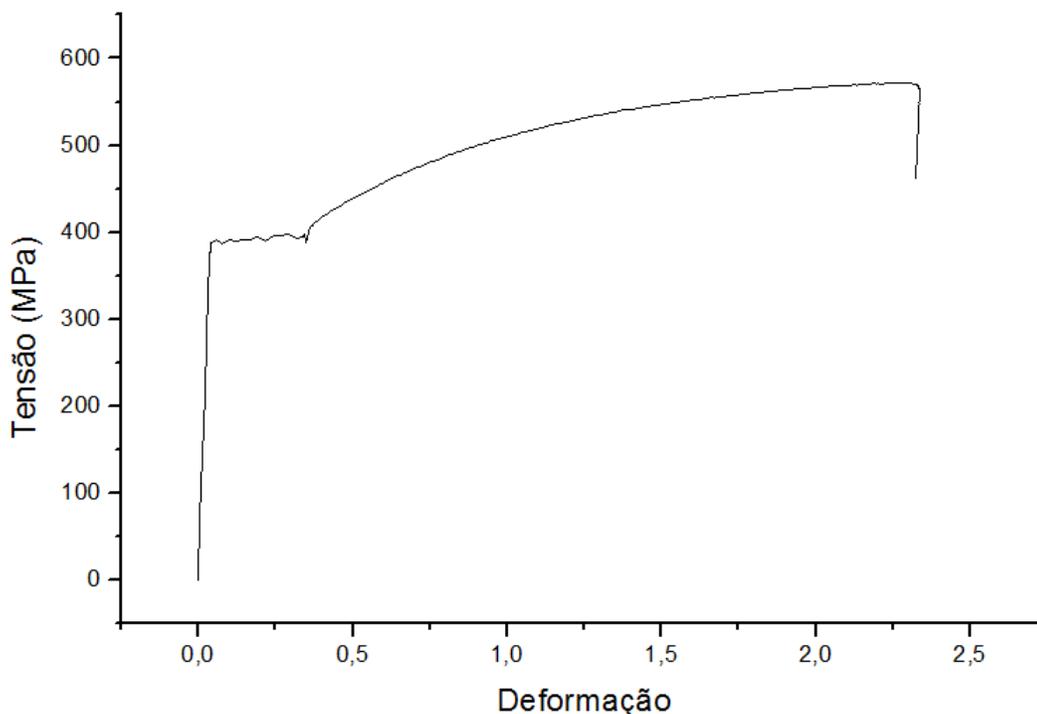


Figura 4.16 – Curva tensão x deformação, obtida do ensaio de tração no corpo de prova 2

Analisando-se a Figura 4.15, constata-se que na região plástica, a tensão oscila em alguns pontos entre 461 e 495 MPa. Tal situação é indicativa de que houve um escorregamento do material nas garras da máquina de tração. Já na curva tensão-deformação da Figura 4.16, isto não ocorre, o que induz a resultados mais realísticos.

O corpo de prova da Figura 4.15 apresentou uma tensão de escoamento de aproximadamente 449 MPa ($45,8 \text{ kgf/mm}^2$) e uma tensão limite de resistência mecânica de aproximadamente 529 MPa ($53,9 \text{ kgf/mm}^2$).

O corpo de prova da Figura 4.16 apresentou uma tensão de escoamento de aproximadamente 390 MPa ($39,8 \text{ kgf/mm}^2$) e uma tensão limite de resistência mecânica de aproximadamente 572 MPa ($58,3 \text{ kgf/mm}^2$). A incerteza de medição referente à tensão de escoamento é igual a $\pm 8,5 \text{ kgf/mm}^2$, enquanto que a incerteza de medição para a tensão limite de resistência mecânica é igual a $\pm 6,2 \text{ kgf/mm}^2$.

De acordo com Ferraresi (1977), o aço SAE 1020 tem uma tensão limite de resistência mecânica variando entre 50 e 60 kgf/mm^2 e uma tensão de escoamento de 30 kgf/mm^2 .

4.2.2 Ensaios de Usinagem

Ao todo foram fabricadas seis peças, sendo três delas em uma máquina-ferramenta e três em outra. Na otimização da fabricação foram consideradas para todas as peças, os seguintes dados:

- Coeficiente K_{S1} da fórmula de Kienzle = 185 (KURAMOTO, 1997);
- Coeficiente $1-z$ da fórmula de Kienzle = 0,85 (KURAMOTO, 1997);
- Salário homem (R\$/h) = 3;
- Tempo de troca da ferramenta (min.) = 1;
- Preço da matéria-prima (R\$/kg) = 4,00;
- Densidade da matéria-prima (kg/m^3) = 7800;

Para a fabricação das peças foram utilizadas duas máquinas-ferramentas, sendo uma delas uma máquina com comando numérico computadorizado – CNC, e a outra, uma máquina convencional, ambas pertencentes ao Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

A peça apresentada na Figura 4.5 será confeccionada em três escalonamentos apresentados a seguir. Além disto, considerou-se a profundidade de corte para o acabamento como sendo igual a 1mm, a profundidade de corte no faceamento igual a 1mm e o diâmetro do furo de centro igual a 5 mm.

Escalonamento 1:

$$d_i = 51,7 \text{ mm}; d_f = 40,0 \text{ mm e } l_f = 58,0 \text{ mm.}$$

Escalonamento 2:

$$d_i = 40,0 \text{ mm}; d_f = 25,0 \text{ mm e } l_f = 45,0 \text{ mm.}$$

Escalonamento 3:

$$d_i = 25,0 \text{ mm}; d_f = 19,0 \text{ mm e } l_f = 25,0 \text{ mm.}$$

4.2.2.1 – Fabricação das Peças Utilizando o Torno ROMI Centur – 30D – TORNO 1

Foram fabricadas três peças no torno 1, apresentado na Figura 4.17, que possui as seguintes características:

- Potência = 15kW (\cong 20,39 CV);
- Variação contínua de rotações;
- Rotação máxima = 3500 rpm;
- Rendimento = 90%.



Figura 4.17 – Torno CNC utilizado para a fabricação de três peças dos experimentos

Os dados específicos relacionados ao processo de fabricação são:

- Salário máquina (R\$/h) = 15,00;
- Tempo de preparação da máquina-ferramenta (minutos) = 15,00;
- Tempo improdutivo (minutos) = 0,5;

- Parâmetros da Fórmula Expandida de Taylor, obtidos do banco de dados do SGF:
 $G = -0,35$; $C = 660$; $E = -0,15$; $F = -0,1$.

A ferramenta e porta-ferramenta utilizados, conforme apresentados na Figura 4.18, possuem as características apresentadas nas Tabelas 4.6 e 4.7.



Figura 4.18 – Ferramenta de corte e porta-ferramenta utilizados no torno CNC

Tabela 4.6: Dados da ferramenta de corte utilizada no torno CNC

Ferramenta	Inserto reversível de metal duro
Fabricante	Sandvik Coromant
Referência	DCMT 11T3 08 - UR
Raio de arredondamento da ponta	0,8 mm
Número de arestas cortantes	4
Comprimento da aresta cortante	11 mm
Custo da ferramenta (R\$)	50,00

Tabela 4.7: Dados do porta-ferramenta utilizado no torno CNC

Fabricante	Sandvik Coromant
Referência	SDJCR 2525 M11
Ângulo de posição	93°
Ângulo de folga	7°
Custo do porta-ferramenta (R\$)	420,00
Vida do porta-ferramenta em número de fios de corte até sua possível inutilização	3000 arestas

De posse destes dados, o programa determinou os parâmetros ótimos de fabricação, de acordo com a Tabela 5.6. O custo e o tempo apresentados nesta tabela referem-se apenas ao custo e ao tempo direto para a geração da respectiva dimensão, não considerando os custos indiretos e os tempos improdutivos.

Tabela 4.8: Parâmetros ótimos para a fabricação no torno CNC

OPERAÇÃO	PARÂMETROS	ESCALON. 1	ESCALON. 2	ESCALON. 3
DESBASTE	Vc (m/min)	152	152	152
	f (mm/volta)	0,22	0,22	0,22
	ap (mm)	4,85	6,50	2,00
	Kp (R\$) direto	0,13	0,16	0,03
	Tt (min) direto	0,28	0,34	0,06
ACABAMENTO	Vc (m/min)	152	152	152
	f (mm/volta)	0,22	0,22	0,22
	ap (mm)	1,00	1,00	1,00
	Kp (R\$) direto	0,10	0,05	0,02
	Tt (min) direto	0,22	0,11	0,05
FACEAMENTO	n (rpm)	1052	1467	2190
	f (mm/volta)	0,22	0,22	0,22
	ap (mm)	1,00	1,00	1,00
	Kp (R\$) direto	1,62	0,16	0,02
	Tt (min) direto	4,04	0,35	0,04
	CUSTO TOTAL	8,84		
	(R\$)			
	TEMPO TOTAL(min)	11,12		

Obtidos os parâmetros ótimos de fabricação, o passo seguinte foi a elaboração do fluxograma de fabricação, conforme mostrado na Figura 4.19, seguida da confecção do programa CNC, o qual foi inicialmente gerado através do programa de computador 2D PROGRAMMER da empresa Adiante. A sequência de programação é apresentada a seguir.

PROGRAMA

00001 G99#

00002 T0505#

00003 G54#

00004 G00 X80. Z5.#

00005 M12#

00006 G96#

00007 S152.

00008 G92 S3000. M3#

00009 G00 X55.7 Z2.#

00010 G66 X55.7 Z2. I1 K.2 U1 W6.0 P67 F.22#

00011 G00 X55. Z5.#

00012 M30

SUB-PROGRAMA P67

00001 G01 X19. Z0. F.22#

00002 Z-25.#

00003 X25.#

00004 Z-45.#

00005 X40.#

00006 Z-57.#

00007 X51.7#

00008 M2#

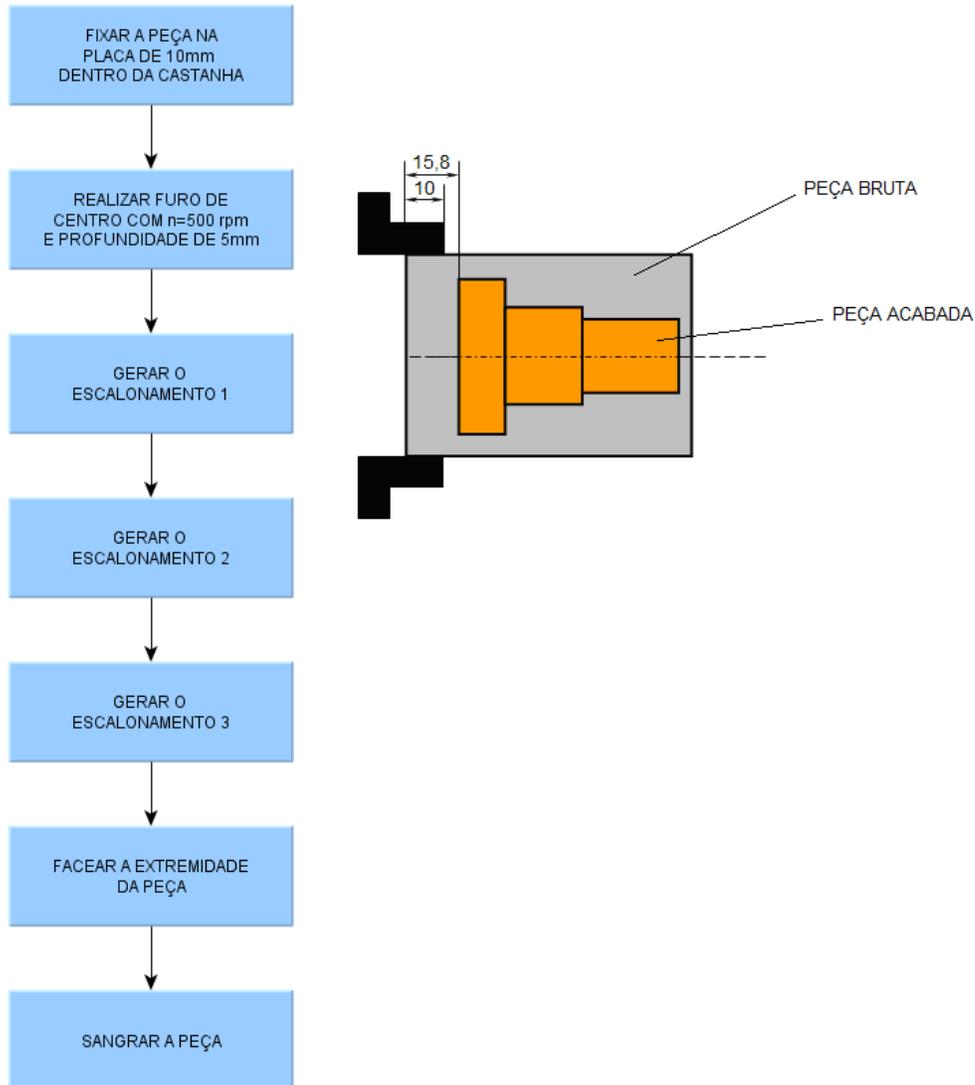


Figura 4.19 – Fluxograma de execução do eixo e esquema da peça bruta e acabada

A Figura 4.20 apresenta a tela do simulador com a peça acabada, necessitando apenas ser cortada ou sangrada.

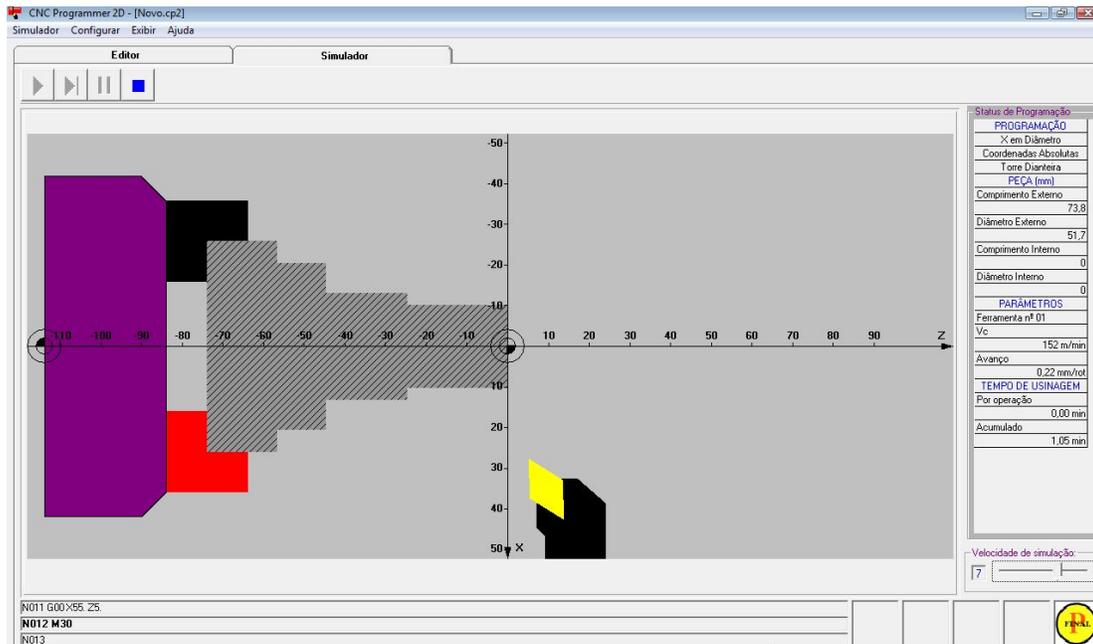


Figura 4.20 – Tela do simulador apresentando a peça acabada

Após a simulação, o passo final foi a confecção das peças fazendo uso da programação CNC gerada. A fabricação foi realizada sem o uso de fluido refrigerante. A Figura 4.21 apresenta a sequência de fabricação, destacando o início, o meio e final da mesma. O tipo de cavaco gerado em todos os escalonamentos foi o cavaco em forma de lascas, conforme mostrado na Figura 4.22.

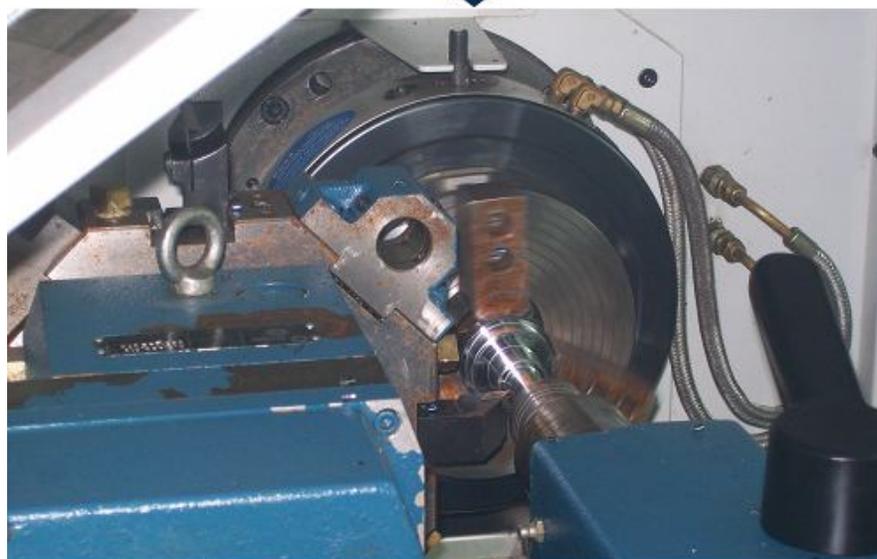


Figura 4.21 – Sequência de fabricação no torno CNC



Figura 4.22 – Cavaco em forma de lascas

4.2.2.2 – Fabricação das Peças Utilizando o Torno Convencional Nardini Mascote – TORNO 2

Da mesma forma que no torno 1 foram confeccionadas outras três peças em um torno convencional, conforme apresentado na Figura 4.23, que possui as seguintes características:

- Potência = 6,3 cv;
- Avanços (mm/volta): 0,053; 0,074; 0,079; 0,094; 0,116; 0,14; 0,15; 0,16; 0,19; 0,223; 0,254; 0,282; 0,297; 0,32; 0,348; 0,374; 0,394; 0,449; 0,49; 0,554; 0,62; 0,675; 0,731 e 1,013.
- Rotações (RPM): 31,5; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600 e 2500;
- Rendimento = 80%.

Os dados específicos relacionados ao processo de fabricação são:

- Salário máquina (R\$/h) = 20,00;
- Tempo de preparação da máquina-ferramenta (min) = 20,00;
- Tempo improdutivo (minutos) = 3,0



Figura 4.23 – Torno Nardini Mascote utilizado para a fabricação de três peças

A ferramenta e porta-ferramenta utilizados, conforme apresentados na Figura 4.24, possuem as características apresentadas nas Tabelas 4.9 e 4.10.



Figura 4.24 – Ferramenta de corte e porta-ferramenta utilizados no torno Nardini

Tabela 4.9: Dados da ferramenta de corte utilizada no torno Nardini

Ferramenta	Inserto reversível de metal duro
Fabricante	Sandvik Coromant
Referência	SPMR 090304
Raio de arredondamento da ponta	0,4 mm
Número de arestas cortantes	4
Comprimento da aresta cortante	9 mm
Custo da ferramenta (R\$)	25,00

Tabela 4.10: Dados do porta-ferramenta utilizado no torno Nardini

Fabricante	Sandvik Coromant
Referência	Csbpr 1616 H 09
Ângulo de posição	75°
Ângulo de folga	11°
Custo do porta-ferramenta (R\$)	79,00
Vida do porta-ferramenta em número de fios de corte até sua possível inutilização	500 arestas

De posse de todos os dados, o programa determinou os parâmetros ótimos de fabricação, de acordo com a Tabela 4.11. O custo e o tempo apresentados nesta tabela referem-se apenas ao custo e ao tempo direto para a geração da referida dimensão, não considerando os custos indiretos e os tempos improdutivo.

Tabela 4.11: Parâmetros ótimos para a fabricação no torno Nardini

OPERAÇÃO	PARÂMETROS	ESCALON. 1	ESCALON. 2	ESCALON. 3
	n (RPM)	630	1000	1600
DESBASTE	Vc (m/min)	102	90	126
	f (mm/volta)	0,15	0,15	0,15
	ap (mm)	4,85	3,25	2,00
	Kp (R\$) direto	0,25	0,24	0,04
	Tt (min) direto	0,60	0,58	0,1
	n (RPM)	1250	1250	1600
ACABAMENTO	Vc (m/min)	203	157	126
	f (mm/volta)	0,15	0,15	0,15
	ap (mm)	1,00	1,00	1,00
	Kp (R\$) direto	0,15	0,08	0,04
	Tt (min) direto	0,25	0,16	0,08

A fim de apresentar o comportamento da velocidade de corte em relação ao custo direto de geração das dimensões com o torno NARDINI, o gráfico da Figura 4.25

representa tal comportamento para o escalonamento 1, considerando-se a operação de desbaste. Analisando-se o referido gráfico, verifica-se um ponto de mínimo que corresponde a exatamente a velocidade de corte de 102 m/min para um custo direto de R\$ 0,25.

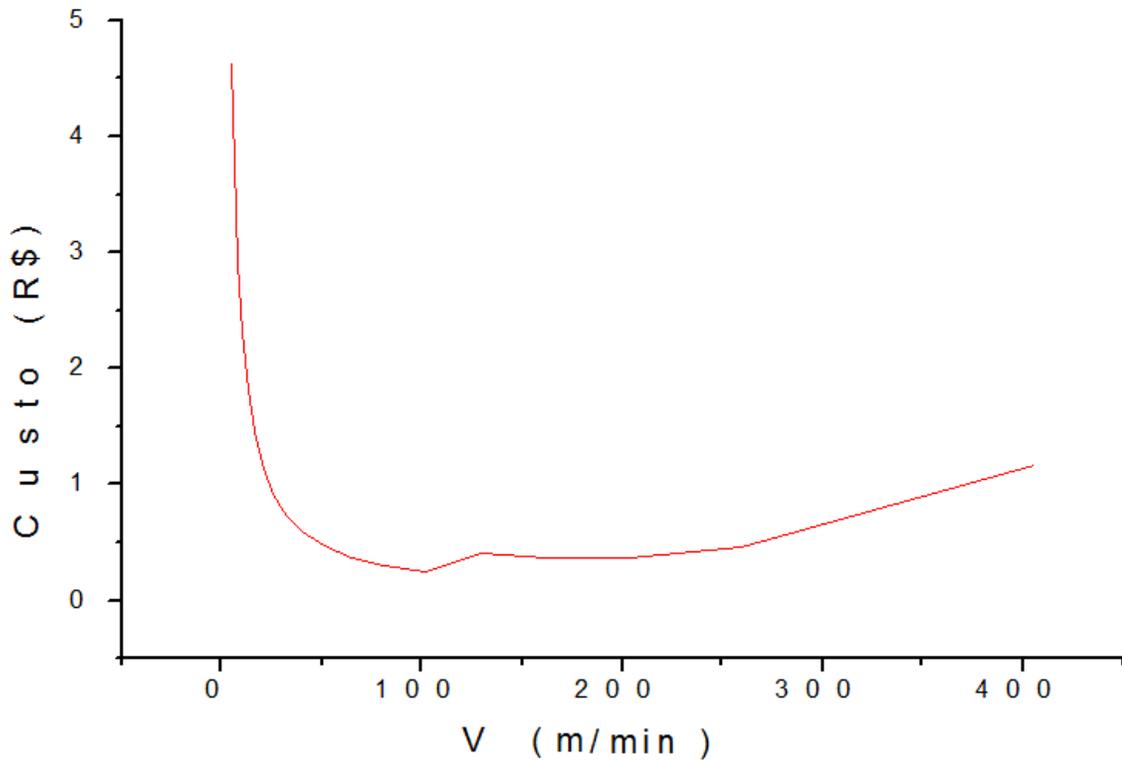


Figura 4.25 – Gráfico do custo direto para o desbaste referente ao escalonamento 1 em função da velocidade de corte

A sequência de fabricação das peças no torno Nardini, é apresentada na Figura 4.26. A usinagem foi realizada sem o uso de fluido refrigerante. Durante o escalonamento 1, o cavaco característico foi o cavaco em forma de lascas. Durante o escalonamento 2, o cavaco mudou da forma de lascas para um cavaco em forma de espiral e contínuo, e assim permaneceu durante o escalonamento 3. A Figura 4.27 mostra a peça bruta junto com a peça final produzida no torno Nardini.

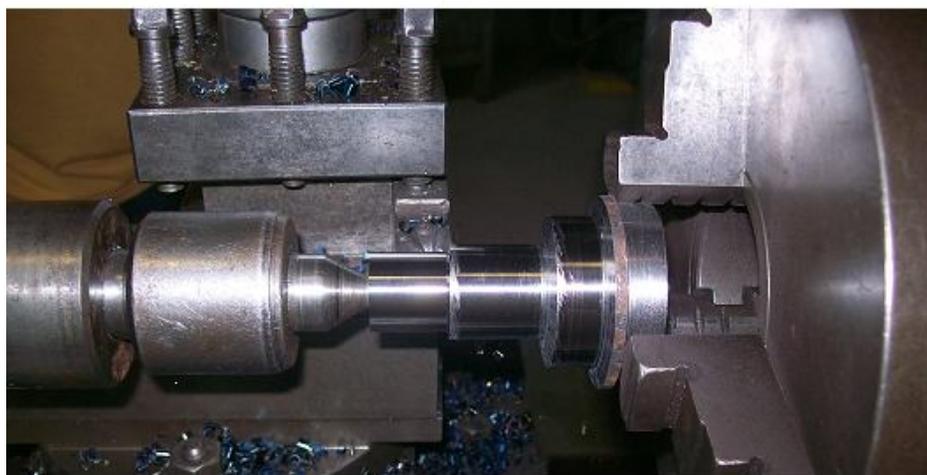
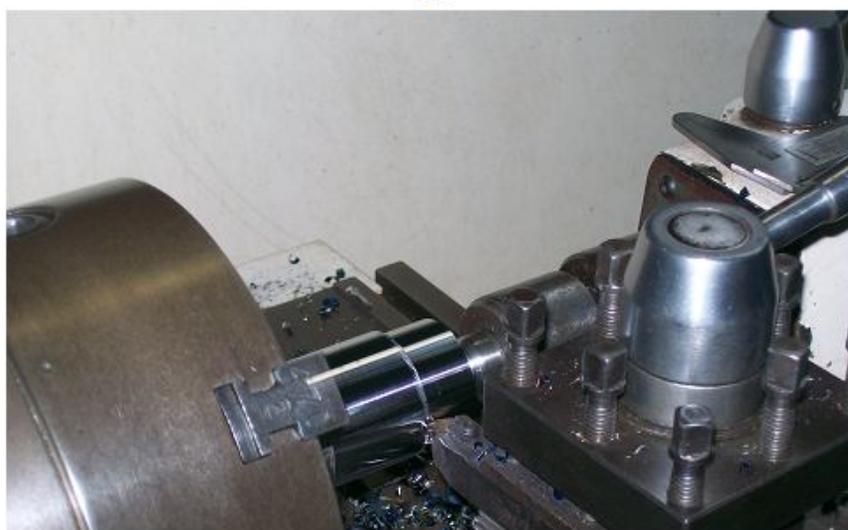


Figura 4.26 – Sequência de fabricação no torno Nardini



Figura 4.27 – Apresentação da peça bruta juntamente com a peça acabada produzida no torno Nardini

4.2.3 Medição das Peças

No procedimento de medição das peças, as mesmas serão divididas em peças fabricadas no torno 1 e peças fabricadas no torno 2. Por outro lado, este procedimento de medição será dividido em duas fases:

- A medição da rugosidade da superfície de maior diâmetro, conforme apresentado na Figura 4.5 e
- A medição dimensional de comprimento e diâmetro, juntamente com a determinação dos desvios de circularidade e cilindricidade.

4.2.3.1 – Medição da Rugosidade

Conforme apresentado na Figura 4.5, foi especificado para o maior diâmetro do eixo, um valor máximo do parâmetro R_a igual a $2 \mu\text{m}$. O principal motivo para a escolha de um valor tão elevado deste parâmetro se deu em função de se poder utilizar uma maior quantidade de avanços possíveis em ambos os tornos, fornecendo ao SGF um maior número de possibilidades para a seleção dos parâmetros que gerassem o menor custo para a fabricação das peças.

Para a determinação dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z foi utilizado o rugosímetro da marca Taylor Robson, referência LMD 087, com menor divisão de 0,0001 μm , conforme mostrado na Figura 4.28.

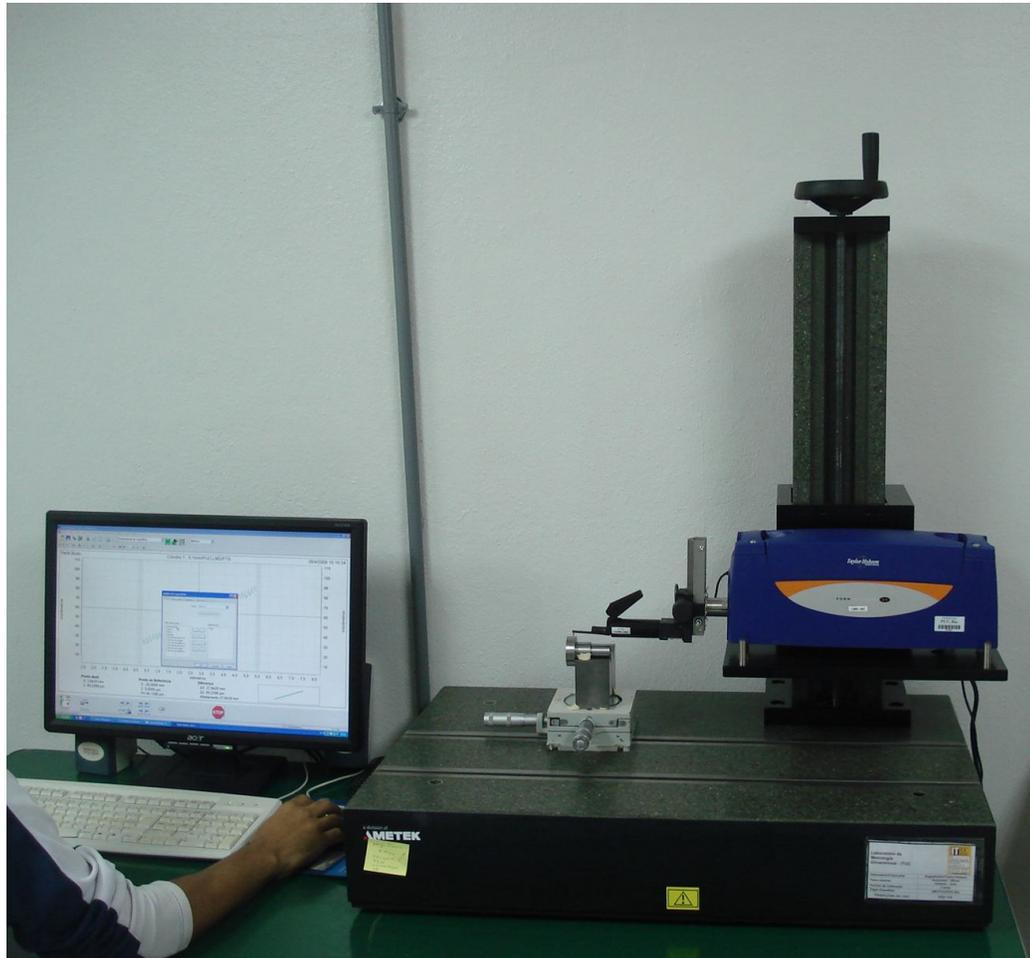


Figura 4.28 – Rugosímetro Taylor Robson utilizado para a medição da rugosidade

O referido rugosímetro pertence ao Laboratório de Metrologia Dimensional da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, laboratório acreditado pelo INMETRO sob o N° 11 em 25/04/1988. O rugosímetro possui certificado de calibração de N° 0186/07 de 05/07/2007, emitido pelo ITUC – Instituto Tecnológico PUC-Rio, e possui uma incerteza expandida igual a $\pm 0,0220 \mu\text{m}$, para um fator de abrangência $k = 2$.

Para a realização de todas as medições, as peças foram enumeradas de acordo com a seguinte ordem:

- Peças de números 1, 2 e 3 – fabricadas no torno Nardini e

- Peças de números 4, 5 e 6 – fabricadas no torno CNC da Romi.

A metodologia adotada considerou três medições do parâmetro Ra e três medições do parâmetro Rz no maior diâmetro de cada peça, conforme apresentado na Figura 4.29. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17. A média das indicações e a incerteza expandida de medição de rugosidade de cada uma das peças, com seu respectivo fator de abrangência, apresentados nas respectivas tabelas foram geradas diretamente no programa SGF. A temperatura média durante as medições foi igual a 20,30°C.

Para as medições em todas as peças, a incerteza expandida relatada foi obtida através de uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência “k”, fornecendo assim, um nível de confiança de aproximadamente 95%.



Figura 4.29 – Ilustração de duas diferentes posições na realização da medição de rugosidade

Tabela 4.12: Dados da medição de rugosidade para a peça 1

Parâmetro	Medições (μm)			Média das indicações (μm)	Incerteza expandida de medição (μm)	Fator de abrangência k
	x_1	x_2	x_3			
Ra	1,6675	1,7075	1,6891	1,6880	$\pm 0,0388$	2,43
Rz	7,5757	7,6686	7,6149	7,6197	$\pm 0,1317$	4,53

Analisando-se a Tabela 4.12 constata-se que todos os valores medidos de Ra, mesmo considerando-se a faixa de incerteza de medição, foram inferiores ao limite máximo estabelecido de 2 μm , para o avanço ótimo determinado pelo SGF, considerando o raio de arredondamento da ponta da ferramenta utilizada no torno 2. A Figura 4.30 apresenta o perfil de rugosidade gerado na medição da peça 1.

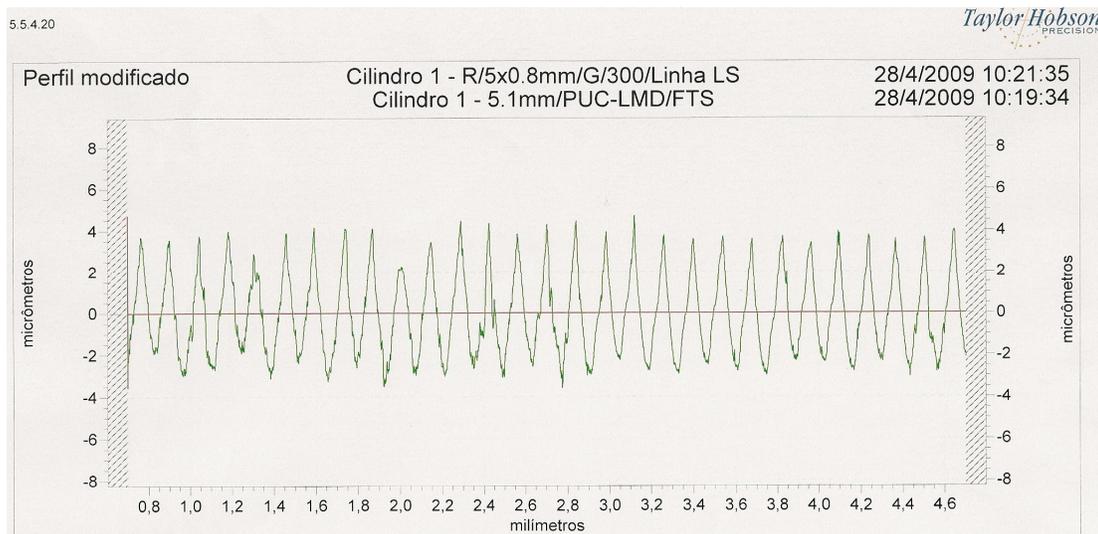


Figura 4.30 – Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 1 para $f = 0,15 \text{ mm/volta}$ e $r_e = 0,4 \text{ mm}$ no torno Nardini

Tabela 4.13: Dados da medição de rugosidade para a peça 2

Parâmetro	Medições (μm)			Média das indicações (μm)	Incerteza expandida de medição (μm)	Fator de abrangência k
	x_1	x_2	x_3			
Ra	1,2961	1,3037	1,3172	1,3057	$\pm 0,0262$	2,08
Rz	7,1087	7,0965	8,0419	7,4157	$\pm 1,4182$	4,53

A Figura 4.31 apresenta o perfil de rugosidade gerado na medição da peça 2.

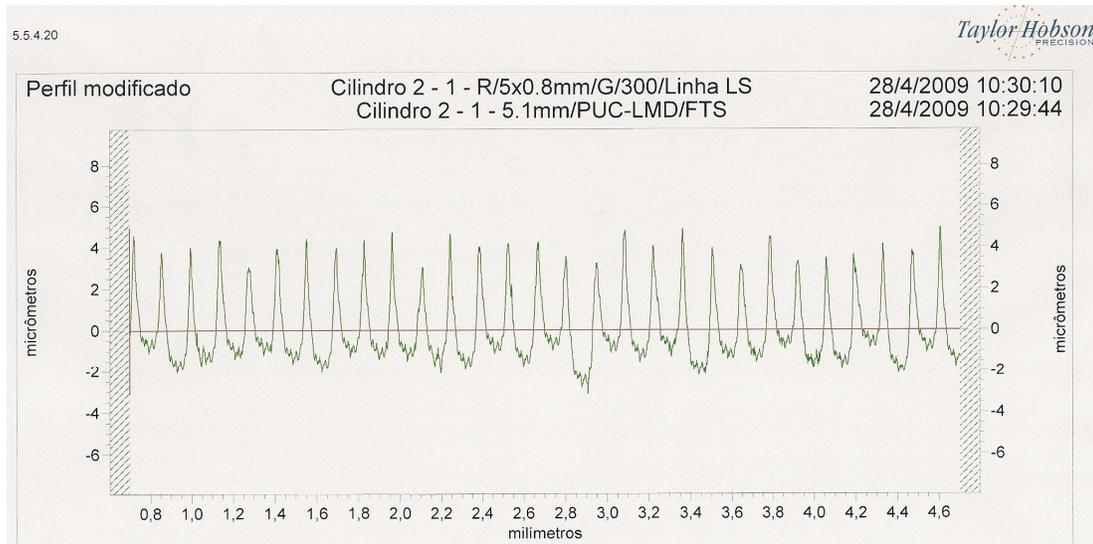


Figura 4.31 – Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 2 para $f = 0,15$ mm/volta e $r_e = 0,4$ mm no torno Nardini

Tabela 4.14: Dados da medição de rugosidade para a peça 3

Parâmetro	Medições (μm)			Média das indicações (μm)	Incerteza expandida de medição (μm)	Fator de abrangência k
	x_1	x_2	x_3			
Ra	1,8753	1,8426	1,8345	1,8508	$\pm 0,0418$	2,52
Rz	7,4140	7,6714	7,1743	7,4199	$\pm 0,6516$	4,53

A Figura 4.32 apresenta o perfil de rugosidade gerado na medição da peça 3.

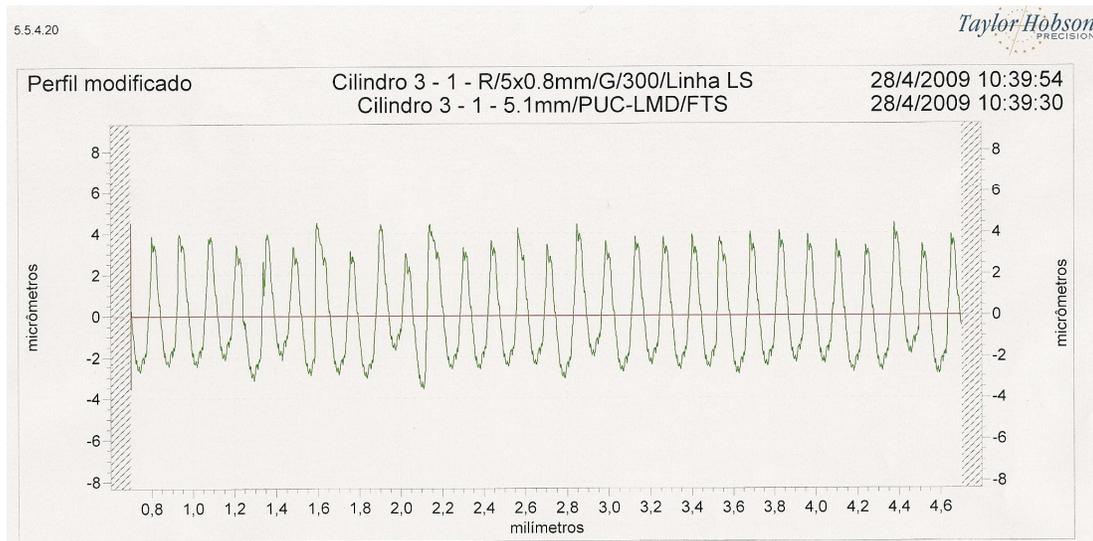


Figura 4.32 – Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 3 para $f = 0,15$ mm/volta e $r_e = 0,4$ mm no torno Nardini

Constata-se, analisando-se as Tabelas 4.13 e 4.14 que todos os valores de R_a se encontram dentro do valor máximo de $2 \mu\text{m}$.

Tabela 4.15: Dados da medição de rugosidade para a peça 4

Parâmetro	Medições (μm)			Média das indicações (μm)	Incerteza expandida de medição (μm)	Fator de abrangência k
	x_1	x_2	x_3			
Ra	2,8525	2,7499	2,7628	2,7884	$\pm 0,1543$	4,53
Rz	14,0590	12,5280	12,3963	12,9944	$\pm 2,4161$	4,53

A Figura 4.33 apresenta o perfil de rugosidade gerado na medição da peça 4.

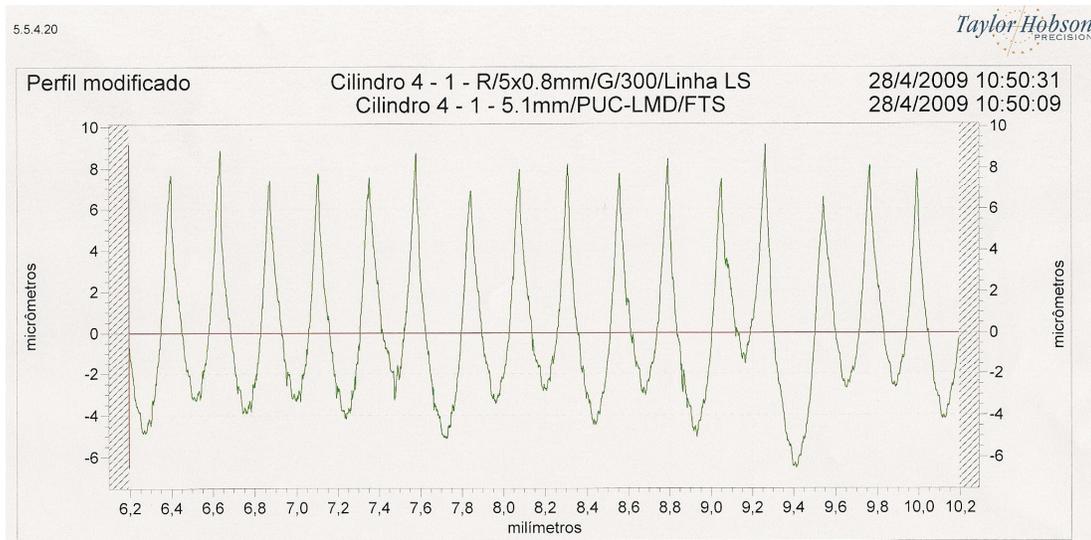


Figura 4.33 – Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 4 para $f = 0,22 \text{ mm/volta}$ e $r_e = 0,8 \text{ mm}$ no torno CNC

Tabela 4.16: Dados da medição de rugosidade para a peça 5

Parâmetro	Medições (μm)			Média das indicações (μm)	Incerteza expandida de medição (μm)	Fator de abrangência k
	x_1	x_2	x_3			
Ra	2,4254	2,2837	2,2519	2,3203	$\pm 0,2465$	4,53
Rz	11,9036	10,8473	10,2348	10,9952	$\pm 2,2067$	4,53

A Figura 4.34 apresenta o perfil de rugosidade gerado na medição da peça 5.

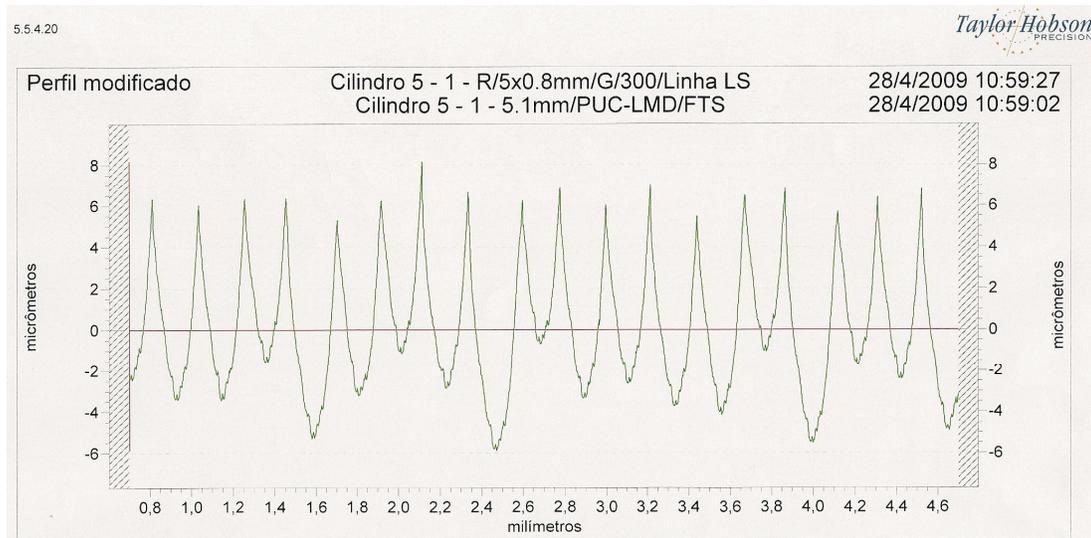


Figura 4.34 – Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 5 para $f = 0,22 \text{ mm/volta}$ e $r_e = 0,8 \text{ mm}$ no torno CNC

Tabela 4.17: Dados da medição de rugosidade para a peça 6

Parâmetro	Medições (μm)			Média das indicações (μm)	Incerteza expandida de medição (μm)	Fator de abrangência k
	x_1	x_2	x_3			
Ra	1,9067	1,9016	1,8984	1,9022	$\pm 0,0226$	2,00
Rz	9,6420	9,1592	9,0799	9,2937	$\pm 0,7966$	4,53

A Figura 4.35 apresenta o perfil de rugosidade gerado na medição da peça 6.

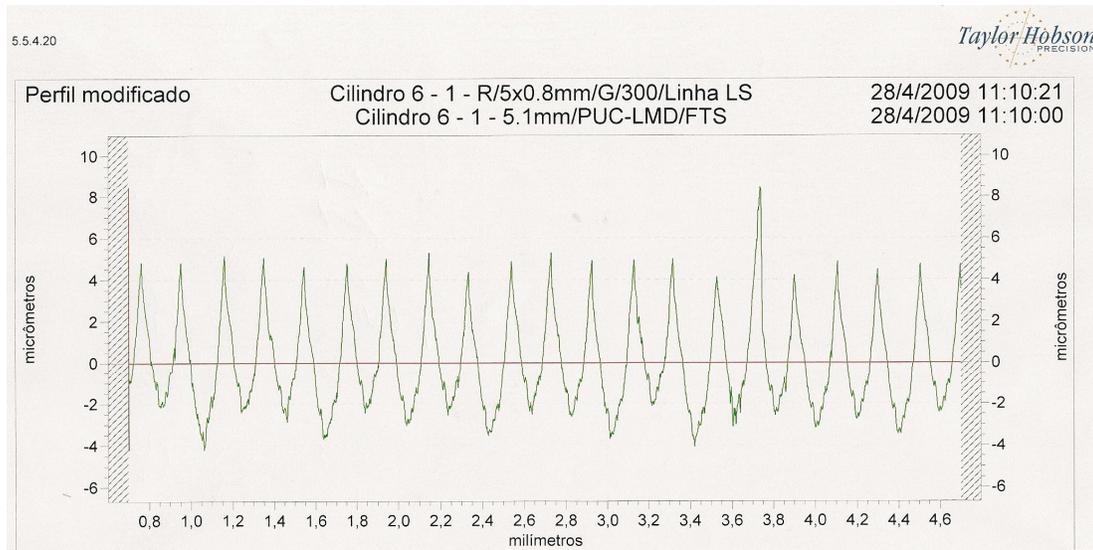


Figura 4.35 – Perfil de rugosidade gerado na medição de rugosidade da peça 6 para $f = 0,22$ mm/volta e $r_e = 0,8$ mm no torno CNC

4.2.3.2 – Medição dos Comprimentos

Para as medições dos comprimentos das peças representadas pela Figura 4.5, foi utilizado um paquímetro digital da marca TESA, conforme apresentado na Figura 4.36, referência LMD – 076, com faixa nominal de 0 – 150 mm, menor divisão de 0,01 mm, pertencente ao Laboratório de Metrologia Dimensional da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. O paquímetro possui certificado de calibração de N° 0338-7/07, emitido em 12/11/2007, apresentando uma incerteza expandida de medição igual a $\pm 0,02$ mm para um fator de abrangência $k = 2,2$. A temperatura média do laboratório durante as medições de comprimento foi igual a 19,98°C. Os valores medidos para cada uma das peças estão apresentados nas Tabelas 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23. A média das indicações, incerteza expandida de medição e o seu respectivo fator de abrangência para cada medição foram determinados pelo programa SGF. Cada valor medido em cada uma das peças foi corrigido, através de interpolação linear, tomando como base o erro de indicação de -0,03 mm para o ponto calibrado de 12,50 mm e o erro de indicação de -0,01 mm para o ponto de 50,00 mm, ambos obtidos do certificado de calibração do paquímetro.

Aplicando-se os valores referentes ao paquímetro no SGF, o mesmo considerou este sistema de medição como estando apto para a medição dos comprimentos, conforme mostrado na Figura 4.37.



Figura 4.36 – Apresentação de uma medição de comprimento com paquímetro

MÓDULO DE MEDIÇÃO

SISTEMA DE MEDIÇÃO (SM) Paquímetro

ENTRE COM A INCERTEZA EXPANDIDA DE MEDIÇÃO DO SM (mm) FATOR

ENTRE COM O FATOR DE ABRANGÊNCIA (k)

ENTRE COM O ERRO MÁXIMO DO SM (mm)

ENTRE COM A RESOLUÇÃO ADOTADA PARA O SM (mm)

0,02	
2,2	
0,03	
0,01	

Critérios utilizados para a determinação da tolerância

Incerteza da máquina-ferramenta

Ajuste através do sistema furo base

Ajuste através do sistema eixo base

Acabamento superficial

Erro da máquina-ferramenta e acabamento superficial

Execução grosseira de peças isoladas

Entre com uma tolerância específica (mm) 0,2

RESULTADO DA ESCOLHA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO
O PAQUÍMETRO É UM SM APTO

Figura 4.37 – Teste de aptidão do sistema de medição do SGF

Tabela 4.18: Dados de medição dos comprimentos da peça 1 fabricada no torno Nardini

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	Fator de abrangência k
	x ₁	x ₂	x ₃			
12,00	12,07	12,09	12,13	12,10	± 0,07	3,31
20,00	20,06	20,01	20,04	20,04	± 0,05	2,87
25,00	25,08	25,02	25,04	25,05	± 0,07	3,31

Tabela 4.19: Dados de medição dos comprimentos da peça 2 fabricada no torno Nardini

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	Fator de abrangência k
	x ₁	x ₂	x ₃			
12,00	12,06	12,03	12,04	12,04	± 0,03	2,23
20,00	20,75	20,74	20,78	20,76	± 0,04	2,52
25,00	24,91	24,96	24,90	24,92	± 0,07	3,31

Tabela 4.20: Dados de medição dos comprimentos da peça 3 fabricada no torno Nardini

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	Fator de abrangência k
	x ₁	x ₂	x ₃			
12,00	12,08	12,07	12,07	12,07	± 0,02	2,01
20,00	20,82	20,81	20,82	20,82	± 0,02	2,01
25,00	24,96	24,99	24,95	24,97	± 0,04	2,52

Tabela 4.21: Dados de medição dos comprimentos da peça 4 fabricada no torno CNC

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	Fator de abrangência k
	x ₁	x ₂	x ₃			
12,00	12,07	12,09	12,06	12,07	± 0,03	2,23
20,00	20,07	20,10	20,09	20,09	± 0,03	2,23
25,00	24,78	24,71	24,75	24,75	± 0,08	3,31

Tabela 4.22: Dados de medição dos comprimentos da peça 5 fabricada no torno CNC

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	Fator de abrangência k
	x ₁	x ₂	x ₃			
12,00	12,04	12,07	12,05	12,05	± 0,03	2,23
20,00	20,04	20,07	20,06	20,06	± 0,03	2,23
25,00	24,90	24,95	24,90	24,92	± 0,06	2,87

Tabela 4.23: Dados de medição dos comprimentos da peça 6 fabricada no torno CNC

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	Fator de abrangência k
	x ₁	x ₂	x ₃			
12,00	12,04	12,07	12,05	12,05	± 0,03	2,23
20,00	20,06	20,04	20,03	20,04	± 0,03	2,23
25,00	24,61	24,62	24,59	24,61	± 0,03	2,23

De maneira geral, percebe-se uma melhor repetitividade e exatidão nas peças 4, 5, e 6, as quais foram fabricadas no torno CNC. Na peça 1 apenas a dimensão nominal de 12,00 mm apresentou valor médio fora da faixa de tolerância. As peças 2 e 3 apresentaram apenas o valor de 20,00 mm fora da faixa de tolerância. Já as peças 4 e 6 apresentaram apenas o valor médio da dimensão nominal de 25,00 mm fora da faixa de tolerância. Todos os valores médios da peça 5 apresentaram-se dentro da faixa de tolerância.

Um aspecto importante a ser considerado durante a fabricação das peças no torno convencional é que em cada passe realizado para a geração de cada superfície, era feita uma medição, porém, não foram realizadas correções dimensionais ao final de cada escalonamento, com o intuito de se obter o erro sistemático da escala longitudinal e da transversal da máquina-ferramenta. Com relação ao torno CNC, também não foram realizadas correções no programa CNC para compensar os erros sistemáticos das duas escalas pelo mesmo motivo.

4.2.3.3 – Medição dos Diâmetros

As medições de diâmetro foram realizadas, em função das tolerâncias dimensionais, na máquina de medição por coordenadas, modelo Global Perf 07.10.07, cabeçote PH10MQ, apalpador TP20, N° de série GLBPB00074, conforme mostrado na Figura 4.38, pertencente ao Laboratório de Metrologia Dimensional da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. A máquina possui certificado de calibração de N° DEA 276-08 de 27/11/2008, emitido pela HEXAGON – Measurement Technologies. A incerteza de medição relatada é apresentada na equação (4.11) para um fator de abrangência $k = 2,0$. Já o erro de indicação fornecido pelo fabricante é apresentado na equação (4.12). A temperatura média durante as medições foi igual a $20,0^{\circ}\text{C}$. Para cada um dos diâmetros foram realizadas três medições, girando-se a peça após cada ciclo.

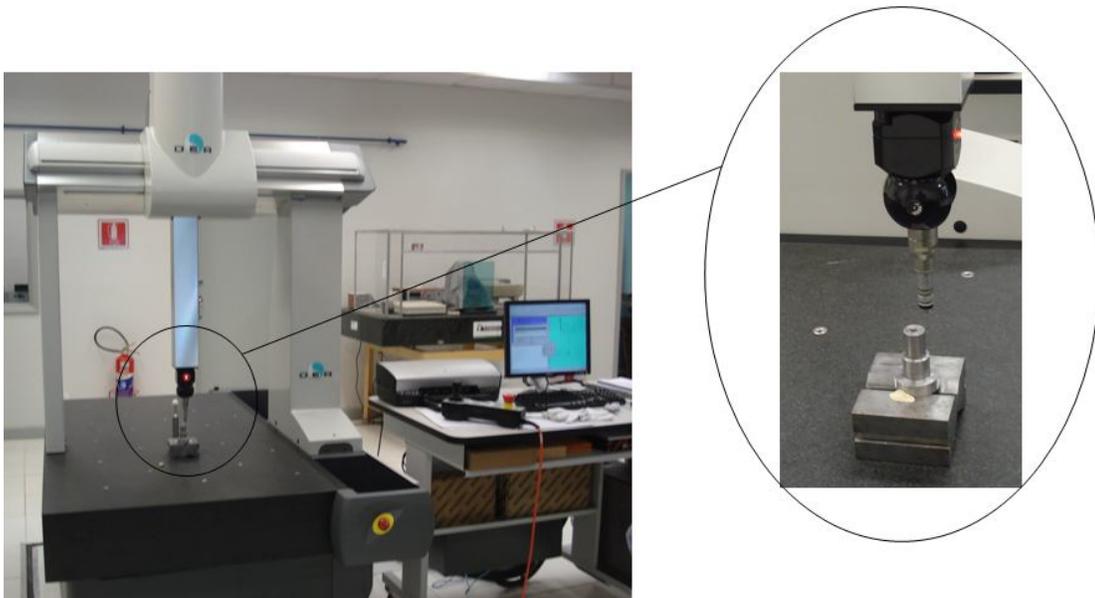


Figura 4.38 – Máquina de medição por coordenadas utilizada para a medição dos diâmetros das peças

$$U = \pm \left(2 + \frac{L}{244} \right) [\mu\text{m}] \quad (4.11)$$

$$E_e = \pm \left(5 + 1,0 \times \frac{L_1}{300} \right) [\mu\text{m}] \quad (4.12)$$

As Tabelas 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam os valores encontrados para cada um dos diâmetros das peças. Foram tomados trinta toques para a determinação da dimensão de 19,0000 mm, quatro toques para a dimensão de 25,0000 mm e vinte toques para a dimensão de 40,0000 mm. Para a determinação da incerteza herdada da equação (4.11) foi tomado como valor de “L”, o valor médio das três medições realizadas para cada um dos diâmetros.

Tabela 4.24: Dados de medição dos diâmetros da peça 1

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Erro de medição (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	k
	x ₁	x ₂	x ₃				
19,0000	18,9158	18,9182	18,9176	18,9172	- 0,0828	± 0,0027	2,14
25,0000	24,9241	24,9266	24,9254	24,9254	- 0,0746	± 0,0027	2,14
40,0000	40,0488	40,0520	40,0490	40,0499	+ 0,0499	± 0,0036	2,37

Desvio de circularidade médio = $(0,0012 \pm 0,0020)$ mm para k = 2,00

Desvio de cilindricidade médio = $(0,0143 \pm 0,0020)$ mm para k = 2,00

Tabela 4.25: Dados de medição dos diâmetros da peça 2

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Erro de medição (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	k
	x ₁	x ₂	x ₃				
19,0000	19,2038	19,2012	19,2013	19,2021	+ 0,2021	± 0,0030	2,23
25,0000	25,0666	25,1189	25,1119	25,0991	+ 0,0991	± 0,0744	4,53
40,0000	40,1682	40,1616	40,1632	40,1643	+ 0,1643	± 0,0075	3,31

Desvio de circularidade médio = $(0,0021 \pm 0,0020)$ mm para k= 2,00

Desvio de cilindricidade médio = $(0,0056 \pm 0,0020)$ mm para k= 2,00

Tabela 4.26: Dados de medição dos diâmetros da peça 3

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Erro de medição (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	k
	x ₁	x ₂	x ₃				
19,0000	18,7740	18,7724	18,7717	18,7727	- 0,2273	± 0,0026	2,12
25,0000	24,7632	24,8054	24,8029	24,7905	- 0,2095	± 0,0621	4,53
40,0000	40,0428	40,0419	40,0430	40,0426	+ 0,0426	± 0,0023	2,01

Desvio de circularidade médio = $(0,0008 \pm 0,0022)$ mm para k = 2,03

Desvio de cilindricidade médio = $(0,0070 \pm 0,0023)$ mm para k = 2,07

Tabela 4.27: Dados de medição dos diâmetros da peça 4

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Erro de medição (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	k
	x ₁	x ₂	x ₃				
19,0000	18,9250	18,9224	18,9226	18,9233	- 0,0767	± 0,0030	2,21
25,0000	24,8663	24,9121	24,9067	24,8950	- 0,1050	± 0,0656	4,53
40,0000	39,8308	39,8311	39,8318	39,8312	- 0,1688	± 0,0023	2,01

Desvio de circularidade médio = $(0,0070 \pm 0,0020)$ mm para k = 2,00

Desvio de cilindricidade médio = $(0,0074 \pm 0,0020)$ mm para k = 2,00

Tabela 4.28: Dados de medição dos diâmetros da peça 5

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Erro de medição (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	k
	x ₁	x ₂	x ₃				
19,0000	18,9220	18,9206	18,9201	18,9209	- 0,0791	± 0,0025	2,07
25,0000	24,8742	24,9136	24,9093	24,8990	- 0,1010	± 0,0567	4,53
40,0000	39,8389	39,8402	39,8392	39,8394	- 0,1606	± 0,0023	2,02

Desvio de circularidade médio = $(0,0009 \pm 0,0020)$ mm para k = 2,00

Desvio de cilindricidade médio = $(0,0066 \pm 0,0035)$ mm para k = 2,65

Tabela 4.29: Dados de medição dos diâmetros da peça 6

Comprimento nominal (mm)	Medições (mm)			Média das indicações (mm)	Erro de medição (mm)	Incerteza expandida de medição (mm)	k
	x ₁	x ₂	x ₃				
19,0000	18,8942	18,8960	18,8958	18,8953	- 0,1047	± 0,0025	2,07
25,0000	24,8512	24,8560	24,8537	24,8536	- 0,1464	± 0,0050	2,87
40,0000	39,8518	39,8523	39,8530	39,8524	- 0,1476	± 0,0023	2,01

Desvio de circularidade médio = $(0,0068 \pm 0,0027)$ mm para k = 2,16

Desvio de cilindricidade médio = $0,0088 \pm 0,0023$ mm para k = 2,05

O diâmetro de maior interesse para este estudo é o de 40,0000 mm, pois as tolerâncias dimensionais para o mesmo foram estabelecidas pelo SGF, tomando-se como base o acabamento superficial, mais especificamente o parâmetro de rugosidade R_a . Este, por sua vez, está diretamente relacionado com o avanço e com o raio de arredondamento da ponta da ferramenta, através das equações (3.7) e (3.8). Logo, verificando-se as dimensões de 40,0000 mm para as seis peças, pode-se perceber que as variações permaneceram muito próximas dos limites de tolerância, conforme pode ser visualizado

nos erros de medição apresentados. Um outro aspecto observado foi que nas peças 4, 5 e 6, fabricadas no torno CNC, os erros de medição foram muito próximos em todas as três medições medidas. Tomando-se, por exemplo, a dimensão de 40,0000 mm, tem-se que na peça 4, o erro de medição foi de $-0,1688$ mm. Na peça 5 esse erro foi de $-0,1606$ mm e na peça 6 foi de $-0,1476$ mm.

É evidente que para que seja estabelecida uma relação entre o avanço e o raio de arredondamento da ponta da ferramenta com a tolerância dimensional, os erros sistemáticos da máquina-ferramenta deverão ser compensados e deve-se ter um controle da fabricação com relação ao estabelecimento do critério de fim de vida da ferramenta, e este, não deverá jamais ser ultrapassado. Os erros sistemáticos das máquinas-ferramentas utilizadas neste trabalho não são conhecidos.

Com relação aos desvios de circularidade e cilindricidade, os valores medidos em todas as peças se encontraram dentro dos limites estabelecidos pelo SGF, até mesmo para o desvio de cilindricidade da peça 1, cujo valor aproximado coincide com o valor limite de 0,01 mm.

4.2.4 Aplicação do Modelo Matemático Proposto

Para a geração de cada uma das três superfícies longitudinais da ponta de eixo da Figura 4.5 foram consideradas as operações de desbaste e acabamento. Logo, os custos diretos referentes à geração de cada uma das dimensões serão compostos pela soma dos custos de desbaste e acabamento.

A Figura 4.39 apresenta a configuração dos custos diretos e incerteza expandida de medição para cada dimensão, em cada um dos tornos. A incerteza expandida adotada foi a maior obtida para cada uma das cotas, considerando as três peças fabricadas em cada máquina-ferramenta.

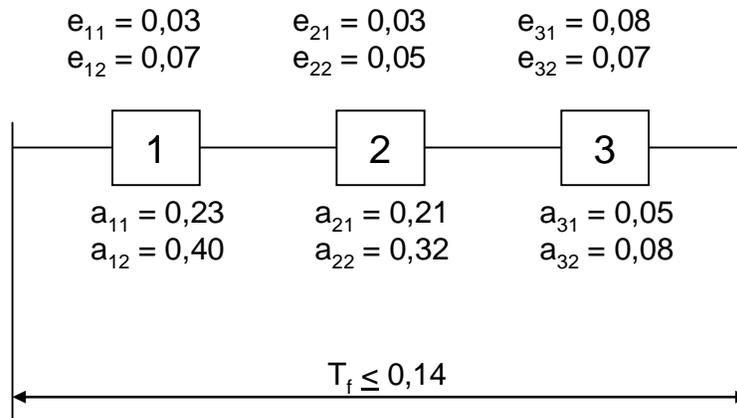


Figura 4.39 – Representação dos parâmetros necessários à síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas

Aplicando-se os dados da Figura 4.39 no modelo matemático composto pelas equações que variam de (4.1) a (4.6), e utilizando-se o programa computacional LINDO, o qual poderá ser acionado diretamente do SGF, obtém-se o seguinte equacionamento:

```

MIN 0.23X11+0.4X12+0.21X21+0.32X22+0.05X31+0.08X32
ST
Z1<=0.08
Z2<=0.1
Z3<=0.11
Z1+Z2+Z3<=0.14
0.03X11+0.07X12-Z1<=0
0.03X21+0.05X22-Z2<=0
0.08X31+0.07X32-Z3<=0
X11+X12=1
X21+X22=1
X31+X32=1
END
GIN X11
GIN X12
GIN X21
GIN X22
GIN X31
GIN X32

```

O resultado da otimização é apresentado na Tabela 4.30. O valor da função objetivo é $y^* = 0,49$. Analisando-se esta tabela constata-se que as variáveis que apresentam valores unitários são: X11, X21 e X31. Isto significa que os afastamentos para a dimensão 1 será igual a $\pm 0,03$ mm, para a dimensão 2 igual a $\pm 0,03$ mm e para a dimensão 3 vale $\pm 0,08$

mm. Um aspecto importante é que foi utilizada apenas uma máquina-ferramenta para a fabricação de toda a peça, o torno CNC. A Figura 4.40 mostra a peça após a síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas. A dimensão que sofreu a maior redução foi a dimensão 2 que baixou de $\pm 0,10$ mm para $\pm 0,03$ mm. O anexo E apresenta os dados de saída do programa LINDO, referentes a esta otimização.

Tabela 4.30: Resultado da otimização para a síntese de tolerâncias determinísticas

Variável	Valor
X11	1
X12	0
X21	1
X22	0
X31	1
X32	0
Z1	0,03
Z2	0,03
Z3	0,08

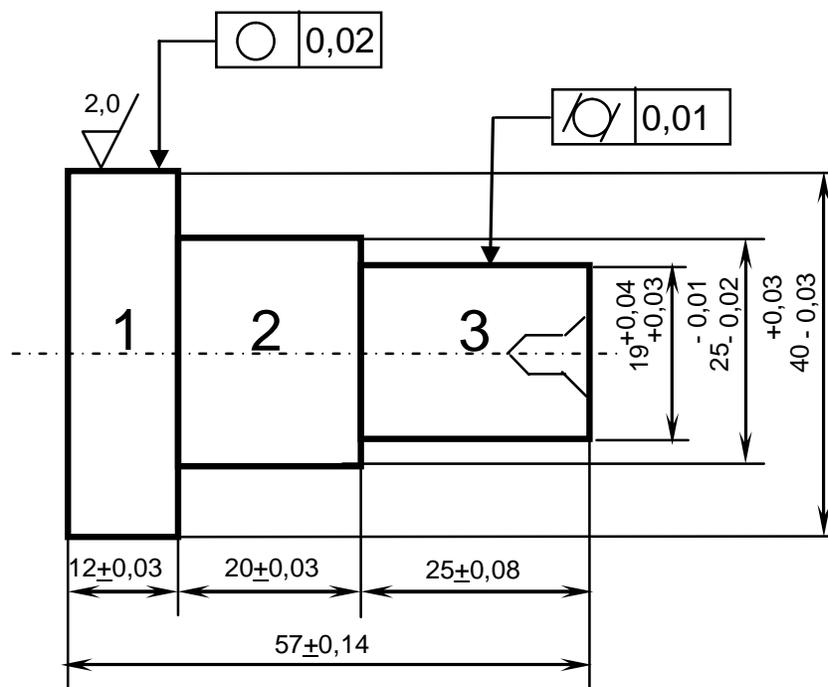


Figura 4.40 – Desenho esquemático da peça após a síntese das tolerâncias

É importante salientar que os parâmetros de fabricação e de medição deverão ser otimizados, pois os mesmos exercem influência nas tolerâncias dimensionais finais das peças a serem fabricadas.

A fim de exemplificar esta afirmação, será refeita a otimização, alterando-se apenas um único parâmetro no torno CNC. Ao invés de se utilizar o avanço ótimo de 0,22 mm/volta, será adotado o avanço não otimizado de 0,10 mm/volta, mantendo-se os mesmos dados de incerteza de medição para cada comprimento medido. A Tabela 4.31 apresenta os novos parâmetros de fabricação, enquanto que a Figura 4.41 apresenta a configuração dos custos diretos e incerteza expandida de medição para cada uma das dimensões e cada um dos tornos.

Tabela 4.31: Novos parâmetros para a fabricação no torno CNC com o avanço de 0,10 mm/volta

OPERAÇÃO	PARÂMETROS	ESCALON.	ESCALON.	ESCALON.
		1	2	3
DESBASTE	Vc (m/min)	171	171	171
	ap (mm)	4,85	6,50	2,00
	Kp (R\$) direto	0,25	0,15	0,05
	Tt (min) direto	0,54	0,32	0,11
ACABAMENTO	Vc (m/min)	171	171	171
	ap (mm)	1,00	1,00	1,00
	Kp (R\$) direto	0,20	0,10	0,04
	Tt (min) direto	0,44	0,22	0,09

$$e_{11} = 0,03$$

$$e_{12} = 0,07$$

$$e_{21} = 0,03$$

$$e_{22} = 0,05$$

$$e_{31} = 0,08$$

$$e_{32} = 0,07$$

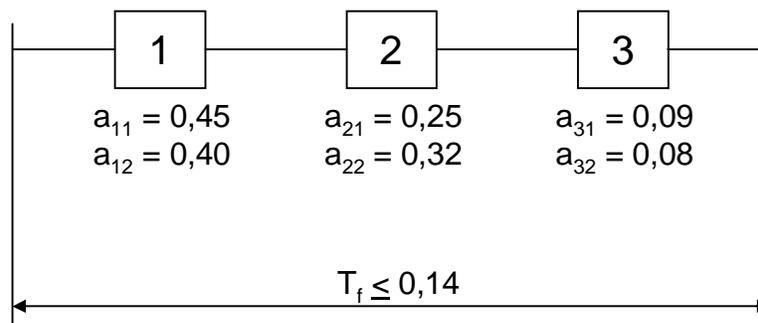


Figura 4.41 – Representação dos parâmetros necessários à síntese das tolerâncias dimensionais, considerando-se o avanço de 0,10 mm/volta para o torno CNC

De posse de todos os dados necessários ao modelo matemático, parte-se para o equacionamento desta situação, conforme mostrado abaixo. O resultado do equacionamento é apresentado na Tabela 4.32.

```

MIN 0.45X11+0.4X12+0.25X21+0.32X22+0.09X31+0.08X32
ST
Z1<=0.08
Z2<=0.1
Z3<=0.11
Z1+Z2+Z3<=0.14
0.03X11+0.07X12-Z1<=0
0.03X21+0.05X22-Z2<=0
0.08X31+0.07X32-Z3<=0
X11+X12=1
X21+X22=1
X31+X32=1
END
GIN X11
GIN X12
GIN X21
GIN X22
GIN X31
GIN X32

```

Tabela 4.32: Resultado da otimização para a síntese de tolerâncias determinísticas, considerando o avanço não otimizado do torno 1 igual a 0,1 mm/volta

Variável	Valor
X11	1
X12	0
X21	1
X22	0
X31	0
X32	1
Z1	0,03
Z2	0,03
Z3	0,07

Nesta situação, o valor da função objetivo aumentou para $y^* = 0,78$. Analisando-se a Tabela 4.32, constata-se que de acordo com esta otimização, o torno 1 executaria as dimensões 1 e 2, enquanto que o torno 2 executaria a dimensão 3. O primeiro aspecto a ser analisado nesta situação é que seria impraticável e sem a menor lógica, a execução de uma peça tão simples em dois tornos diferentes. Por outro lado, a diminuição de 0,12 mm/volta em relação ao avanço ótimo fez com que o custo para geração da dimensão 3 fosse menor no torno Nardini que no torno CNC. Isto evidencia a necessidade da aplicação deste modelo matemático apenas com parâmetros ótimos de fabricação, o que implica na necessidade de sempre utilizá-lo em conjunto com o programa SGF.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através dos estudos realizados no âmbito deste trabalho é possível se concluir que a síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas envolve a determinação de uma série de variáveis que vão desde a fase de projeto até a fase de medição, passando pelos parâmetros do processo de fabricação.

O modelo matemático apresentado neste trabalho reflete as três fases ligadas ao produto: projeto, fabricação e medição, pois o toleranciamento inicial envolve questões como o ajuste, o acabamento superficial, a precisão da máquina-ferramenta e o tipo de acoplamento. Já a síntese das tolerâncias envolve todos os parâmetros de processo refletidos na condição do mínimo custo ou da máxima produção para a geração de cada superfície, bem como na incerteza do sistema de medição ou na incerteza da máquina-ferramenta no tocante aos seus deslocamentos.

Para o modelo proposto neste trabalho, há a necessidade de se fabricar apenas poucas peças em cada máquina-ferramenta, ao contrário do modelo que trabalha a variabilidade 3σ do processo, que dependendo da situação poderá necessitar de um número maior de peças fabricadas.

Este modelo matemático poderá ser gerado com a função objetivo representando o tempo total para geração de cada uma das dimensões. Tal prática deverá ser utilizada quando a perspectiva de lotes volumosos for identificada já na concepção do projeto.

Fica evidente a necessidade de se trabalhar no toleranciamento do processo, com um programa computacional integrador, ou seja, que mobilize em um único compartimento, as fases de projeto, fabricação e medição de forma integrada, mas que também permita a utilização de cada um dos módulos em separado. Além disto, é importante que tal programa possua uma integração com a programação linear. Esta é a concepção do SGF.

Um aspecto a ser considerado para a eficiência da síntese das tolerâncias diz respeito à qualidade dos valores obtidos tanto com relação ao custo quanto ao tempo de geração de cada superfície, quanto com relação à incerteza de medição adotada ou a incerteza da máquina-ferramenta. Estes parâmetros deverão ser otimizados de modo a se

escolher a máquina-ferramenta correta, bem como o sistema de medição mais adequado. Ficou evidenciado neste trabalho que variando-se, por exemplo, o avanço, pode-se mudar completamente a alocação das tolerâncias finais, bem como a seleção da máquina-ferramenta mais adequada para a fabricação da peça em questão. No exemplo apresentado neste trabalho, variando-se o avanço em 0,10 mm/volta, mudou não apenas as tolerâncias finais, mas também a máquina-ferramenta escolhida, devendo ser fabricada duas dimensões em um torno e uma dimensão em um outro torno, o que não condiz com a fabricação otimizada.

A ferramenta programação linear apresenta-se neste tipo de otimização como uma ferramenta de grande importância, pois possibilita que se obtenha a melhor condição de resposta, combinando-se, direta ou indiretamente, todas as variáveis de influência no processo.

Conclui-se também que o processo de medição é parte integrante do processo de fabricação e do projeto de uma determinada peça, pois os dados obtidos da medição têm uma influência tanto na otimização do toleranciamento quanto na seleção da máquina-ferramenta mais adequada para a fabricação de um produto por usinagem.

Através da relação entre a tolerância dimensional e o parâmetro de rugosidade R_a e entre R_a com o avanço e o raio de arredondamento da ponta da ferramenta, pode-se determinar o avanço máximo e o raio de arredondamento mínimo para se obter uma dada tolerância dimensional limite. No entanto, deve-se considerar a influência dos outros parâmetros, tais como: operador, desgaste da ferramenta, desvios da máquina-ferramenta, rigidez da máquina-ferramenta, utilização ou não de fluido refrigerante, formas de aplicação do fluido refrigerante, fixação da peça, fixação da ferramenta e referenciamento da ferramenta.

Os dados experimentais gerais mostraram a constatação da relação entre o parâmetro de rugosidade R_a com o avanço e o raio de arredondamento da ponta da ferramenta adotados.

O modelo matemático desenvolvido no âmbito deste trabalho para a síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas garante que a tolerância encontrada jamais ultrapassará uma tolerância parcial limite.

Com relação ao módulo de fabricação, atualmente o SGF determina a velocidade de corte ótima, considerando o critério de mínimo custo ou o de máxima produção. Todavia, a situação ideal de otimização para uma dada aplicação poderá ser obtida com a velocidade

variando entre estes dois valores extremos. É importante que no futuro, seja inserida uma rotina para que o programa possa verificar a possibilidade de se obter esta condição intermediária, que dependerá, fundamentalmente, do tempo que se dispõe para a fabricação de uma demanda específica.

O SGF é um programa flexível e permite a atualização de valores de tolerância geométrica e de outros parâmetros de processo como por exemplo, valores da fórmula de Taylor expandida.

As peças fabricadas no torno CNC apresentaram uma maior exatidão em comparação com as peças fabricadas no torno convencional Nardini. Um aspecto que contribuiu para isto foi a diferença dos ângulos de posição das duas ferramentas de corte utilizadas. Enquanto que na ferramenta utilizada no torno Nardini o ângulo de posição vale 75°, este mesmo ângulo na ferramenta do torno CNC é igual a 93°.

Finalmente, constata-se que o projeto de engenharia da fabricação por usinagem contempla o projeto de três fases que estão interligadas e dependentes. A fase de projeto do produto onde são determinadas as tolerâncias dimensionais e geométricas com base nas exigências funcionais das peças. O projeto de fabricação diz respeito à seleção das máquinas-ferramenta, ferramental e dos parâmetros de usinagem, e os custos e tempos envolvidos no ciclo de usinagem. O projeto de medição envolve a determinação do sistema de medição mais adequado para a verificação do produto com base nas exigências previamente determinadas na fase de projeto do mesmo. A última etapa é, portanto, o processo de otimização do projeto com base nas variáveis ligadas à fabricação e à medição. Só após a conclusão desta última etapa é que se pode dizer que se realizou plenamente o projeto de fabricação por usinagem.

A idéia é em um futuro próximo, expandir o módulo de fabricação para uma maior abrangência do processo de torneamento, bem como para os processos de fresamento e furação. Além disto, tem-se como objetivo a criação de um módulo do SGF específico para o controle estatístico de processo.

Em resumo, tem-se as seguintes conclusões:

- Síntese das tolerâncias está relacionada a muitas variáveis;
- Síntese das tolerâncias dependerá dos parâmetros ótimos;
- O modelo matemático apresentado garante que a tolerância encontrada jamais ultrapassará a tolerância limite;

- As peças fabricadas no torno CNC apresentaram uma maior exatidão nas medições de comprimento;
- Todos os parâmetros de fabricação gerados pelo SGF foram obtidos na prática;
- Acabamento superficial dentro do estabelecido e
- Programa integrador é fundamental para a síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas.

Como recomendações para trabalhos futuros, tem-se:

- Ampliação do módulo de fabricação do SGF;
- Inserção de um módulo de controle estatístico de processo;
- Realização da aquisição automática de dados de medição e
- Testar o modelo matemático proposto para outros processos de fabricação.

Referências Bibliográficas

17^a CGPM, resolução 1, CR 97 e metrologia, Sèvres, 1983.

A2LA Guide for the estimation of the uncertainty of dimensional calibration and testing results. Edited by Thomas M. Adams, Frederick, July, 2002.

ABDOU, G.; CHANG, R. TVCAPP tolerance verification in computer-aided process planning. INT. J. Prod. Res. Vol 31, nº 2, London, 1993.

ABNT 6405 – Rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro, 1988.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S. & LIRANI, J. Tolerâncias, ajuste, desvios e análise de dimensões. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1977.

AQUINO, J. L. S. TOL: um simulador educacional de tolerância em furos e eixos para apoio à disciplina de desenho mecânico. Dissertação de Mestrado em Computação. UECE/CEFETCE, Fortaleza, 2003.

ASME Y14.5M. “Dimensioning and tolerancing”. Revision of ANSI Y14.5M-1982. New York, 1994.

BATISTA, A. J. “Desenvolvimento de um aplicativo para cálculo dos custos de torneamento. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPE, Recife, 2005.

BENNICH, P. Geometrical measurements. Metro Trade Workshop – traceability and measurement uncertainty in testing, Berlin, 2003.

BET, L. Estudo da medição da textura de superfícies com sonda mecânica e com sondas ópticas tipo seguidor. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BRAMMERTZ, P. H. Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindreihen. Bericht aus dem Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der TH Aachen, 1961.

BULBA, E. A. Conformidade na manufatura e nível de qualidade. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

CASSIER, Z. Critérios de optimización de parâmetros de corte en el torneado de piezas utilizando sistemas CAD-CAM, Departamento de Mecânica – Universidad Simón Bolívar, Caracas, 1986.

CHASE, K & PARKINSON, A. A survey of research in the application of tolerance analysis to the design of mechanical assemblies. Res. Eng. Dês. Vol 1, N° 3, pp 23 – 37, Toronto, 1991.

CONMETRO – Quadro geral das unidades de medidas. Resolução do CONMETRO n° 12 de 1998, 2ª edição, Brasília, 2000.

COUTO, P. R. G. “Estimativa da incerteza de medição na análise química”. Apostila. Cooperação técnica Alemanha – Brasil. Projeto Metrologia Nordeste II. Recife, 2002.

DEIAB, I. M. & AL-ANSARY, M. D. Concurrent Optimization of Design and Machining Tolerances Using the Genetic Algorithms Method. Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 37. No. 12, pp. 1721-1731, Elsevier, Great Britain, 1997.

DIN 4762 – Surface roughness; Terminology, Berlin, 1989.

DIN 4768 – Ermittlung der Rauheitsmeßgrößen Ra, Rz, Rmax mit elektrischen Tastschnittgeräten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1974.

DOYLE, L. E. Manufacturing processes and materials for engineers. Prentice – Hall, New Jersey, 1962.

DUNNARUMMA, A. & GIORLEO, G. “A contribution to the study of tolerancing technology”. The international journal of advanced manufacturing technology, pp 291-294, London, 2002.

EA 4/02 – Expression of the uncertainty of measurement in calibration. European Cooperation for Accreditation, Paris, 1999.

ERMER, D. S. & KROMODIHARDJO, S. Optimization of multipass turning with constraints. Journal Engineering for Industry, vol. 3, pp 462-468, ASME, New York, 1981.

FENG, C.; WANG, J. & WANG, J. S. “An optimization model for concurrent selection of tolerances and suppliers”. Computers & Industrial Engineering 40, Elsevier, Great Britain, 2001.

FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. Vol. 1, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1977.

FERRARESI, D. Otimização das condições de usinagem em produção seriada. Revista máquinas e metais, pp. 24 – 37, Editora Aranda, São Paulo, novembro de 1989.

FLACK, D.; BEVAN, K. “Fundamental good practice in the design and interpretation of engineering drawings for measurement processes”. National Physical Laboratory, Middlesex, July, 2005. ISSN 1368-6550.

FLEISCHER, J.; PETER, K. & ENDER, T. “Redução dos tempos de preparação beneficia a flexibilidade na produção”. Revista Máquinas e Metais, nº 508, PP 128 – 137, Editora Aranda, São Paulo, maio de 2008.

GRUESO, J. M. & ROJAS, F. A. “Análise dimensional ajuda a avaliar o custo-desempenho de ferramentas de tornear”. Revista Máquinas e Metais, nº 517, Editora

Aranda, São Paulo, fevereiro, 2009.

GUIMARÃES, V. A. “Controle dimensional e geométrico – uma introdução à metrologia industrial. Editora da Universidade do Passo Fundo, Passo Fundo, 1999.

HARREL, C. R.; GHOSH, B. K. & BOWDEN, R. “Simulation using promodel”. Mc Graw-Hill, Boston, 2000.

HE, J. E. “Tolerancing for manufacturing via cost minimization”. Int. J. Mach.Tools Manufact., Pergamon – Elsevier Science, Vol. 31, nº 4, Great Britain, 1991.

HUNTER, R.; GUZMAN, M.; MÜLLER, J. and PEREZ, J. “Implementation of a tolerance model in a computer aided design and inspection system”. Achievements in Materials and Manufacturing Engineering – AMME. Volume 17, ISSUE 1-2, july – august, Gliwice, 2006.

ISO 1101. “Geometrical product specifications (GPS). Geometrical tolerancing. Tolerances of form, orientation, location and run-out”. TDW/4, Genève, 2004.

ISO 3685. “Specification for tool-life testing with single point turning tools. Second edition, Genève, 1993.

ISO 8402. Gestión de la calidad y aseguramiento de la calidad. Vocabulário, Buenos Aires, 1994.

ISO/ABNT NBR 10012-1 – Requisitos de garantia da qualidade para equipamentos de medição - parte 1: sistema de comprovação metroológica para equipamentos de medição . ABNT, Rio de Janeiro, 1993.

ISO GUM - Guia para a expressão da incerteza de medição – Terceira edição brasileira em língua portuguesa – Rio de janeiro: ABNT, INMETRO, 2003.

JI, P.; KE, M. & AHLUWALIA, R. R. Computer-aided operational dimensioning for process planning. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35 N° 10, pp 1353-1362, Great Britain, 1995.

JR, P. J. D. *Dimensioning and tolerancing handbook*. McGraw-Hill, ISBN 0-07-018131-4, New York, 1999.

JUNIOR, R. S. U. R. Determinação das condições otimizadas de usinagem com aplicação em torneamento. *Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*, 1995.

JUSTER, N. Modelling and representation of dimensions and tolerances: a survey. *Comput. Aided Dês.* Vol 24, N° 1, pp 3 – 17, Elsevier, Great Britain, 1992.

KIENZLE, O. *Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen*. VDI, Hannover, p. 299-305, 1952.

KIM, S. H. & KNOTT, K. A pseudo-boolean approach to determining least cost tolerances. *International journal of production research.* Vol 26, N° 1, pp 157-167, London, 1988.

KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren*, vol. 1, p.178 – VDI – Verlag gmbH – Düsseldorf, 1984.

KRAUSE, F. L. & GOLM, F. *Planning and multicriteria optimization of design processes*. CIRP ANNALS, Elsevier, Oxford, 1996.

KREYSZIG, E. *Statistische Methoden und Ihre Anwendungen*. Vandenhoeck & Ruprecht. ISBN 3-525-40717-3, Göttingen, 1985.

KUMAR, A. S.; RAJA DURAI, A.; SORNAKUMAR, T. “Yttria ceramics: cutting tool application”. *Materials Letters* 58, Amsterdam, 2004, pp. 1808– 1810.

KUMAR, A. S., RAJA DURAI, A.; Sornakumar, T.. “Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels”. *Tribology International* 39, Elsevier, Great Britain, (2006), pp. 191–197.

KUMAR, A.S.; RAJA DURAI, A.; SORNAKUMAR, T. “The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel”. *Journal of Materials Processing Technology* 173, Elsevier, Great Britain, 2006, pp. 151–156.

KURAMOTO, A. Ensaio de Força de Corte – Relatório. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

KUSIAK, A. & FENG, C. “Deterministic tolerance synthesis: a comparative study”. *Computer-aided design*, vol. 27, nº 10, Great Britain, 1995.

LANZER, E. A. Programação linear: conceitos e aplicações. 2a edição. Serviço editorial do Instituto de Planejamento Econômico e Social. Rio de Janeiro, 1988.

LAW, A. & KELTON, D. “Simulation modeling and analysis”. New York, Mc Graw-Hill, Boston, 2000.

LEE, W. J. & WOO, T. C. “Optimum selection of discrete tolerances”. *Journal of mechanisms, transmissions and automation in design*, 111, ASME, New York, 1989.

LEVINE, D.; BERENSON, M.; STEPHAN, D. Estatística: teoria e aplicações. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2000.

LINDSTRÖM, B. Cutting data field analysis and predictions – par 1: straight Taylor slopes. *Cirp annals*, vol. 38, 1989, pp. 103-106.

LINK, W. Metrologia mecânica – expressão da incerteza de medição. Rio de Janeiro, 1997.

LINK, W. Tópicos avançados de metrologia mecânica – Confiabilidade metrológica e suas aplicações. 1a ed., São Paulo, 2000.

MACHINING DATA HANDBOOK. 3rd edition, volume two. Compiled by the technical staff of the Machinability Data Center, Ohio, 1980.

MAURIS, G. Propagation of measurement uncertainty expressed by a possibility distribution with coverage-interval-based semantics. XVIII IMEKO WORLD CONGRESS. Metrology for a sustainable development. Rio de Janeiro, Brazil, 2006.

MAZIERO, N. L.; FERREIRA, J. C. E. & GUBERT, E. “Desenvolvimento de um banco de dados de tolerâncias visando a integração com um sistema CAD”. Congresso brasileiro de engenharia mecânica, São Paulo, 1997.

MESQUITA, N. G. M. Determinação dos Parâmetros da Fórmula Expandida de Taylor. Dissertação da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1980.

MITUTOYO SUL AMERICANA. Catálogo geral de produtos PG405. Publicação da Mitutoyo. São Paulo, 2000.

MONTE, M. & DATSERIS, P. Optimum tolerance selection for minimum manufacturing cost and other design criteria. ASME technical paper 82-DET35, New York, 1982, pp. 1-9.

NBR ISO 2768-1. Parte 1: Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, fevereiro, 2001.

NBR ISO 2768-2. Parte 2: Tolerâncias geométricas para elementos sem indicação de tolerância individual. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, fevereiro, 2001.

NBR 6158 – Sistema de tolerâncias e ajustes. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, junho, 1995.

NBR 6409 – Tolerâncias de forma e tolerâncias de posição. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, dezembro, 1997.

NBR ISO 6892 – Materiais Metálicos – Ensaio de Tração à Temperatura Ambiente, ABNT, Rio de Janeiro, 2002.

NBR NM/87-1 – Materiais Metálicos – Dureza Brinell – Parte 1: Medição da Dureza Brinell, ABNT, Rio de Janeiro, 1999.

NGOI, B. K. A.; ONG, C. T. Product and process dimensioning and tolerancing techniques. A state-of-the-art review. Int J Adv Manuf Technol, Springer-Verlag London Limited, London, 1998.

NIELSEN, H. S. ISO 14253-1. Decision rules – good or bad? National conference of standards laboratories. Workshop & symposium, 1999.

NIELSEN, H. S. “Specifications, operators and uncertainties”. Proceedings of the 8th CIRP seminar on computer aided tolerancing, Charlotte, NC, 2003.

NOPPEN, G.; SIGALLA, J.; CZICHOS, H.; PETERSOHN, D. & SCHWARZ, W. Technische Oberflächen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1985.

NOVASKI, O. Introdução à engenharia de fabricação mecânica. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1994.

OLIVEIRA, J. E. F. de. Otimização de processos de fabricação por usinagem via programação linear. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPE, Recife, 1999.

OLIVEIRA, J. E. F. de; MESQUITA, N. G. M. & YADAVA, Y. P. Tolerâncias dimensionais de peças usinadas com pastilhas cerâmicas – um estudo de caso. 4º Congresso de Engenharia de Fabricação, Estância de São Pedro, 2007.

OLIVEIRA, José Eduardo Ferreira de. A metrologia aplicada aos setores industrial e de serviços. Principais aspectos a serem compreendidos e praticados no ambiente organizacional. Brasília: SEBRAE, 2008. CDU 339.37:677.

OSTWALD, P. & HUANG, J. A method for optimal tolerance selection. ASME J. Eng. Indust. Vol 109, nº 4, New York, 1977, p. 558-565.

PRASAD, A. Optimal selection of process for turning operation in CAPP system. Taylor and Francis Ltd, International Journal of Product Research, Vol. 3, Issue 6, pp. 1495-1522, London, 1997.

PEREIRA, M. W.; MANKE, A. L.MDPA – Uma metodologia de desenvolvimento de produtos aplicado em engenharia simultânea. 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, Florianópolis, 2001.

POTTER, R. W. The art of measurement – theory and practice. Prentice-Hall, New Jersey, 2000. ISBN 0-13-026174-2.

PROVENZA, F. “Tolerâncias ISO”. Editora F. Provenza, São Paulo, 1995.

ROLIM, T. L. Sistemática indicadora de método para a calibração de máquinas de medição por coordenadas. Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB, João Pessoa, 2003.

SAE J 403 – Chemical Compositions of SAE Carbon Steels, 2001.

SCHNEIDER, F. “Tolérancement Géometrique – Interpretation. Publication de L’Université de Metz, Metz, 2005.

SFANTSIKOPOULOS, M. M.; DIPLARIS, S. C. & PAPAZOGLU, P. N. Concurrent dimensioning for accuracy and cost. Int J Adv Technol 10: 263-268. Springer-Verlag London Limited, London, 1995.

SILVA, W. A. da. “Otimização de parâmetros da gestão baseada em atividades (ABM) aplicada a uma célula de manufatura”. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá, 2005.

SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES – SI. 6. ed. Brasília, SENAI/DN, Brasília, 2000. ISBN 85-87-87090-85-2.

SLEELE, A. Analysis of measurement comparisons. XVIII IMEKO WORLD CONGRESS. Metrology for a sustainable development. Rio de Janeiro, Brazil, 2006.

SMATHERS, E. W. & OSTWALD, P. F. Optimization of component functional dimensions and tolerances. ASME, 72-DE-18, New York, 1972.

SRIRAMAN, V. & LEON, J. “Teaching geometric dimensioning and tolerancing in a manufacturing program”. Journal of Industrial Technology. Volume 15, nº 3, may 1999 to July, Michigan, 1999.

STEMMER, C. E. Ferramentas de corte: Ferramentas simples de toronar, 2ª edição, Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

TEERAVARAPRUG, J. “Deterministic tolerance synthesis with a consideration of nominal values”. Thammasat Int. J. Sc. Tech, vol. 7, nº 1, Thailand, January-April, 2002.

TEERAVARAPRUG, J. “A comparative study of probabilistic and worst-case tolerance synthesis”. Engineering Letters, 14:1, EL_14_1_5. Advance online publication: 12, Hong Kong, February 2007.

TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK. Society of manufacturing engineers. Volume 1, Machining, Fouth Edition, Michigan, 1983.

UNE-EN ISO 14253-1. Especificación geométrica de productos (GPS). Parte 1: Reglas de decisión para probar la conformidad o no conformidad com las especificaciones. Norma española, Génova, 1998.

URRUTIA, J. D. Avaliação dos processos de medição na indústria baseada no impacto econômico da operação de controle geométrico. Congresso Brasileiro de Metrologia – Metrologia 2000, São Paulo, 2000.

VIM – Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia, 2ª edição, INMETRO/SENAI, Brasília, 2000.

VOELCKER, H. A current perspective on tolerancing and metrology. Proc. Int. Fórum Dimensional Tolerancing & Metrology. ASME, New York, pp 49 – 66, 1993.

VUOLO, J. H. Fundamentos da teoria de erros. Editora Edgard Blücher, 2ª edição, São Paulo, 1996. ISBN 8521200560.

WANG, J. X.; JIANG, X.; MA, L. M.; XU, Z. G.; LI, Z. Decision Rules for Workpieces based on Total Uncertainty. Springer Verlag London Limited, London, 2005.

WEGENER, K & BRINGMANN, B. Em busca da medição perfeita. Revista Máquinas e Metais, nº 498, Editora Aranda, São Paulo, julho, 2007.

WEISSMANN, C. Tolerâncias de forma e de posição. Padronização industrial. Mundo mecânico, MM Editora Ltda, 1978.

WIDIA – Richtwerte Für Das Drehen Von Eisen-Werkstoffen. Krupp Widia GMBH Werkzeugtechnik, Essen, 1990.

WOOD, B. M. & DOUGLAS, R. J. Confidence-interval interpretation of a measurement pair for quantifying a comparison. Metrologia, 35, pp 187-196, Sèvres, 1998.

WU, Z.; ELMARAGHY, W. H. & ELMARAGHY, H. A. Evaluation of cost-tolerance algorithms for design tolerance analysis and synthesis. ASME Manufacturing Review, Vol 1, nº 3, New York, 1988.

ZHANG, H.C., HUQ, M.E. Tolerancing techniques: the state-of-the-art. INT. J. PROD. RES., VOL. 30, No 9, pp. 2111-2135, London, 1992.

ZHANG, H. C. Advanced Tolerancing Techniques. Willey Series in Engineering Design and Automation, New York, 1997. ISBN 0471145947, 9780471145943.

Anexo A

Valores do fator de abrangência “k” para a distribuição t-Student para graus de liberdade v em função da confiabilidade (68,27%; 95,45% e 99,73% para k = 1, 2 e 3 respectivamente) (ISO GUM, 2003).

Graus de liberdade	P = 68,27%	P = 95,45%*	P = 99,73%
1	1,84	13,97	235,80
2	1,32	4,53	19,21
3	1,20	3,31	9,22
4	1,14	2,87	6,62
5	1,11	2,65	5,51
6	1,09	2,52	4,90
7	1,08	2,43	4,53
8	1,07	2,37	4,28
9	1,06	2,32	4,09
10	1,05	2,28	3,96
11	1,05	2,25	3,85
12	1,04	2,23	3,76
13	1,04	2,21	3,69
14	1,04	2,20	3,64
15	1,03	2,18	3,59
16	1,03	2,17	3,54
17	1,03	2,16	3,51
18	1,03	2,15	3,48
19	1,03	2,14	3,45
20	1,03	2,13	3,42
25	1,02	2,11	3,33
30	1,02	2,09	3,27

Continuação do Anexo A: Valores do fator de abrangência “k” para a distribuição t-Student para graus de liberdade ν em função da confiabilidade (68,27%; 95,45% e 99,73% para $k = 1, 2$ e 3 respectivamente) (ISO GUM, 2003).

Graus de liberdade	P = 68,27%	P = 95,45%*	P = 99,73%
35	1,01	2,07	3,23
40	1,01	2,06	3,20
45	1,01	2,06	3,18
50	1,01	2,05	3,16
100	1,005	2,025	3,077
∞	1,000	2,000	3,000

* Grau de confiabilidade da incerteza de medição mundialmente adotada nos certificados de calibração.

Anexo B

Manual do usuário do SGF

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA FABRICAÇÃO – SGF

MANUAL DO USUÁRIO

Autor: José Eduardo Ferreira de Oliveira
Revisão 00, janeiro de 2009

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	3
2 – INSTALAÇÃO DO PROGRAMA	4
2.1 – Configurando o computador	4
3 - ABERTURA	7
3.1 - Educativo	7
3.2 – Tolerâncias geométricas	9
4 – MÓDULO DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS	12
4.1 – Tolerância em função da incerteza da máquina-ferramenta	12
4.2 – Seleção dos ajustes através do sistema furo base	13
4.3 – Tolerância em função do acabamento superficial	18
4.4 – Tolerância de execução grosseira de peças isoladas	19
4.5 – Seleção dos ajustes através do sistema eixo base	19
5 – MÓDULO DE FABRICAÇÃO	21
5.1 – Dados referentes à Fórmula Expandida de Taylor	22
5.2 – Seleção do desgaste de flanco	24
5.3 – Determinação do avanço máximo permissível	24
5.4 – Determinação dos parâmetros ótimos de usinagem	25
5.5 – Otimização com base na velocidade de mínimo custo	27
6 – MÓDULO DE MEDIÇÃO	30
6.1 – Seleção do sistema de medição e expressão do resultado de medição	30
6.2 – Determinação do intervalo de conformidade	33
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

1 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste manual é apresentar a forma de utilização dos recursos do programa SGF. O programa é dividido em cinco módulos como segue:

- Módulo educativo;
- Módulo de toleranciamento dimensional;
- Módulo de toleranciamento geométrico;
- Módulo de fabricação e
- Módulo de medição.

O SGF foi desenvolvido dentro do Excel, utilizando o recurso VBA – Visual Basic for Application, com o objetivo de alinhar os recursos do Excel com a funcionalidade do visual basic.

Todos os módulos existentes poderão funcionar de forma independente ou integrada, a critério do usuário. Além disto, o SGF possui um link para o programa de programação linear LINDO – Linear Interactive aNd Discrete Optimizer.

Antes de começar a operar o programa, leia atentamente todo este manual.

2 – INSTALAÇÃO DO PROGRAMA

Para a realização da instalação do SGF, deve-se, inicialmente, copiar a pasta SGF no diretório “C” do computador. Em seguida, abra esta pasta e o arquivo executável é o SGF2.xls.

Clique duas vezes sobre este arquivo e execute os seguintes passos:

- 1 – clique em “Habilitar Macros”, conforme figura 4 (caso esta tela não apareça no computador, passe para o item 2.1 deste manual);
- 2 – Entre com a senha que acompanha o disco de instalação (**Guarde esta senha, pois todas as vezes que você acessar o programa, a mesma lhe será solicitada**).

2.1 – Configurando o computador

O programa SGF contém “Macros” que dependendo do nível de segurança do computador, poderão não ser habilitadas.

Ao se clicar duas vezes no arquivo SGF2.xls, caso o nível de segurança esteja em “muito alto” ou “alto”, aparecerá a caixa de diálogo, conforme figura 1.

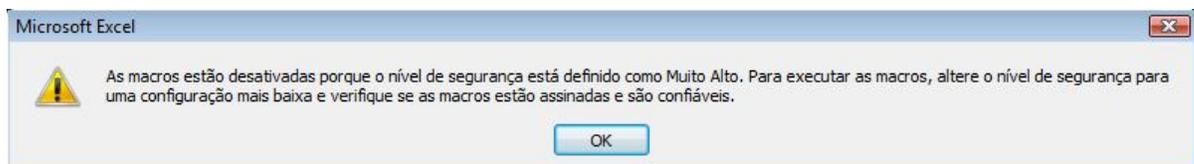


Figura 1 – Solicitação para alteração do nível de segurança

Para se realizar a alteração do nível de segurança, deve-se seguir os seguintes passos (ver figura 2):

- 1 – abra o programa (SGF2.xls);
- 2 – vá até a parte superior da tela e clique no menu “Ferramentas”;
- 3 – clique em “Macro”;
- 4 – clique em “Segurança”;
- 5 – escolha o nível de segurança “Médio”, conforme apresentado na figura 3 e
- 6 – feche o programa e abra-o novamente.

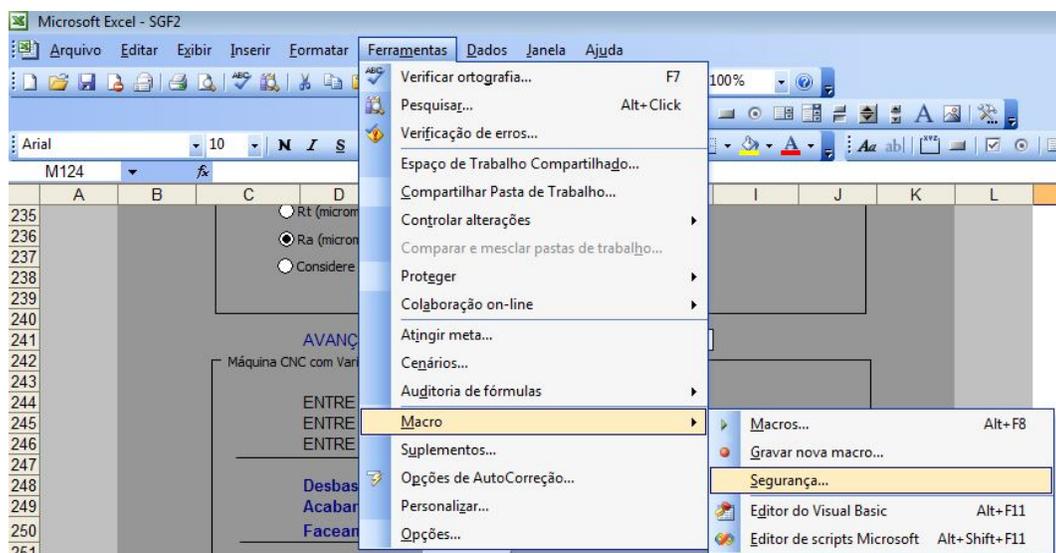


Figura 2 – Passo a passo para alteração da configuração de segurança do computador

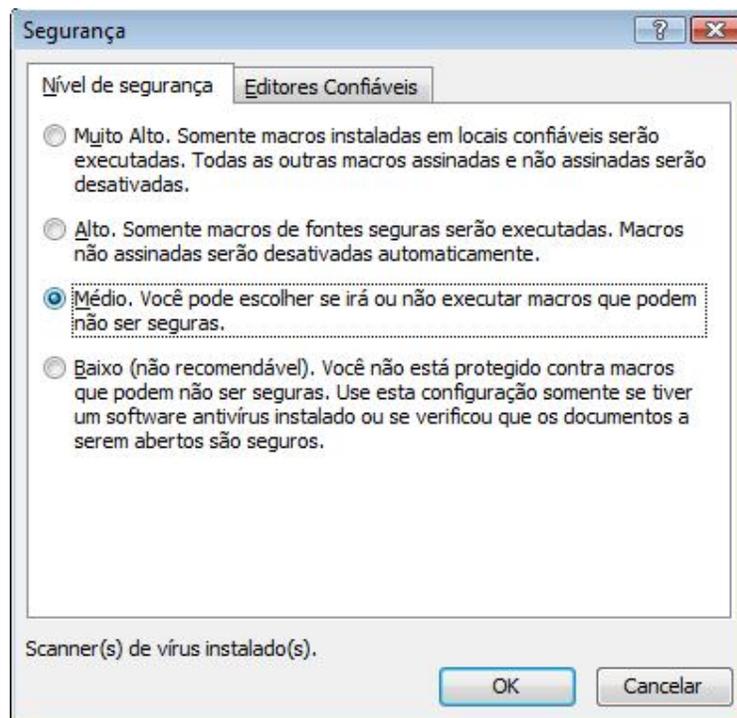


Figura 3 – Seleção do nível de segurança

Ao se abrir o programa com o nível de segurança já em “Médio”, aparecerá a tela conforme figura 4. Escolha “Habilitar macros”.

OBS: CASO O COMPUTADOR JÁ ESTIVESSE COM ESTE NÍVEL DE SEGURANÇA, ESTA MESMA TELA APARECERIA, BASTANDO PARA TAL, SE CLICAR EM “HABILITAR MACROS”.



Figura 4 – Opção para habilitar as macros

Durante a inserção dos dados, utilize a vírgula ao invés do ponto para expressar números com casas decimais.

3 – ABERTURA

Ao se abrir o programa SGF, aparecerão na parte “Inicial”, cinco ícones, conforme mostrado na figura 5.



Figura 5 – Tela “Inicial” do SGF

O ícone “LINDO” aciona o programa de programação linear LINDO (Linear Interactive aNd Discrete Optimizer). Já o ícone “Educativo” refere-se ao módulo educativo do programa que é um módulo complementar e será apresentado a seguir.

O ícone “Tolerâncias Geométricas” apresenta os desvios máximos permissíveis de forma, posição e combinados, sendo tratado mais adiante neste mesmo tópico. Além disso, o ícone “Sobre o Programa” refere-se à concepção do mesmo, enquanto que o ícone “Ajuda” é um link para este manual.

3.1 - Educativo

Este módulo foi concebido com o objetivo de apresentar ao usuário, alguns conceitos relacionados ao projeto e à medição, com o propósito não apenas de proporcionar uma informação clara e objetiva, mas também de apresentar termos que são utilizados pelo SGF. A figura 6 apresenta a tela principal deste módulo que é obtida, clicando-se no ícone “Educativo”.

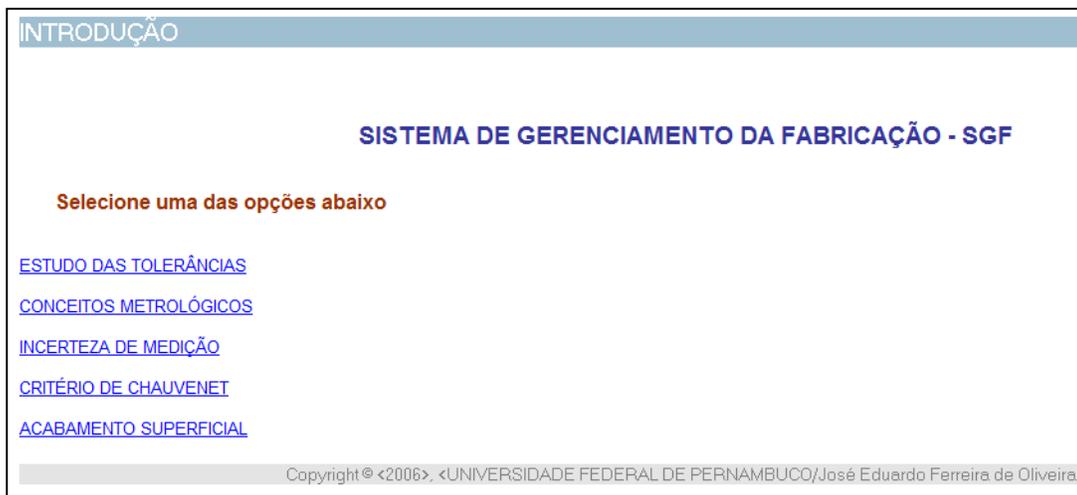


Figura 6 – Tela principal do módulo educativo

Analisando-se esta figura, constata-se que existem cinco tópicos contemplados pelo mesmo:

- Estudo das tolerâncias;
- Conceitos metrológicos;
- Incerteza de medição;
- Critério de Chauvenet e
- Acabamento superficial.

Cada um destes tópicos apresenta informações atualizadas sobre o tema a que se propõe como segue:

- **ESTUDO DAS TOLERÂNCIAS** – aborda assuntos ligados às tolerâncias geométricas;
- **CONCEITOS METROLÓGICOS** – apresenta as definições dos principais termos ligados à metrologia, de acordo com o VIM (Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia) [1];
- **INCERTEZA DE MEDIÇÃO** – descreve o passo a passo utilizado pelo programa para a expressão da incerteza expandida de medição com base no ISO GUM (Guia para a Expressão da Incerteza de Medição) [2];
- **CRITÉRIO DE CHAUVENET** – apresenta o critério de rejeição de um resultado de medição adotado pelo programa e
- **ACABAMENTO SUPERFICIAL** – apresenta as aplicações típicas do parâmetro de rugosidade Ra, muito utilizado no módulo de fabricação do SGF.

Tomando como exemplo, o tópico “Estudo das tolerâncias”, ao se clicar sobre o mesmo, aparecerá uma tela conforme figura 7. A figura 8 apresenta uma parte da tela do programa gerada ao se clicar sobre o item “Exemplos de Representação”.

ESTUDO DAS TOLERÂNCIAS

Estudo das Tolerâncias Geométricas

Na fabricação de uma peça, as tolerâncias dimensionais são insuficientes para caracterizá-la. Os desvios da peça projetada para a peça fabricada podem ser indicados previamente, através das tolerâncias geométricas, representadas pelos desvios de forma e posição, os quais são originários em função de:

- falta de rigidez da máquina-ferramenta;
- dispositivos de fixação;
- desgaste da ferramenta e
- outros fatores que exercem influência direta na qualidade final de uma peça usinada.

Esses erros deverão ser enquadrados e limitados em **tolerâncias geométricas** que não prejudiquem o funcionamento, montagem e resistência da peça acabada.

Para mais informações, selecione um dos seguintes itens abaixo:

[Exemplos de Representação](#)
[Indicação dos Elementos de Referência](#)
[Indicação da Tolerância de Posição](#)
[Exemplos de Aplicação](#)
[Escolha da Tolerância](#)
[Classes de Ajustes](#)

[Voltar](#)

Figura 7 – Tela relacionada ao estudo das tolerâncias geométricas

Exemplos de Representação

Exemplos de Representação

Considerações Gerais

Os retângulos são ligados ao elemento que se deseja verificar por intermédio de uma seta. Se a indicação direta do elemento não for adequada, pode-se tomar um prolongamento do mesmo conforme figura abaixo.

Figura 8 – Parte do programa educativo que trata de exemplos de representação das tolerâncias geométricas

3.2 – Tolerâncias Geométricas

O objetivo deste módulo é apresentar os desvios máximos permissíveis de forma, posição e combinados, de acordo com o processo de fabricação, máquina-ferramenta e dimensões das peças. A figura 9 apresenta a tela principal deste módulo que é composta por três partes: A, B e C, onde a parte “A” representa as opções de desvios obtidos pelo programa, a opção “B” é um link com a parte de tolerâncias geométricas do módulo educativo e a opção “C” apresenta explicações sobre cada um dos desvios.

Clicando-se em cada uma das opções discriminadas pela letra “A”, aparecerá uma tela diferente para obtenção dos desvios máximos. Por exemplo, ao se clicar sobre o item “Desvios permissíveis de paralelismo entre duas superfícies planas”, será mostrada a tela da figura 10. Analisando-se esta figura, percebe-se que o desvio máximo permissível é obtido, selecionando-se o processo de fabricação em que a peça foi gerada. Além disto, deve-se considerar que existem dois tipos de desvios:

- Desvio de planicidade (valor econômico) e
- Desvio de planicidade (maior precisão).

Quando se considera o “valor econômico”, significa uma tolerância geométrica maior, ao passo que “maior precisão” implica em um processo que necessita de um controle mais apurado, devendo ter, portanto, um controle geométrico maior, e, conseqüentemente, uma tolerância geométrica mais apertada.

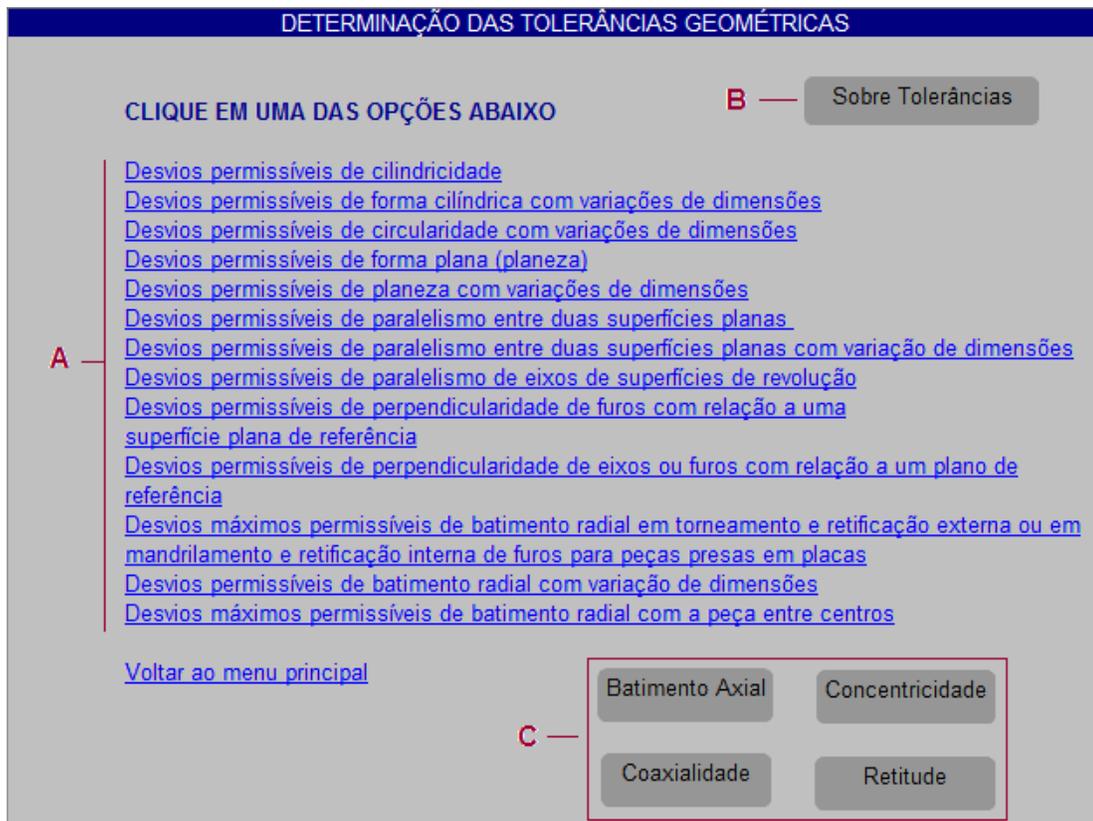


Figura 9 – Tela principal do módulo de tolerâncias geométricas

Caso se deseje conhecer aspectos relacionados ao desvio de planicidade, por exemplo, deve-se clicar sobre o ícone “Sobre o desvio” e será mostrada a tela da figura 11.

DESVIO PERMISSÍVEL DE PARALELISMO ENTRE DUAS SUPERFÍCIES PLANAS

Selecione o processo de fabricação

- Aplainamento de superfícies planas e canais
- Aplainamento de superfícies planas e canais para plaina vertical
- Fresamento com fresa de disco
- Fresamento com fresa de topo
- Retificação em retífica de superfície em sentido contrário ao avanço
- Retificação em retífica de superfície no mesmo sentido do avanço
- Retificação com a face lateral de rebolos
- Retificação com o diâmetro externo de rebolos
- Retificação em desbaste

Sobre o Desvio

DESVIO DE PARALELISMO POR 100 mm (VALORES ECONÔMICOS) mm

DESVIO DE PARALELISMO POR 100 mm (MAIOR PRECISÃO) mm

[Voltar](#)

Figura 10 – Tela do SGF referente à obtenção do desvio de planicidade

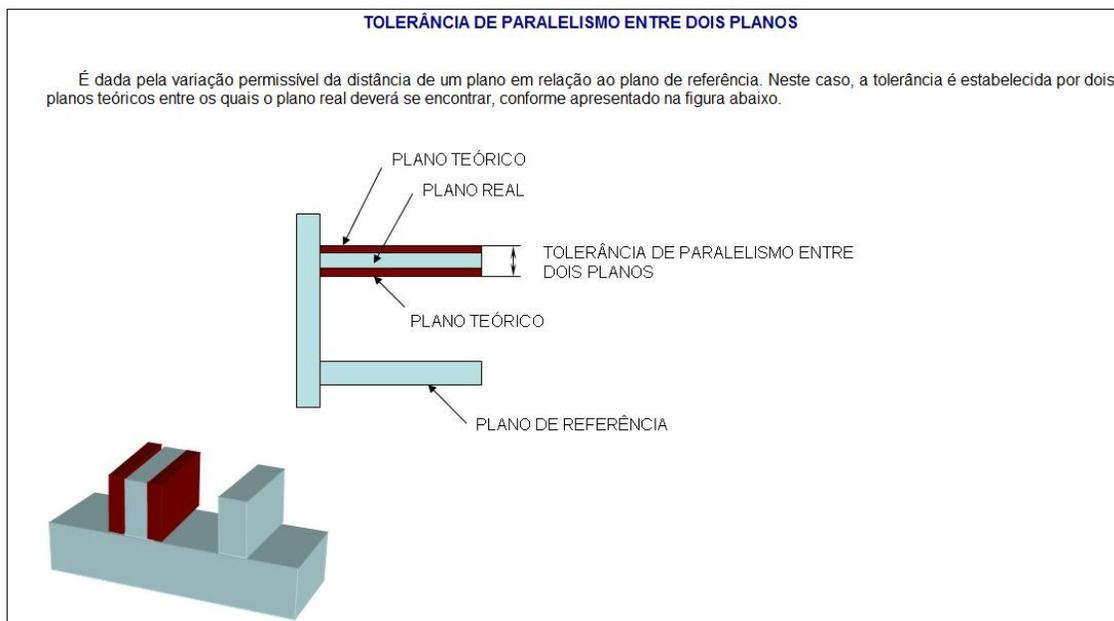


Figura 11 – Parte das informações do programa referentes à tolerância de paralelismo entre dois planos

4 – MÓDULO DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS

Este módulo é composto pelas seguintes possibilidades:

- Tolerância em função da incerteza da máquina-ferramenta;
- Seleção dos ajustes através do sistema furo base;
- Tolerância em função do acabamento superficial;
- Tolerância de execução grosseira de peças isoladas e
- Seleção dos ajustes através do sistema eixo base.

Independente do se que quer realizar com o programa, o primeiro passo é entrar com a dimensão nominal (em milímetros) que se quer trabalhar, conforme mostrado na indicação “A” da figura 12.

MÓDULO DE TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS - DADOS INICIAIS

A — ENTRE COM A DIMENSÃO NOMINAL (mm) SIGA EM FRENTE

B — ENTRE COM A INCERTEZA DA MÁQUINA (micrometros)

TOLERÂNCIA (t) IT = IT6 t = 0,01258 mm C

Figura 12 – Inserção dos dados iniciais

O SGF funciona para o módulo de toleranciamento dimensional, com dimensões até 3150 mm. No exemplo da figura 12, como a dimensão nominal foi de 19 mm, apareceu a mensagem “SIGA EM FRENTE”.

A indicação “B” solicita a inserção da incerteza da máquina-ferramenta. Esta opção será apresentada a seguir. Caso a opção “TOLERÂNCIA EM FUNÇÃO DA INCERTEZA DA MÁQUINA-FERRAMENTA” não seja utilizada, deve-se deixar esta opção em branco.

A opção “C” apresenta a tolerância dimensional (t) em função grau de tolerância-padrão (IT). Para a obtenção de (t), basta entrar com o valor da dimensão nominal em “A” e selecionar o IT desejado (IT01 ... IT18).

4.1 – Tolerância em função da precisão da máquina-ferramenta

A figura 13 apresenta a tela do SGF referente a esta situação, cujo objetivo é o de calcular a tolerância para uma dimensão em função apenas da precisão da máquina-ferramenta.

TOLERÂNCIA EM FUNÇÃO DA PRECISÃO DA MÁQUINA-FERRAMENTA

D — GRAU DE TOLERÂNCIA PADRÃO = IT6

E — VALOR DA DIMENSÃO (mm) = 19 ± 0,00629

F — TOLERÂNCIA DIMENSIONAL (mm) = 0,012580413

HÁ UM VALOR MÍNIMO DA DIMENSÃO EM FUNÇÃO DOS ESFORÇOS OU DA FIXAÇÃO? QUAL O VALOR? mm

G — O AFASTAMENTO INFERIOR VALE mm

O AFASTAMENTO SUPERIOR VALE mm

VALOR DA DIMENSÃO (mm) = 19

0

Figura 13 – Tela do SGF para o toleranciamento dimensional em função da incerteza da máquina-ferramenta

A determinação da tolerância dimensional, juntamente com os afastamentos superior e inferior é muito simples. Uma vez inserida a dimensão nominal (opção “A” da figura 12), o programa automaticamente determina o grau de tolerância padrão (opção “D” da figura 13); a dimensão toleranciada, ou seja, com os seus afastamentos (opção “E”) e a tolerância dimensional (opção “F”).

Neste sistema de toleranciamento, pode ocorrer a necessidade de se ter uma dimensão mínima por problemas construtivos, mantendo-se a tolerância dimensional. Neste caso, deve-se inserir esta dimensão mínima, conforme apresentado na opção “G” da figura 13, e o programa, com base nesta tolerância, recalcula o afastamento superior.

4.2 – Seleção dos Ajustes Através do Sistema Furo Base

Para a obtenção da tolerância dimensional através desta opção, deve-se, inicialmente, selecionar as posições dos campos de tolerância para eixos e furos, conforme opção “H” (exemplo: H7 para o furo e r6 para o eixo) da figura 14. Em seguida, deve-se selecionar o tipo de ajuste, conforme opção “I”. O ícone “ajustes” apresenta uma tabela com todas as possibilidades de ajustes que o programa opera.

The screenshot shows the following data:

Item	Value
TOLERÂNCIA DO FURO (mm)	0,020129
TOLERÂNCIA DO EIXO (mm)	0,01258
DIMENSÃO DO FURO (mm) =	19
DIMENSÃO DO EIXO (mm) =	19
Dmax =	19,02013 mm
Dmin =	19 mm
dmax =	19,040298 mm
dmin =	19,027718 mm

Figura 14 – Tela do programa para o toleranciamento dimensional considerando-se o sistema furo base

É importante salientar que para todas estas opções de toleranciamento dimensional, deve-se antes de qualquer coisa, inserir o valor da dimensão nominal, conforme apresentado na opção “A” da figura 12.

O SGF apresenta um banco de dados de possibilidades de acoplamentos, considerando-se o sistema furo base. Para acessá-lo, deve-se seguir os seguintes passos:

- 1 – clica-se no ícone educativo, conforme mostrado na figura 5;
- 2 – clica-se em “ESTUDO DAS TOLERÂNCIAS”;

3 – clica-se em “Escolha da Tolerância” que aparecerá a tabela 1.

Tabela 1: Principais aplicações do sistema furo base

ACOPLAMENTO	APLICAÇÃO
<p>H6/g5 Deslizante (emprego comum)</p>	<p>Peças com movimento de rotação de alta precisão, com aplicação de cargas pesadas, lubrificadas racionalmente e sustentação hidrodinâmica correta.</p> <p>EXEMPLOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eixos com movimento de rotação, de aço beneficiado e retificado em bronzina; • mandril de retífica; • bomba de engrenagem com elevado grau de precisão no sentido radial e axial. <p>MONTAGEM: Livre, à mão.</p>
<p>H6/h5 Deslizante (emprego comum)</p>	<p>Acoplamentos de alta precisão, móvel axialmente ou dotado de movimento de rotação lento oscilante, com lubrificação interna.</p> <p>EXEMPLOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alavancas oscilantes movidas sobre camos, em bronzina; • mangote porta mandril e mandril para fresadora e mandriladora de alta precisão; • válvula de comando alternativa de movimento alternativo longitudinal ou angular de alta precisão. <p>MONTAGEM: Por escorregamento, à mão.</p>
<p>H6/j5 Aderente (emprego comum)</p>	<p>Acoplamentos de precisão de partes reciprocamente fixas, separável manualmente, sede fixa, de centragem de alta precisão; acoplamentos móveis axialmente com sede curta em geral.</p> <p>EXEMPLO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rodas de câmbio montadas sobre eixo ranhurado ou chavetado (centragem sobre o eixo interno) <p>MONTAGEM: À mão com leve toque de macete.</p>
<p>H6/n5 Fixo duro (emprego comum)</p>	<p>Acoplamentos fixos, não desmontáveis à mão. Peças que não necessitam ser fixadas axialmente, mas que somente não devem girar sob a ação de momento torçor, montagem a quente com macete de madeira ou a frio sob pressão (esta operação não consente em geral sucessivas desmontagens).</p> <p>EXEMPLOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fixação de engrenagem de força, montada com chaveta ou sobre eixo ranhurado, sendo desmontada raramente; • coroa de bronze para roda helicoidal, encaixada sobre aço ou ferro fundido; • eixos desmontáveis (eixos com diâmetros do garfo da embreagem); • bronzina na sede externa (se for desmontada com certa frequência).

	MONTAGEM: À mão, com macete ou prensa e com diferença de temperatura.
H6/p5 Fixo prensado (emprego comum)	Acoplamentos fixos não desmontáveis. São peças ajustadas de modo a comportarem-se como se fossem uma única peça, para não serem mais desmontadas e destinadas a transmitir fortes cargas axiais e momentos otçores sem o uso de chavetas ou similares, sendo possível a desmontagem somente sobre pressão e quente. EXEMPLOS: <ul style="list-style-type: none"> • Engates de grande responsabilidade; • bronzina na parte externa, para não ser desmontada. MONTAGEM: Á mão, com macete ou prensa e com diferença de temperatura.
H7/f7 Livres normal (emprego comum)	Acoplamento com movimento de rotação de grande velocidade, com centralização e sustentação hidrodinâmica, mesmo que imperfeita. EXEMPLOS: <ul style="list-style-type: none"> • Eixos velozes e suas respectivas bronzinas em geral; • mandril de retificadora de precisão, no respectivo rolamento; • eixo (ainda que pouco veloz) mantido em bronzina de largura axial maior que duas vezes o diâmetro; • extremidade do eixo porta fresa diretamente montado no rolamento de suporte de extremidade; • chaveta; • eixo de mandril de broca; • pino de posição de média precisão. MONTAGEM: Livre, à mão.
H7/g6 Livres justo (emprego comum)	Acoplamentos com movimento de rotação de velocidade periférica média (2 a 4 m/s) com boa centralização. Acoplamentos com movimento axial alternativo de média e alta velocidade igual ou menor que 35 m/min (aproximadamente 0,6 m/s). EXEMPLOS: <ul style="list-style-type: none"> • Mandril para fresadora de média precisão em relação ao rolamento; • casquilho do suporte de extremidade e da parte intermediária do eixo porta fresa na sede; • extremidade do eixo porta fresa (curto) diretamente montado no rolamento do suporte da extremidade; • eixo e bronzina em geral; • rolamento de esfera, não muito veloz e pouco carregado. MONTAGEM: Por escorregamento, à mão.
H7/h6 Deslizante	Emprego análogo ao acoplamento H6/h5, porém, de menor precisão, boa centralização de deslizamento, sede menos precisa, porém, de maior comprimento que com o acoplamento

(emprego comum)	<p>H6/h5.</p> <p>EXEMPLOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eixo porta fresa e fresa; • haste de pistão de bomba de óleo alternativa no cilindro; • válvula de admissão de movimento alternativo no sentido axial e angular para comando hidráulico de precisão; • cubo de engrenagem por corrente. <p>MONTAGEM: Por escorregamento, à mão.</p>
<p>H7/j6</p> <p>Aderente</p> <p>(emprego raro)</p>	<p>Emprego análogo ao acoplamento H6/j5, mas de menor precisão. Acoplamento aderente menos preciso, mas de maior comprimento que o acoplamento H6/j5.</p> <p>Deve ser evitado, sendo geralmente substituído pelo H7/h6.</p> <p>MONTAGEM: À mão com macete. Resfriar eventualmente o eixo.</p>
<p>H7/m6</p> <p>Fixo normal</p> <p>(emprego raro)</p>	<p>Emprego análogo ao acoplamento H7/j6 ou H7/h6. É da classe dos incertos, devendo-se evitá-lo.</p> <p>MONTAGEM: À mão, com macete ou prensa e com diferença de temperatura.</p>
<p>H7/n6</p> <p>Fixo duro</p> <p>(emprego comum)</p>	<p>Emprego análogo ao acoplamento H6/n5, de menor precisão e um pouco menos fixo, boa centralização, com sede um pouco mais longa e condições de montagem de média dificuldade. Acoplamento substituível pelo H7/r6 ou H7/p6 ou selecionado.</p> <p>MONTAGEM: À mão, com macete ou prensa, e com diferença de temperatura entre as partes acopladas.</p>
<p>H7/r6</p> <p>Fixo prensado</p> <p>(emprego comum)</p>	<p>Acoplamentos fixos não desmontáveis. As partes acopladas são consideradas como se fossem uma única peça para não ser mais desmontada e destinada a transmitir cargas axiais sem o uso de chaveta ou similar, montada sob pressão a quente.</p> <p>O emprego é análogo ao do acoplamento H6/p5.</p> <p>MONTAGEM: À mão, com macete ou prensa e com diferença de temperatura entre as duas peças.</p>
<p>H7/f6</p> <p>Livre normal</p> <p>(emprego comum)</p>	<p>Acoplamento com movimento de rotação em geral, com baixa carga e sem exigência de centralização precisa.</p> <p>EXEMPLOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Polia louca; • volante de manobra. <p>MONTAGEM: À mão.</p>
<p>H8/h8</p> <p>Deslizante</p> <p>(emprego comum)</p>	<p>Acoplamento deslizante axialmente, sem exigência de precisão, sede longa ou de baixa carga.</p> <p>EXEMPLOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Distribuidor hidráulico, êmbolo de bomba alternativa, cilindros; • eixos e mancais de baixa velocidade, centragem grosseira de deslizamento sujeito a esforço de pequena

	importância. MONTAGEM: À mão.
--	----------------------------------

Fonte: Provenza, F. Tolerâncias ISO. São Paulo, 1995. [3]

ACOPLAMENTO	APLICAÇÃO
H7/s6 H7/r6 Ajuste forçado duro	Transmissão de esforços médios por centímetro quadrado. Montagem sob pressão ou por variação de temperatura. Geralmente Não há necessidade de chaveta ou outro sistema de fixação contra rotação ou do deslocamento axial. Desmontagem relativamente difícil. EXEMPLOS: <ul style="list-style-type: none"> • Cubos de embreagem e acoplamento; • buchas de mancal em alojamentos; • flanges.
H7/n6 Ajuste forçado	Ajuste forçado médio. Montagem difícil com batidas de martelo. EXEMPLOS: <ul style="list-style-type: none"> • Acoplamentos em máquinas e motores elétricos; • engrenagens de máquinas e motores elétricos.
H7/m6 Ajuste forçado	Ajuste forçado leve. Montagem fácil com martelo. EXEMPLOS: <ul style="list-style-type: none"> • Polias; • engrenagens; • rodas de freio; • onde se requieram frequentes montagens e desmontagens.
H7/j6 H7/h6 Ajuste com folga	Ajuste deslizante. Usado quando houver necessidade de desmontagens frequentes. EXEMPLOS: <ul style="list-style-type: none"> • Engrenagens; • anéis de posicionamento; • flanges de centragem para acoplamentos e tubulações; • ferramentas de corte sobre o eixo (fresas).
H7/g6 Ajuste com folga	Ajuste rotativo com pequena folga entre as superfícies. Apropriado para peças que devam estar sujeitas a rápidos deslocamentos axiais sem folga sensível. EXEMPLOS: <ul style="list-style-type: none"> • Engrenagens deslocáveis;

	<ul style="list-style-type: none"> • fusos de máquinas retificadoras; • hastes de válvulas de cilindros de ar em suas buchas-guias; • hastes de instrumentos indicadores.
H7/f7 Ajuste de elevada qualidade	<p>Ajuste rotativo com folga perceptível.</p> <p>EXEMPLOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eixos que deslizem sobre mancais e rodas; • engrenagens que deslizam sobre eixos.
H8/h8 Ajuste de elevada qualidade	<p>Ajuste deslizante para uso com mínimo esforço.</p> <p>EXEMPLOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Luvas deslizantes; • polias; • engrenagens e acoplamentos sobre eixos; • anéis de posicionamento em eixos de transmissão.

Fonte: Guimarães, V. A. Controle Dimensional e Geométrico. Passo Fundo, 1999 [4].

Os dados de saída desta opção são: tolerância dimensional do furo e do eixo (opção “J”); dimensões do furo e do eixo, com seus respectivos afastamentos (opção “K”) e as dimensões máximas e mínimas para o furo e para o eixo (opção “L”)

4.3 – Tolerância em Função do Acabamento Superficial

Uma outra possibilidade de toleranciamento dimensional é em função do acabamento superficial e o SGF trabalha com dois parâmetros de rugosidade Rz e Ra.

Para se determinar esta tolerância, basta inserir o valor do parâmetro Rz ou do Ra ou de ambos, conforme mostrado na figura 15.

Caso a peça que está sendo toleranciada utilize ambos os parâmetros, o próprio SGF automaticamente seleciona a menor tolerância dimensional, pois a mesma atenderá a ambas as situações.

Os dados de saída desta opção são: o valor da dimensão com seus afastamentos e a tolerância dimensional.

TOLERÂNCIA EM FUNÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL	
DETERMINAÇÃO DA TOLERÂNCIA EM FUNÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL	
ENTRE COM O VALOR DO Rz PRETENDIDO (micrometros)	<input type="text"/>
ENTRE COM O VALOR DO Ra PRETENDIDO (micrometros)	<input type="text" value="2"/>
VALOR DA DIMENSÃO (mm) =	19 ± 0,03
TOLERÂNCIA DIMENSIONAL (mm) =	<input type="text" value="0,06"/>

Figura 15 – Determinação da tolerância dimensional em função do acabamento superficial

4.4 – Tolerância de Execução Grosseira de Peças Isoladas

Esta opção possibilita ao usuário realizar o toleranciamento dimensional para peças isoladas que não necessitam de grande exatidão. Para tal, o programa divide esta peça em:

- Menos grosseira – o programa atribui o grau de tolerância padrão IT12;
- Intermediariamente grosseira – grau de tolerância padrão IT15 e
- Mais grosseira possível – grau de tolerância padrão IT18.

A figura 16 ilustra a tela do SGF para esta opção.

TOLERÂNCIA DE EXECUÇÃO GROSSEIRA DE PEÇAS ISOLADAS	
Grau de precisão	
<input checked="" type="radio"/> Menos grosseira <input type="radio"/> Intermediariamente grosseira <input type="radio"/> Mais grosseira possível	
TOLERÂNCIA DIMENSIONAL (mm)	<input type="text" value="0,201286605"/>
VALOR DA DIMENSÃO (mm)	19 ± 0,10064

Figura 16 – Tolerância dimensional de peças isoladas

4.5 – Seleção dos Ajustes através do Sistema Eixo Base

Esta opção funciona de maneira análoga ao sistema de toleranciamento considerando-se o sistema furo base apresentado no item 4.2. Neste caso, não há um banco de dados de exemplos de aplicação como no caso do sistema furo base.

A figura 17 apresenta a tela responsável pela execução desta opção.

5 – MÓDULO DE FABRICAÇÃO

O objetivo deste módulo é o de se determinar os parâmetros ótimos de fabricação por usinagem, considerando o torneamento de eixos escalonados ou não, e máquinas-ferramenta com CNC (comando numérico computadorizado). Para tal, o mesmo é dividido nas seguintes partes:

- Inserção de dados iniciais;
- Inserção dos dados referentes aos tempos de fabricação;
- Inserção dos dados referentes à matéria-prima;
- Seleção da ferramenta de corte;
- Inserção dos dados referentes à Fórmula Expandida de Taylor;
- Seleção do desgaste de flanco;
- Determinação do avanço máximo permissível;
- Determinação dos parâmetros de usinagem, considerando-se a velocidade de mínimo custo ou a de máxima produção.

Inicialmente, devem-se inserir os dados iniciais, conforme mostrado na figura 18.

DADOS INICIAIS - TORNEAMENTO	
ENTRE COM A POTÊNCIA DO MOTOR (CV)	20,39
ENTRE COM O RENDIMENTO DA MÁQUINA	0,9
ENTRE COM O COEFICIENTE KS1 DA FÓRMULA DE KIENZLE	185
ENTRE COM O COEFICIENTE 1-z DA FÓRMULA DE KIENZLE	0,85
ENTRE COM O COMPRIMENTO DA MATERIA-PRIMA (mm)	73,8
ENTRE COM O DIÂMETRO DA MATERIA-PRIMA (mm)	51,7
ENTRE COM O SALÁRIO-HOMEM (\$/hora)	3
ENTRE COM O SALÁRIO-MÁQUINA (\$/hora)	15
ENTRE COM O VALOR DO ÂNGULO DE POSIÇÃO DA FERRAMENTA	Valor em graus 75
ENTRE COM O VALOR DO ÂNGULO DE SAÍDA DA FERRAMENTA	-6
ENTRE COM O VALOR DO ÂNGULO DE FOLGA DA FERRAMENTA	6
ENTRE COM O VALOR DO Nº DE PEÇAS A SEREM FABRICADAS	2

Figura 18 – Dados iniciais do módulo de fabricação

Clicando-se no ícone “Kienzle” (opção “M” da figura 18), o programa abre uma tabela com uma série de valores dos parâmetros de Kienzle para diferentes materiais.

A opção “N” apresenta um ícone em vermelho que aparecerá em várias situações no SGF. Quando tal ícone aparecer, deve-se passar o cursor do mouse sobre o mesmo que aparecerá uma informação como mostrado na figura 18.

Em seguida, devem-se inserir os dados referentes aos tempos de fabricação e dados referentes à matéria-prima, de acordo com a figura 19.

DADOS REFERENTES AOS TEMPOS DE FABRICAÇÃO	
ENTRE COM O TEMPO DE TROCA DA FERRAMENTA (min)	1
ENTRE COM O TEMPO DE AFIANÇA DA FERRAMENTA (min)	0
ENTRE COM O TEMPO IMPRODUTIVO (min)	0,5
ENTRE COM O TEMPO DE PREPARAÇÃO DA MÁQUINA (min)	15
DADOS REFERENTES À MATÉRIA-PRIMA	
ENTRE COM O PREÇO POR KG DO MATERIAL ADQUIRIDO (\$/kg)	4
ENTRE COM A DENSIDADE DO MATERIAL (kg/m ³)	7800

Figura 19 – Tela do SGF para inserção de dados

O passo seguinte é a seleção da ferramenta de corte que pode ser de aço rápido ou um inserto reversível. Para isto, basta selecionar uma das opções, conforme mostrado na figura 20. Após se selecionar a opção desejada, deve-se entrar com os dados referentes à opção selecionada.

SELEÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE	
Critério de Seleção de Ferramentas	
<input type="radio"/> Aço rápido	
ENTRE COM O Nº DE AFIANÇÕES DA FERRAMENTA	
ENTRE COM O VALOR DE AQUISIÇÃO DA FERRAMENTA (\$)	
ENTRE COM O VALOR FINAL DA FERRAMENTA (\$)	
ENTRE COM O CUSTO POR AFIANÇA DA FERRAMENTA (\$)	
<input checked="" type="radio"/> Inserto reversível	
ENTRE COM O CUSTO DE AQUISIÇÃO DO INSERTO (\$)	30
ENTRE COM O CUSTO DE AQUISIÇÃO DO PORTA-FERRAMEN.(\$)	92
ENTRE COM O Nº DE FIOS DE CORTE DO INSERTO	8
ENTRE COM O Nº DE FIOS DE CORTE DO PORTA-FERRAMENTA ATÉ A SUA POSSIVEL INUTILIZAÇÃO	500
ENTRE COM O VALOR DO RAIO DE ARREDONDAMENTO DA PONTA DA FERRAMENTA (mm)	0,8

Figura 20 – Tela para seleção da ferramenta de corte de torneamento

5.1 – Dados Referentes à Fórmula Expandida de Taylor

O SGF trabalha com a fórmula Expandida de Taylor para a otimização dos parâmetros de corte, pois mesmo necessitando de uma quantidade maior de ensaios para obtenção dos seus parâmetros, uma vez determinados, os mesmos poderão ser utilizados com diferentes avanços e profundidades de corte, ao contrário da Fórmula de Taylor simples.

Nesta opção, o usuário deverá entrar com o valor dos parâmetros de acordo com a ferramenta e a peça que se está trabalhando e com as condições em que a usinagem foi realizada. A figura 21 apresenta a tela do programa para preenchimento dos dados.

ENTRE COM O VALOR DO PARÂMETRO	VALOR
G	-0,35
C	754
E	-0,15
F	-0,1
H	0

$$V = C \times f^E \times a_p^F \times T^G \times VK^H$$

Valores da Taylor Expandida

Figura 21 – Tela do SGF para inserção dos dados referentes à Fórmula Expandida de Taylor

Na figura 21 encontra-se a Fórmula Expandida de Taylor e logo abaixo, o ícone “Valores da Taylor Expandida”. Clicando-se neste ícone, abre-se um **banco de dados da Taylor Expandida**, conforme mostrado na figura 22.

FERRAMENTA: TTX MATÉRIA - PRIMA: 1020

Condições

- Matéria-prima com carepa de fundição, laminação ou forjamento
- Usinagem pesada (desbaste)
- Usinagem leve (acabamento)
- Torneamento interno
- Corte interrompido
- Máquina-ferramenta em bom estado
- Máquina-ferramenta em mau estado

Resultados

C = 754 F = -0,1

E = -0,15 G = -0,35

Faixa de validade dos resultados

ap (mm) = 1 a 10

f (mm/volta) = 0,1 a 1,0

T (min) = 6 a 100

VB (mm) = 0,3 a 0,4

$$V_c = Ws \times C \times a_p^F \times f^E \times T^G$$

Vc = velocidade de corte (m/min)
ap = profundidade de corte (mm)
f = avanço (mm/volta)
T = tempo de vida da ferramenta (min)
Ws = fator de correção

Ws = 0.875

Figura 22 – Banco de dados dos parâmetros da Fórmula de Taylor Expandida

Os dados deste banco de dados foram obtidos de uma publicação da WIDIA [5] e para se obter os parâmetros da equação, basta selecionar o tipo da ferramenta, conforme opção “M” (exemplo da figura 22, ferramenta TTX); o material da peça que se quer fabricar como mostrado na opção “N” (exemplo da figura 22, aço 1020) e as condições para realização da usinagem, conforme opção “O” (exemplo da figura 22, usinagem pesada).

Os resultados são apresentados de acordo com a opção “P”. No caso de utilização deste banco de dados, o parâmetro da Taylor Expandida “H” é igual a zero.

Por fim, a opção “Q” apresenta a fixa de validade dos parâmetros em função da profundidade de corte (ap), do avanço (f), do tempo de vida da ferramenta por aresta (T) e do desgaste de flanco (VB).

5.2 – Seleção do Desgaste de Flanco

O objetivo desta opção é o de selecionar o máximo desgaste de flanco a ser adotado na operação de usinagem, em função, principalmente da tolerância do diâmetro da peça. A figura 23 apresenta a tela do SGF para determinação deste valor de desgaste de flanco.



Figura 23 – Tela do SGF para determinação do valor do desgaste de flanco a ser considerado na operação de usinagem

Para se determinar o desgaste de flanco em milímetros, conforme indicado na opção “R”, deve-se inicialmente, entrar com o valor da tolerância dimensional do diâmetro da peça a ser fabricada, e, em seguida, se selecionar a ferramenta e o tipo de operação.

5.3 – Determinação do Avanço Máximo Permissível

Outro parâmetro de fundamental importância na otimização da usinagem é o avanço, cujo valor máximo deverá ser dado em função da geometria da ferramenta, do ângulo de saída da mesma e do acabamento superficial final que se deseja na superfície da peça acabada. A figura 24 apresenta a tela relacionada a esta situação.

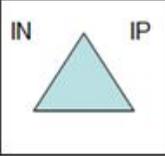
Inicialmente, deve-se selecionar a geometria da ferramenta, de acordo com a opção “S”. Em seguida, marca-se a opção “T” de acordo com o ângulo de saída da ferramenta, se positivo ou negativo. Depois insere-se o comprimento da aresta de corte da ferramenta (opção “U”) e o valor máximo do parâmetro de rugosidade Ra, Rt ou se considera ambos os parâmetros para usinagem de uma dada peça ou parte da mesma (opção “V”). Caso se considere ambos os parâmetros de rugosidade, o programa selecionará o menor avanço, pois o mesmo satisfará ambas as rugosidades.

DETERMINAÇÃO DO AVANÇO MÁXIMO PERMISSÍVEL

S

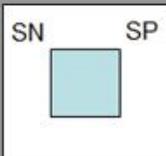
Escolha a geometria da ferramenta

IN IP



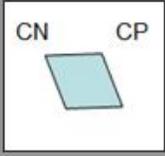
GEOMETRIA 1

SN SP



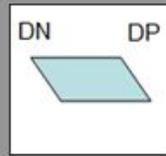
GEOMETRIA 2

CN CP



GEOMETRIA 3

DN DP



GEOMETRIA 4

Ângulo de saída

Positivo

Negativo

T

ENTRE COM O COMPRIMENTO DA ARESTA (mm)

U

Valor máximo do parâmetro de rugosidade

Rt (micrometros)

Ra (micrometros)

Considere ambos os parâmetros

AVANÇO MÁXIMO PERMISSÍVEL (mm/volta) **W**

V

Figura 24 – Tela do programa para obtenção do avanço máximo permitido a uma dada operação de torneamento

O avanço máximo permitido para a operação de torneamento é mostrado na opção “W”.

5.4 – Determinação dos Parâmetros Ótimos de Usinagem

A última fase deste módulo de fabricação é a determinação dos parâmetros ótimos de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, rotação de faceamento, tempo total de fabricação por peça e custo total de fabricação por peça. Conforme apresentado na figura 25, esta otimização pode se dar considerando-se duas possíveis situações:

- Velocidade de mínimo custo e
- Velocidade de máxima produção.

Máquina CNC com Variação Contínua - Diâmetros Escalonados

Y | ENTRE COM O MENOR AVANÇO mm/volta
 ENTRE COM O MAIOR AVANÇO mm/volta
 ENTRE COM O INCREMENTO DE AVANÇOS

Z | Desbaste
 Acabamento e Faceamento [Clique aqui antes de utilizar esta opção](#)
MÍNIMO CUSTO

ZA | Desbaste
 Acabamento e Faceamento
MÁXIMA PRODUÇÃO

Faceamento
 Sim
 Não

ZB

Figura 25 – Tela do programa para determinação dos parâmetros ótimos de usinagem

De acordo com a figura 25, deve-se inicialmente, clicar na opção “X” para se obter informações de como considerar a usinagem de um eixo escalonado ou não. A figura 26 mostra a convenção adotada pelo programa para se operar esta fase.

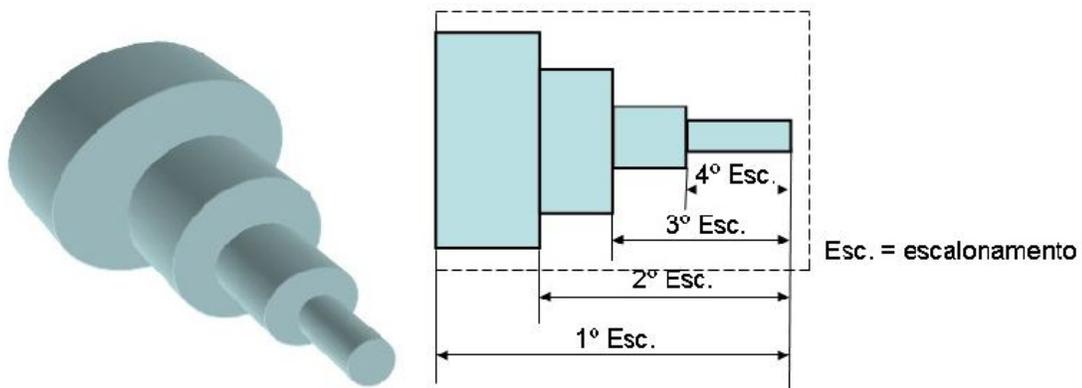


Figura 26 – Convenção dos escalonamentos a serem considerados no SGF

Verifica-se na figura 26, uma configuração genérica de um eixo bruto (linhas pontilhadas) para um eixo com quatro escalonamentos. Esta situação poderá ser configurada também para um eixo já pré-acabado, confeccionado por uma operação de conformação mecânica, necessitando apenas de uma usinagem de acabamento.

Esta configuração deverá ser seguida conforme apresentada na figura 26, podendo ser aplicada para "n" escalonamentos, inclusive com apenas "1" escalonamento, ou seja, um cilindramento.

Uma vez entendido como os escalonamentos deverão ser inseridos no programa, deve-se inserir o menor avanço, o maior e o incremento de avanço (opção "Y"), ou seja, de quanto em quanto mm/volta o avanço poderá variar na máquina-ferramenta específica.

Caso a operação inclua também o faceamento, deve-se clicar em "Sim" na opção "ZB". Caso contrário, clica-se em "Não".

Se o usuário desejar realizar a otimização da fabricação considerando a "VELOCIDADE DE MÍNIMO CUSTO", o mesmo deverá utilizar a opção "Z", de acordo com a figura 25. Caso o mesmo deseje realizar a otimização com base na "VELOCIDADE DE MÁXIMA PRODUÇÃO", deverá utilizar a opção "ZA".

5.5 – Otimização com Base na Velocidade de Mínimo Custo

Analisando-se a figura 25, constata-se que para a otimização com base na velocidade de mínimo custo existem dois botões: o botão "calcula" e o botão "total".

O botão "calcula" tem por objetivo apresentar os parâmetros de usinagem para a operação de desbaste, enquanto que o botão "total" realiza a determinação dos parâmetros de usinagem para as operações de acabamento e/ou faceamento, casos elas existam. Além disto, este botão ainda determina o custo total de fabricação e o tempo total de fabricação por peça.

Ao se clicar no botão "calcula", o programa executará os seguintes passos:

- 1 – tela informando sobre a operação de desbaste;
- 2 – tela com a seguinte informação: Preencha os dados solicitados. Utilize a vírgula ao invés de ponto para expressar as casas decimais;
- 3 – entre com a quantidade de escalonamentos do eixo;
- 4 – entre com a maior velocidade de avanço da máquina-ferramenta em mm/min;
- 5 – entre com a profundidade de corte em mm, conforme figura 27;
- 6 – entre com o diâmetro inicial para cada escalonamento;
- 7 – entre com o diâmetro final para cada escalonamento, desconsiderando a profundidade de acabamento;
- 8 – entre com o comprimento de avanço para cada escalonamento.

A partir daí, o programa apresenta os parâmetros de saída, sendo realizado de escalonamento em escalonamento, ou seja, apresenta todos os parâmetros referentes ao escalonamento 1, depois solicita os diâmetros e o comprimento de avanço para o escalonamento 2 e em seguida os parâmetros de saída para este escalonamento, e assim por diante. Os parâmetros de saída são:

- Custo para realização do desbaste para cada escalonamento;
- Tempo necessário para a realização do desbaste para cada escalonamento;
- Avanço, conforme figura 28;
- Velocidade de corte;
- Profundidade de corte de desbaste;
- Número de passes;

- O custo total de desgaste, incluindo os custos gerais indiretos;
- O tempo total de desgaste, incluindo os tempos improdutivos;

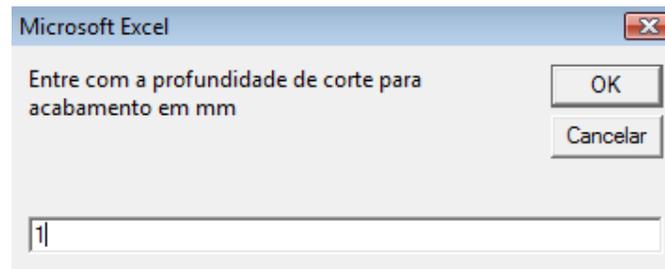


Figura 27 – Exemplo de como o SGF solicita a inserção dos dados para a otimização

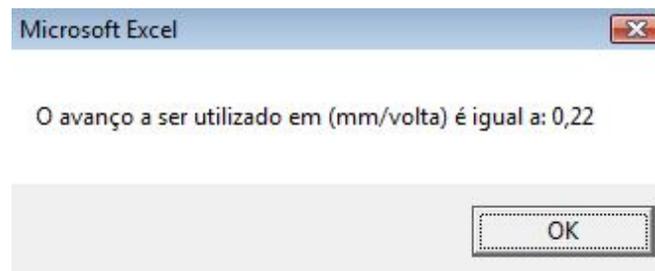


Figura 28 – Exemplo de dado de saída do SGF

A partir daí, caso seja realizada uma operação de acabamento e/ou faceamento, deve-se clicar em “total”, porém, caso se utilize uma ferramenta diferente, deve-se trocar os dados da ferramenta, conforme mostrado nas figuras 20, 23 e 24.

Clicando-se no ícone “total”, o SGF executará os seguintes passos:

- 1 – tela informando sobre a operação de acabamento e faceamento;
- 2 – tela com a seguinte informação: Preencha os dados solicitados. Utilize a vírgula ao invés de ponto para expressar as casas decimais;
- 3 – entre com a quantidade de escalonamentos do eixo;
- 4 – entre com a profundidade de corte para acabamento em mm;
- 5 – o eixo possui furo de centro? Em caso afirmativo, digite o diâmetro do mesmo em (mm). Caso contrário, digite (zero);
- 6 – entre com a profundidade de faceamento em mm, caso exista a operação de faceamento;
- 7 – entre com o diâmetro inicial para cada escalonamento;
- 8 – entre com o diâmetro final para cada escalonamento, desconsiderando a profundidade de acabamento;
- 9 – entre com o comprimento de avanço para cada escalonamento.

A partir daí, o programa apresenta os resultados inicialmente para o acabamento, e em seguida para o faceamento, com a diferença que ao invés da velocidade de mínimo custo, o programa apresenta a rotação para o mínimo custo. Além disto, o programa apresenta ainda, os parâmetros para o faceamento da extremidade final da peça.

Por fim, o SGF apresenta o custo total e o tempo total de fabricação por peça considerando o desbaste, acabamento e o faceamento.

A otimização considerando-se a “VELOCIDADE DE MÁXIMA PRODUÇÃO” é realizada da mesma forma que para a velocidade de mínimo, onde neste caso, para a operação de desbaste, deve-se clicar no botão “calcular” e para o acabamento e o faceamento, deve-se clicar no botão “totalizar”.

6 – MÓDULO DE MEDIÇÃO

Este módulo foi desenvolvido para atender aos seguintes objetivos:

- Selecionar o sistema de medição mais adequado;
- Analisar os dados da medição e automaticamente excluir dados, caso os mesmos gerem dispersões elevadas em relação aos demais dados;
- Determinar a incerteza expandida de medição com base no ISO GUM [2];
- Expressar o resultado da medição (média das indicações mais ou menos a incerteza expandida de medição) e
- Definir o intervalo de conformidade.

6.1 – Seleção do Sistema de Medição e Expressão do Resultado de Medição

O SGF pode trabalhar com os seguintes sistemas de medição ligados à metrologia dimensional:

- Paquímetros;
- Micrômetros;
- Traçadores de altura;
- Relógios comparadores e apalpadores;
- Escalas;
- Microscópios de medição e
- Máquinas de medição por coordenadas.

A figura 29 apresenta a tela deste módulo relacionada à seleção do sistema de medição mais adequado.

Para que um sistema de medição seja considerado “apto”, a sua incerteza de medição, resolução e exatidão deverão ser comparadas à tolerância da dimensão a ser medida. Para tal, o usuário deverá inicialmente, selecionar um dos possíveis sistemas de medição de acordo com a opção “ZC” da figura 29. Em seguida, devem-se inserir os seguintes dados, conforme opção “ZD”:

- A incerteza expandida de medição do sistema de medição;
- O fator de abrangência relacionado à incerteza expandida de medição do sistema de medição;
- A exatidão do sistema de medição que geralmente é apresentada no catálogo do fabricante, mas que também pode ser obtida através da calibração e
- A resolução adotada para este sistema de medição.

Ao lado do campo para inserção destes valores existe uma coluna com o nome “FATOR”. Este fator representa o quanto a incerteza de medição, a exatidão e a resolução do sistema de medição deverão ser menores que o valor da tolerância da cota a ser medida. Por exemplo, se o “FATOR” para a incerteza de medição for igual a 4, significa que o critério admitido pelo usuário foi o de que a incerteza de medição deverá ser $\frac{1}{4}$ da tolerância dimensional. É importante salientar que ao se passar o cursor sobre o campo “FATOR” específico, o

programa apresenta a faixa de variação aceitável para este fator. Por exemplo, para a incerteza de medição, este fator deverá variar entre 3 e 10.

Outra questão é que se o usuário não inserir um valor nesta coluna “FATOR”, o próprio programa utiliza um valor *default*.

MÓDULO DE MEDIÇÃO

SISTEMA DE MEDIÇÃO (SM)

Traçador de altura

Escaleta
Máquina de medição
Micrômetro
Microscópio
Paquímetro
Relógio comparador
Traçador de altura

ENTRE COM A INCERTEZA EXPANDIDA DE MEDIÇÃO DO SM (mm)

ENTRE COM O FATOR DE ABRANGÊNCIA (k)

ENTRE COM A EXATIDÃO DO SM (mm)

ENTRE COM A RESOLUÇÃO ADOTADA PARA O SM (mm)

FATOR

0,001
2
0,003
0,001

Critérios utilizados para a determinação da tolerância

Incerteza da máquina-ferramenta

Ajuste através do sistema furo base

Ajuste através do sistema eixo base

Acabamento superficial

Erro da máquina-ferramenta e acabamento superficial

Execução grosseira de peças isoladas

Entre com uma tolerância específica (mm)

RESULTADO DA ESCOLHA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO
O TRAÇADOR DE ALTURA É UM SM APTO

Figura 29 – Tela do SGF relacionada com a seleção do sistema de medição

A partir daí, deve-se selecionar um dos critérios utilizados para a determinação da tolerância, de acordo com o módulo de tolerância dimensional, ou simplesmente entrar com um valor de tolerância específica. Essa tolerância será comparada com três critérios de seleção adotados. Caso o sistema atenda aos três critérios, aparecerá a mensagem: “ SISTEMA DE MEDIÇÃO SELECIONADO É UM SM APTO”, conforme mostrado na figura 29, opção “ZF”. Caso contrário, aparecerá a mensagem de sistema de medição inapto, devendo-se, portanto, se selecionar outro.

Uma vez selecionado o sistema de medição, o usuário deverá entrar no programa com os resultados da medição nas células mostradas na opção “ZG” da figura 30. O SGF utiliza o critério de Chauvenet para eliminar algum valor do conjunto de resultados que apresente alta dispersão. O programa automaticamente recalcula a média e o desvio padrão com os valores restantes.

Depois, o usuário deverá entrar com o valor da temperatura média em que as medições foram realizadas e com o coeficiente de dilatação linear da matéria-prima, conforme opção “ZH”. Clicando-se sobre o ícone da opção “ZJ”, aparecerá uma tabela com valores de coeficientes de dilatação linear para algumas matérias-primas ligadas ao setor metal-mecânica.

ENTRE COM OS VALORES DE MEDIÇÃO EM CADA UMA DAS CÉLULAS ABAIXO (mm)

70,001						
70,002						
70,002						
70,001						
70,001						

ENTRE COM A TEMPERATURA MÉDIA DURANTE AS MEDIÇÕES (°C) 20,2

ENTRE COM O COEFIC DE DILATAÇÃO LINEAR DA MATÉRIA-PRIMA (1/°C) 0,0000115

ALGUNS VALORES DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO LINEAR

ESCOLHÁ O NÍVEL DE CONFIANÇA PARA O RESULTADO 95,45% - EXPANDIDA

RESULTADO DA MEDIÇÃO (mm) 70,0014 ± 0,001631 k = 2,005159

Figura 30 – Tela referente à inserção dos dados de medição e expressão do resultado de medição

A opção “ZI” solicita ao usuário a inserção da diferença entre a temperatura da peça e a temperatura do sistema de medição, conforme mostrado na figura 31. Caso o usuário não clique neste ícone, será atribuído um valor *default*. Este valor é utilizado na determinação da incerteza de medição.

Microsoft Excel

Entre com o valor da diferença entre a temperatura do sistema de medição e a temperatura da peça ou digite o número zero para que o programa atribua uma diferença padrão

OK

Cancelar

Figura 31 – Solicitação para a inserção da diferença de temperatura entre a peça e o sistema de medição

Para a expressão da incerteza de medição, deve-se atribuir um nível de confiabilidade para a mesma. A opção “ZK” do programa possibilita ao usuário a escolha de três possíveis níveis de confiança:

- 90%;
- 95,45% (EXPANDIDA) e
- 99,73%

Concluída esta etapa, o programa apresenta o resultado da medição com sua respectiva incerteza de medição (opção “ZM”) e o fator de abrangência “k” da incerteza de medição (opção “ZL”).

6.2 – Determinação do Intervalo de Conformidade

O objetivo deste tópico é apresentar o estabelecimento do intervalo de conformidade adotado pelo programa, conforme mostrado na figura 32.

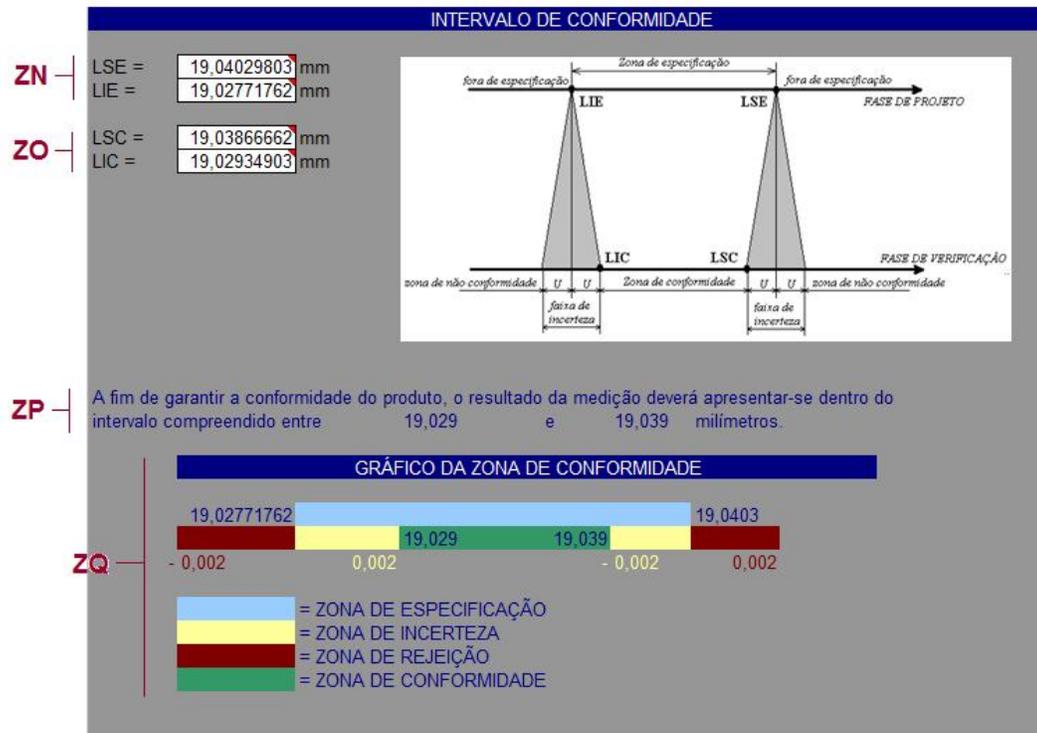


Figura 32 – Tela do SGF referente à determinação do intervalo de conformidade

Durante o toleranciamento (fase de projeto) são definidos dois limites, apresentados na opção “ZN” da figura 32:

- LSE – limite superior de especificação e
- LIE – limite inferior de especificação.

Na fase de medição, porém, deve-se considerar a incerteza de medição, o que torna esta faixa duas incertezas de medição menores, conforme figura 33, gerando assim, outros dois limites, que são automaticamente gerados pelo programa, conforme opção “ZO”:

- LSC – limite superior de controle e
- LIC – limite inferior de controle

A partir daí, é apresentado o intervalo de conformidade de acordo com a opção “ZP”, e apresentado o gráfico de conformidade, segundo opção “ZQ”.

Neste gráfico existem quatro zonas bem definidas:

- A zona de especificação – na cor azul;
- A zona de incerteza – na cor amarela;
- A zona de rejeição – na cor vermelha e
- A zona de conformidade (faixa em que o valor nominal da medição deverá se apresentar) – na cor verde.

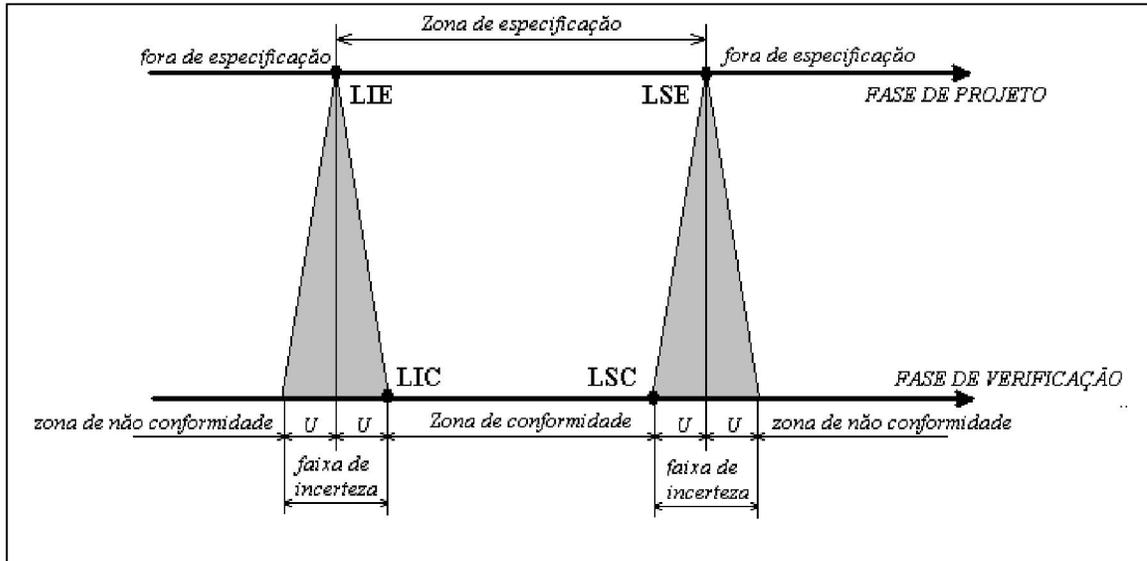


Figura 33 – Estabelecimento das zonas de conformidade e não conformidade de acordo com a UNE EN ISO 14253-1 [6]

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] VIM – Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia, 2a edição, INMETRO/SENAI, Brasília, 2000.

[2] GUM - Guia para a expressão da incerteza de medição – Terceira edição brasileira em língua portuguesa – Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, 2003.

[3] PROVENZA, F. “Tolerâncias ISO”. Editora F. Provenza, São Paulo, 1995.

[4] GUIMARÃES, V. A. “Controle dimensional e geométrico – uma introdução à metrologia industrial. Editora da Universidade do Passo Fundo, Passo Fundo, 1999.

[5] WIDIA – Richtwerte Für Das Drehen Von Eisen-Werkstoffen. Krupp Widia GMBH Werkzeugtechnik.

[6] UNE-EN ISO 14253-1. Especificación geométrica de productos (GPS). Parte 1: Reglas de decisión para probar la conformidad o no conformidad con las especificaciones. Norma española, 1998.

Anexo C

Algumas aplicações típicas do parâmetro de rugosidade Ra utilizadas em projetos de peças mecânicas

Ra (μm)	Aplicações
0,01	blocos-padrão, réguas triangulares de alta precisão, guias de aparelhos de medida de alta precisão.
0,02	aparelhos de precisão, superfícies de medida em micrômetros e calibres de precisão.
0,03	calibradores, elementos de válvulas de alta pressão hidráulica.
0,04	agulhas de rolamentos, superacabamento de camisa de bloco de motor.
0,05	pistas de rolamentos, peças de aparelhos de controle de alta precisão.
0,06	válvulas giratórias de alta pressão, camisas de blocos de motores.
0,08	agulhas de rolamentos de grandes dimensões, colos de virabrequim.
0,1	assentos cônicos de válvulas, eixos montados sobre mancais de bronze, teflon, etc, a velocidades médias, superfícies de cames de baixa velocidade.
0,15	rolamentos de dimensões médias, colos de rotores de turbinas e redutores.
0,2	mancais de bronze, nailon, etc, cones de cubos sincronizadores de caixas de câmbio de automóveis.
0,3	flancos de engrenagens, guias de mesas de máquinas-ferramenta.
0,4	pistas de assento de agulhas de cruzetas em cardãs, superfície de guia de elementos de precisão.
0,6	válvulas de esfera, tambores de freio.
1,5	assentos de rolamentos em eixos com carga pequena, eixos e furos para engrenagens, cabeças de pistão, face de união de caixas de engrenagens.
2	superfícies usinadas em geral, eixos, chavetas de precisão, alojamentos de rolamentos.
3	superfícies usinadas em geral, superfícies de referência, de apoio, etc.
4	superfícies desbastadas por operações de usinagem.
5 a 15	superfícies fundidas, superfícies estampadas.
> 15	peças fundidas, forjadas e laminadas.

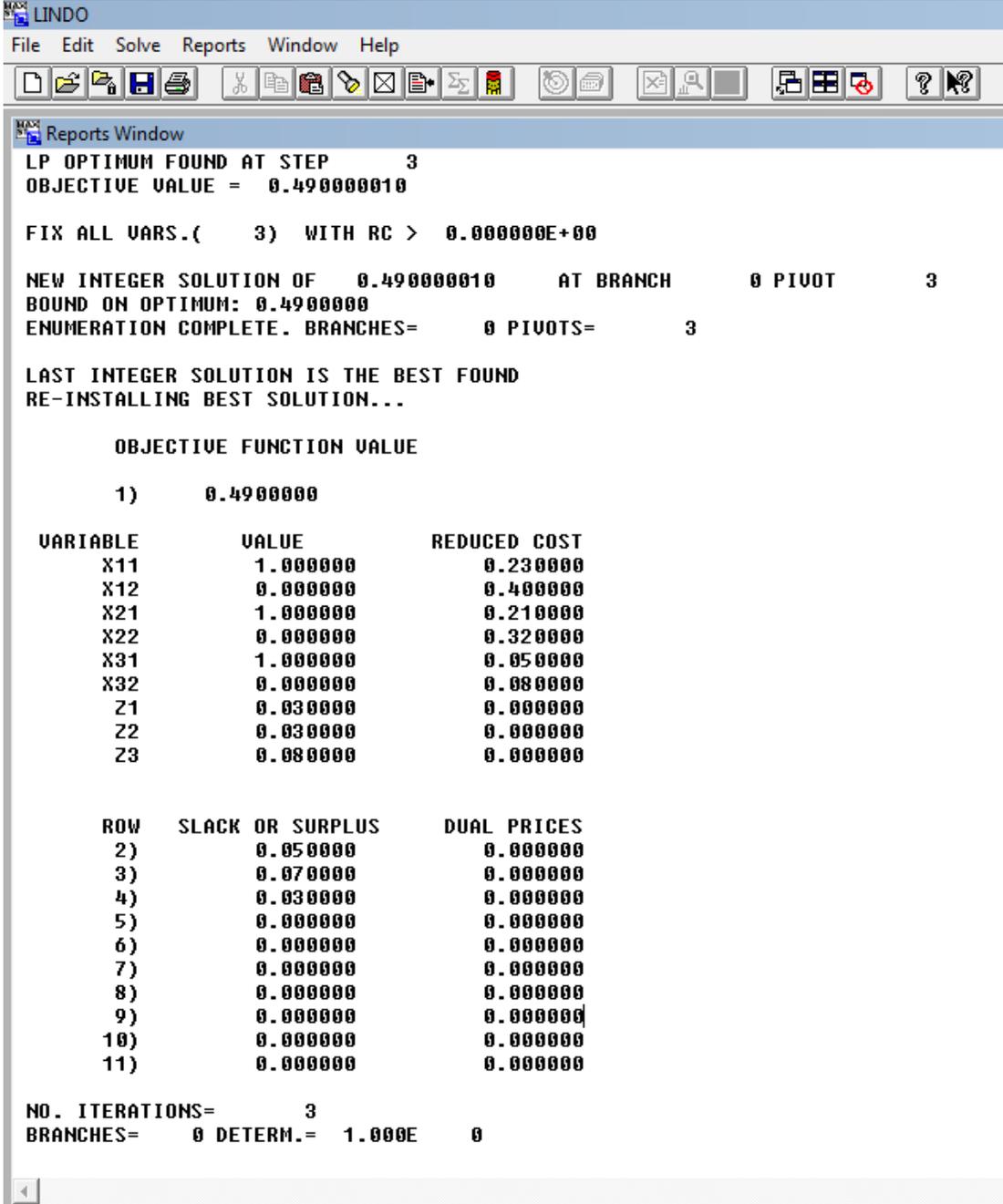
Anexo D

Resultados do ensaio para a determinação da composição química do material

 <p style="text-align: center;">PEDIDO DE SERVIÇOS AVULSO - CP Nº 35.527/08</p> <p>CLIENTE: CEFET - PE CORTESIA</p>											
TIPO DE ANÁLISE: QUÍMICA (X) FÍSICA () METALOGRAFIA ()											
QUANTIDADE MÍNIMA DE ELEMENTOS: 10											
PRAZO DE ENTREGA: 05 DIAS											
ANÁLISE QUÍMICA (EM ESPECTRÔMETRO COMPUTADORIZADO)											
MATERIAL: SAE 1020											
AMOSTRA Nº	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Al	% Cu	% V
1	0,22	0,18	0,51	0,019	0,031	0,06	0,14	0,03	0,003	0,21	0,001
PROPRIEDADES MECÂNICAS											
ENSAIO DE TRAÇÃO/NORMA *****											
ENSAIO DE IMPACTO/NORMA *****											
AMOSTRA Nº	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO Kgf/mm ²	LIMITE DE ESCOAMENTO Kgf/mm	ALONGAMENTO %	REDUÇÃO DE ÁREA	DUREZA HB	ENSAIO DE IMPACTO					
****	****	****	***	***	****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
ENSAIO METALOGRÁFICO											
AMOSTRA Nº	METALOGRAFIA					FOTOMICROGRAFIA					
***	*****					*****	*****	*****	*****	*****	*****
A/C : Prof. Paulo Chagas											
Material classificado conforme norma SAE J 403 / 01											
ANALISTA DA QUALIDADE						GERENTE DA QUALIDADE					
Abel Rodrigues Dias						Cristiane Duran					
DATA: 08 / 05 / 08 VISTO						DATA: 08 / 05 / 08 VISTO					
Unidade STZ SIMISA SIMIONI METALURGICA LTDA Marginal Antônio Waldir Martinelli, 3013 CEP 14175-300 - Sertãozinho / SP PABX: (16) 3946.1200 - FAX: (16) 3946.1201						Unidade CSA SIMISA SIMIONI METALURGICA LTDA Rau da Matriz s/nº Pontezinha-Cabo-PE. CEP 54.530-000 - Cabo Stº. Agostinho / PE PABX: (81) 3479.1011 - FAX: (81) 3479.1377					

Anexo E

Dados de saída do programa de programação linear LINDO referentes à síntese das tolerâncias dimensionais determinísticas no projeto das peças fabricadas



The screenshot shows the LINDO software interface. The title bar reads 'LINDO'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Solve', 'Reports', 'Window', and 'Help'. The toolbar contains various icons for file operations and solving. The main window is titled 'Reports Window' and displays the following text:

```

LP OPTIMUM FOUND AT STEP      3
OBJECTIVE VALUE =  0.490000010

FIX ALL VARS.(    3) WITH RC >  0.000000E+00

NEW INTEGER SOLUTION OF  0.490000010    AT BRANCH      0 PIVOT      3
BOUND ON OPTIMUM: 0.49000000
ENUMERATION COMPLETE. BRANCHES=      0 PIVOTS=      3

LAST INTEGER SOLUTION IS THE BEST FOUND
RE-INSTALLING BEST SOLUTION...

      OBJECTIVE FUNCTION VALUE

    1)      0.49000000

VARIABLE      VALUE      REDUCED COST
X11           1.000000      0.230000
X12           0.000000      0.400000
X21           1.000000      0.210000
X22           0.000000      0.320000
X31           1.000000      0.050000
X32           0.000000      0.080000
Z1            0.030000      0.000000
Z2            0.030000      0.000000
Z3            0.080000      0.000000

      ROW      SLACK OR SURPLUS      DUAL PRICES
    2)           0.050000           0.000000
    3)           0.070000           0.000000
    4)           0.030000           0.000000
    5)           0.000000           0.000000
    6)           0.000000           0.000000
    7)           0.000000           0.000000
    8)           0.000000           0.000000
    9)           0.000000           0.000000
   10)           0.000000           0.000000
   11)           0.000000           0.000000

NO. ITERATIONS=      3
BRANCHES=      0 DETERM.=  1.000E  0
  
```