

MON
621.9
S2370
TES/mcm

2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Título: "OTIMIZAÇÃO DE ENSAIOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO
DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR EXPANDIDA"

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por :

ANDRÉ LUIS BELONI DOS SANTOS

para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

DIRBI/UFU 621.9-S2370 /TES/FU
MON - 00982/96



1000164414

Banca examinadora:

- | | | |
|--|---|----------|
| Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte (Orientador) | - | UFU |
| Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão (Examinador) | - | UFU |
| Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho (Examinador) | - | EESC/USP |

Uberlândia, 19 de Abril de 1996

À minha esposa, Cleide, pelo carinho e compreensão.

Aos meus pais, Teresa e Luis Adão.

Aos meus irmãos, Adriano e Rogério.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 CSRB - DIRETORIA DE BIBLIOTECAS

Procedência _____

Valor R\$ doação

Res. nº 1.96

C.P.D. _____

N. Fiscal/Imp. _____

Reg. 00982/96 Data 29.07.96

Vol. _____ Ex. 1

FU-00006049-1

Ao Professor Dr. Alisson Rocha Machado, pelo incentivo
 e principalmente pela confiança depositada na equipe
 para o desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte, pelo incentivo, suporte técnico e orientação, fundamentais à realização deste trabalho.
- Ao Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão, pelo auxílio e co-orientação.
- Ao Departamento de Engenharia Mecânica e a Coordenação do Curso de Pós-Graduação, pela oportunidade de realização deste trabalho.
- Aos professores do curso de pós-graduação, pelos conhecimentos passados.
- Aos companheiros e alunos do curso de Pós-Graduação, pelo coleguismo.
- Aos colegas da Oficina Mecânica da UFU e à técnica Ângela Maria da Silva Andrade, do LEM-UFU, pela colaboração.
- Ao técnico Reginaldo Ferreira de Souza do LPU-UFU, pelo apoio na condução dos testes experimentais.
- À VILLARES S/A - Usina Anhanguera, pela doação do material de trabalho.
- À SANDVIK, pela doação do suporte das ferramentas de corte.
- À CAPES, pelo apoio financeiro.
- A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

OTIMIZAÇÃO DE ENSAIOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES
DA EQUAÇÃO DE TAYLOR EXPANDIDA

SUMÁRIO

	PAG.
1. INTRODUÇÃO -----	1
2. CONSIDERAÇÕES SOBRE DESGASTE E VIDA DE FERRAMENTAS DE CORTE NO PROCESSO DE FRESAMENTO -----	5
2.1. AVARIAS NAS FERRAMENTAS DE CORTE DURANTE O FRESAMENTO -----	5
2.2. EFEITOS TÉRMICOS NO PROCESSO DE CORTE INTERROMPIDO ----	6
2.3. MECANISMOS DE DESGASTE -----	11
2.3.1. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA SUPERFICIAL POR CISALHAMENTO A ALTAS TEMPERATURAS -----	12
2.3.2. DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DEVIDO A TENSÕES DE COMPRESSÃO -----	12
2.3.3. DESGASTE POR DIFUSÃO -----	13
2.3.4. DESGASTE POR ADERÊNCIA E ARRASTAMENTO -----	13
2.3.5. DESGASTE ABRASIVO -----	14
2.3.6. DESGASTE DE ENTALHE -----	14
2.4. FORMAS DE DESGASTE -----	15
2.4.1. DESGASTE DE CRATERA -----	16
2.4.2. DESGASTE DE ENTALHE -----	17

2.4.3.	DESGASTE DE FLANCO	-----	17
2.5.	VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE	-----	18
2.6.	CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA	-----	19
3.	METODOLOGIA DO PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL PARA A OTIMIZAÇÃO DE ENSAIOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR EXPANDIDA	-----	21
3.1.	ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR	-----	22
3.2.	O PROGRAMA TAYLOR	-----	29
3.2.1.	ENTRADA DE DADOS	-----	30
3.2.2.	CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE SENSIBILIDADE 'X' E DA MATRIZ 'V'	-----	31
3.2.3.	ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR	-----	32
3.2.4.	ESTIMATIVA DOS DESVIOS PADRÕES DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR	-----	32
3.2.5.	SAÍDA DOS RESULTADOS	-----	35
3.2.5.1.	ERRO MÉDIO	-----	37
3.2.5.2.	DESVIO PADRÃO	-----	38
3.2.5.3.	ERRO PORCENTUAL MÉDIO	-----	38
3.3.	O CRITÉRIO DE EXPERIMENTO ÓTIMO	-----	39
3.3.1.	O PROJETO DO EXPERIMENTO ÓTIMO	-----	43
3.4.	O PROGRAMA INIT	-----	47

3.4.1.	ENTRADA DE DADOS	47
3.4.2.	A DETERMINAÇÃO DO CONJUNTO DE PARÂMETROS DE CORTE ÓTIMO	48
3.4.3.	SAÍDA DOS RESULTADOS	49
3.5.	O PROGRAMA OTIMO	49
3.6.	RESULTADOS DE SIMULAÇÕES	51
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	55
4.1.	MATERIAIS	55
4.2.	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	58
4.3.	PROCEDIMENTOS PARA O PROJETO DE EXPERIMENTO ÓTIMO	60
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1.	TESTES DE VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE	65
6.	CONCLUSÕES	78
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
8.	ANEXOS	86

RESUMO

Santos, A.L.B. - "Otimização de Ensaios Utilizados na Determinação dos Coeficientes da Equação de Taylor Expandida", Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 1996.

A falta de uma metodologia criteriosa, quando da programação de ensaios de vida de ferramentas de corte para a determinação dos coeficientes da equação de Taylor, pode proporcionar resultados pouco confiáveis. Neste trabalho é apresentado um procedimento de otimização que gera o melhor conjunto de parâmetros de corte para ser utilizado em ensaios para o ajuste dos coeficientes da equação de Taylor expandida, em processos de usinagem. É apresentada uma metodologia para a identificação de intervalos de confiabilidade dos coeficientes da equação de Taylor e dos tempos de vida das ferramentas de corte. Para a validação dos procedimentos propostos, o trabalho experimental envolveu o fresamento frontal do aço ABNT 1045 (192 HB de dureza média) utilizando-se pastilhas de metal duro revestidas da classe ISO P45 M35. Desta forma foi possível também verificar a confiabilidade da equação de Taylor como modelo representativo do processo de fresamento. Os resultados indicaram que a metodologia utilizada proporcionou uma sensível redução no número de ensaios necessários à obtenção da confiabilidade desejada dos coeficientes da equação de Taylor expandida, comparativamente aos procedimentos normalmente empregados, com grande redução de custos e aumento de eficiência quando da determinação de condições otimizadas de usinagem.

Palavras Chave

Equação de Taylor expandida, Intervalos de confiança, Otimização de parâmetros, Fresamento.

ABSTRACT

Santos, A.L.B. - "Optimization Procedure for Machining Tests when Determining the Coefficients of Taylor's Expanded Equation", Msc. Thesis, UFU, Uberlândia-MG, 1996.

The absence of a criterious methodology when carrying out cutting tool life trials for the determination of the Taylor's equation coefficients, may lead to unreliable results. This work presents an optimized procedure to generate the most appropriated group of cutting parameters to be used during the tests to obtain the adjustment of the coefficients of Taylor's equation for machining processes. A method is proposed to determine the confidence intervals of Taylor's expanded equation coefficients and to predict cutting tool life. In order to validate the proposed methodology, face milling trials of ABNT 1045 steel (average hardness of 192 HB) were carried out using coated carbide inserts (ISO grade P45 M35). This allowed the reliability of Taylor's equation for milling operations to be verified. The results indicated that the suggested procedure provided a considerable reduction in the amount of tests required to obtain reliable coefficients, in comparison to traditional approaches. Additionally, a great reduction in costs and an increase in efficiency was achieved when establishing optimized cutting conditions.

Key Words

Taylor's expanded equation, Confidence intervals, Optimization of parameters, Face milling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS	PAG.
2.1 - Variação cíclica da temperatura de corte no processo de corte interrompido [26]. -----	7
2.2 - Distribuição da temperatura e de tensões em pastilhas de metal duro no corte interrompido [26]. -----	8
2.3 - Sulcos desenvolvidos em forma de pente (<i>combracks</i>) [26]. -----	9
2.4 - Esquema representativo do processo de 'formação do pé' [16]. -----	10
2.5 - Mecanismos e processos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte [28]. -----	11
2.6 - Principais áreas de desgaste em uma ferramenta de corte [32]. -----	16
2.7 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte [36]. -----	19
3.1 - Diagrama de blocos do programa TAYLOR. -----	30
3.2 - Estrutura dos dados de entrada do programa TAYLOR. -----	31
3.3 - Forma de saída dos resultados estimados. -----	36

3.4	-	Diagrama de blocos do programa INIT. -----	47
3.5	-	Estrutura dos dados de entrada do programa INIT. -----	48
3.6	-	Forma de saída dos resultados do programa INIT. -----	49
3.7	-	Precisão de T_m vs. o número de ensaios. -----	54
4.1	-	Geometria das ferramentas utilizadas no trabalho experimental. -----	56
4.2	-	Micro-estrutura ao longo da seção transversal do material ABNT 1045. Em ordem de exposição, (a), (b), (c) e (d), desde a região mais próxima à extremidade livre do material (a), até o centro da peça (d). -----	57
4.3	-	Fresadora CNC Romi Interact 4. -----	58
4.4	-	Microscópio ferramenteiro para a medição de desgaste em ensaios de vida de ferramentas de corte. -----	59
5.1	-	Desgaste de flanco de ferramentas para diferentes condições de usinagem: (a) $V_C=207$ m/min., $f_Z=0.148$ mm/rev., $a_p=1.52$ mm, $VB_{MAX}=0.686$ mm (b) $V_C=263$ m/min., $f_Z=0.142$ mm/rev., $a_p=1.51$ mm, $VB_{MAX}=1.253$ mm (c) $V_C=100$ m/min., $f_Z=0.05$ mm/rev., $a_p=1.75$ mm, $VB_{MAX}=0.382$ mm (d) $V_C=251$ m/min., $f_Z=0.09$ mm/rev., $a_p=2.22$ mm, $VB_{MAX}=1.553$ mm. -----	66
5.2	-	Valores de erro médio porcentual para teste programado e teste prático. -----	70
5.3	-	Valores de desvio padrão para teste programado e teste prático. -----	71

5.4	-	Valores do coeficiente H da equação de Taylor para teste programado e teste prático. -----	72
5.5	-	Valores do coeficiente E da equação de Taylor para teste programado e teste prático. -----	74
5.6	-	Valores absolutos do coeficiente F da equação de Taylor para teste programado e teste prático. -----	75
5.7	-	Valores absolutos do coeficiente G da equação de Taylor para teste programado e teste prático. -----	76

LISTA DE TABELAS

TABELAS		PAG.
3.1	- Dados utilizados para o ajuste da reta $y = \alpha x$. -----	41
3.2	- Resultados do ajuste da reta $y = \alpha x$. -----	42
3.3	- Valores do coeficiente da equação de Taylor expandida assumidos como exatos. -----	51
3.4	- Erro dos coeficientes da equação de Taylor. -----	52
4.1	- Faixas de trabalho adotadas para as variáveis de corte, necessárias à inicialização do procedimento de experimento ótimo. -----	61
4.2	- Condições de corte iniciais geradas pelo programa INIT. -----	61
5.1	- Valores de variáveis de corte geradas segundo a metodologia do experimento ótimo. -----	65
5.2	- Valores de variáveis de corte definidos [12], para a realização de testes de vida. -----	67

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

- A - Coeficiente da equação de Taylor relativo ao parâmetro de corte V_C .
- B - Coeficiente da equação de Taylor relativo ao parâmetro de corte f .
- C - Coeficiente da equação de Taylor relativo ao parâmetro de corte a_p .
- Constante para a equação de Taylor escrita em função do tempo de vida T da ferramenta de corte.
- \bar{C} - Constante conhecida da equação de Taylor.
- D - Coeficiente da equação de Taylor relativo ao tempo de vida T da ferramenta.
- E - Coeficiente da equação de Taylor relativo ao parâmetro de corte f .
- F - Coeficiente da equação de Taylor relativo ao parâmetro de corte a_p .
- G - Coeficiente da equação de Taylor relativo ao tempo de vida T da ferramenta.
- H - Coeficiente da equação de Taylor relativo ao desgaste VB da ferramenta.
- HB - Dureza Brinnell.
- KT - Profundidade máxima de cratera.

K	-	Constante para a equação de Taylor.
K_r	-	Pior valor do conjunto de parâmetros de corte escolhido aleatoriamente.
MaxVSX	-	Valor singular máximo da matriz de sensibilidade.
MinVSX	-	Valor singular mínimo da matriz de sensibilidade.
N	-	Número de ensaios.
	-	Distribuição normal.
N_p	-	Número de coeficientes da equação de Taylor a serem estimados.
NC	-	Número de condicionamento da matriz sensibilidade.
R_a	-	Rugosidade média (μm).
T	-	Tempo de corte (min.).
T_I	-	Tempo inferior ou mínimo de vida da ferramenta para um certo desgaste.
T_M	-	Tempo médio de vida da ferramenta para determinado desgaste VB.
T_S	-	Tempo superior ou máximo de vida da ferramenta para um certo desgaste.
TiN	-	Nitreto de titânio.
TiC	-	Carboneto de titânio.
T_{MED}	-	Tempo de corte medido nos ensaios de vida das ferramentas.

T_{CAL}	-	Tempo de corte calculado computacionalmente.
T_m	-	Tempo de vida máximo da ferramenta de corte.
V	-	Matriz inversa da matriz sensibilidade.
V_C	-	Velocidade de corte (m/min.).
V_{ii}	-	I-ésimo valor da inversa da matriz sensibilidade V .
V_I	-	Valor inferior ou mínimo dos coeficientes estimados da equação de Taylor.
V_M	-	Valor médio dos coeficientes estimados da equação de Taylor.
V_S	-	Valor superior ou máximo dos coeficientes estimados da equação de Taylor.
VB_B	-	Desgaste de flanco médio da ferramenta de corte.
VB_{MAX}	-	Máximo valor do desgaste de flanco na ferramenta de corte.
VN	-	Desgaste de entalhe (mm).
X	-	Matriz de sensibilidade.
Y	-	Vetor do logaritmo Neperiano dos valores de desgaste de flanco VB_{MAX} .
a_p	-	Profundidade de corte (mm).
b	-	Vetor dos coeficientes ajustados da equação de Taylor.

b_i	-	Coeficientes do vetor b .
b_s	-	Largura do chanfro da ferramenta.
f	-	Avanço (mm/rev.).
f_z	-	Avanço por dente (mm).
l	-	Largura da ferramenta.
l_a	-	Largura da aresta de corte principal.
$l.c.$	-	Diâmetro da circunferência inscrita na seção quadrada da ferramenta.
s	-	Espessura da ferramenta.
x	-	Variável independente.
	-	Coeficiente da equação de Taylor relativo ao parâmetro de corte V_C .
y	-	Variável independente.
z	-	Número de dentes da ferramenta de corte.
	-	Variável dependente.

LETRAS GREGAS

Δ	-	Intervalo de confiança para determinada variável.
η	-	Média do desvio padrão.
α	-	Constante de proporcionalidade.
α_0	-	Ângulo de folga.
λ_s	-	Ângulo de inclinação.
γ_0	-	Ângulo de saída.
χ_r	-	Ângulo de posição principal.
σ	-	Desvio padrão.
μ	-	Erro médio.
$\varepsilon\%$	-	Erro porcentual médio.

OPERADORES

∂	-	Derivada parcial.
------------	---	-------------------

SUPER-ÍNDICES

- $[]^T$ - Indica a transposta da matriz.
 - $[]^{-1}$ - Indica a inversa da matriz.
 - *
- Indica que o valor o qual está relacionada é estimado.

OUTROS SÍMBOLOS

- $\| \|$ - Módulo de uma função.

1. INTRODUÇÃO

A concentração de esforços na busca de maior produtividade e qualidade dos produtos e processos de fabricação existentes é uma preocupação cada vez mais cultural na moderna engenharia de processo. A evolução dos processos de usinagem, com exigências cada vez maiores de equipamentos e ferramental de corte, fez surgir a necessidade de se obter uma relação que expressasse a influência das condições de corte sobre o processo. O primeiro modelo matemático que procurou equacionar o comportamento dos processos de usinagem, foi publicado por F.W. Taylor [1], em 1907, Equação 1.1 .

$$T = K \cdot V_C^{-X} \quad (1.1)$$

onde, T é o tempo de vida da ferramenta de corte.

K é uma constante.

V_C é a velocidade de corte da ferramenta.

X é o coeficiente da variável de corte V_C .

Posteriormente surgiram variações desta equação [2], tanto para considerar a influência de outras variáveis, tentando alcançar maior precisão na identificação do comportamento das mesmas, como também para extrapolar o modelo a outros processos de fabricação além do de torneamento, tomado como referência nas primeiras pesquisas desenvolvidas na área de usinagem. Outros pesquisadores [3] também propuseram diferentes equações para relacionar os parâmetros de usinagem. Colding [4] mostrou que as curvas de vida das ferramentas podem

sofrer variações em sua forma linear, principalmente a baixas velocidades de corte, propondo um outro modelo para considerar tal comportamento.

Alguns estudos [5] procuraram reproduzir o processo de corte através de modelos mais complexos, com um número muito grande de variáveis para tentar alcançar a maior precisão na identificação de seu comportamento. Verificou-se que modelos como esses não apresentavam grande aplicação prática em função do grande número de constantes a serem identificadas, assim como de algumas não representarem de maneira confiável o comportamento do processo.

Devido a complexidade e principalmente ao envolvimento de um grande número de variáveis envolvidas nos processos de usinagem (que tornam difícil o equacionamento da influência das condições de corte sobre as variáveis de estado do processo), pode-se afirmar que ainda não existe um modelo matemático confiável que possa equacionar de forma completa tal problema, pelo menos a nível de aplicação industrial [6].

Normalmente, a equação de Taylor é utilizada como modelo para processos de otimização de ensaios de vida de ferramentas de corte, sendo que seus coeficientes, estimados a partir de resultados experimentais, possibilitam a comparação de desempenho de ferramentas e procedimentos de fabricação [7]. Para tanto, os coeficientes da equação de Taylor são avaliados utilizando-se estimadores de mínimos quadrados em conjunto com uma série de valores medidos para diversas condições de usinagem. Todo procedimento é feito de maneira empírica, sem que nenhum critério seja observado, quer no projeto dos experimentos, quer na confiabilidade dos valores estimados para os coeficientes da equação de Taylor.

Com relação à confiabilidade dos coeficientes, é possível estimar um intervalo de confiança para os mesmos [8], quando da utilização do estimador de máximo a posteriori. Com relação ao projeto do experimento, Duarte e Arruda [9] apresentam um critério de experimento ótimo baseado na razão entre os valores singulares máximos e mínimos da matriz de

sensibilidade. Este critério de otimização foi utilizado com sucesso em projetos de experimento para identificação de sistemas não lineares [10].

Deste modo, este trabalho tem o objetivo de estabelecer uma metodologia criteriosa, tanto para o procedimento experimental, como para a obtenção da confiabilidade desejada dos coeficientes da equação de Taylor em processos de usinagem. É proposto um estimador para a confiabilidade da equação de Taylor expandida, cujos coeficientes foram estimados via procedimentos de mínimos quadrados comuns, assim como apresentado um procedimento computacional para a determinação de parâmetros de corte ótimos, a serem utilizados em procedimentos de identificação dos coeficientes da equação de Taylor expandida para processos de usinagem.

A obtenção de condições de corte otimizadas, através de tratamento estatístico e computacional, possibilita obter a confiabilidade dos coeficientes da equação de Taylor expandida de forma muito mais rápida e precisa, garantindo a repetibilidade dos ensaios de vida das ferramentas com a realização de um número de testes muito reduzido, e conseguindo desta maneira, grande redução dos custos de usinagem (economia de material, ferramental de corte, hora-máquina, hora-homem, entre outros).

Para a realização dos ensaios de vida das ferramentas e confirmação do procedimento descrito, adotou-se o processo de usinagem de fresamento frontal. Desta forma este trabalho pôde, além de oferecer uma metodologia de otimização para a determinação de intervalos de confiabilidade dos coeficientes da equação de Taylor expandida, para processos de usinagem, verificar a confiabilidade da equação de Taylor como modelo representativo do comportamento do processo de fresamento.

Este trabalho apresenta no capítulo 2 uma breve revisão bibliográfica a respeito dos ensaios de vida de ferramentas de corte para o processo de fresamento, ressaltando as formas e

mecanismos de desgaste inerentes ao processo, os principais fenômenos responsáveis por avarias nas ferramentas durante o corte, assim como os critérios de vida utilizados para mensurar os desgastes ocorridos nas pastilhas durante a usinagem.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento dos programas computacionais de otimização e determinação dos coeficientes da equação de Taylor axpandida. Faz também uma simulação de resultados, confrontando os valores dos coeficientes obtidos a partir de conjuntos de parâmetros de corte utilizados em tese de mestrado por Motta [11], e os valores obtidos segundo o procedimento de otimização.

O capítulo 4 descreve todo procedimento experimental realizado, materiais e equipamentos utilizados, os ensaios de vida das ferramentas e o procedimento adotado para o projeto de experimento ótimo, mostrando a sequência de operações empregada para determinação dos coeficientes estimados da equação de Taylor expandida.

No capítulo 5 são apresentados os resultados relativos aos valores de variáveis de corte (V_C , f , a_p), gerados segundo a metodologia do experimento ótimo, e também de um segundo conjunto de variáveis, cujas condições de corte foram escolhidas seguindo um procedimento estatístico fatorial fracionado [12-13], dentro de intervalos sugeridos por catálogo de fabricante de ferramentas [14]. Dos valores decorrentes dos ensaios de vida realizados para as condições de corte obtidas segundo as duas metodologias propostas acima, foram determinados os intervalos de confiabilidade dos coeficientes estimados para a equação de Taylor expandida. De forma comparativa, graficamente, foi feita uma análise dos resultados obtidos para os coeficientes da equação de Taylor expandida, assim como do desvio padrão e erro médio porcentual para as duas situações propostas.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões a respeito da eficácia da metodologia proposta neste trabalho, e faz algumas sugestões para a continuidade do mesmo.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE DESGASTE E VIDA DE FERRAMENTAS DE CORTE NO PROCESSO DE FRESAMENTO

Em um processo de usinagem, existem duas causas principais para a rejeição das ferramentas de corte:

- a ocorrência de uma falha ou avaria, também conhecida como fratura súbita, que pode se dar sob a forma de lascamento, quebra ou trincamento (decorrente da utilização de condições de corte ou geometria da ferramenta inadequadas), ou ainda por algum defeito de fabricação.
- níveis elevados de desgaste tanto na superfície de saída como na superfície de folga, também chamado de desgaste progressivo.

2.1. AVARIAS NAS FERRAMENTAS DE CORTE DURANTE O FRESAMENTO

Em operações de fresamento, os choques mecânicos e térmicos, inerentes ao processo, são os principais fatores desencadeadores de avarias que levam à rejeição das ferramentas de corte. Tais falhas geralmente se processam por lascamento, trincamento ou quebra das superfícies de folga e saída, e ocorrerão com maior intensidade e rapidez quanto menor a tenacidade das ferramentas de corte. Alguns fatores a serem considerados são: o tipo de material de trabalho, o avanço utilizado, a velocidade de corte, a geometria da ferramenta e a presença de

vibrações, sendo que sob condições adequadas de trabalho, há quase sempre a tendência da ferramenta falhar por desgaste excessivo das arestas cortantes.

Boston and Gilbert [15], foram os primeiros a constatar a presença de trincas originadas a partir de efeitos térmicos na superfície de saída de ferramentas de metal duro durante o fresamento. Até então os choques mecânicos decorrentes da entrada da ferramenta na peça em um processo de corte interrompido, eram considerados os responsáveis pela reduzida vida da ferramenta de corte. Os efeitos mecânicos devido a saída da ferramenta da peça eram desconsiderados ou considerados de pequena influência.

Testes subsequentes mostraram a formação imediata e progressiva de lascamento na saída da ferramenta da peça, indicando a presença de um outro fenômeno responsável pela falha da ferramenta de corte [16]. Desde então, muitos pesquisadores [17-21] conduziram testes para demonstrar a hipótese de que o fenômeno térmico é o responsável pela formação dos *combracks*, ou sulcos em forma de pente, principal responsável por falhas de ferramentas de metal duro em cortes interrompidos a elevadas velocidades de corte.

2.2. EFEITOS TÉRMICOS NO PROCESSO DE CORTE INTERROMPIDO

A temperatura gerada durante o processo de corte intermitente é um parâmetro de grande significância no controle da vida da ferramenta. Investigações [21-25] mostraram que a temperatura no corte interrompido flutua ciclicamente, aumentando durante o tempo ativo (curva “a” da Figura 2.1) e diminuindo durante o tempo inativo de corte (curva “b” da Figura 2.1), e que os efeitos térmicos decorrentes desta variação de temperatura são dependentes das

condições de corte, principalmente da velocidade de corte, do avanço e da relação entre o tempo ativo e inativo de um ciclo, e também do material da peça e da ferramenta de corte. A curva "c" mostra uma composição das curvas "a" e "b" da Figura 2.1, representando o comportamento da temperatura na ferramenta de corte durante um corte interrompido.

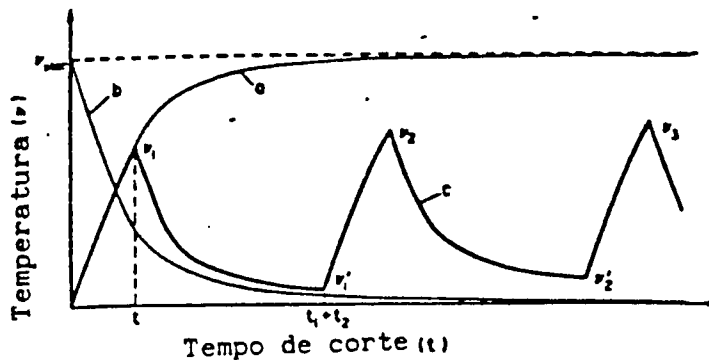


Figura 2.1 - Variação cíclica da temperatura de corte no processo de corte interrompido [26].

Segundo Zorev [26-27], a flutuação cíclica da temperatura na interface cavaco-ferramenta, conforme ilustrado na Figura 2.2, leva a uma modificação também cíclica da distribuição de tensões na região de corte da ferramenta. Estas tensões de tração, atuando na ferramenta durante o período inativo em um corte intermitente, são as maiores responsáveis pela formação de trincas, sendo os impactos mecânicos de grande importância no processo de propagação destas trincas iniciadas devido ao efeito térmico.

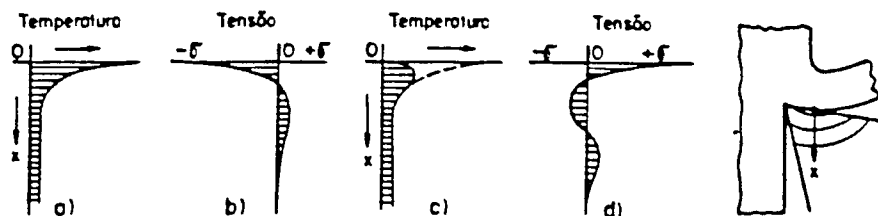


Figura 2.2 - Distribuição da temperatura e de tensões em pastilhas de metal duro, no corte interrompido [26].

O mecanismo de flutuação cíclica da temperatura e distribuição de tensões pode ser explicado da seguinte maneira [26] : “ A Figura 2.2 a) representa a curva de distribuição de temperatura em relação a profundidade ‘x’, a partir do ponto de contato cavaco ferramenta. A camada superficial , a uma temperatura bastante alta, se dilata. Porém, as camadas subsequentes a temperaturas inferiores, terão uma dilatação bem menor. Como consequência, tais camadas impedirão a ocorrência de uma dilatação muito maior na camada superficial, dando origem aí a tensões de compressão, Figura 2.2 b). Decorre portanto, tensões de tração a uma determinada distância ‘x’ da superfície de contato cavaco ferramenta. Em um instante de tempo posterior, com a variação da temperatura de corte, isto é, com o resfriamento da camada superficial (devido ao tempo inativo), esta camada estará submetida a tração, enquanto que as camadas subsequentes passarão a ser solicitadas a compressão, Figura 2.2 c) e Figura 2.2 d) ”. Além da ação cíclica do corte interrompido, este fenômeno pode também ser promovido por variação de temperatura causado por acesso irregular de refrigerante de corte [26]. Esta flutuação cíclica de tensões leva ao aparecimento de trincas por fadiga em ferramentas que não apresentam

tenacidade suficiente para suportarem tais tensões. Estas trincas, que são portanto de origem térmica, levarão ao desenvolvimento do que se conhece por sulcos desenvolvidos em forma de pente (*combracks*), ilustrado na Figura 2.3 .

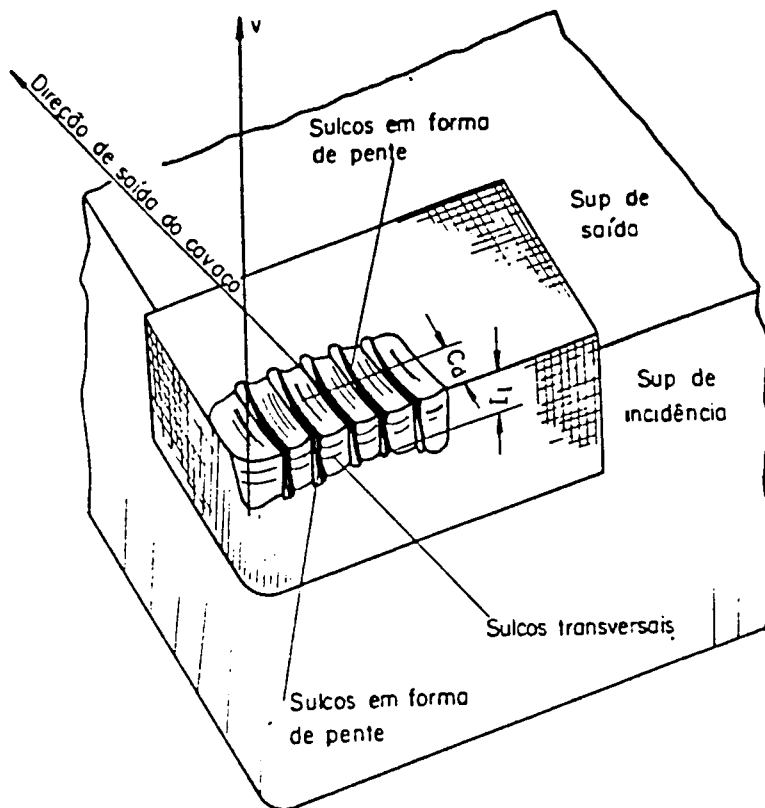


Figura 2.3 - Sulcos desenvolvidos em forma de pente (*combracks*) [26].

O número de sulcos está relacionado com o número de trincas térmicas, e depende da velocidade de corte, do avanço, da tenacidade da ferramenta de corte e do número de ciclos térmicos.

Segundo Pekelharing [16], o lascamento excessivo de ferramentas de metal duro usadas no fresamento é devido a problemas durante a saída da aresta de corte da peça. Quando a

ferramenta se aproxima da saída da peça, ocorre uma rotação no plano de cisalhamento primário, tornando-o negativo, resultando na ocorrência do fenômeno conhecido como 'formação do pé' (*foot forming*), pela semelhança desse com um pé humano. Isto faz com que as até então elevadas tensões de compressão atuantes na região do corte, passem a atuar como tensões de tração, levando à formação de trincas por fadiga nas arestas cortantes. A Figura 2.4 mostra a sequência de formação deste fenômeno, que é peculiar a determinadas geometrias de saída da peça.

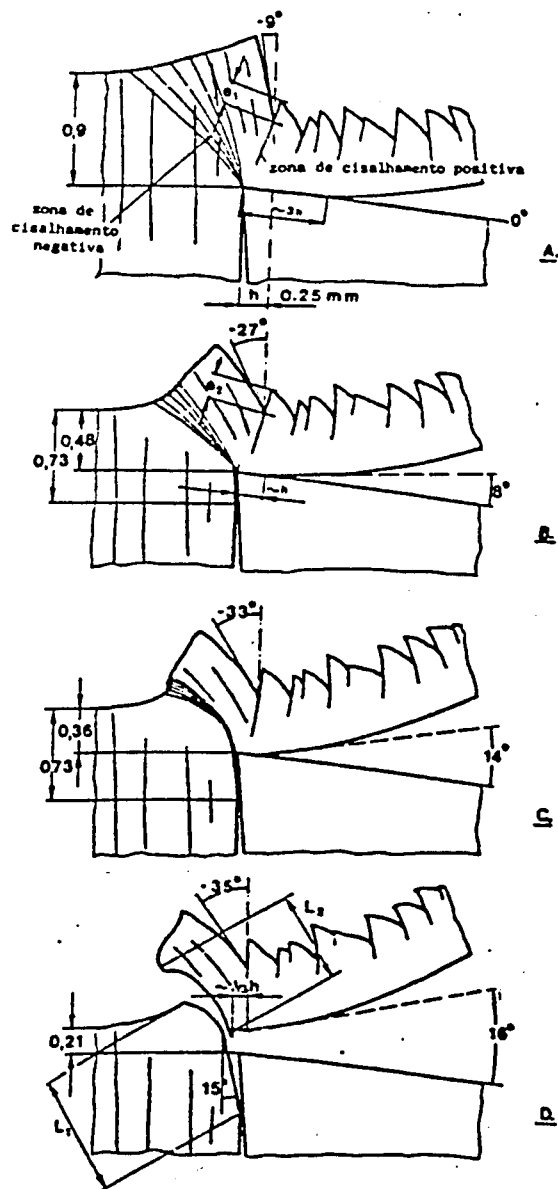


Figura 2.4 - Esquema representativo do processo de 'formação do pé' [16].

2.3. MECANISMOS DE DESGASTE

Trent [28] considera a existência de pelo menos seis processos e mecanismos de desgaste, conforme ilustrado na Figura 2.5, que seriam responsáveis pelas formas de desgaste ilustrados pela Figura 2.6 . São eles: deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas, deformação plástica devido a tensões de compressão, desgaste por difusão, desgaste por aderência e arrastamento, desgaste abrasivo e desgaste de entalhe.

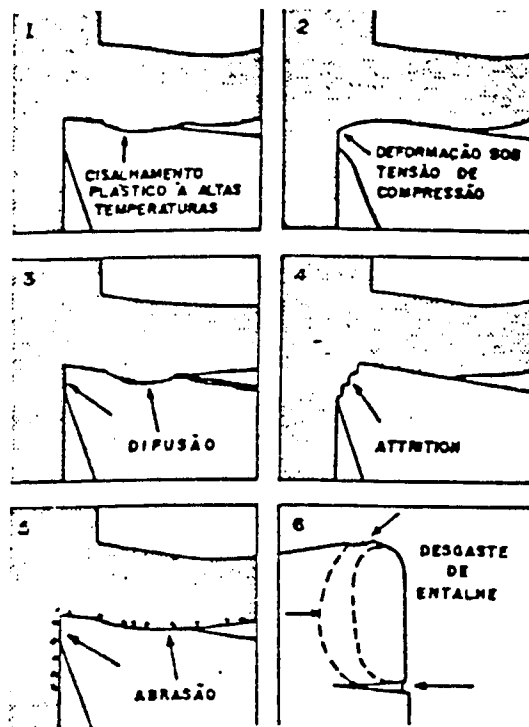


Figura 2.5 - Mecanismos e processos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte [28].

2.3.1. Deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas

É definido mais como um processo de desgaste, ocorrendo em ferramentas onde as tensões cisalhantes na interface cavaco-ferramenta são suficientes para causar deformação plástica na aresta de corte. Devido as altas temperaturas ali desenvolvidas, a resistência ao escoamento do material da ferramenta próximo a interface é reduzida, sendo as tensões cisalhantes suficientes para causar deformação plástica, arrancando material da superfície da ferramenta e formando uma cratera, conforme a Figura 2.5.1 .

2.3.2. Deformação plástica devido a tensões de compressão

Também é definido como um processo de desgaste, ocorrendo devido a nucleação e propagação de trincas causadas por altas tensões de compressão aliadas às altas temperaturas na superfície de saída, levando à fratura súbita. Este processo de desgaste é portanto, mais propício a acontecer em usinagens com altos valores de avanço ou quando usinando materiais de elevada dureza. No caso de ferramentas de metal duro revestido, as propriedades de deformação do substrato, ao invés da resistência ao desgaste do revestimento, determinarão o limite quando da usinagem a altas velocidades de corte [29], Figura 2.5.2 .

2.3.3. Desgaste por difusão

Este mecanismo de desgaste envolve a transferência de átomos entre os materiais da ferramenta e da peça a elevadas temperaturas, podendo ocorrer tanto na superfície de saída como na superfície de folga. A taxa de difusão depende da temperatura e da solubilidade das diferentes fases dos elementos envolvidos, muito mais do que da dureza do material da ferramenta de corte [30], (Figura. 2.5.3).

2.3.4. Desgaste por aderência e arrastamento

Este mecanismo de desgaste, também conhecido por *attrition*, ocorre em geral a baixas velocidades de corte, quando o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular, como no caso de usinagem com a presença da aresta postiça de corte, tornando o contato com a ferramenta de corte não contínuo. Sob tais circunstâncias, fortes ligações são formadas entre as camadas em contato do cavaco e da ferramenta de corte. Se tais ligações são mais fortes do que a resistência local do material da ferramenta, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente a interface, levando ao desgaste da mesma. No caso de ferramentas de metal duro, o tamanho do grão é mais importante para a taxa de desgaste por *attrition* do que a dureza da ferramenta em si (grãos finos são mais resistentes do que grãos grosseiros), Figura 2.5.4 .

2.3.5. Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo envolve a perda de material por microsulcamento, e requer a presença de partículas de dureza superior ao material da ferramenta (carbonetos, impurezas, etc...), contidas no material de trabalho, e que são forçadas contra a superfície da ferramenta de corte durante a usinagem. Pode também resultar de partículas duras presentes na própria ferramenta, que são arrancadas por *attrition*, por exemplo (Figura 2.5.5), ou ainda ser causado por óxidos que se formam na superfície de saída da ferramenta durante a usinagem, e que são removidos durante o processo.

2.3.6. Degaste de entalhe

O desgaste de entalhe é considerado por Trent [28] como um processo, ao invés de um mecanismo de desgaste. Ele é caracterizado pela formação de entalhes profundos em forma de 'V' nas arestas principal e secundária de corte, ocorrendo principalmente na usinagem de materiais resistentes a elevadas temperaturas, tais como: ligas de Ni, Ti, Co, aço inox, etc... Ainda não existe um consenso entre os pesquisadores que explique exatamente o mecanismo que provoca o desgaste de entalhe, embora hajam algumas suspeitas [30], tais como:

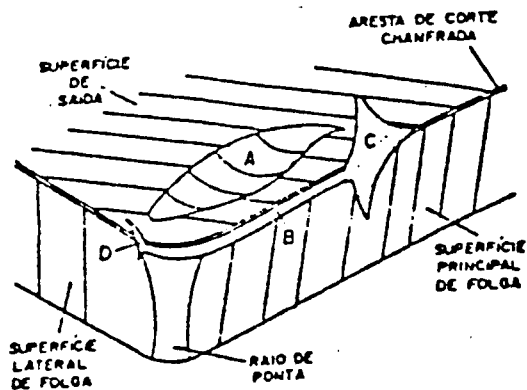
- a presença de uma camada abrasiva de óxido na superfície de usinagem.
- concentração de tensões.

- trincas térmicas causadas por um gradiente de temperatura súbito.
- presença de rebarbas na superfície a ser usinada.
- presença de uma camada encruada subsequente à superfície de corte.
- fluxo de aresta postiça de corte paralelo à aresta de corte.
- fadiga do material da ferramenta causada pela flutuação de força na superfície livre, acompanhado de pequenos movimentos laterais da aresta do cavaco.

Trent [28] sugeriu que óxidos se formariam continuamente na interface cavaco-ferramenta, aderindo-se então à ferramenta, sendo que a quebra das junções de aderência entre os óxidos e a ferramenta poderia, ocasionalmente, remover material da superfície desta última. Entretanto, Shaw et alii [31] afirmam que o entalhe na forma de 'V' é formado pelas rebarbas produzidas nas arestas laterais do cavaco, envolvendo um mecanismo de aderência e arrancamento (*attrition*), Figura 2.5.6 .

2.4. FORMAS DE DESGASTE

Durante a usinagem dos metais, a ação do corte promove uma mudança na forma e portanto na geometria original da ferramenta de corte, ocasionando um desgaste progressivo tanto na superfície de folga como na superfície de saída, reduzindo a eficiência da operação. A Figura 2.6 mostra as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte e identifica três formas de desgaste.



- . Desgaste de cratera (área A)
- . Desgaste de flanco (área B)
- . Desgaste de entalhe (áreas C e D)

Figura 2.6 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte [32].

2.4.1. Desgaste de cratera

Este tipo de desgaste geralmente está associado às elevadas temperaturas geradas na interface cavaco ferramenta, ocorrendo devido a combinação dos mecanismos de desgaste denominados difusão e adesão, durante o deslizamento do cavaco pela superfície de saída da ferramenta [33]. A máxima profundidade de cratera geralmente ocorre próxima ao ponto médio do comprimento de contato entre o cavaco e a superfície de saída, onde, acredita-se, a temperatura atinja seu maior valor. A posição da cratera relativa a aresta de corte varia de acordo com o material usinado, ocorrendo em geral atrás da aresta de corte. A profundidade e a largura da cratera formada na superfície de saída da ferramenta, estão relacionadas à velocidade e ao avanço empregados durante o processo de corte [35].

2.4.2. Desgaste de entalhe

O mecanismo que determina como o desgaste de entalhe realmente acontece ainda não está bem definido, conforme comentado no item 2.3.6 . Sob certas circunstâncias e condições de operação, um grande entalhe é formado na aresta principal de corte (detalhe 'C' da Figura 2.6), na extremidade livre do cavaco, levando ao enfraquecimento da aresta de corte. Entalhes menores também são formados na aresta secundária de corte (detalhe 'D' da Figura 2.6), influenciando principalmente o acabamento superficial produzido.

2.4.3. Desgaste de flanco

Este tipo de desgaste é em geral o principal fator a limitar a vida das ferramentas de corte. Decorre da perda do ângulo de folga da ferramenta, ocasionando um aumento da área de contato entre a superfície de folga e o material da peça, aumentando conseqüentemente o atrito naquela área. A taxa de desgaste de flanco é bastante elevada no início do processo de corte, decrescendo a partir de um valor crítico. Com o decorrer do processo de corte, um segundo valor crítico é alcançado, a partir do qual a taxa de desgaste aumenta drasticamente.

2.5. VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE

Pode ser definida [35] como sendo o tempo em que a ferramenta de corte trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. O fim de vida de uma ferramenta de corte será definido pelo grau de desgaste estabelecido. A grandeza deste desgaste, ou a fixação de um nível de desgaste permitido irá depender de inúmeros fatores, tais como:

- acabamento superficial não satisfatório;
- tolerâncias dimensionais não são mais possíveis de se obter;
- aumento excessivo da força de corte;
- temperatura excessiva atingida pela ferramenta;
- receio de quebra da aresta de corte devido ao desgaste;

Através do controle de um destes fatores, e adotando-se um critério de fim de vida, pode-se saber o momento adequado para a substituição da ferramenta de corte.

2.6. CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA

Os critérios recomendados pela norma ISO 3685 [36] para ferramentas de metal duro, aço rápido e cerâmicas, são (ver Figura 2.7):

- desgaste de flanco médio, $VB_B = 0.3\text{mm}$.
- desgaste de flanco máximo, $VB_{MAX} = 0.6\text{mm}$.
- profundidade máxima de cratera, $KT = 0.06 + 0.3f$, onde f é o avanço em mm/revolução
- desgaste de entalhe, $VN = 1.0\text{mm}$.
- falha catastrófica.

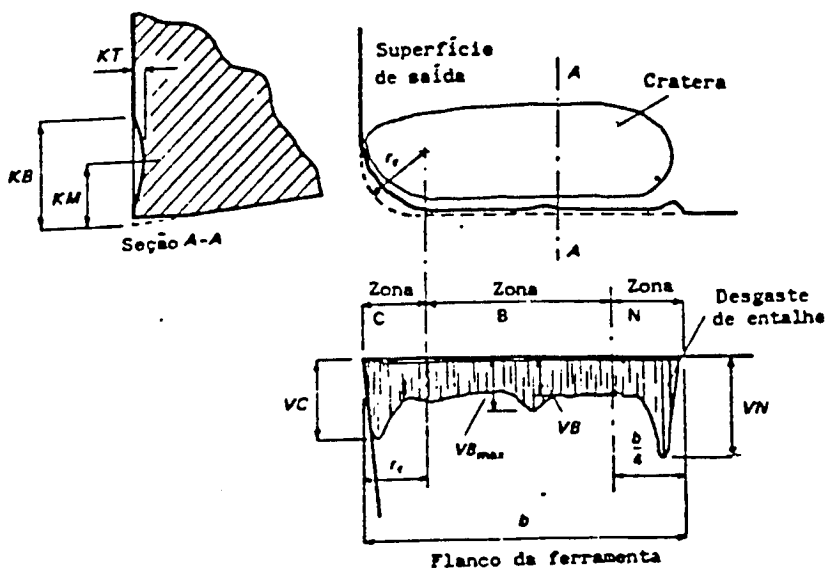


Figura 2.7 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte [36].

É importante salientar que os valores sugeridos pela ISO 3685 [36] dizem respeito a testes de vida de ferramentas de corte, sendo que industrialmente estes parâmetros podem assumir valores diferentes, pois eles dependem de vários fatores, que variam para cada empresa, tais como:

- rigidez da máquina ferramenta
- precisão requerida na peça
- acabamento superficial exigido

3. METODOLOGIA DO PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL PARA A OTIMIZAÇÃO DE ENSAIOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR EXPANDIDA

Normalmente, os coeficientes da equação de Taylor são avaliados utilizando-se o estimador de mínimos quadrados comum [37] em conjunto com uma série de valores medidos para diversas condições de usinagem. Infelizmente, nenhum critério é observado, quer seja no projeto dos experimentos, quer seja na confiabilidade dos valores estimados para os coeficientes. Com relação à confiabilidade dos coeficientes, é possível estimar um intervalo de confiança para os mesmos [8], quando da utilização do estimador seqüencial de máximo à posteriori [38]. Com relação ao projeto do experimento, Duarte e Arruda [9] apresentam um critério de experimento ótimo, baseado na razão entre os valores singulares máximos e mínimos da matriz de sensibilidade, que foi utilizado para otimização de experimentos para identificação de parâmetros em sistemas dinâmicos não lineares.

Neste Capítulo, será proposto um estimador para a confiabilidade da equação de Taylor, cujos coeficientes foram estimados via procedimentos de mínimos quadrados comuns, e um procedimento computacional para a determinação dos parâmetros de corte ótimos (V_C , f , a_p) a serem utilizados na estimação dos coeficientes da equação de Taylor para processos de usinagem em geral. Por fim, simulações teóricas serão realizadas para análise de performance dos procedimentos propostos.

3.1. ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR

A Equação de Taylor expandida utilizada neste trabalho diz respeito ao processo de torneamento e ao processo de fresamento com penetração de trabalho constante [38].

Para a utilização do estimador de mínimos quadrados na determinação dos coeficientes da equação de Taylor, torna-se necessário linearizar o problema. A linearização é conseguida aplicando-se a função logarítmica em ambos os lados da equação de Taylor expandida [2], Equação 3.1, resultando na Equação 3.2 .

$$V_C = C f^E a_p^F T^G VB_{MAX}^H \quad (3.1)$$

$$\ln V_C = \ln C + E \ln f + F \ln a_p + G \ln T + H \ln VB_{MAX} \quad (3.2)$$

onde,

\ln é o símbolo de logaritmo Neperiano

C é uma constante

V_C é a velocidade de corte

f é o avanço

a_p é a profundidade de corte

T é o tempo de vida da ferramenta de corte

VB_{MAX} é o desgaste de flanco máximo[36]

Pode-se re-arranjar a Equação 3.2 de tal maneira que, na forma matricial, a mesma pode ser expressa por:

$$Y = Xb \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \ln VB_{MAX1} \\ \ln VB_{MAX2} \\ \ln VB_{MAX3} \\ \vdots \\ \ln VB_{MAXN} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{ccccc} 1 & \ln V_{C_1} & \ln f_1 & \ln a_{P_1} & \ln T_1 \\ 1 & \ln V_{C_2} & \ln f_2 & \ln a_{P_2} & \ln T_2 \\ 1 & \ln V_{C_3} & \ln f_3 & \ln a_{P_3} & \ln T_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \ln V_{C_N} & \ln f_N & \ln a_{P_N} & \ln T_N \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} C^* \\ H^* \\ E^* \\ F^* \\ G^* \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

onde,

$$C^* = - \ln C/H$$

$$H^* = 1/H$$

$$G^* = - G/H$$

$$E^* = - E/H$$

$$F^* = - F/H$$

N é o número de leituras experimentais de VB_{MAX}

Utilizando-se o procedimento dos Mínimos Quadrados Comuns, a melhor estimada para o vetor b resulta na equação da norma mínima [39], ou seja:

$$b = V X^T Y = [X^T X]^{-1} X^T Y \quad (3.4)$$

As hipóteses normalmente assumidas e aceitáveis para os erros de medição dos valores estimados são:

- a) Que os erros de medição só ocorram na variável independente VB_{MAX} .
- b) Que os erros de medição tenham distribuição normal com média nula e desvio padrão σ constante, $N(0, \sigma)$.
- c) Que os erros de medição não sejam correlacionados.

Com as hipóteses listadas acima, é possível determinar o intervalo de confiança com que os coeficientes b_i são estimados [38]. Para um número de ensaios N relativamente grande ($N > 50$), uma boa estimativa para o desvio padrão σ_i do i -ésimo coeficiente b_i pode ser calculado pela Equação 3.5, onde V_{ii} é o i -ésimo valor da inversa da matriz de sensibilidade $X^T X$ e N_p é o número de coeficientes a serem estimados (5 para o caso da equação de Taylor expandida).

$$\sigma_i^2 = V_{ii} \sqrt{\frac{(Y - Xb)^T (Y - Xb)}{N - N_p}} \quad (3.5)$$

Com as Equações 3.4 (valores estimados médios) e 3.5 (desvio padrão da estimativa), a estatística dos valores estimados para os coeficientes C^* , H^* , G^* , E^* e F^* está completamente determinada, com as hipóteses listadas acima para o erro de medição. Porém, o que interessa são

os valores médios e a confiabilidade dos coeficientes C, H, G, E e F. Para o cálculo do intervalo de confiabilidade destes coeficientes e posteriormente do tempo de vida T, é utilizada uma aproximação de uma função de várias variáveis pelos dois primeiros termos de uma expansão em série de Taylor [40]. Para exemplificar, seja z uma variável relacionada, através da função f com as variáveis independentes x e y. Conhecendo-se os intervalos de confiança Δ para as variáveis x e y, pode-se escrever:

$$z + \Delta z = f(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (3.6)$$

Expandindo-se a Equação 3.6 em série de Taylor e retendo os dois primeiros termos, obtém-se:

$$z + \Delta z \cong f(x, y) + \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Delta y \quad (3.7)$$

Uma vez que $z = f(x, y)$, tem-se que o intervalo de confiança Δz para a variável z pode ser aproximado pela Equação 3.8 .

$$\Delta z \cong \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \Delta y \quad (3.8)$$

Utilizando-se a Equação 3.4 para a estimativa dos coeficientes C^* , E^* , F^* , G^* e H^* , e a Equação 3.5 para estimar o desvio padrão para estes coeficientes, obtém-se, através das Equações 3.9 a 3.13 apresentadas abaixo, os valores estimados para os coeficientes C, E, F, G e H e os seus respectivos intervalos de confiança de 68,26 % (um desvio padrão).

$$C = e^{-C^* H^*} \quad (3.9)$$

$$\sigma_C = \left\| -H^* e^{-C^* H^*} \cdot \sigma_{C^*} - C^* e^{-C^* H^*} \cdot \sigma_{H^*} \right\|$$

$$E = -\frac{E^*}{H^*} \quad (3.10)$$

$$\sigma_E = \left\| \frac{1}{H^*} \sigma_{E^*} - \frac{E^*}{H^{*2}} \sigma_{H^*} \right\|$$

$$F = -\frac{F^*}{H^*} \quad (3.11)$$

$$\sigma_F = \left\| \frac{1}{H^*} \sigma_{F^*} - \frac{F^*}{H^{*2}} \sigma_{H^*} \right\|$$

$$G = -\frac{G^*}{H^*} \quad (3.12)$$

$$\sigma_G = \left\| \frac{1}{H^*} \sigma_{G^*} - \frac{G^*}{H^{*2}} \sigma_{H^*} \right\|$$

$$H = -\frac{1}{H^*} \quad (3.13)$$

$$\sigma_H = \left\| -\frac{1}{H^{*2}} \sigma_{H^*} \right\|$$

Uma outra forma de apresentação da equação de Taylor é em função de T, conforme mostrado na Equação 3.14 .

$$T = K \cdot V_C^A \cdot f^B \cdot a_P^C \cdot VB_{MAX}^D \quad (3.14)$$

Analogamente aos coeficientes C, E, F, G e H da Equação 3.1, os valores médios, e respectivos desvios padrões dos coeficientes K, A, B, C e D são estimados pelas Equações 3.15 a 3.19 .

$$K = C^{-\frac{1}{G}} \quad (3.15)$$

$$\sigma_K = \left\| -\frac{1}{G} \cdot C^{-\left(\frac{1+G}{G}\right)} \cdot \sigma_G + \frac{1}{G^2} \cdot C^{-\frac{1}{G}} \cdot \ln C \cdot \sigma_C \right\|$$

$$A = \frac{1}{G} \quad (3.16)$$

$$\sigma_A = \left\| -\frac{1}{G^2} \cdot \sigma_G \right\|$$

$$B = -\frac{E}{G} \quad (3.17)$$

$$\sigma_B = \left\| -\frac{1}{G} \cdot \sigma_E + \frac{E}{G^2} \cdot \sigma_G \right\|$$

$$C = -\frac{F}{G} \tag{3.18}$$

$$\sigma_C = \left\| -\frac{1}{G} \cdot \sigma_F + \frac{E}{G^2} \cdot \sigma_G \right\|$$

$$D = -\frac{H}{G} \tag{3.19}$$

$$\sigma_D = \left\| -\frac{1}{G} \cdot \sigma_H + \frac{1}{G^2} \cdot \sigma_G \right\|$$

3.2. O PROGRAMA TAYLOR

Com o objetivo de se estimar os coeficientes e respectivos intervalos de confiabilidade da equação de Taylor expandida, foi implementada a rotina computacional TAYLOR, em linguagem FORTRAN, cujo diagrama de blocos está representado na Figura 3.1 .

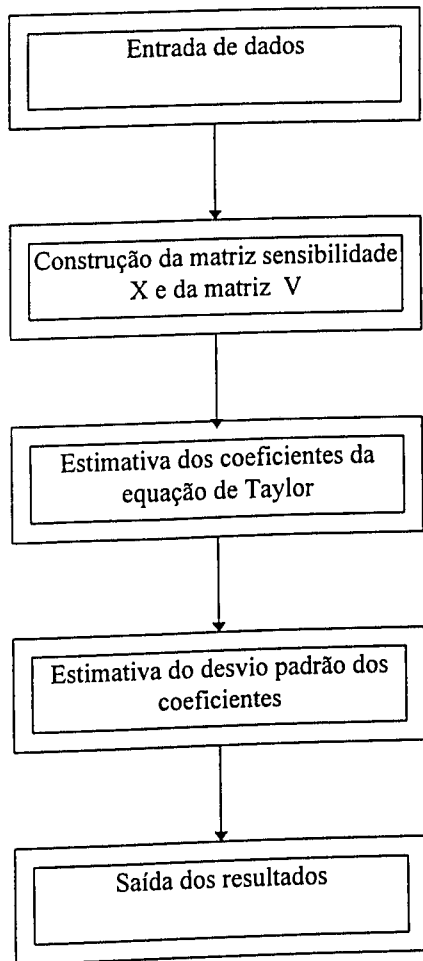


Figura 3.1 - Diagrama de blocos do programa TAYLOR.

3.2.1. ENTRADA DE DADOS

A entrada de dados é constituída por um arquivo ASCII onde é informado o número N de medições de desgaste VB_{MAX} realizadas, assim como os valores obtidos de VB_{MAX} e T para as

respectivas condições de corte ensaiadas (V_C , f , a_p). O formato dos dados é do tipo livre, conforme a Figura 3.2 .

N				
V_{C1}	f_1	a_{p1}	T_1	$VB_{MAX 1}$
V_{C1}	f_1	a_{p1}	T_2	$VB_{MAX 2}$
.
.
V_{C2}	f_2	a_{p2}	T_i	$VB_{MAX i+1}$
V_{C2}	f_2	a_{p2}	T_i	$VB_{MAX i+1}$
.
.
V_{Cn}	f_n	a_{pn}	T_N	$VB_{MAX N}$

Figura 3.2 - Estrutura dos dados de entrada do programa TAYLOR.

3.2.2. CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE SENSIBILIDADE 'X' E DA MATRIZ 'V'

Nesta etapa, verifica-se a consistência dos dados (nenhum parâmetro pode ter valor negativo), e monta-se a matriz de sensibilidade 'X' (matriz do lado direito da Equação 3.3), e o vetor $X^T Y$ (lado direito da Equação 3.4). Após o cálculo da matriz $X^T X$, calcula-se a matriz V, inversa de $X^T X$, utilizando-se um algoritmo de Gauss Sidel. A opção por uma inversão de $X^T X$ ao invés de uma decomposição do tipo LU, muito mais eficiente [41], se deve à necessidade de

se obter os elementos da diagonal da matriz V , utilizados na estimativa do desvio padrão dos coeficientes estimados.

3.2.3. ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR

Os coeficientes C^* , E^* , F^* , G^* e H^* são estimados via Equação 3.4 . Os coeficientes C , E , F , G e H , relativos a equação de Taylor expandida em função de V_C , e K , A , B , C e D , relativos a equação de Taylor expandida em função de T , são calculados pelas Equações 3.9 a 3.13 e 3.15 a 3.19 respectivamente. Para um conjunto de parâmetros (V_C , f , a_p e VB_{MAX}) inseridos via teclado pelo usuário, é calculado o tempo de vida máximo estimado para a ferramenta utilizando-se a Equação 3.14. O tempo de vida máximo é utilizado para fins de comparação e controle.

3.2.4. ESTIMATIVA DOS DESVIOS PADRÕES DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR

Os desvios padrões dos coeficientes C^* , E^* , F^* , G^* e H^* são estimados via aplicação direta da Equação 3.5 . Os desvios padrões dos coeficientes E , F , G , e H são estimados pelas Equações 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13, respectivamente. O desvio padrão do coeficiente C não é estimado pela Equação 3.9 devido ao fato de C ser uma função exponencial dos produtos C^* e H^* . Neste caso,

a aproximação da função C por apenas dois termos de uma expansão em série de potências não é uma boa aproximação para C.

Para uma estimativa mais precisa da confiabilidade da constante C, a Equação 3.1 de Taylor foi re-escrita na forma da Equação 3.20, tendo como coeficiente desconhecido apenas a constante C.

$$VB_{MAX} = \left[\frac{V_C}{f^E \cdot a_P^F \cdot T^G} \right]^{\frac{1}{H}} \cdot C^{-\frac{1}{H}} = \bar{C} \cdot C^* \quad (3.20)$$

A melhor estimativa para C^* é obtida utilizando-se a Equação 3.4, que para o caso de apenas um coeficiente a ser estimado, reduz-se à expressão 3.21 .

$$C^* = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{C}_i \cdot VB_{MAX\ i}}{\sum_{i=1}^N \bar{C}_i \cdot \bar{C}_i} \quad (3.21)$$

Para um coeficiente desconhecido, o valor estimado para o desvio padrão (para $N \gg \gg$) reduz-se à Equação 3.22 .

$$\sigma_{C^*}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \bar{C}_i \cdot \bar{C}_i} \cdot \left(\frac{\sum (VB_{MAX\ i} - \bar{C}_i \cdot C^*)^2}{N-1} \right) \quad (3.22)$$

Finalmente os valores estimados para a constante C e o desvio padrão σ_C são calculados pela Equação 3.23 .

$$C = C^{*-H} \quad (3.23)$$

$$\sigma_C = \left\| -H \cdot C^{*(-H-1)} \cdot \sigma_H - C^{*-H} \cdot \ln C^* \cdot \sigma_{C^*} \right\|$$

A aproximação via expansão em série de Taylor assume pequenos incrementos (σ) para ser válida com apenas dois termos. Por isto, neste trabalho caso o desvio padrão de um coeficiente seja maior do que o valor do próprio coeficiente, assume-se o valor estimado para o coeficiente como sendo o desvio padrão. Isto é feito para alertar o analista de que a confiabilidade para um dado coeficiente está muito baixa.

Um outro desvio padrão calculado neste bloco é o do tempo de vida máximo estimado para os parâmetros de corte e critério de fim de vida, escolhidos pelo usuário com entrada via teclado, para fins de controle. Devido ao número de coeficientes envolvidos, optou-se por um procedimento diferente daquele dado pela Equação 3.8, para a estimativa do desvio padrão.

Utilizando-se um algoritmo de geração de números aleatórios [41] com distribuição Normal $N(\eta, \sigma)$, foi construída uma matriz com cem valores aleatórios para cada coeficiente da

Equação 3.14 . Com esta matriz calculou-se com valores para o tempo de vida máximo da ferramenta, que de acordo com o Teorema do Limite Central [42] terão uma distribuição Normal, cujo valor médio e respectiva variância podem ser estimados pelas Equações 3.24 e 3.25 [37], respectivamente.

$$T_m = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} T_{m_i} \quad (3.24)$$

$$\sigma_{T_m}^2 = \frac{1}{99} \sum_{i=1}^{100} (T_{m_i} - T_m)^2 \quad (3.25)$$

3.2.5. SAÍDA DOS RESULTADOS

A Figura 3.3 mostra a forma do arquivo de saída do programa TAYLOR. Nesta Figura, V_I significa valor inferior ou mínimo, V_M é o valor médio e V_S significa o valor superior ou máximo. Os valores inferiores e superiores são relativos a um intervalo de confiança de 68,26% (um desvio padrão). Caso o valor inferior estimado para o tempo de vida máximo for menor do que zero, assume-se o valor zero para o valor inferior do tempo de vida máximo.

. Coeficientes da equação de Taylor para V_C

	Valor inferior	Valor médio	Valor superior
C	V_I	V_M	V_S
E	V_I	V_M	V_S
F	V_I	V_M	V_S
G	V_I	V_M	V_S
H	V_I	V_M	V_S

. Coeficientes da equação de Taylor para T

	Valor inferior	Valor médio	Valor superior
K	V_I	V_M	V_S
A	V_I	V_M	V_S
B	V_I	V_M	V_S
C	V_I	V_M	V_S
D	V_I	V_M	V_S

. Confiabilidade de Tempo de vida para VB = Valor definido como critério de fim de vida e condições de corte médias.

Tempo mínimo	Tempo médio	Tempo máximo
T_I	T_M	T_S

. Estatística dos tempos medidos e simulados:

. Erro médio = μ

. Desvio padrão = σ

. Erro porcentual médio = $\epsilon\%$

Figura 3.3 - Forma de saída dos resultados estimados.

Das saídas mostradas na Figura 3.3, apenas o ítem relativo à estatística dos erros medidos e simulados não foi definido e explicado.

3.2.5.1. Erro médio (μ)

O erro médio é apenas a média aritmética entre os tempos medidos T_{MED} e os calculados pela Equação 3.14, T_{CAL} . O Erro médio é calculado pela Equação 3.26.

$$\text{Erro Medio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{MED_i} - T_{CAL_i}) \quad (3.26)$$

A importância do cálculo do erro médio diz respeito à hipótese de erro de medição com média zero, que é essencial para a validade dos valores estimados para os coeficientes [38]. Os valores de erro médio devem se situar nas proximidades de zero, pois valores grandes de erro médio em relação ao valor de tempo de vida (para um dado valor de VB_{MAX}) estimado, tanto positivos quanto negativos, indicam a existência de polarização dos estimadores de mínimos quadrados, o que invalida a utilização do mesmo [38].

3.2.5.2. Desvio padrão (σ)

O valor do desvio padrão é calculado pela Equação 3.27

$$\text{Desvio Padrao} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_{\text{CAL}_i} - T_{\text{MED}_i})^2} \quad (3.27)$$

O valor do desvio padrão é um indicador da validade das hipóteses assumidas no desenvolvimento das equações de estimativa da confiabilidade dos parâmetros. Caso o valor do desvio padrão seja menor ou esteja nas proximidades da diferença entre o limite superior T_S e o valor esperado T_M , significa que a confiabilidade estimada para os valores dos coeficientes tem grande probabilidade de estarem estatisticamente corretos.

3.2.5.3. Erro porcentual médio ($\varepsilon\%$)

O erro porcentual médio é calculado pela Equação 3.28 .

$$\text{Erro Porcentual Medio} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (T_{CAL_i} - T_{MED_i})^2}{\sum_{i=1}^N T_{MED_i}}} \quad (3.28)$$

O erro porcentual médio é um indicador da validade da equação de Taylor ou do procedimento de medição de VB. Valores altos de erro porcentual médio em conjunto com medições de VB rigorosas (estatisticamente falando), indicam a precariedade de se utilizar a equação de Taylor para modelar um processo particular.

O parâmetro mais importante na Figura 3.3 é o da confiabilidade de tempo de vida para VB. Após o número mínimo permitido de variações dos parâmetros de corte (quatro no caso da equação de Taylor expandida), o analista pode através da observação da estabilização do tempo médio e do tempo máximo, definir o momento de parar com os ensaios. Outra informação importante é a diferença entre o tempo máximo e o tempo médio correspondente a um desvio padrão, que é um bom indicativo da precisão da equação de Taylor e do procedimento de medição de VB.

3.3. O CRITÉRIO DE EXPERIMENTO ÓTIMO

Um dos grandes problemas em ajuste de modelos, reside na escolha do melhor conjunto de dados experimentais que deverão ser usados para a estimação dos coeficientes da equação do modelo, ou seja, a escolha do experimento ótimo. Para a escolha do experimento ótimo é preciso,

inicialmente, definir um critério de experimento ótimo e através da minimização ou maximização deste critério, projetar o melhor conjunto de experimentos para ser utilizado no ajuste dos coeficientes desconhecidos do problema.

Da Equação 3.5, observa-se que o grau de precisão com que os coeficientes da equação de Taylor são ajustados é completamente dependente do condicionamento matriz V , ou seja, da inversa da matriz $X^T X$. Em vista disto, vários critérios de experimento ótimo para ajuste de modelos foram propostos, baseados no produto $X^T X$. Dentre estes critérios, pode-se destacar a maximização da soma dos termos da diagonal de $X^T X$ e a maximização do valor singular mínimo da matriz X [38].

Para entender o significado destes critérios, o melhor exemplo é o de um ajuste de um modelo com um só coeficiente a ser estimado, pois neste caso a matriz se reduz a um escalar. Seja o ajuste do coeficiente angular α de uma reta que passa pela origem ($y = \alpha x$), e para o qual serão utilizados dez pontos entre as quarenta possibilidades mostradas na Tabela 3.1. Os valores de y na Tabela, foram obtidos adicionando-se um número aleatório ξ de distribuição Normal $N(0; 0.5)$ à Equação $y = 0.5x$. Os valores calculados para ξ representam erros de medição que, normalmente, são aditivos às respostas e com distribuição Normal [42] de média nula e com variância constante.

Tabela 3.1 - Dados utilizados para o ajuste da reta $y = \alpha x$.

x	y	x	y	x	y
1.0000	-0.2046	15.0000	7.5374	28.0000	14.6408
2.0000	1.6200	16.0000	7.5556	29.0000	14.3539
3.0000	1.7610	17.0000	9.3831	30.0000	15.3029
4.0000	1.5153	18.0000	8.5636	31.0000	15.5194
5.0000	3.0276	19.0000	10.3857	32.0000	16.0604
6.0000	3.1833	20.0000	9.3557	33.0000	15.9888
7.0000	4.5221	21.0000	11.2927	34.0000	16.9269
8.0000	4.8729	22.0000	11.3145	35.0000	17.8390
9.0000	4.1156	23.0000	11.3254	36.0000	17.5504
10.0000	6.0822	24.0000	12.0343	37.0000	18.3994
11.0000	5.5812	25.0000	12.9964	38.0000	18.8269
12.0000	5.7156	26.0000	13.3057	39.0000	19.4720
13.0000	6.3317	27.0000	14.2481	40.0000	19.5868
14.0000	6.9122				

Na Tabela 3.2 são apresentados os resultados para três possibilidades de escolha de dados para o ajuste do coeficiente α :

- I. Utilizando-se os dez primeiros conjuntos de dados da tabela 3.1, relativos aos menores valores de x .
- II. Utilizando-se dez conjuntos igualmente espaçados de x e y : $[x(1), y(1)]$, $[x(5), y(5)]$, $[x(9), y(9)]$, , $[x(37), y(37)]$.

III. Utilizando-se os dez últimos conjuntos de dados da Tabela 3.1, relativos aos maiores valores de x .

Na Tabela 3.2, são apresentados os valores estimados $\bar{\alpha}$ para α (Equação 3.21), o desvio padrão calculado via Equação 3.22 para os valores estimados, σ_{ξ} , e o erro porcentual ε_p dos valores estimados para α em relação ao valor exato 0.5 .

Tabela 3.2 - Resultado do ajuste da reta $y = \alpha x$

	I	II	III
$\bar{\alpha}$	0.5639	0.5131	0.4980
σ_{ξ}	0.0413	0.0106	0.0035
ε_p	12.78	2.62	0.40

Apesar de o bom senso indicar que os dados escolhidos regularmente seriam os melhores para o ajuste, a Tabela 3.2 mostra que a opção III, relativa aos maiores valores de x , se apresenta como a melhor opção. Este resultado não surpreende pois, matematicamente, uma simples inspeção da equação para a estimativa do desvio padrão (Equação 3.22) mostra o efeito da razão $1/\sum x^2$ na precisão do procedimento de estimação. Do ponto de vista prático, deve-se procurar minimizar a razão sinal ruído, o que é conseguido para valores maiores da variável y , que são os correspondentes aos maiores valores de x .

Duarte e Arruda [9], propuseram a minimização do número de condicionamento NC na Equação 3.29, ou seja, a minimização da razão entre os valores singulares máximo (MaxVSX) e mínimo (MinVSX) da matriz X.

$$NC = \frac{\text{MaxVSX}}{\text{MinVSX}} \quad (3.29)$$

A grande vantagem de se utilizar a Equação 3.29 como critério de experimento ótimo reside no fato de que, a inversa dos valores singulares está diretamente relacionada com a precisão da estimação [38]. Portanto, a escolha de um conjunto de experimentos que minimize a Equação 3.29 resulta em um conjunto de coeficientes estimados com o mesmo grau de precisão. Por resultar em estimadas com intervalos de confiança (percentuais) da mesma ordem de grandeza, a Equação 3.29 foi utilizada neste trabalho como critério de experimento ótimo.

3.3.1. O PROJETO DO EXPERIMENTO ÓTIMO

Na implantação de um procedimento para a determinação dos parâmetros de usinagem ótimos, para o ajuste dos coeficientes da equação de Taylor, dois grandes problemas tiveram que ser contornados. O primeiro é que para um dado conjunto de parâmetros de usinagem, não se sabe, à priori, quantos intervalos de tempo serão usados na montagem da matriz X (Equação 3.3). O segundo problema reside no fato de que a Equação 3.29 é fortemente não linear, o que implica nas dificuldades inerentes de otimização de modelos não lineares.

O primeiro obstáculo foi resolvido pela divisão do procedimento de experimento ótimo em duas etapas distintas. Inicialmente utilizou-se um critério de fim de vida baseado em VB_{MAX} , o que conseqüentemente resultou que T passou a ser a variável dependente (fim de vida). Este procedimento levou à redução de uma ordem (a variável T) no número de dados do problema de ajuste. A seguir, após a realização dos ensaios previstos pelo critério de experimento ótimo do problema anterior reduzido, fez-se o ajuste dos coeficientes da equação de Taylor, sendo estes coeficientes então, utilizados para estimar os tempos para a construção da matriz X (Equação 3.3).

Devido ao alto grau de não linearidade da função objetivo (Equação 3.29) a ser minimizada, e ao baixo custo computacional para o cálculo de NC , optou-se neste caso, pela utilização de um procedimento de otimização baseado no procedimento de busca aleatória COMPLEX, devido a robustez e eficiência apresentada por este procedimento [43].

O procedimento completo para o projeto do experimento ótimo consiste em:

1 - Inicialmente o usuário define os intervalos máximos e mínimos para os parâmetros de corte V_C , f e a_p . O intervalo mínimo de tempo entre as leituras, bem como o tempo máximo esperado para um ensaio, também são definidos pelo usuário.

2 - Na falta de conhecimento prévio, a respeito dos valores dos coeficientes da equação de Taylor, o objetivo inicial é ajustar os coeficientes da Equação 3.30 .

$$\ln V_C = \ln(C VB_{MAX}^H) + E \ln f + F \ln a_p + G \ln T_{MAX} \quad (3.30)$$

Como o interesse é o ajuste dos coeficientes da Equação 3.1, são projetados apenas o número mínimo de ensaios (neste caso, quatro) ótimos para a determinação dos coeficientes da Equação 3.30 . O procedimento para a determinação dos quatro ensaios iniciais consiste em escolher aleatoriamente cinco mil conjuntos de quatro ensaios e escolher o conjunto que resulta no menor valor de NC.

3 - Os ensaios são realizados e os resultados, para diversas medições de VB_{MAX} em um mesmo ensaio, são utilizados para estimar os coeficientes, e respectivos desvios padrões, da Equação 3.1. Caso os resultados sejam satisfatórios finaliza-se o procedimento.

4 - Uma vez estimado os valores para os coeficientes da Equação 3.1, é possível, para um dado conjunto de parâmetros de corte, estimar o tempo de vida da ferramenta para um dado VB_{MAX} . De posse do tempo de vida da ferramenta, e do intervalo mínimo de tempo entre as leituras de desgaste, monta-se a matriz X (Equação 3.3) necessária para o cálculo do critério de experimento ótimo NC.

5 - O procedimento de otimização para escolher um novo conjunto de parâmetros de usinagem, a partir do quarto, consiste em:

- a) Montar um conjunto com quinhentos elementos, tendo cada elemento três parâmetros de usinagem escolhidos aleatoriamente, construir as matrizes X respectivas, englobando os dados de ensaios anteriores, e calcular os valores para NC.
- b) determinar a posição (kr) do pior valor de NC.

- c) determinar o centro de gravidade \bar{x} dos parâmetros restantes (Equação 3.31).
- d) determinar uma direção de busca $d\bar{x}$ (Equação 3.32).
- e) determinar um novo conjunto x de parâmetros de corte (Equação 3.33) e calcular o valor de NC para este novo conjunto.
- f) voltar ao passo b até que algum critério de convergência tenha sido atingido.

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq kr}}^{5000} X_{ik}}{4999} \quad i = 1 \text{ a } 3 \quad (3.31)$$

$$d\bar{x}_i = \bar{\bar{x}}_i - \bar{x}_{kr} \quad (3.32)$$

$$x_i = x_{kr} + 1.8 d\bar{x}_i \quad (3.33)$$

6 - voltar ao passo 3.

A utilização de quinhentos pontos aleatórios no procedimento de otimização foi escolhido objetivando uma grande precisão. Esta escolha foi possível devido ao baixo custo computacional para o cálculo de NC. Na realidade, o normal é utilizar em torno de quatro a cinco vezes o número de variáveis a serem otimizadas [42].

3.4. O PROGRAMA INIT

O programa INIT, em linguagem FORTRAN, é relativo aos passos 1 e 2 do projeto do experimento ótimo. O diagrama de blocos do programa INIT está mostrado na Figura 3.4 .

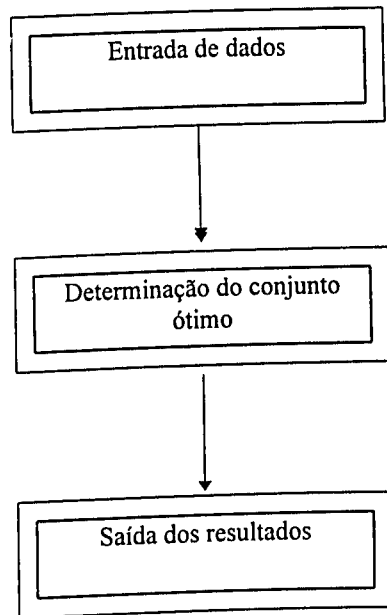


Figura 3.4 - Diagrama de blocos do programa INIT

3.4.1. ENTRADA DE DADOS

O arquivo de entrada de dados é do tipo ASCII, com formato livre, onde são informados os valores mínimos e máximos para os parâmetros de corte V_C , f , a_p , admissíveis para o

processo de usinagem em questão. A Figura 3.5 mostra a estrutura de dados de entrada do programa INIT.

V_C (mínimo)	V_C (máximo)
f (mínimo)	f (máximo)
a_p (mínimo)	a_p (máximo)

Figura 3.5 - Estrutura de dados de entrada do programa INIT

3.4.2. A DETERMINAÇÃO DO CONJUNTO DE PARÂMETROS DE CORTE ÓTIMOS

Para a obtenção do conjunto de parâmetros de corte ótimos, inicialmente gera-se um conjunto aleatório de quatro condições de corte, cujos valores tem distribuição uniforme entre os valores mínimos e máximos permitidos para cada parâmetro de corte. Após a construção da matriz de sensibilidade, calcula-se, usando um algoritmo para cálculo de valores singulares [44], os valores do índice NC para a matriz de sensibilidade. Caso o índice NC seja mínimo, os valores dos parâmetros de corte para aquele conjunto é retido. Caso contrário, o conjunto é descartado. O processo é realizado para cinco mil conjuntos de parâmetros aleatórios de condições de corte, ou seja, o processo de busca utilizado é o da busca exaustiva.

3.4.3. SAÍDA DOS RESULTADOS

A Figura 3.6 mostra a forma do arquivo de saída dos resultados do programa INIT. Neste arquivo é indicado o melhor conjunto de quatro condições de corte entre cinco mil possibilidades analisadas.

V_{C1}	f_1	a_{p1}
V_{C2}	f_2	a_{p2}
V_{C3}	f_3	a_{p3}
V_{C4}	f_4	a_{p4}

Figura 3.6 - Forma de saída dos resultados do programa INIT

3.5. O PROGRAMA OTIMO

O programa OTIMO, também em linguagem FORTRAN, é utilizado após a realização dos ensaios fornecidos pelo programa INIT. Neste programa já é considerada a influência dos tempos de medição sobre o experimento ótimo, tendo o usuário a opção de escolher os tempos de

parada para a medição do desgaste VB_{MAX} , que pode ser em função do comprimento usinado ou de uma variação mínima aceitável para uma nova medição de VB_{MAX} .

Da maneira como o programa OTIMO foi construído, não há necessidade de um diagrama de blocos para explicar o funcionamento de mesmo, uma vez que este programa é apenas uma combinação dos programas TAYLOR e INIT, em conjunto com o procedimento COMPLEX [43] para a minimização da função objetivo.

A entrada de dados do programa OTIMO, é constituída pelos arquivos de entrada do programa TAYLOR (Figura 3.2) e do programa INIT (Figura 3.5). A partir dos dados de entrada do programa TAYLOR, são estimados (conforme feito no programa TAYLOR), os valores dos coeficientes da equação de Taylor expandida, possibilitando assim uma estimativa do tempo de vida máximo esperado para um determinado conjunto de parâmetros de corte. Conhecendo-se os valores mínimos e máximos admissíveis para cada parâmetro de corte (arquivo de entrada do programa INIT), torna-se possível gerar conjuntos aleatórios de condições de corte passíveis de execução.

Com o arquivo de entrada do programa TAYLOR e os limites aceitáveis para os parâmetros de corte, é possível montar matrizes de sensibilidade, Equação 3.3, às quais se adicionam os valores relativos às novas condições de corte . Calculando-se as matrizes de sensibilidade e o índice NC, utiliza-se o passo 5 do projeto do experimento ótimo para a determinação do melhor novo conjunto de parâmetros de corte que deve ser ensaiado

O arquivo de saída do programa OTIMO é o mesmo arquivo de entrada do programa TAYLOR (Figura 3.2), no qual são adicionados os novos valores para os parâmetros de corte e os tempos, em minutos, de parada da máquina para a medição dos valores de desgaste VB_{MAX} .

O campo relativo aos valores de VB_{MAX} ficam em branco, para serem preenchidos pelo técnico quando da realização do novo ensaio.

3.6. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Para a convalidação dos procedimentos de experimento ótimo e ajuste dos programas desenvolvidos, foram realizadas simulações com os coeficientes da equação de Taylor expandida obtidos por Motta [11] em sua dissertação de mestrado. Nestas simulações, os resultados dos ensaios propostos pelo procedimento de otimização foram confrontados com os conjuntos de parâmetros de corte utilizados por Motta [11] em seu trabalho. Os coeficientes estimados em [11], mostrados na Tabela 3.3, são relativos ao torneamento do aço ABNT 8640 com ferramentas de metal duro classe ISO P35 435, especificação TNMG 22 04 08 - QM Sandvick, triplamente revestidas ($TiC/Al_2O_3/TiN$), e utilizando, como fluido de corte, óleo emulsionável na concentração de 10%. Os valores estimados para os coeficientes da equação de Taylor são relativos a resultados de 9 ensaios, sendo medidos 55 valores de VB_B com um desvio padrão médio, estimado, de 0.0157 mm.

Tabela 3.3 - Valores dos coeficientes da equação de Taylor expandida assumidos como exatos.

C	E	F	G	H
432.633	0.779	-1.243	-0.293	-0.376

Utilizando os procedimentos de experimento ótimo desenvolvidos, foram projetados 12 ensaios. Para a simulação dos resultados dos ensaios, os valores de desgaste médio VB_B foram calculados utilizando os coeficientes da Tabela 3.3, sendo adicionado aos resultados valores com distribuição normal, média zero e desvio padrão de 0.0157 mm, modelando os erros de medição. Este procedimento foi utilizado tanto para os parâmetros calculados pelo critério de experimento ótimo, quanto para os parâmetros utilizados por Motta [11] para efeitos de análise de desempenho.

A Tabela 3.4 mostra os erros calculados para os coeficientes da equação de Taylor para os parâmetros utilizados por Motta [11], denominado PADRÃO, para os parâmetros calculados pelo critério de experimento ótimo com nove ensaios, denominado OTIM9, e com doze ensaios, OTIM12. A última coluna da Tabela 3.4 mostra o erro percentual calculado para a vida da ferramenta, $\epsilon_C\%$, obtido para um critério de fim de vida médio $VB_B = 0.3$ mm e para valores médios dos parâmetros de corte, que no caso foram: $V_C = 200$ m/min, $f = 0.5$ mm/volta e $a_p = 1.5$ mm.

Tabela 3.4 - Erro dos coeficientes da equação de Taylor.

ENSAIO	C	H	E	F	G	ϵ_C (%)
PADRÃO	4.84	6.41	12.47	10.58	11.96	19.29
OTIM9	0.06	0.51	1.77	14.33	0.53	3.93
OTIM12	0.82	0.25	1.61	13.99	0.27	3.85

Observa-se da Tabela 3.4 que a utilização dos procedimentos de otimização implicaram em um grande aumento da precisão do cálculo da vida máxima da ferramenta, o que valida os procedimentos de otimização propostos (ϵ_C em torno de 4%) em relação ao procedimento padrão ($\epsilon_C = 19.29\%$).

Verifica-se também que a utilização do critério de experimento ótimo resultou em erros menores para os valores dos coeficientes de Taylor, com exceção do coeficiente F. O alto valor (14.33%) para o erro no cálculo do coeficiente F pode ser explicado em função da pequena sensibilidade das funções de transferência em relação a este coeficiente, visto que o erro calculado para a vida da ferramenta com os valores médios para os parâmetros de corte foi de apenas 3.93% para os coeficientes do procedimento otimizado com nove ensaios.

Os valores dos erros para o procedimento otimizado com nove e doze ensaios são da mesma ordem de grandeza, principalmente para o parâmetro mais importante que é T_m , indicando que não houve grandes ganhos de precisão com o aumento do número de ensaios. A Figura 3.7, mostra o valor porcentual do desvio padrão, normalizado em relação ao valor médio, estimado para T_m em função do número de ensaios. Na estimativa dos valores de desvio padrão para T_m utilizou-se a Equação 3.7 em conjunto com a Equação 3.5.

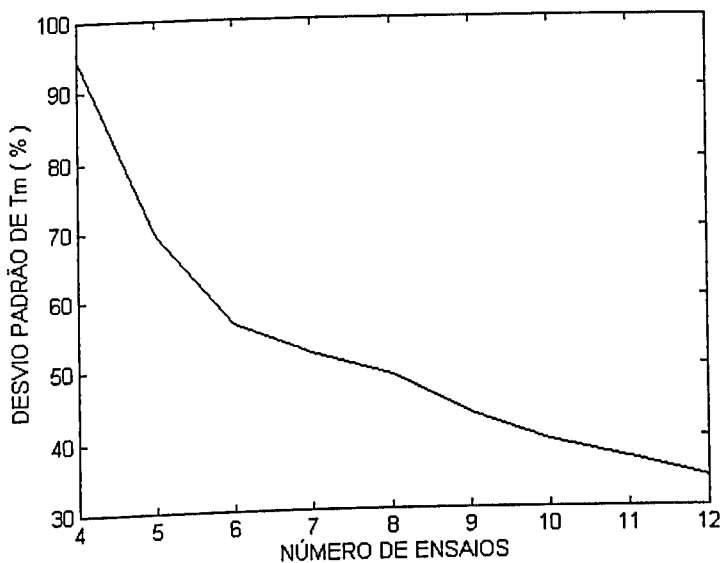


Figura 3.7 - Precisão de T_m vs. o número de ensaios

Observa-se, da Figura 3.7, que os valores normalizados estimados para os desvios padrões têm uma queda significativa até o décimo ensaio, estabilizando a partir daí, ou seja, o ganho de precisão no cálculo de T_m decresce em função do aumento do número de ensaios. Portanto, a análise dos valores normalizados estimados para os desvios padrões de T_m em função do número de ensaios, é um bom critério para se avaliar a real necessidade de se fazer novos ensaios para a estimativa dos coeficientes da equação de Taylor estendida.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a certificação do procedimento de experimento ótimo, fêz-se necessário definir uma metodologia de trabalho segundo as condições e disponibilidades existentes nos laboratórios de pesquisa da UFU. A seguir serão descritos todos os materiais, equipamentos e procedimentos adotados para a realização dos ensaios experimentais.

4.1. MATERIAIS

Todos os testes de vida das ferramentas de corte foram realizados com pastilhas marca Sandvik, cuja geometria atende a especificação ISO SEMN 12 04 AZ. Tais ferramentas são da classe ISO P45 M35, e possuem revestimento triplo (TiN, TiC, TiN). A Figura 4.1 mostra a geometria da referida pastilha.

Todos os ensaios foram realizados com uma fresa frontal marca Sandvik, código R260.22-080-15, de diâmetro igual a 80 mm e capacidade para seis insertos.

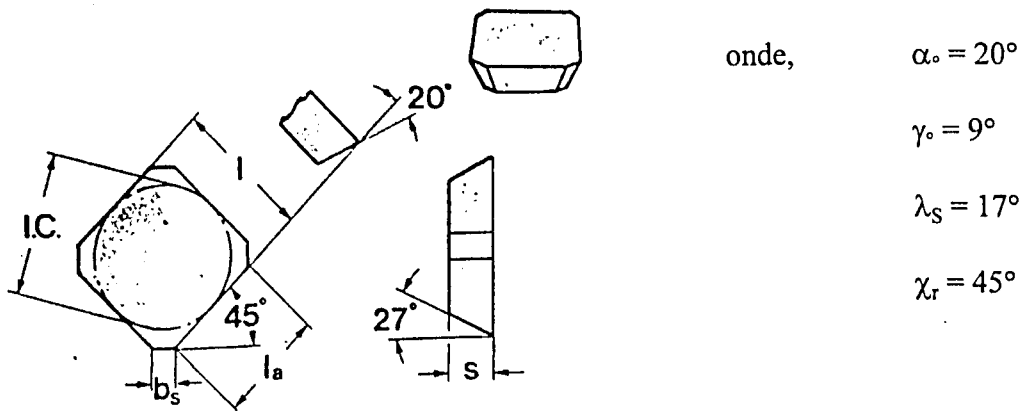


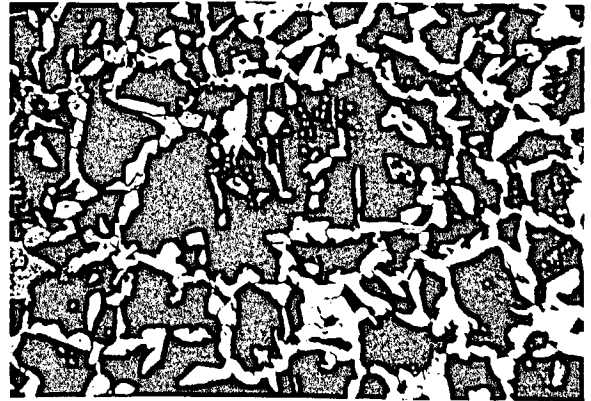
Figura 4.1 - Geometria do inserto ISO SEMN 12 04 AZ utilizada no trabalho experimental [14].

Foi utilizado como material de trabalho, barras de seção quadrada de aço ABNT 1045 com bitola de 101.60 mm. As barras foram fornecidas pela Aços Villares. A composição química e a dureza do material, conforme certificado número 30016 fornecido pelo fabricante, são apresentadas no Anexo 1. As barras foram cortadas por serra mecânica alternativa em tarugos de 520 mm de comprimento, os quais foram assentados em um dispositivo adequado à correta fixação na mesa da máquina fresadora, garantindo rigidez mecânica ao processo de corte. Inicialmente promoveu-se uma pré-usinagem em um das faces da peça para a retirada da camada oxidada e da camada encruada decorrente do processo de laminação das barras, de modo a garantir que as condições para o desgaste se mantivessem inalteradas nos diversos passes realizados em cada teste executado. O material ABNT 1045 utilizado nos testes de vida das ferramentas de corte foi analisado micrograficamente. Foram fotografadas em banco

metalográfico, quatro regiões representativas da micro-estrutura ao longo de toda a seção transversal do material ABNT 1045 (Figura 4.2), desde a região mais próxima a extremidade livre, Figura 4.2 (a), e caminhando em direção ao interior da seção do material, Figura 4.2 (b) e Figura 4.2 (c), até o seu centro Figura 4.2. (d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.2 - Micro-estrutura ao longo da seção transversal do material ABNT 1045. Em ordem de exposição, (a), (b), (c) e (d), desde a região mais próxima à extremidade livre do material (a), até o centro da peça (d).(Fotos com ampliação de 131.25 vezes).

4.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a execução dos testes de vida das ferramentas de corte, foi utilizado uma máquina fresadora CNC, marca Romi, modelo Interact 4, com potência máxima de 22 CV e capacidade de rotação máxima do eixo árvore de 4000 rpm, disponível no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (Figura 4.3).

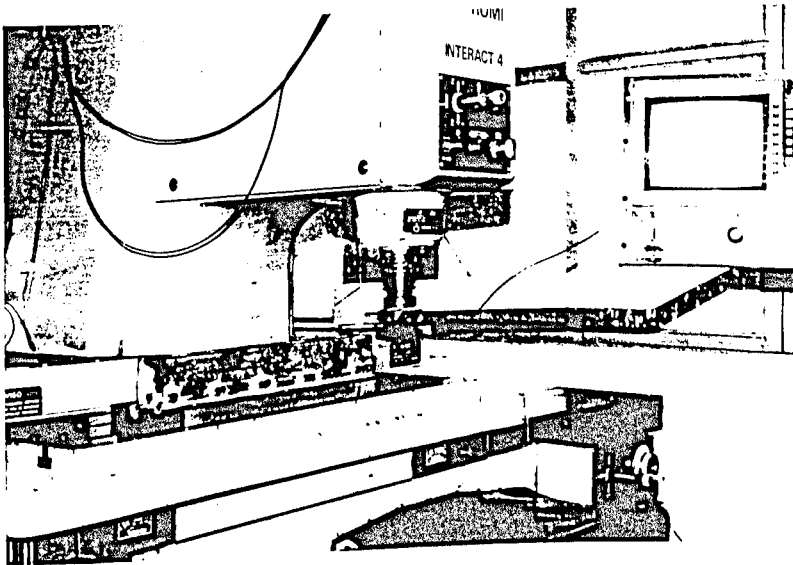


Figura 4.3 - Fresadora CNC Romi Interact 4.

Para a medição e leitura dos valores de desgaste obtidos nas ferramentas de corte, utilizou-se um microscópio ferramenteiro dotado de micrômetros digitais (Figura 4.4).

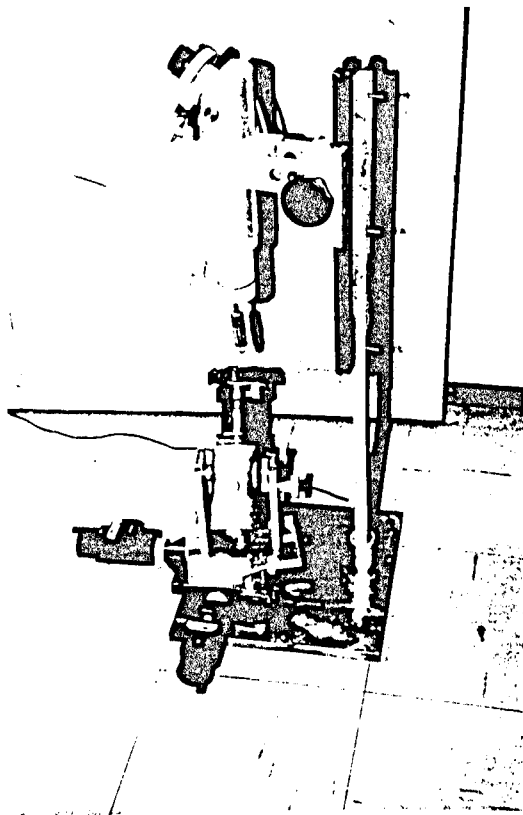


Figura 4.4 - Microscópio ferramenteiro para a medição de desgaste em ensaios de vida de ferramentas de corte.

Foi feito um acompanhamento da rugosidade superficial após cada passe da ferramenta no material de trabalho. As medições foram realizadas perpendicularmente às marcas de avanço, em três posições diferentes. Utilizou-se um rugosímetro portátil Mitutoyo Surftest 211, com 'cut off' ajustado em 0.8 mm e parâmetro de acabamento superficial medido R_a (μm).

As fotografias para análise metalográfica do material ABNT 1045 foram obtidas no microscópio NEOPHOT 21, do LEM-UFU, onde também, utilizando-se um durômetro universal marca WOLPERT, foram feitas as medições para a verificação da dureza do material de trabalho. Para a aquisição dos valores de dureza Brinnell (HB) nas respectivas regiões analisadas da Figura 4.2, foram aplicadas cargas de 187.50 kgf durante 30 segundos, com uma esfera de aço de diâmetro igual a 2.5 mm. O valor médio de dureza obtido de nove impressões no material foi de 197 HB, que coincide com o valor fornecido pelo fabricante como mostra a Anexo 1 .

4.3. PROCEDIMENTOS PARA O PROJETO DE EXPERIMENTO ÓTIMO

Para gerar o melhor conjunto de variáveis de corte para ser utilizado em ensaios para o ajuste dos coeficientes da equação de Taylor, em um processo de fresamento, torna-se necessário definir como ponto de partida do processo de otimização, uma faixa de trabalho em que as condições de corte (V_C , f , a_p) variem desde um valor mínimo até um valor máximo admitido. A faixa de variação dos parâmetros de corte da equação de Taylor expandida utilizada neste trabalho encontra-se listada na Tabela 4.1. Estes valores foram escolhidos conforme recomendação de catálogo de fabricante de ferramentas de corte [14], e em função do material ABNT 1045 a ser trabalhado e do processo utilizado.

Tabela 4.1 - Faixas de trabalho adotadas para as variáveis de corte necessárias à inicialização do procedimento de experimento ótimo.

Parâmetro de corte	Valor máximo	Valor mínimo
V_C (m/min.)	100	300
f_Z (mm/rev.)	0.05	0.20
a_p (mm)	1	2.5

Uma vez definidas as faixas de variação dos parâmetros de corte mostrados na Tabela 4.1, estes valores foram utilizados no programa INIT , resultando nas quatro melhores condições de corte para inicialização do procedimento de ajuste dos coeficientes da equação de Taylor expandida. Na Tabela 4.2 estão listados os valores dos parâmetros de corte ótimos para os quatro primeiros ensaios de vida a serem realizados.

Tabela 4.2 - Condições de corte iniciais geradas pelo programa INIT.

Condições de corte geradas por INIT	V_C (m/min.)	f_Z (mm/rev.)	a_p (mm)
1	107.00	0.181	1.523
2	251.17	0.096	2.216
3	275.18	0.080	1.783
4	116.52	0.068	2.246

Para o prosseguimento do procedimento e antes da realização dos ensaios de vida das ferramentas, tomou-se alguns cuidados de modo a garantir a maior confiabilidade possível nos resultados obtidos, tais como:

- verificação e inspeção dos insertos em microscópio ferramenteiro, evitando-se assim a utilização de pastilhas defeituosas ou trincadas.
- verificação com relógio comparador das variações dimensionais entre as seis pastilhas assentadas na fresa, não sendo permitida variação superior a 0.05 mm.

As medições de desgaste nos testes de vida foram efetuadas ao final de um percurso de corte correspondente a um passe da ferramenta (520 mm), ou então entre intervalos de passes maiores, quando as condições de corte eram pouco severas e as variações de desgaste eram muito pequenas, de até 0.02 mm de desgaste de flanco, entre dois passes consecutivos.

A cada medição de desgaste VB_{MAX} efetuada anotou-se o tempo de corte correspondente, assim como os valores de desgaste de flanco médio das ferramentas (VB_B) e a rugosidade superficial média do material (R_a).

Os desgastes foram monitorados em todas as seis pastilhas de corte, até que o critério de fim de vida adotado fosse alcançado em pelo menos uma delas. Neste momento o teste era encerrado e as seis arestas de corte substituídas por novas para a realização de um novo teste.

Como critério de fim de vida das ferramentas de corte, adotou-se o desgaste de flanco máximo $VB_{MAX} = 0.7$ mm, uma vez que esta forma de desgaste foi a predominante em todos os testes realizados.

Face as dimensões da fresa (diâmetro de 80 mm), e da bitola do material fornecido pelo fabricante (101.60 mm de sessão quadrada), decidiu-se efetuar os passes de corte sempre na forma de ida e volta, de modo que cada passe cortasse 50.80 mm. Isto se justifica de modo a garantir o mesmo ângulo de saída e geometria de corte nos diversos passes realizados, mantendo constantes as condições para o desgaste das ferramentas de corte.

Os valores de desgaste medidos, juntamente com os tempos de corte correspondentes aos quatro testes iniciais realizados, foram agrupados em um arquivo de dados que foi utilizado como 'dados de entrada' no programa computacional TAYLOR. Este programa gerou uma estimativa inicial dos coeficientes da equação de Taylor (C, H, E, F e G), assim como a estatística dos tempos medidos e simulados (erro porcentual médio e desvio padrão), relativos a equação expandida estudada.

O programa computacional OTIMO, alimentado pelo arquivo de dados gerado pelo programa TAYLOR, e pelo arquivo de dados inicial das condições de corte criado por INIT, deu origem a novos valores estimados para as variáveis de corte (V_C , f , a_p), além de prever o tempo de vida da ferramenta de corte para as condições apresentadas.

Esta nova condição de corte, correspondente ao quinto teste de vida da ferramenta, foi ensaiada, e os valores de desgaste e os tempos correspondentes obtidos, acrescentados ao arquivo inicial gerado por INIT. Uma nova estimativa dos coeficientes e dos tempos medidos e simulados da equação de Taylor era então obtida. Este procedimento, realizado a cada novo conjunto de variáveis de corte gerado por OTIMO, era repetido até que as condições exigidas pelo processo de otimização fossem satisfeitas.

Para a comparação do procedimento de otimização, foi elaborado, seguindo um modelo estatístico fatorial fracionado [12-13], e conforme sugestões contidas em manual de fabricante de

ferramentas de corte [14], um conjunto de nove condições de corte a serem testadas. Foram ensaiadas inicialmente as quatro primeiras condições sugeridas, montando-se a partir dos valores de desgaste medidos e dos tempos de corte correspondentes, um arquivo de dados.

Como forma de confrontação de resultados e metodologia, procedeu-se analogamente ao procedimento de otimização descrito acima. As medições de desgaste com seus respectivos tempos, relativos aos ensaios de número 5, 6, 7, 8 e 9, foram sendo introduzidas uma a uma a partir do arquivo de dados inicial (montado a partir dos quatro primeiros ensaios sugeridos), de modo que a cada teste executado e incrementado neste arquivo de dados, o programa TAYLOR gerava novos valores estimados dos coeficientes da equação de Taylor, erro médio porcentual e desvio padrão. Deste modo pôde-se acompanhar a cada ensaio realizado, por meio de gráficos, a convergência dos valores dos coeficientes e dos valores estatísticos analisados, possibilitando a comparação de procedimentos.

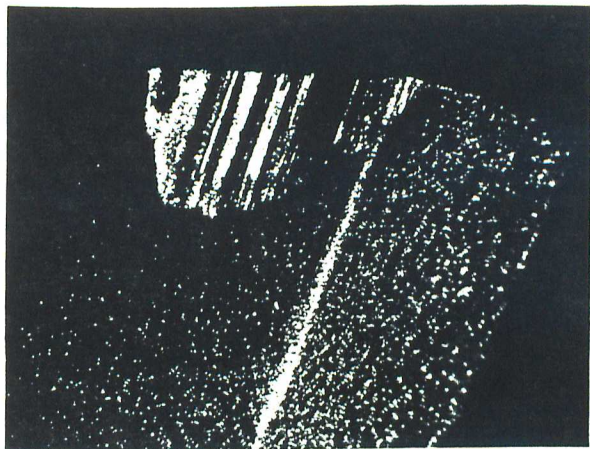
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. TESTES DE VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Para a comprovação da eficácia da metodologia do experimento ótimo e confiabilidade dos resultados obtidos, fez-se necessário a realização de testes de vida de ferramentas de corte de acordo com o procedimento descrito no capítulo anterior. A Tabela 5.1, mostra os valores das variáveis de corte para cada condição de corte gerada pelos programas de otimização. Cada condição de corte proposta na tabela abaixo gerou um ensaio de vida de ferramenta, onde foram anotados os valores de desgaste de flanco e os respectivos tempos relativos a cada medição, Anexo 2. A Figura 5.1 apresenta exemplos de desgaste de flanco na superfície principal de folga, ocorridos durante os ensaios de vida das ferramentas de corte.

Tabela 5.1 - Valores das variáveis de corte geradas segundo a metodologia do experimento ótimo.

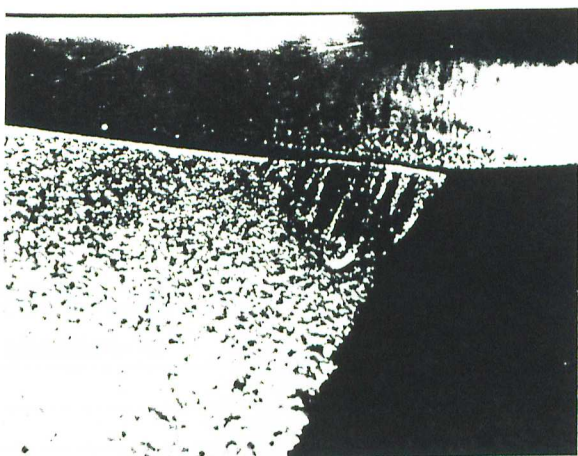
Condições de corte geradas	Vc (m/min.)	f (mm/n/z)	ap (mm)
1	107.00	0.181	1.532
2	251.17	0.096	2.216
3	275.18	0.080	1.783
4	116.52	0.068	2.246
5	179.91	0.170	1.379
6	250.00	0.121	1.603
7	171.89	0.155	1.482
8	204.47	0.142	1.541
9	207.65	0.148	1.516



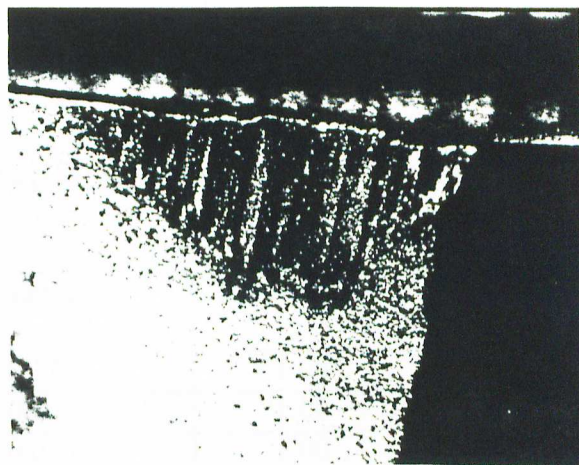
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.1 - Desgaste de flanco de ferramentas para diferentes condições de usinagem:

(a) $V_C=207$ m/min., $f_Z=0.148$ mm/rev., $a_p=1.52$ mm, $V_{B_{MAX}}=0.686$ mm (b) $V_C=263$ m/min.,

$f_Z=0.142$ mm/rev., $a_p=1.51$ mm, $V_{B_{MAX}}=1.253$ mm (c) $V_C=100$ m/min., $f_Z=0.05$ mm/rev.,

$a_p=1.75$ mm, $V_{B_{MAX}}=0.382$ mm (d) $V_C=251$ m/min., $f_Z=0.09$ mm/rev., $a_p=2.22$ mm,

$V_{B_{MAX}}=1.553$ mm. (Fotos com ampliação de 16.41 vezes).

No Anexo 3 são apresentados os valores dos coeficientes (obtidos a partir das condições de corte da Tabela 5.1), e demais informações para a verificação da confiabilidade dos coeficientes estimados da equação de Taylor expandida. A partir do número mínimo de quatro ensaios de fim de vida, e a cada novo ensaio realizado, pode-se acompanhar a evolução da confiabilidade dos coeficientes da equação estudada.

A Tabela 5.2 mostra nove condições de corte distintas, escolhidas segundo o procedimento estatístico fatorial fracionado [12-13] e dentro do intervalo sugerido pelo catálogo de fabricantes de ferramentas [14], para a confrontação de metodologias. Os resultados decorrentes dos ensaios de vida das condições de corte da tabela abaixo, encontram-se no Anexo 4.

Tabela 5.2 - Valores de variáveis de corte definidos [12-13], para realização de testes de vida.

Condições de corte estabelecidas	Vc (m/min.)	f (mm/n/z)	ap (mm)
1	100	0.125	1.00
2	200	0.200	1.00
3	300	0.050	1.00
4	100	0.050	1.75
5	200	0.125	1.75
6	300	0.200	1.75
7	100	0.200	2.50
8	200	0.050	2.50
9	300	0.125	2.50

No Anexo 5 são apresentados os valores estimados dos coeficientes da equação de Taylor expandida e demais resultados relativos à estatística dos tempos medidos e simulados

(calculados a partir das condições de corte da tabela acima), desde o número mínimo de quatro ensaios de vida até o nono ensaio realizado. Deste modo pode-se acompanhar a tendência de evolução da confiabilidade dos coeficientes estimados da equação de Taylor e fazer uma comparação para se verificar a eficiência da metodologia de experimento ótimo proposta.

A seguir, serão apresentados e analisados os resultados encontrados para os coeficientes da equação de Taylor expandida para as duas metodologias apresentadas neste trabalho. Como forma de facilitar a comparação entre resultados, todos os ensaios de vida realizados segundo as condições de corte propostas pelo procedimento de otimização, foram denominados ensaios ou testes programados, enquanto que os ensaios realizados segundo as condições de corte escolhidas de acordo com o procedimento estatístico fatorial fracionado [12-13], foram denominados ensaios práticos.

De posse dos valores decorrentes dos ensaios de vida das ferramentas para as duas situações a serem comparadas, ou seja, a primeira gerando condições de corte de acordo com o procedimento de experimento ótimo, e a segunda contando com valores de corte previamente determinados, utilizou-se o mesmo procedimento computacional e tratamento estatístico para a determinação dos intervalos de confiabilidade dos coeficientes estimados para a equação de Taylor expandida. Assim sendo, foram montados seis gráficos comparativos dos valores obtidos para os coeficientes E, F, G, H, desvio padrão e erro porcentual médio da equação de Taylor , segundo as duas metodologias utilizadas.

A Figura 5.2 expressa o erro porcentual médio para o tempo estimado da equação de Taylor expandida. Analizando-se os valores segundo a metodologia do experimento ótimo (testes programados), observa-se uma pequena variação nos valores de erro médio porcentual obtidos desde o quarto até o nono ensaios, o que demonstra a grande capacidade de convergência

do procedimento de otimização utilizado. Os valores de erro, relativos aos testes práticos, mostram-se muito maiores que aqueles obtidos segundo a metodologia do experimento ótimo. Verifica-se uma grande variação destes valores, assim como uma dispersão bem acentuada, comparativamente aos valores encontrados para os testes programados. Isto ocorre provavelmente devido ao fato dos valores dos parâmetros de corte escolhidos inicialmente para a realização dos testes de vida das ferramentas, não serem representativos do universo de escolha possíveis, o que quer dizer que, do ponto de vista estatístico, não são valores que geram bons conjuntos de variáveis de corte para serem utilizados no ajuste dos coeficientes da equação de Taylor expandida. Como resultado, tem-se a necessidade de se realizar um número muito maior de ensaios de vida, de modo a melhorar o universo de conjuntos de variáveis de corte utilizados para o ajuste dos coeficientes.

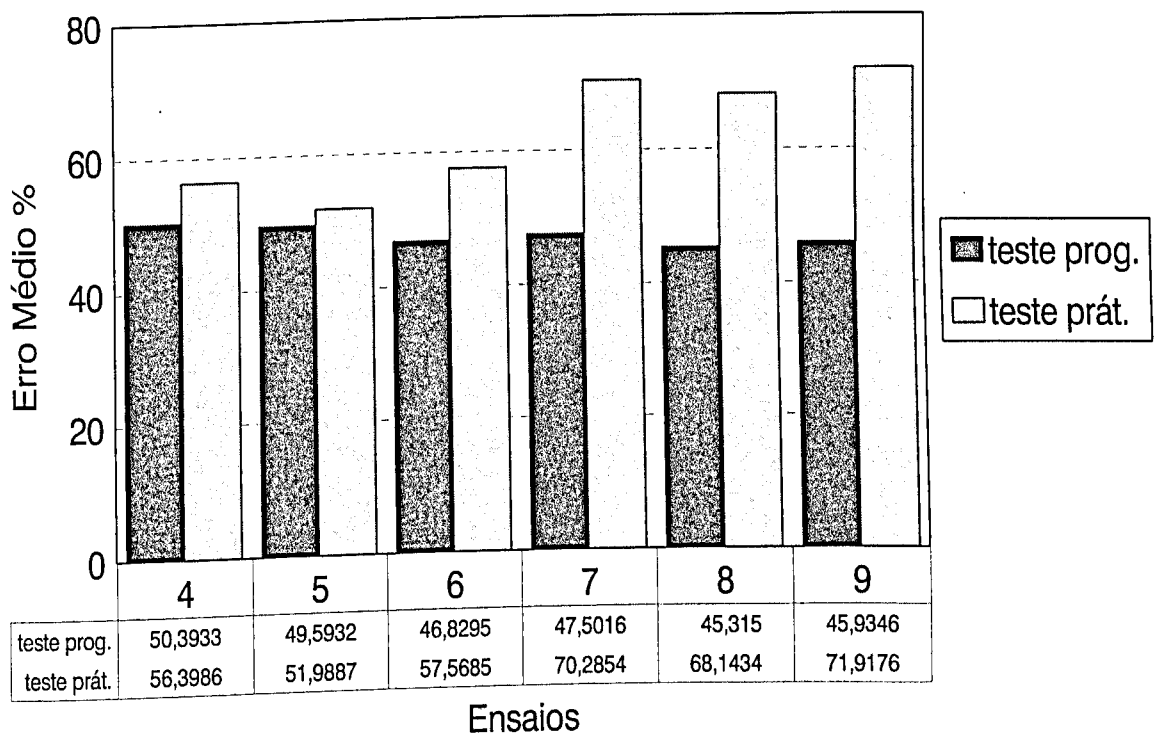


Figura 5.2 - Valores de erro médio % para teste programado e teste prático.

A Figura 5.3 mostra o desvio padrão para o tempo estimado da equação de Taylor expandida. No universo de nove ensaios realizados, verifica-se uma tendência acentuada de convergência dos valores de desvio padrão obtidos em cada novo ensaio programado realizado. Pela observação dos valores decorrentes dos testes práticos, verifica-se uma dispersão muito grande em torno de uma tendência de convergência dos valores de desvio padrão, o que indicaria a necessidade de um grande número de ensaios para a obtenção de valores de desvio padrão os quais foram alcançados em apenas nove ensaios, utilizando-se a metodologia do experimento ótimo.

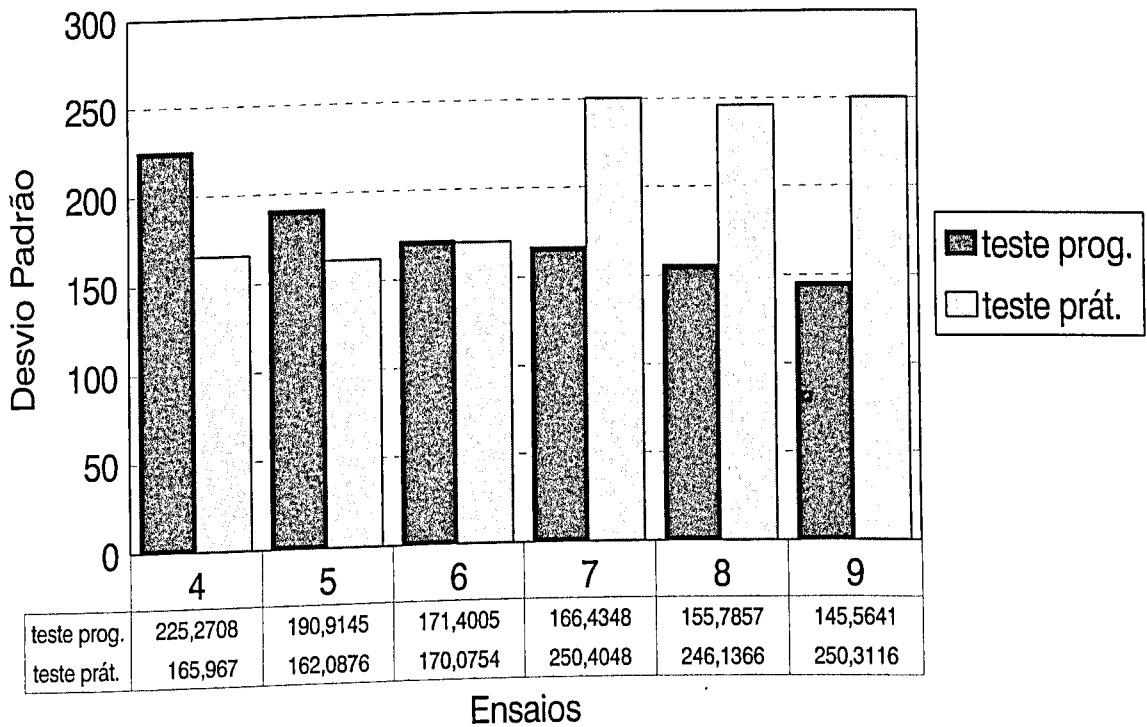


Figura 5.3 - Valores de desvio padrão para teste programado e teste prático.

A Figura 5.4, representativa do coeficiente H do termo que expressa o critério de desgaste VB_{MAX} , na equação de Taylor expandida, mostra de forma clara como o procedimento de otimização resultou no melhor conjunto de variáveis de corte para ser utilizado nos ensaios para o ajuste dos coeficientes da equação de Taylor. A tendência verificada nos testes práticos mostra que, possivelmente, o valor do coeficiente H convergirá, embora após um número de testes bem maior, para o valor obtido com apenas 4 ensaios (número de ensaios mínimos) realizados de acordo com a metodologia do experimento ótimo.

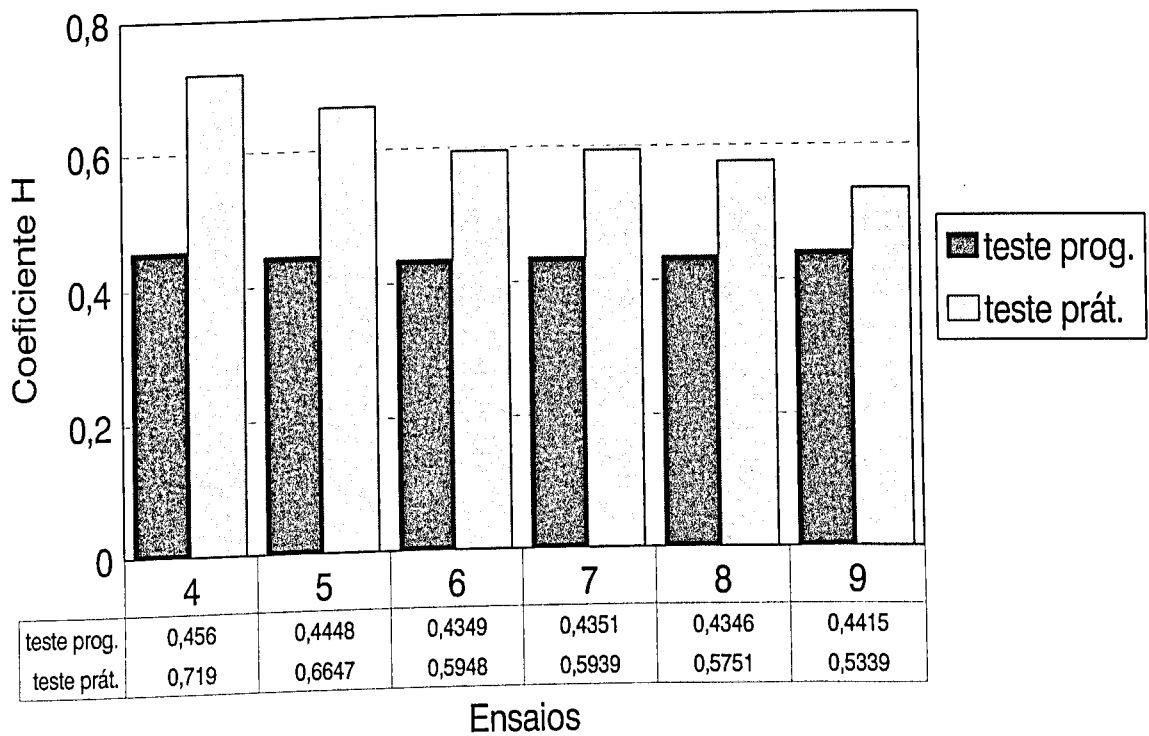


Figura 5.4 - Valores do coeficiente H para teste programado e teste prático.

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, representativas do coeficiente E do parâmetro de corte f , do coeficiente F do parâmetro V_c , e do coeficiente G da variável de corte ap , respectivamente, também confirmam a eficácia da metodologia de otimização proposta neste trabalho, comparativamente às metodologias empíricas usualmente utilizadas para a determinação da vida de ferramentas de corte.

Isto se torna importante no sentido de se reduzir ao máximo o número de ensaios de vida de ferramentas quando da necessidade de se determinar os intervalos de confiabilidade dos

coeficientes da equação de Taylor e os tempos de vida das ferramentas de corte. Até então, para a comparação dos tempos de vida de duas ou mais ferramentas, pesquisadores promoviam a realização de um número grande de ensaios, independentemente de qualquer critério, como forma de garantir a confiabilidade desejada nos resultados obtidos.

Este trabalho de dissertação propõe um procedimento que permite estimar a confiabilidade destes resultados em função do número de ensaios realizados, evitando assim um grande desperdício de material, ferramental de corte, hora-máquina, hora-homem e tempo, com a realização de ensaios desnecessários. Do mesmo modo, a aquisição de resultados não confiáveis, devido a um número de testes insuficientes, representaria um problema igualmente sério, podendo comprometer ainda toda a produtividade de uma linha de produção.

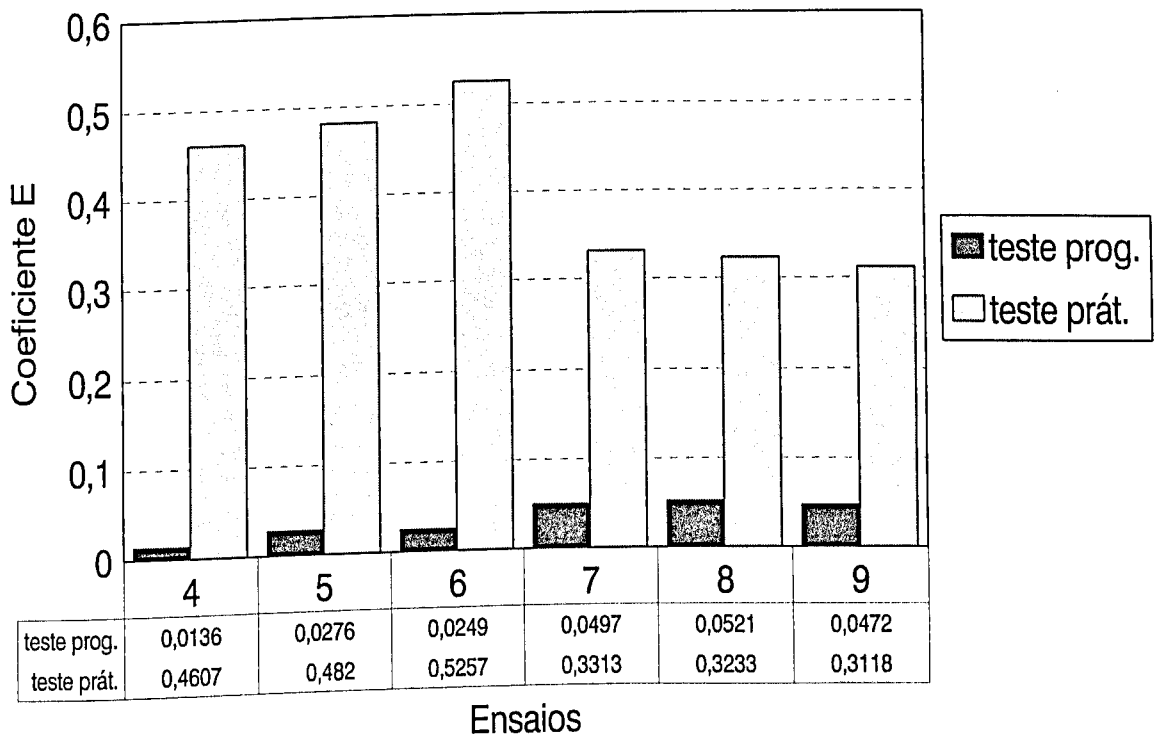


Figura 5.5 - Valores absolutos do coef. E para teste programado e teste prático.

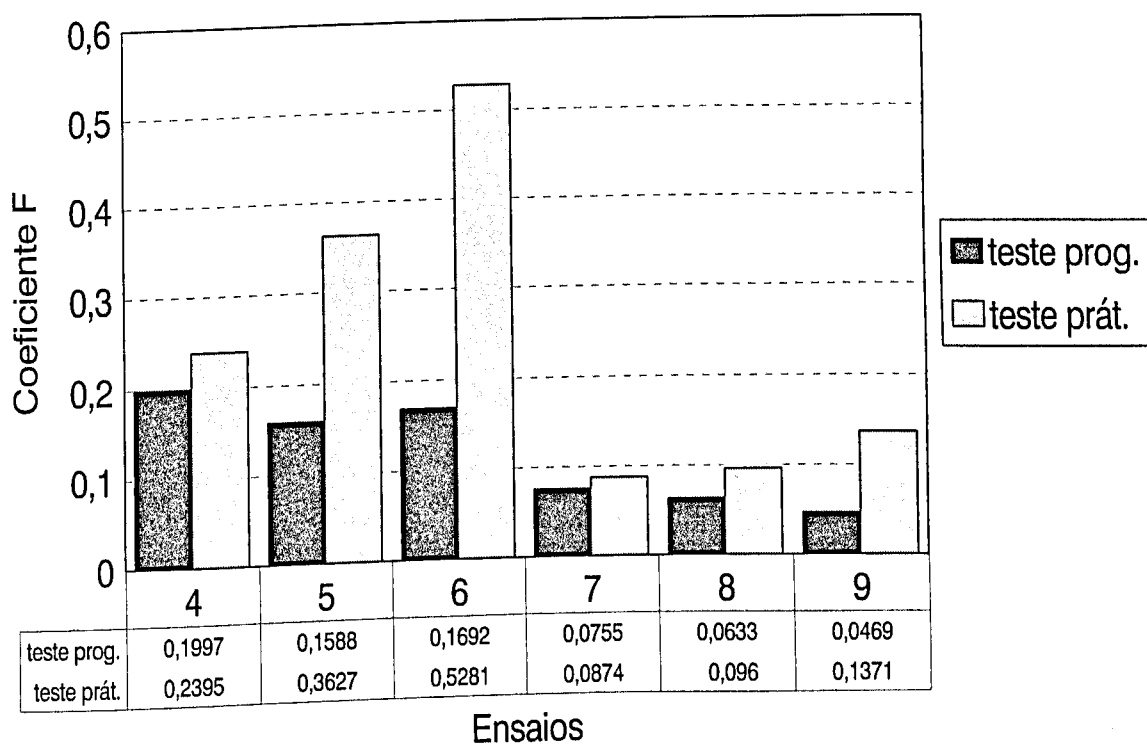


Figura 5.6 - Valores absolutos do coef. F para teste programado e teste prático.

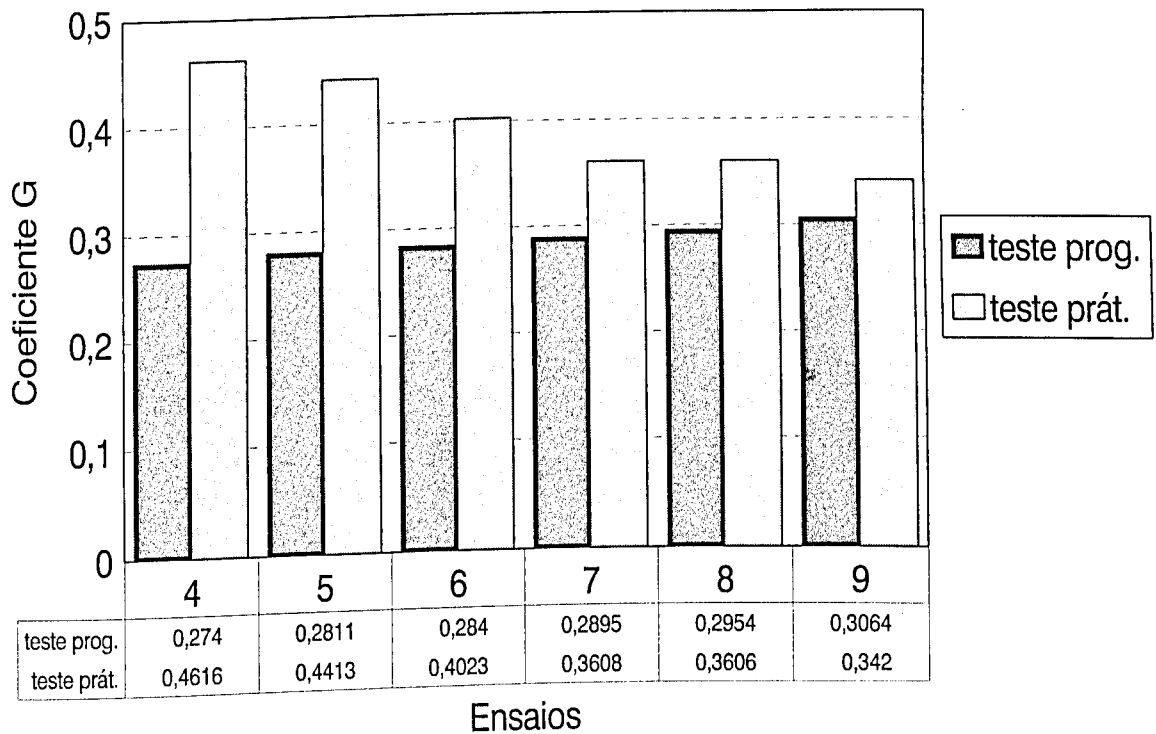


Figura 5.7 - Valores absolutos do coef. G para teste programado e teste prático.

A mesma proposta de otimização de ensaios para o ajuste dos coeficientes da equação de Taylor expandida apresentada neste trabalho, foi utilizada por Lourenço [45], para o fresamento do aço inoxidável austenítico AISI 304. Analogamente ao procedimento de otimização adotado neste trabalho para o fresamento do aço ABNT 1045, foram feitos gráficos relativos aos valores dos coeficientes C, E, F, G, H, desvio padrão e erro porcentual médio da equação de Taylor expandida. Os tempos estimados de vida das ferramentas para as condições de corte propostas

pelo programa de otimização, para o fresamento do aço inox AISI 304, apresentaram erro médio de 10% em relação aos tempos de vida efetivamente obtidos. Comparativamente ao aço ABNT 1045, estes apresentaram resultados muito inferiores, acima de 40% de erro médio. Como consequência, comparando-se os gráficos obtidos para os coeficientes C, E, F, G, H, desvio padrão e erro médio porcentual mostrados para os materiais ABNT 1045 e AISI 304, nota-se que o número de ensaios de vida necessários à obtenção de valores de convergência satisfatórios dos coeficientes da equação de Taylor, foi bem menor para o material AISI 304, ou seja, adotando-se os mesmos procedimentos experimentais, computacionais e estatísticos para dois materiais diferentes, houve uma grande variação na velocidade de convergência dos coeficientes e valores estatísticos analisados. Isto pode ser explicado por dois fatores:

- erros de leitura dos valores de desgaste, quando dos ensaios de vida das ferramentas de corte.
- influência do material de trabalho.

Simulações teóricas tem mostrado que os erros de leitura influenciam fortemente na confiabilidade dos coeficientes estimados para a equação de Taylor expandida, conforme pode ser observado pela análise da Figura 3.7 . No que diz respeito à influência do material de trabalho, um material mais nobre, ou seja, obtido sob condições mais severas de controle de qualidade, com maior precisão de composição química e estrutura micrográfica homogênea, ofereceria uma condição mais uniforme e de menor possibilidade de variação nos processos e mecanismos de desgaste das ferramentas de corte. Este fator também explicaria a necessidade de um número menor de testes de vida para a obtenção de valores confiáveis dos coeficientes da equação de Taylor expandida.

6. CONCLUSÃO

A utilização de critérios de experimento ótimo possibilita a obtenção dos coeficientes da equação de Taylor expandida de forma mais rápida e precisa, permitindo a comparação de desempenho de ferramentas e procedimentos de fabricação a partir de um pequeno número de ensaios e com grande redução nos custos com experimentos.

Com relação à confiabilidade dos coeficientes estimados, todo procedimento é feito segundo uma metodologia criteriosa, desde a elaboração do projeto dos experimentos até a determinação da confiabilidade dos mesmos, garantindo a repetibilidade do processo.

Os tempos de vida, assim como os coeficientes da equação de Taylor expandida, estimados pelos procedimentos de otimização, mostraram-se mais precisos para o aço inoxidável austenítico AISI 304 que para o aço comum ao carbono ABNT 1045, possivelmente pelo fato do primeiro apresentar uma micro-estrutura mais homogênea que o segundo. O aço AISI 304, desta maneira, propicia uma condição mais uniforme e de menor possibilidade de variação dos processos e mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas durante o corte, o que justifica os resultados encontrados.

O gradiente dos valores de desvio padrão, erro médio e erro médio porcentual para os valores médios dos parâmetros de corte, se apresenta como um bom indicador para a finalização dos ensaios experimentais, assim como para mensurar o grau de precisão global com que os coeficientes são estimados.

Sugere-se para continuidade deste trabalho, a aplicação da metodologia de experimento ótimo para o processo de torneamento, verificando a confiabilidade dos coeficientes estimados para um processo de usinagem onde, reconhecidamente, a equação de Taylor é representativa do processo de corte. Uma outra sugestão para pesquisas futuras se refere à influência da precisão da medição de VB na confiabilidade dos coeficientes estimados para a equação de Taylor expandida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.

- [1] Taylor, F.W. - "On the Art of Cutting Metals", ASME, vol. 28, pp 31-279, 1907.
- [2] Stemmer, C.E. - "Ferramentas de Corte", editora da UFSC, Florianópolis-SC, 1989.
- [3] Mills, B. and Redford, A.H. - "Machinability of Engineering Materials", Applied Science Publishers, 1983.
- [4] Colding, B.N. - "A Wear Relationship for Turning Milling and Grinding Machining Economics", Tese KTH, Estocolmo, 1959.
- [5] Colding, B.N. and König, W. - "Validity of Taylor Equation in Metal Cutting", CIRP, vol.19, pp 793-812, 1971.
- [6] Gorczyca, F.E. - "Applications of Metal Cutting Theory", Industrial Press, 1987.
- [7] Gennari Jr, W. - "Desempenho de Ferramentas de Cermets em Operações de Acabamento do Aço ABNT 1045", Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, Brasil, 1994.

- [8] **Silva, A.D.** - "Uma Metodologia para a Otimização Automática de Parâmetros de Usinagem", Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis-SC, Brasil, 1994
- [9] **Duarte, M.A.V. and Arruda, J.R.F.** - "Updating Rotor-Bearing Finite Element Models Using Experimental Frequency Response Functions", Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, vol. XV, número 2, pp136-149, Fevereiro de 1993.
- [10] **Duarte, M.A.V.** - "Ajuste de Modelos Dinâmicos de Estruturas com não Linearidades Concentradas", Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas-SP, Brasil, Maio de 1994.
- [11] **Motta, M.F.** - "Influência do Fluido de Corte no Torneamento do aço ABNT 8640", Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 1994, pp 122.
- [12] **Davies, O.L.** - "The Design and Analysis of Industrial Experiments", 2nd edition, Imperial Chemical Industries Limited, 1963.
- [13] **Cochran, W.G and Cox, G.M.** - "Experimental Design", 2nd edition, Wiley, 1957.
- [14] **Sandvik Coromant** - "Herramientas Rotativas y Plaquititas", Dinamarca, 1991, pp 528.
- [15] **Boston, O.W. and Gilbert, W.W.** - "Influence of Tool Life and Power of Nose Radius, Chamfer and Peripheral Cutting Edge Angle when Face Milling a 40.000 psi Cast Iron", Transactions of the ASTM, 1947, 69, pp 117-124.

- [16] **Pekelharing, A.J.** - "The Exit Failure in Interrupted Cutting", Annals CIRP, 1978, 27, pp 5-10.
- [17] **Andrev, G.S.** - "Thermal State of Tool Cutting Edge in Intermittent Cutting", Russ. Engg. J., 1974, 54, pp 56-59.
- [18] **Okushima, K. and Hoshi, T.** - "Thermal Crack in the Carbide Face Milling Cutter", 2nd report, Bull. JSME, 1963, 6(22), pp 317-326.
- [19] **Optiz, H. and Fohlich, K.E.** - ZVDI, 1954, 96, pags 822.
- [20] **Shinozaki, N. and Horda, M.** - "Thermal Stress Resistance of some Carbide and Oxide Tool Materials", Scientific papers of the Institute of Physics and Chemistry, Annals CIRP, 1970, 18, pp 555-562.
- [21] **Chao, B.T. and Trigger, K.J.** - "Temperature Distribution at the Tool-Chip Interface in Metal Cutting", Trans. ASME, 1955, 77, pp 1107-1121.
- [22] **Bathia, S.M. ; Pandey, P.C. ; Shaw, H.S.** - "The Thermal Condition of the Tool Cutting Edge in Intermittent Cutting", Wear, 1986, vol.61, pp 21-30.
- [23] **Chakraverti, G. ; Pandey, P.C. ; Mehta, N.K.** - "Ananysis of Tool Temperature Fluctuation in Interrupted Cutting", Precision Enginering, vol. 6, n. 2, 1984, pp 99-105.

- [24] **Wang, K.K. ; Tsao, K.C. ; Wu, S.M.** - "Investigation of Face-Milling Tool Temperatures by Simulation Techniques", Journal of Engineering for Industry, 1969, pp 772-780.
- [25] **Palmai, Z.** - "Cutting Temperature in Intermittent Cutting", International Journal of Machine Tools Manufacture, vol. 27, n. 2, 1987, pp 261-274.
- [26] **Zorev, N.N. and Sawiaskin, K.A.** - "Carbide Tool Life at Interrupted Cut with Continuous Cycles", Annals CIRP, 1970, 18, pp 555-562.
- [27] **Zorev, N.N.** - "Machining Steel with a Carbide Tipped Tool in Intermittent Heavy Cutting Conditions", Russ. Engg. J., 1963, 43(2), pp 43-47.
- [28] **Trent, E.M.** - "Metal Cutting", 2nd edition, Butterworths, 1984, 254 pags, ISBN 0-408-10856-6.
- [29] **Kramer, B.M.** - "On Tool Materials for High Speed Machining", Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, 1987, 109, pp 87-91.
- [30] **Shaw, M.C.** - "Metal Cutting Principles", Oxford Science Publication, New York, 1984, pp 594, ISBN 0-19-859002-4.

- [31] **Shaw, M.C. ; Thurman, A.L. ; Arlgren, H.J.** - "A Plastic Problem Involving Plane Strain and Plane Stress Simultaneously: Groove Formation in the Machining of High-Temperature Alloys", Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 1966, pp 142-146.
- [32] **Dearley, P.A. and Trent, E.M.** - "Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools", Metal Technology, 1982, vol. 9, pp 60-75.
- [33] **Aspinwall, D.K. and Chen, W.** - "Machining Grey Cast Iron using Advanced Ceramic Tool Materials", 27th International MATADOR Conference, 1978, Manchester, UK.
- [34] **Bhattacharyya, S.K. ; Aspinwall, D.K. ; Nicol, A.W.** - "The Application of Polycrystalline Compacts for Ferrous Machining", Proceedings of the 19th International Machine Tool Design and Research Conference, 1978, pp 425-434.
- [35] **Ferraresi, D.** - "Fundamentos da Usinagem dos Metais", ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1977, 751 pags.
- [36] **ISO 3685** - "Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools", 1977.
- [37] **Eykhoff, P.** - "Parameter Estimation in Engineering and Science", John Wiley, New York, 1977.

- [38] **Beck, J.V. and Arnold, K.J.** - "Parameter Estimation in Engineering Problems", Computational Mechanics Publications, England, 1985.
- [39] **Mottershead, J.E. and Foster, C.D.** - "An Instrumental Variable Method for the Estimation of Mass, Stiffnes and Damping Parameter from Measured Response Functions", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 2 (4), p. 376 - 390, 1988.
- [40] **Doebelin, E.O.** - "Measurement Systems Application and Design", John Willey & Sons, New York, 1989.
- [41] **Press, W.H. ; Flannery, B.P. ; Teukolsky, S.A. ; Vetterling, W.T.** - "Numerical Recipes - The Art of Scientific Computing, Fortran Version", Cambridge University Press, 3 rd edition, 1990, pp 702.
- [42] **Bendat, T.S. and Piersol, A.G.** - "Random Data Analysis and Measurement Procedures", Jonh Wiley & Sons, New York, 1986.
- [43] **Himmelblau, D.M.** - "Applied Nonlinear Programming", McGrawHill, New York, 1972.
- [44] **Marple Jr., S.C.** - "Digital Spectral Analysis with Applications", Inc., New Jersey, USA, 1987.

- [45] **Lourenço, C.J.** - "Comparação em Termos de Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico 304 e do Aço Inoxidável Austenítico 304 Modificado em sua Composição Química", Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 1996.

8.

ANEXOS

ANEXO 1

Certificado de composição química e de dureza média HB do aço ABNT 1045 fornecido pelo fabricante.

VILLARES ACOS VILLARES S/A - USINA ANHANGUERA		QUALITY CERTIFICATE / CERTIFICADO DE QUALIDADE Nº 001.095		Invoice Nº / Nota Fiscal Nº 71474-7											
		Customer Order Nº / Pedido do Cliente Nº -X-		Our Reference Nº / Ordem de Fabricação Nº 113927-4											
HEAD OFFICE Av. Espírito de Santo, 311 Vila Anhanguera São Carlos - SP CEP: 13506-900 Fone: (019) 333-1111 Fax: (019) 333-1111		ESPRITOMO CENTRAL Av. Espírito de Santo, 311 Vila Anhanguera São Carlos - SP CEP: 13506-900 Fone: (019) 333-1111 Fax: (019) 333-1111		Condition Fabricate / Material Código Cliente SAE 1045M											
Client / Cliente UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA															
Size / Dimensão QD 101.60 mm		Weight / Peso -X-		Application / Normas Gerais -											
Description / Descrição -X-		Finish / Acabado -X-		Delivery Condition / Condição de Entrega -X-											
Heat Treatment / Tratamento Térmico -X-															
1 - Chemical Composition (%) / Análise Química (%)															
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu					
Order Nº / Ordem Nº	.48	.25	.67	.019	.038	.12	.09	.03	.032	.11	-X-	-X-	-X-	-X-	-X-
Order Nº / Ordem Nº	8117362														
2 - Mechanical Properties / Propriedades Mecânicas															
Tensile Strength / Tensão de Resistência -X-		Yield Strength / Tensão de Escoamento -X-		Elongation / Alongamento -X-		Impact Test / Ensaio de Impacto -X-		Hardness / Dureza -X-		Heat Treatment / Tratamento Térmico -X-		3 - Hardness of Unit / Grau de Esferoidização (%) Unit / Grau de Esferoidização (%) 197/201 HB			
4 - Microstructure / Microestrutura															
Grain Size / Tamanho de Grão ASTM E 112 TEMPERA B600C B-7		Decarburization (mm) / Descarbonização (mm) -X-		Spheroidization Level (%) / Grau de Esferoidização (%) -X-											
5 - End Quench Hardness Test / Ensaio de Temperatura Crítica															
-X- -X- -X- -X- -X- -X- -X- -X- -X- -X- -X- -X- -X- -X- -X-															
6 - Macro Test / Exame Macrográfico															
-X- -X- -X- -X- -X- -X-															
7 - Ultrasonic Test / Exame de Ultrassom															
-X-															

OUR QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IS CERTIFIED TO ISO 9002
CERTIFICATE No.: 30016



MOGI DAS CRUZES, 16 DEC 1994

[Handwritten Signature]

Quality Assurance Department / Departamento de Garantia da Qualidade

ANEXO 2

As Tabelas abaixo mostram os valores de desgaste VB_{MAX} (mm) e tempo de vida T (min.) para as condições de corte propostas pelo procedimento de otimização.

Tabela 1 - Ensaio de fim de vida realizado para a primeira condição de corte gerada: $V_C=107$ m/min., $f=0.181$ mm/rev., $a_p=1.523$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
107.0000	.1810	1.5230	1.1987	.0500
107.0000	.1810	1.5230	2.3973	.0850
107.0000	.1810	1.5230	3.5960	.0900
107.0000	.1810	1.5230	4.7947	.1000
107.0000	.1810	1.5230	7.1920	.1000
107.0000	.1810	1.5230	8.3907	.1000
107.0000	.1810	1.5230	9.5893	.1100
107.0000	.1810	1.5230	10.7880	.1200
107.0000	.1810	1.5230	11.9867	.1250
107.0000	.1810	1.5230	13.1853	.1250
107.0000	.1810	1.5230	14.3840	.1300
107.0000	.1810	1.5230	15.5827	.1300
107.0000	.1810	1.5230	16.7813	.1500
107.0000	.1810	1.5230	17.9800	.1500
107.0000	.1810	1.5230	19.1787	.1850
107.0000	.1810	1.5230	21.5760	.1850
107.0000	.1810	1.5230	23.9733	.1850
107.0000	.1810	1.5230	26.3707	.1850
107.0000	.1810	1.5230	28.7680	.1850
107.0000	.1810	1.5230	31.1653	.1850
107.0000	.1810	1.5230	33.5627	.1870
107.0000	.1810	1.5230	38.3573	.1980
107.0000	.1810	1.5230	43.1520	.2110
107.0000	.1810	1.5230	47.9467	.2470
107.0000	.1810	1.5230	52.7413	.2580
107.0000	.1810	1.5230	57.5360	.2920
107.0000	.1810	1.5230	62.3307	.3050
107.0000	.1810	1.5230	67.1253	.3580
107.0000	.1810	1.5230	71.9200	.4630
107.0000	.1810	1.5230	76.7147	.5190
107.0000	.1810	1.5230	81.5093	.6100
107.0000	.1810	1.5230	83.9067	.6490
107.0000	.1810	1.5230	86.3040	.7130

Tabela 2 - Ensaio de fim de vida para a segunda condição de corte gerada: $V_C=251.17$ m/min., $f=0.0963$ mm/rev., $a_p=2.216$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
251.1720	.0963	2.2160	.9657	.1000
251.1720	.0963	2.2160	1.9313	.1280
251.1720	.0963	2.2160	2.8970	.2100
251.1720	.0963	2.2160	3.8627	.3240
251.1720	.0963	2.2160	4.8283	.4870
251.1720	.0963	2.2160	5.7940	.5580
251.1720	.0963	2.2160	6.7597	.5840
251.1720	.0963	2.2160	7.7253	.6710
251.1720	.0963	2.2160	8.6910	1.5530

Tabela 3 - Ensaio de fim de vida para a terceira condição de corte gerada: $V_C=275.176$ m/min., $f=0.0803$ mm/rev., $a_p=1.783$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
275.1760	.0803	1.7830	1.0613	.0900
275.1760	.0803	1.7830	2.1227	.3970
275.1760	.0803	1.7830	3.1840	.9380

Tabela 4 - Ensaio de fim de vida para a quarta condição de corte gerada: $V_C=116.52$ m/min., $f=0.0682$ mm/rev., $a_p=2.246$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
116.5210	.0682	2.2460	2.9272	.0780
116.5210	.0682	2.2460	5.8543	.1150
116.5210	.0682	2.2460	8.7815	.1250
116.5210	.0682	2.2460	11.7087	.1300
116.5210	.0682	2.2460	17.5630	.1540
116.5210	.0682	2.2460	23.4173	.1540
116.5210	.0682	2.2460	35.1260	.1590
116.5210	.0682	2.2460	52.6890	.2080
116.5210	.0682	2.2460	64.3977	.2340
116.5210	.0682	2.2460	81.9607	.4120
116.5210	.0682	2.2460	87.8150	.6410
116.5210	.0682	2.2460	90.7422	.7700

Tabela 5 - Ensaio de fim de vida para a quinta condição de corte gerada: $V_C=179.9$ m/min., $f=0.1696$ mm/rev., $a_p=1.379$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
179.9050	.1696	1.3790	.3500	.0740
179.9050	.1696	1.3790	.7667	.0860
179.9050	.1696	1.3790	1.5167	.0860
179.9050	.1696	1.3790	2.2667	.0900
179.9050	.1696	1.3790	3.0167	.1110
179.9050	.1696	1.3790	3.7833	.1220
179.9050	.1696	1.3790	4.5333	.1450
179.9050	.1696	1.3790	5.3000	.1710
179.9050	.1696	1.3790	6.0667	.2170
179.9050	.1696	1.3790	6.8833	.2790
179.9050	.1696	1.3790	8.3833	.4060
179.9050	.1696	1.3790	9.1500	.4500
179.9050	.1696	1.3790	9.9167	.5330
179.9050	.1696	1.3790	11.4667	.5720
179.9050	.1696	1.3790	12.9833	.6440
179.9050	.1696	1.3790	13.7500	.6440
179.9050	.1696	1.3790	15.3000	.6990
179.9050	.1696	1.3790	16.7667	.8040

Tabela 6 - Ensaio de fim de vida para a sexta condição de corte gerada: $V_C=250.00$ m/min., $f=0.121$ mm/rev., $a_p=1.603$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
250.0000	.1212	1.6030	.2333	.0640
250.0000	.1212	1.6030	.7667	.0760
250.0000	.1212	1.6030	1.5167	.1350
250.0000	.1212	1.6030	2.3000	.3310
250.0000	.1212	1.6030	2.8333	.4100
250.0000	.1212	1.6030	3.0667	.4200
250.0000	.1212	1.6030	3.8333	.4830
250.0000	.1212	1.6030	4.5833	.5460
250.0000	.1212	1.6030	5.3167	.7810

Tabela 7 - Ensaio de fim de vida para a sétima condição de corte gerada: $V_C=171.89$ m/min., $f=0.155$ mm/rev., $a_p=1.482$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
171.89	.1552	1.4823	.879	.067
171.89	.1552	1.4823	1.759	.072
171.89	.1552	1.4823	3.517	.080
171.89	.1552	1.4823	5.276	.106
171.89	.1552	1.4823	7.035	.106
171.89	.1552	1.4823	9.672	.179
171.89	.1552	1.4823	11.431	.249
171.89	.1552	1.4823	13.189	.318
171.89	.1552	1.4823	14.069	.338
171.89	.1552	1.4823	15.828	.396
171.89	.1552	1.4823	17.586	.547
171.89	.1552	1.4823	18.466	.557
171.89	.1552	1.4823	19.345	.593
171.89	.1552	1.4823	20.224	.644
171.89	.1552	1.4823	21.104	.678
171.89	.1552	1.4823	21.983	.769

Tabela 8 - Ensaio de fim de vida para a oitava condição de corte gerada: $V_C=204.468$ m/min., $f=0.142$ mm/rev., $a_p=1.54$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
204.468	.1422	1.5410	.806	.058
204.468	.1422	1.5410	1.613	.096
204.468	.1422	1.5410	2.420	.131
204.468	.1422	1.5410	3.226	.171
204.468	.1422	1.5410	4.033	.232
204.468	.1422	1.5410	5.645	.303
204.468	.1422	1.5410	6.452	.341
204.468	.1422	1.5410	8.065	.394
204.468	.1422	1.5410	8.871	.403
204.468	.1422	1.5410	10.485	.423
204.468	.1422	1.5410	11.291	.588
204.468	.1422	1.5410	12.098	.718

Tabela 9 - Ensaio de fim de vida para a nona condição de corte gerada: $V_C=207.65$ m/min.,
 $f=0.148$ mm/rev., $a_p=1.516$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
207.650	.1481	1.516	.763	.064
207.650	.1481	1.516	1.526	.077
207.650	.1481	1.516	3.051	.090
207.650	.1481	1.516	3.814	.111
207.650	.1481	1.516	5.340	.165
207.650	.1481	1.516	6.102	.199
207.650	.1481	1.516	6.865	.260
207.650	.1481	1.516	8.391	.400
207.650	.1481	1.516	9.154	.467
207.650	.1481	1.516	9.916	.499
207.650	.1481	1.516	10.679	.548
207.650	.1481	1.516	11.442	.686
207.650	.1481	1.516	12.205	.844

ANEXO 3

As Figuras abaixo apresentam os valores dos coeficientes da equação de Taylor expandida, assim como os demais resultados expressos na forma da Figura 3.3., gerados a partir dos ensaios de vida realizados de acordo com as condições de corte propostas pelos procedimentos de otimização.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_c

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	332.6170	475.1671	617.7172
H	.3313	.4560	.5807
E	-.4735	-.0136	.4463
F	-.9000	.1997	1.2995
G	-.3766	-.2740	-.1713

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.5888E+10	.2355E+11
A	-5.1904	-3.6498	-2.1092
B	-1.7916	-.0496	1.6923
C	-3.3423	.7290	4.8003
D	.8210	1.6642	2.5074

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$

$V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO	TEMPO MEDIO	TEMPO MAXIMO
.0000	21.6714	335.9286

ESTATISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -6.0104

DESVIO PADRAO = 225.2708

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 50.3933

Figura 1 - Resultados obtidos após o número mínimo de quatro ensaios de fim de vida.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_c

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	331.9070	474.1528	616.3987
H	.3474	.4448	.5421
E	-.4066	-.0276	.3515
F	-.5798	.1588	.8975
G	-.3668	-.2811	-.1953

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.3313E+10	.1325E+11
A	-4.7467	-3.5577	-2.3688
B	-1.4859	-.0980	1.2899
C	-2.0847	.5651	3.2149
D	.9471	1.5823	2.2175

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$

$V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO	TEMPO MEDIO	TEMPO MAXIMO
.0000	20.6306	110.1853

ESTATISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -3.7455

DESVIO PADRAO = 190.9145

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 49.5032

Figura 2 - Valores obtidos após cinco ensaios de fim de vida realizado.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_c

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	329.4385	470.6264	611.8143
H	.3484	.4349	.5215
E	-.3858	-.0249	.3360
F	-.5274	.1692	.8657
G	-.3630	-.2840	-.2049

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.2576E+10	.1030E+11
A	-4.5845	-3.5212	-2.4578
B	-1.3920	-.0876	1.2168
C	-1.8736	.5957	3.0651
D	.9753	1.5315	2.0877

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$

$V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO	TEMPO MEDIO	TEMPO MAXIMO
.0000	19.7368	87.7564

ESTATISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -2.5769

DESVIO PADRAO = 171.4005

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 46.8295

Figura 3 - Valores obtidos após seis ensaios de fim de vida.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_C

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	337.7076	482.4394	627.1712
H	.3493	.4351	.5208
E	-.4220	-.0497	.3225
F	-.6312	.0755	.7823
G	-.3674	-.2895	-.2116

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.1856E+10	.7423E+10
A	-4.4593	-3.4540	-2.4486
B	-1.4905	-.1718	1.1469
C	-2.1886	.2608	2.7102
D	.9724	1.5027	2.0330

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA V_B = 7.000000000000000E-001

V_C = 200.0000; f = .1250 e a_p = 1.7500

TEMPO MINIMO TEMPO MEDIO TEMPO MAXIMO

.0000 20.2596 89.8100

ESTATISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -2.5282

DESVIO PADRAO = 166.4848

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 47.5016

Figura 4 - Valores obtidos após sete ensaios de fim de vida realizados.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_c

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	344.3227	491.8895	639.4564
H	.3552	.4346	.5141
E	-.4107	-.0521	.3064
F	-.6155	.0633	.7420
G	-.3687	-.2954	-.2221

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.1296E+10	.5184E+10
A	-4.2875	-3.3852	-2.4830
B	-1.4194	-.1765	1.0664
C	-2.0881	.2142	2.5164
D	.9941	1.4713	1.9485

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$
 $V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO TEMPO MEDIO TEMPO MAXIMO
 .0000 20.2590 78.0861

ESTATISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS
 ERRO MEDIO = -1.9972
 DESVIO PADRAO = 155.7857
 ERRO PORCENTUAL MEDIO = 45.3150

Figura 5 - Valores obtidos após oito ensaios de fim de vida.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_c

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	366.7256	523.8937	681.0619
H	.3596	.4415	.5234
E	-.4262	-.0472	.3317
F	-.6695	.0469	.7633
G	-.3825	-.3064	-.2303

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.7483E+09	.2993E+10
A	-4.1344	-3.2634	-2.3925
B	-1.4204	-.1541	1.1121
C	-2.1890	.1529	2.4949
D	.9708	1.4407	1.9106

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$

$V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO TEMPO MEDIO TEMPO MAXIMO

.0000 20.7976 82.2909

ESTATISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -1.7045

DESVIO PADRAO = 145.5641

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 45.9346

Figura 6 - Valores obtidos após nove ensaios de fimde vida realizados.

ANEXO 4

As Tabelas abaixo mostram os valores de desgaste VB_{MAX} (mm) e o tempo de vida T (min.) para as condições de corte escolhidas segundo um procedimento estatístico fatorial fracionado, dentro de intervalos sugeridos por catálogo de fabricante de ferramentas.

Tabela 1 - Ensaio de fim de vida realizado para a primeira condição de corte proposta: $V_C=100$ m/min., $f=0.125$ mm/rev., $a_p=1.0$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
100.000	.125	1.00	1.8700	.0700
100.000	.125	1.00	3.7400	.0760
100.000	.125	1.00	7.4800	.0810
100.000	.125	1.00	11.220	.1010
100.000	.125	1.00	14.960	.1080
100.000	.125	1.00	22.440	.1520
100.000	.125	1.00	28.050	.1600
100.000	.125	1.00	33.660	.1840
100.000	.125	1.00	41.140	.2000
100.000	.125	1.00	48.620	.2130
100.000	.125	1.00	56.100	.2370
100.000	.125	1.00	63.580	.2570
100.000	.125	1.00	74.800	.2840
100.000	.125	1.00	86.020	.3450
100.000	.125	1.00	93.500	.4060
100.000	.125	1.00	100.93	.4350
100.000	.125	1.00	112.20	.5240
100.000	.125	1.00	117.81	.5520
100.000	.125	1.00	125.29	.5900
100.000	.125	1.00	132.77	.6600
100.000	.125	1.00	136.51	.7250

Tabela 2 - Ensaio de fim de vida para a segunda condição de corte proposta: $V_C=200$ m/min.,
 $f=0.2$ mm/rev., $a_p=1.00$ mm .

V_C	f	a_P	T	VB_{MAX}
200.000	.200	1.00	.58600	.0510
200.000	.200	1.00	1.7580	.0780
200.000	.200	1.00	2.9300	.0930
200.000	.200	1.00	4.6880	.1170
200.000	.200	1.00	8.2040	.1920
200.000	.200	1.00	10.548	.4690
200.000	.200	1.00	11.134	.5470
200.000	.200	1.00	11.720	.6080
200.000	.200	1.00	12.306	.6830
200.000	.200	1.00	12.892	.7100

Tabela 3 - Ensaio de fim de vida para a terceira condição de corte proposta: $V_C=300$ m/min.,
 $f=0.05$ mm/rev., $a_p=1.00$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
300.000	.050	1.00	1.5600	.0360
300.000	.050	1.00	3.1200	.0550
300.000	.050	1.00	4.6800	.0820
300.000	.050	1.00	7.8000	.1920
300.000	.050	1.00	9.3600	.3170
300.000	.050	1.00	10.920	.3990
300.000	.050	1.00	12.480	.4850
300.000	.050	1.00	14.040	1.005

Tabela 4 - Ensaio de fim de vida para a quarta condição de corte proposta: $V_C=100$ m/min.,
 $f=0.05$ mm/rev., $a_p=1.75$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
100.000	.050	1.75	4.6900	.0880
100.000	.050	1.75	9.3800	.0990
100.000	.050	1.75	14.070	.1020
100.000	.050	1.75	18.760	.1140
100.000	.050	1.75	28.140	.1460
100.000	.050	1.75	32.830	.1530
100.000	.050	1.75	42.210	.1530
100.000	.050	1.75	51.590	.1530
100.000	.050	1.75	60.970	.1670
100.000	.050	1.75	75.040	.1840
100.000	.050	1.75	89.110	.2220
100.000	.050	1.75	98.490	.2230
100.000	.050	1.75	112.56	.2510
100.000	.050	1.75	126.63	.2530
100.000	.050	1.75	145.39	.3820
100.000	.050	1.75	154.77	.4010

Tabela 5 - Ensaio de fim de vida para a quinta condição de corte proposta: $V_C=200$ m/min.,
 $f=0.125$ mm/rev., $a_p=1.75$ mm.

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
200.000	.125	1.75	.93800	.0580
200.000	.125	1.75	2.8140	.1370
200.000	.125	1.75	4.6900	.1840
200.000	.125	1.75	6.5660	.2830
200.000	.125	1.75	8.4420	.3680
200.000	.125	1.75	10.318	.4480
200.000	.125	1.75	12.194	.7670

Tabela 6 - Ensaio de fim de vida para a sexta condição de corte proposta: $V_C=300$ m/min., $f=0.2$ mm/rev., $a_p=1.75$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
300.000	.200	1.75	.39000	.1200
300.000	.200	1.75	.78000	.2110
300.000	.200	1.75	1.1700	.4950
300.000	.200	1.75	1.5600	.6240
300.000	.200	1.75	1.9500	1.528

Tabela 7 - Ensaio de fim de vida para a sétima condição de corte proposta: $V_C=100$ m/min., $f=0.2$ mm/rev., $a_p=2.5$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
100.000	.200	2.50	1.1700	.0640
100.000	.200	2.50	2.3400	.0700
100.000	.200	2.50	4.6800	.0780
100.000	.200	2.50	7.0200	.0850
100.000	.200	2.50	9.3600	.0990
100.000	.200	2.50	14.040	.1100
100.000	.200	2.50	18.720	.1130
100.000	.200	2.50	23.400	.1400
100.000	.200	2.50	28.080	.1490
100.000	.200	2.50	35.100	.1850
100.000	.200	2.50	42.120	.2280
100.000	.200	2.50	46.800	.2460
100.000	.200	2.50	53.820	.2890
100.000	.200	2.50	60.840	.3040
100.000	.200	2.50	67.860	.3530
100.000	.200	2.50	74.880	.4120
100.000	.200	2.50	81.900	.5340
100.000	.200	2.50	85.410	.6310
100.000	.200	2.50	86.580	.6610
100.000	.200	2.50	87.750	.7030

Tabela 8 - Ensaio de fim de vida para a oitava condição de corte proposta: $V_C=200$ m/min.,
 $f=0.05$ mm/rev., $a_p=2.5$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
200.000	.050	2.50	2.3400	.0580
200.000	.050	2.50	7.0200	.1200
200.000	.050	2.50	11.700	.1470
200.000	.050	2.50	16.380	.2920
200.000	.050	2.50	21.060	.4160
200.000	.050	2.50	23.400	.4530
200.000	.050	2.50	28.080	1.062

Tabela 9 - Ensaio de fim de vida para a nona condição de corte proposta: $V_C=300$ m/min.,
 $f=0.125$ mm/rev., $a_p=2.5$ mm .

V_C	f	a_p	T	VB_{MAX}
300.000	.125	2.50	.63000	.0680
300.000	.125	2.50	1.2600	.2880
300.000	.125	2.50	1.8900	.4760
300.000	.125	2.50	2.5200	.5220
300.000	.125	2.50	3.1500	1.823

ANEXO 5

As Figuras abaixo apresentam os valores dos coeficientes da equação de Taylor expandida, assim como dos demais resultados expressos na forma da Figura 3.3., gerados a partir dos ensaios de fim de vida realizados de acordo com as condições de corte escolhidas segundo um procedimento estatístico fatorial fracionado.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_c

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	409.0189	584.3127	759.6065
H	.3860	.7190	1.0520
E	-.8664	-.4607	-.0550
F	-1.0806	-.2395	.6017
G	-.7135	-.4616	-.2096

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.9863E+06	.3945E+07
A	-3.6387	-2.1665	-.6943
B	-2.1366	-.9982	.1403
C	-2.4735	-.5188	1.4359
D	.2564	1.5577	2.8591

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$

$V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO	TEMPO MEDIO	TEMPO MAXIMO
.0000	34.8984	540.5038

ESTADISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -1.7421

DESVIO PADRAO = 165.9670

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 56.3986

Figura 1 - Resultados obtidos após o número mínimo de quatro ensaios de fim de vida realizados.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_c

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	340.7457	486.7796	632.8135
H	.4413	.6647	.8881
E	-.7632	-.4820	-.2008
F	-.8417	-.3627	.1163
G	-.6274	-.4413	-.2552

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.1229E+07	.4916E+07
A	-3.3675	-2.2660	-1.1646
B	-1.9242	-1.0923	-.2604
C	-1.9983	-.8219	.3546
D	.6071	1.5062	2.4052

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$

$V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO	TEMPO MEDIO	TEMPO MAXIMO
.0000	26.8378	77.4523

ESTATISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -.8100

DESVIO PADRAO = 162.0876

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 51.9887

Figura 2 - Valores obtidos após cinco ensaios de fim de vida realizados.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_C

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	250.9590	358.5129	466.0668
H	.4115	.5948	.7782
E	-.7824	-.5257	-.2691
F	-.9496	-.5281	-.1066
G	-.5652	-.4023	-.2395

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.2235E+07	.8941E+07
A	-3.6352	-2.4855	-1.3359
B	-2.1829	-1.3067	-.4306
C	-2.5361	-1.3127	-.0892
D	.6495	1.4785	2.3075

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$

$V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO	TEMPO MEDIO	TEMPO MAXIMO
.0000	18.2838	45.5232

ESTATISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -1.4592

DESVIO PADRAO = 170.0754

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 57.5685

Figura 3 - Valores obtidos após seis ensaios de fim de vida.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_c

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	326.7382	466.7688	606.7995
H	.4163	.5939	.7714
E	-.5234	-.3313	-.1392
F	-.3453	-.0874	.1706
G	-.5026	-.3608	-.2190

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.2496E+08	.9986E+08
A	-4.0088	-2.7715	-1.5341
B	-1.5921	-.9182	-.2443
C	-.9746	-.2421	.4903
D	.7540	1.6459	2.5378

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$

$V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO	TEMPO MEDIO	TEMPO MAXIMO
.0000	34.3191	87.0818

ESTADISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -6.7585

DESVIO PADRAO = 250.4048

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 70.2854

Figura 4 - Valores obtidos após sete ensaios de fim de vida realizados.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_c

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	323.6361	462.3372	601.0384
H	.4186	.5751	.7316
E	-.4948	-.3233	-.1519
F	-.3167	-.0960	.1247
G	-.4915	-.3606	-.2297

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.2454E+08	.9816E+08
A	-3.9013	-2.7730	-1.6447
B	-1.4960	-.8965	-.2971
C	-.8929	-.2662	.3606
D	.8084	1.5947	2.3810

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$

$V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO	TEMPO MEDIO	TEMPO MAXIMO
.0000	32.1453	70.6412

ESTADISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -6.0386

DESVIO PADRAO = 246.1366

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 68.1434

Figura 5 - Valores obtidos após oito ensaios de fim de vida.

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA V_c

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
C	298.2807	426.1153	553.9498
H	.3974	.5339	.6704
E	-.4769	-.3118	-.1467
F	-.3457	-.1371	.0715
G	-.4629	-.3420	-.2211

COEFICIENTES DA EQUACAO DE TAYLOR PARA T

COEF.	INFERIOR	MEDIO	SUPERIOR
K	.0000E+00	.4887E+08	.1955E+09
A	-4.0784	-2.9241	-1.7698
B	-1.5142	-.9117	-.3093
C	-1.0347	-.4009	.2328
D	.8222	1.5613	2.3004

CONFIABILIDADE DE TEMPO DE VIDA PARA $V_B = 7.0000000000000000E-001$

$V_c = 200.0000$; $f = .1250$ e $a_p = 1.7500$

TEMPO MINIMO	TEMPO MEDIO	TEMPO MAXIMO
.0000	27.8383	59.1073

ESTATISTICA DOS TEMPOS MEDIDOS E SIMULADOS

ERRO MEDIO = -5.8483

DESVIO PADRAO = 250.3116

ERRO PORCENTUAL MEDIO = 71.9176

Figura 6 - Valores obtidos após nove ensaios de fim de vida realizados.