

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

UMA METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO  
AUTOMÁTICA DE PARÂMETROS DE USINAGEM

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALEXANDRE DIAS DA SILVA

Florianópolis, dezembro de 1994.

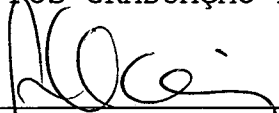
UMA METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO  
AUTOMÁTICA DE PARÂMETROS DE USINAGEM


ALEXANDRE DIAS DA SILVA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE


DOUTOR EM ENGENHARIA

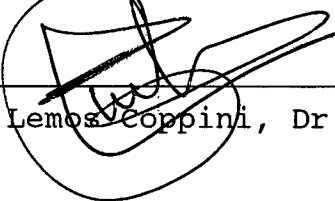
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA  
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

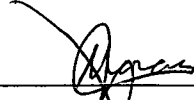
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D.  
Orientador

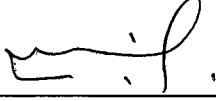
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr. Eng. Mec.  
Coordenador do Curso


BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D.  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Nivaldo Lemos Coppini, Dr. Eng.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Marcus Antônio Viana Duarte, Dr. Eng.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Benedito de Moraes Purquério, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Lourival Bohes, Dr. Eng. Mec.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Abelardo Alves de Queiroz, pela amizade e orientação deste trabalho.

Ao Prof. Bernd Hirsch, pela oportunidade concedida para desenvolvimento de parte do trabalho junto ao Instituto BIBA.

Ao Dr.Ing. Enrico Hämele, pela amizade e co-orientação do trabalho durante a etapa desenvolvida no Instituto BIBA.

Ao Prof. Marcus Antônio Viana Duarte, pela amizade e colaboração técnica inestimável.

Ao Prof. Álisson Rocha Machado, pela amizade e co-orientação na realização deste trabalho.

Aos colegas do DEEME/UFU, em especial aos professores da área de Fabricação, pelo apoio para conclusão deste trabalho.

À minha esposa e aos meus filhos, pelo apoio, paciência e compreensão.

Aos meus sogros, pela amizade e receptividade durante a estadia em Florianópolis.

Aos colegas de curso e familiares, pelo companheirismo.

À CAPES e DAAD, pelo apoio financeiro.

À memória de meu padrinho,

Moacir da Silva Lima

## SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS .....	i
LISTA DE FIGURAS .....	iii
LISTA DE TABELAS .....	vi
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1. Introdução .....	1
2. Objetivo .....	7
3. Modelamento do Processo de Usinagem .....	10
3.1. Parâmetros de Corte .....	10
3.2. Força de Corte .....	14
3.3. Critério de Otimização das Condições de Corte .....	17
4. Identificação de Parâmetros .....	22
4.1. Modelos Usados em Ajustes de Parâmetros .....	23
4.2. Estimadores de Parâmetros .....	25
4.2.1. O Estimador MAP Sequencial .....	28
4.2.2. O Estimador de Variáveis Instrumentais .....	31
4.3. Ajuste dos Coeficientes da Equação de Taylor .....	32
4.3.1. Escolha dos Valores Iniciais para b e V .....	34
4.3.2. Estimativa da Matriz W de Confiabilidade nas medições .....	35
4.3.3. Convergência do Estimador MAP .....	35
4.3.4. Intervalo de Confiabilidade .....	36
4.4. Equações de Taylor Reduzidas .....	37

5. Metodologia Proposta .....	39
5.1. Considerações Iniciais .....	39
5.2. Restrições .....	40
5.2.1. Restrição de Força no Desbaste .....	40
5.2.2. Restrição de Torque .....	52
5.2.3. Restrição de Força no Acabamento .....	58
5.2.4. Restrição de Rugosidade .....	60
5.2.5. Restrição de Potência .....	62
5.3. Otimização dos Parâmetros de Usinagem .....	63
5.3.1. Inicialização do Banco de Dados .....	63
5.3.2. Cálculo de Vc inicial .....	69
5.3.3. Otimização pela Realimentação do Sistema ....	71
5.3.4. Ajuste dos Parâmetros com Monitoramento de Força .....	77
5.4. Considerações sobre Quebra de Ferramenta .....	78
6. Características do Sistema Computacional .....	87
6.1. Estrutura Modular .....	87
6.2. Seleção das Funções do Sistema .....	88
6.2.1. Geração das Condições de Usinagem .....	88
6.2.2. Realimentação .....	90
6.2.3. Configuração do Sistema .....	91
6.2.4. Apresentação .....	96
6.2.5. Dados Recomendados .....	97
6.3. Estrutura de Arquivos .....	97
6.3.1. Cadastros .....	97
6.3.2. Arquivo de Dados Práticos .....	108
6.4. Módulo de Ajuste de Parâmetros .....	116

6.4.1. Entrada de dados .....	116
6.4.2. Controle do Banco de Dados .....	117
6.4.3. Inicialização do Módulo de Ajuste .....	117
6.4.4. Saída dos Resultados .....	118
6.5. Sequência do Processamento .....	118
7. Simulações .....	121
7.1. Características do Processo Simulado .....	121
7.2. Ajuste dos Coeficientes da Equação de Taylor .....	123
7.3. Otimização de Vc .....	134
7.4. Identificação de Parâmetros com Monitoramento de Força .....	135
8. Conclusão .....	137
REFERÊNCIAS .....	139
ANEXO .....	145

## LISTA DE SÍMBOLOS

Simbologia	Unidade
ae - Penetração de trabalho	mm
ap - Profundidade de corte	mm
b - Largura de corte	mm
B - Largura fresada	mm
C - Coeficiente linear da equação expandida de Taylor	-
$C_m$ - Custo de utilização da máquina-ferramenta	\$/h
$C_t$ - Custo da ferramenta	\$/aresta
$C_T$ - Constante da equação simplificada de Taylor	-
D - Diâmetro da ferramenta	mm
e - Variáveis de entrada	-
E - Expoente do avanço na equação expandida de Taylor	-
f - Avanço	mm/rot
F - Expoente da profundidade de corte na equação expandida de Taylor	-
$F_c$ - Força de corte	N
$f_z$ - Avanço por gume	mm/rot
G - Expoente da vida da ferramenta na equação expandida de Taylor	-
h - Espessura de corte	mm
$h_m$ - Espessura média do cavaco	mm
H - Expoente da marca de desgaste na equação expandida de Taylor	-
I - Expoente da penetração de trabalho na equação expandida de Taylor	-
$K_{cl.1}$ - Força específica de corte	N/mm <sup>2</sup>



L	- Comprimento total de furação	mm
$L_f$	- Percurso de avanço	mm
$m_c$	- Constante do material na equação de Kiezle	-
P	- Matriz de ganho do filtro	-
r	- Função objetivo	-
$r_c$	- Raio de cunha	mm
$R_{max}$	- Rugosidade superficial	$\mu m$
$t_C$	- Tempo de troca de ferramenta	min
T	- Vida da ferramenta	min
TF	- Função Transferência	-
$T_R$	- Tempo de resposta na realimentação	-
V	- Matriz de covariância das medições	-
VB	- Critério de fim de vida da ferramenta	mm
Vc	- Velocidade de corte	m/min
X	- Matriz de sensibilidade do modelo	-
Y	- Variáveis de saída	-
Z	- Número de arestas da ferramenta	-
$Z_E$	- Número de arestas efetivamente atuantes	-
$\alpha$	- Coeficiente angular da relação entre força de corte e desgaste da ferramenta	N/mm
$\beta$	- Parâmetros do modelo	-
$\beta_0$	- Valores iniciais dos parâmetros	-
$\epsilon$	- erros de medição.	-
$\varphi_s$	- Ângulo de ataque	graus
$\psi$	- Covariância dos erros de medição	-
$\eta_m$	- Dados medidos	-
$\eta_r$	- Dados do sistema real	-
$\tau_P$	- Constante de tempo do processo	-
$\chi$	- Ângulo de posição	graus

## LISTA DE FIGURAS

- 1.1 - Procedimento convencional para determinação de condições de usinagem.
- 1.2 - Diagrama de blocos para controle de processos.
- 2.1 - Procedimento de otimização dos parâmetros de corte
- 3.1 - Representação da equação de Taylor.
- 3.2 - Influência de variações dos parâmetros de usinagem.
- 3.3 - Variáveis do processo - torneamento.
- 3.4 - Variáveis do processo - fresamento tangencial.
- 3.5 - Variáveis do processo - fresamento de topo.
- 3.6 - Influência de  $V_c$  sobre custos e tempos de usinagem.
- 3.7 - Influência da variação de  $f$  e  $a_p$  nos custos de usinagem.
- 4.1 - Hipótese sobre o erro de medição  $\epsilon$
- 4.2 - Modelo de erro na entrada.
- 4.3 - Fluxograma.
- 5.1 - Operação de desbaste.
- 5.2 - Curva  $h=f(I, F_c=F_{c_{adm}})$  no diagrama  $h \times I$ .
- 5.3 - Alternativas de redução de  $f$  ou  $a_p$  para limitar a força.
- 5.4 - Alternativas de redução de  $f$  e/ou  $a_p$  para limitar a força.
- 5.5 - Opções de redução dos parâmetros:
  - a) avanço
  - b) profundidade de corte
  - c) ambos. ok
- 5.6 - Algoritmo para redução da força de corte.
- 5.7 - Volume de material removido no fresamento.
- 5.8 - Determinação do ângulo de ataque.

- 5.9 - Restrição de torque para o fresamento.
- 5.10 - Área da seção do cavaco.
- 5.11 - Restrição de força no acabamento.
- 5.12 - Exemplo de tabelas para dados de corte.
- 5.13 - Equação de Taylor para dados de corte recomendados.
- 5.14 - Ajuste dos parâmetros com dados realimentados
- 5.15 - Frequência de quebra de ferramenta.
- 5.16 - Influência da velocidade de corte na vida da ferramenta.
- 5.17 - Influência do desgaste sobre a força de corte.
- 5.18 - Otimização dos parâmetros considerando quebra de ferramenta.
- 6.1 - Módulos do sistema computacional.
- 6.2 - Opções disponíveis no menu "Geração".
- 6.3 - Opções disponíveis no menu "Realimentação".
- 6.4 - Opções disponíveis no menu "Configuração".
- 6.5 - Opções disponíveis no menu "Apresentação".
- 6.6 - Opções disponíveis no menu "Dados Recomendados".
- 6.7 - Registros dos arquivos de materiais e ferramentas.
- 6.8 - Registros dos arquivos de máquinas, suportes e peças.
- 6.9 - Registros dos arquivos de tarefas e dados gerais.
- 6.10 - Registros dos arquivos de configurações.
- 6.11 - Registros dos arquivos de dados recomendados.
- 6.12 - Registros dos arquivos de dados práticos.
- 6.13 - Faixas de velocidades.
- 6.14 - Organização dos arquivos de dados práticos.
- 6.15 - Fluxograma do programa de ajuste de parâmetros.
- 6.16 - Entrada de dados do programa de ajuste.

- 6.17 - Sequência do processamento.
- 7.1 - Erro percentual na estimação de  $G$  utilizando o estimador MAP para o arquivo principal, arquivo com  $f$  constante e arquivo com  $f$  e  $a_p$  constantes.
- 7.2 - Convergência na avaliação da vida em função do número de ensaios.
- 7.3 - Performance dos estimadores MAP, MQ E MAK.
- 7.4 - Velocidade de convergência do estimador MAP em função do valor inicial assumido para  $V$ .
- 7.5 - Desempenho do estimador de Mínimos Quadrados.
- 7.6 - Desempenho do estimador de Markov.
- 7.7 - Desempenho do estimador Máximo a Posteriori.
- 7.8 - Comparação entre os estimadores para variância ponderada de erros.
- 7.9 - Procedimento para simulação de ajuste de  $T_{om}$ .
- 7.10 - Ajuste de  $T_{om}$  como função do número de ensaios.
- A.1 - Menu principal e submenu Geração.
- A.2 - Entrada de dados para definição da tarefa.
- A.3 - Exemplo de dados de corte gerados.
- A.4 - Seleção de tarefas para realimentação.
- A.5 - Realimentação do sistema.
- A.6 - Indicação dos coeficientes da equação de Taylor.
- A.7 - Definição da configuração.
- A.8 - Formas de apresentação dos dados do sistema.
- A.9 - Seleção do tipo de tabela para dados recomendados.
- A.10 - Entrada de dados de corte recomendados.

**LISTA DE TABELAS**

- 1.1 - Classificação da forma de controle.
- 7.1 - Características do processo.
- 7.2 - Dados de corte recomendados.
- 7.3 - Coeficientes estimados.
- 7.4 - Valores estimados para  $\alpha$ .

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um procedimento de otimização de condições de corte para processos de fabricação por usinagem. A implementação da metodologia proposta em um sistema computacional baseia-se na identificação de parâmetros do modelo de um dado processo através da realimentação de dados de saída, como vida e desgaste da ferramenta ou força de corte, para cada combinação adotada das condições de avanço, profundidade de corte e velocidade de corte. No modelamento do processo foi utilizado a equação de Taylor para relacionar a influência das condições de usinagem sobre a vida e desgaste da ferramenta e a equação de Kienzle para determinação da força de corte. Simulações foram realizadas para analisar as características dos estimadores de Máximo a Posteriori, Markov e Mínimos Quadrados aplicados ao processo de usinagem. O sistema mostrou-se ser adequado a aplicações em processos produtivos, onde a variação e a quantidade de dados necessários para se obter uma boa precisão na identificação dos parâmetros do modelo são facilmente atingidos.

**ABSTRACT**

A method for optimization of the cutting conditions for a machining operation is proposed in this work. The implementation of the system in a software is based on the identification of the parameters of the model through a feedback of the process output data such as tool life, tool wear or cutting force for each feed rate, depth of cut and cutting speed combination. Taylor's equation was used in the model in order to relate the influence of the cutting conditions with tool wear and tool life. Estimation of the cutting force was based on Kienzle's equation. In order to analyse the characteristics of Maximum a Posteriori, Markov and Least Square estimators applied to the machining process, simulation data was used. The system is highly recommended in production line application, because enough amount of cutting condition data is easily available.

# CAPÍTULO I

## Introdução

A aplicação de sistemas computacionais como ferramenta de apoio aos processos produtivos tem se mostrado indispensável para aumentar satisfatoriamente sua qualidade e produtividade de forma a atender as exigências impostas pela competitividade do mercado. A fabricação assistida por computador (sistemas CAM - *Computer Aided Manufacturing*) envolve técnicas para apoiar e integrar as etapas de projeto, planejamento de processos, controle da produção, garantia da qualidade e programação de máquinas |1-6|. Otimizar condições de corte para processos de fabricação por usinagem também tem papel de importância nesta cadeia. Embora pesquisas nesta área já tenham atingido um bom nível de desenvolvimento, raramente os resultados destes trabalhos são empregados em ambiente industrial. Estimativas como as apresentadas em |7| mostram que os tempos de corte dos metais são atualmente 40% maiores que o ideal, embora a maioria das máquinas-ferramentas modernas tenham potência e velocidade suficientes para trabalhar nas condições ótimas de usinagem. Portanto, apesar de se ter hoje um grande conhecimento acumulado sobre usinagem e apenas simples ajustes sejam necessários para se atingir condições ótimas, dificilmente estes valores são empregados.

As principais justificativas apresentadas pelos usuários para as dificuldades em se determinar os valores ótimos são:

- a) O custo de realização de ensaios de usinabilidade é elevado.
- b) As condições adotadas nestes ensaios nem sempre coincidem com aquelas existentes na produção.
- c) O custo de ferramentas é considerado pequeno em relação ao custo total de manufatura.
- d) As variações de usinabilidade dos materiais poderiam provocar a quebra das ferramentas para velocidades e avanços elevados.



- e) É difícil se calcular adequadamente a economia que pode ser obtida com dados de usinagem otimizados.
- f) A questão da escolha das melhores ferramentas e dados de usinagem ótimos é complexa e pouquíssimos engenheiros têm este conhecimento.
- g) O número de variáveis envolvidas na usinagem é grande e seus efeitos no resultado do processo é de difícil equacionamento, principalmente quando considerados de forma combinada.

Entre outras, a última razão é provavelmente a que acumula maior responsabilidade pelo mal desempenho na usinagem de metais na grande maioria das indústrias do setor.

A consequência destas dificuldades é que o procedimento normalmente adotado pelos responsáveis pela determinação das condições de corte, conforme ilustrado pela figura 1.1, limita-se à utilização de valores recomendados e adaptados ao processo em que serão aplicados e que raramente são melhorados pela realização de ensaios prévios de usinabilidade ou por consideração de critérios de otimização. O conhecimento e a experiência acumulada sobre o processo e suas restrições permanecem entretanto como fatores decisivos nesta tarefa.

O crescente aumento da produtividade na usinagem é proporcionado principalmente pela evolução no desenvolvimento de máquinas e de novos materiais para ferramentas, mas o fator predominante neste aspecto é a automação dos processos. O aprimoramento e aplicação de técnicas de controle na fabricação por usinagem é decorrência da necessidade de se manter o desempenho destes sistemas.

Sob o ponto de vista de controle de processos, um equipamento para fabricação por usinagem pode ser entendido como uma função de transformação onde a definição dos parâmetros de entrada dependem de características desejadas no produto final e parâmetros de saída indicam os resultados obtidos. A saída é caracterizada pela geometria e propriedades da peça produzida. A entrada é o conjunto de variáveis que tem efeito perceptível e determinístico sobre a saída ou nas condições de trabalho da

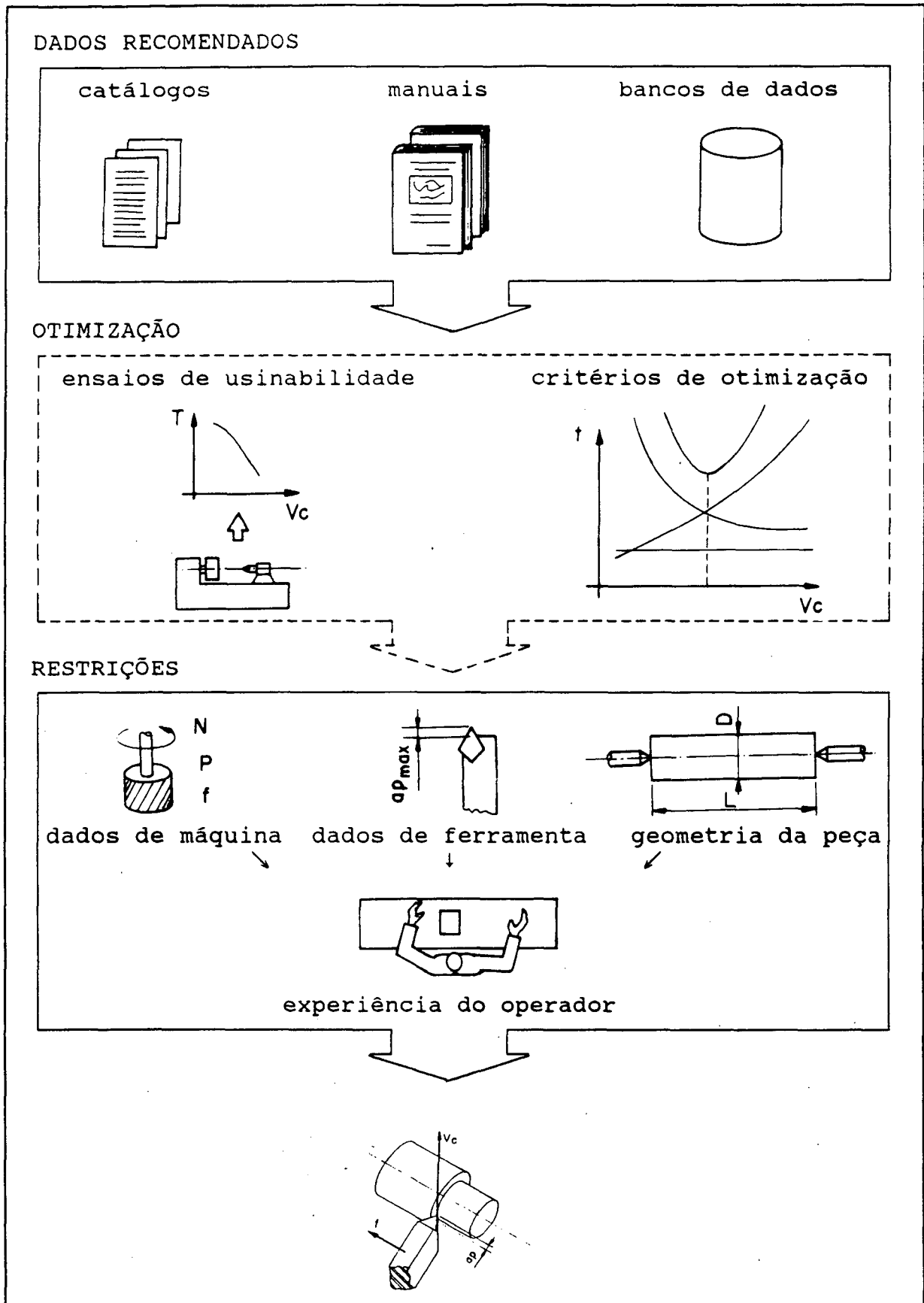


Fig. 1.1 - Procedimento convencional para determinação de condições de usinagem.

máquina. Como entrada considera-se o material a ser transformado, parâmetros de usinagem e ferramenta de corte utilizada. O controle de um processo tem como objetivo a eliminação ou redução de interferências para manter de forma apropriada a relação

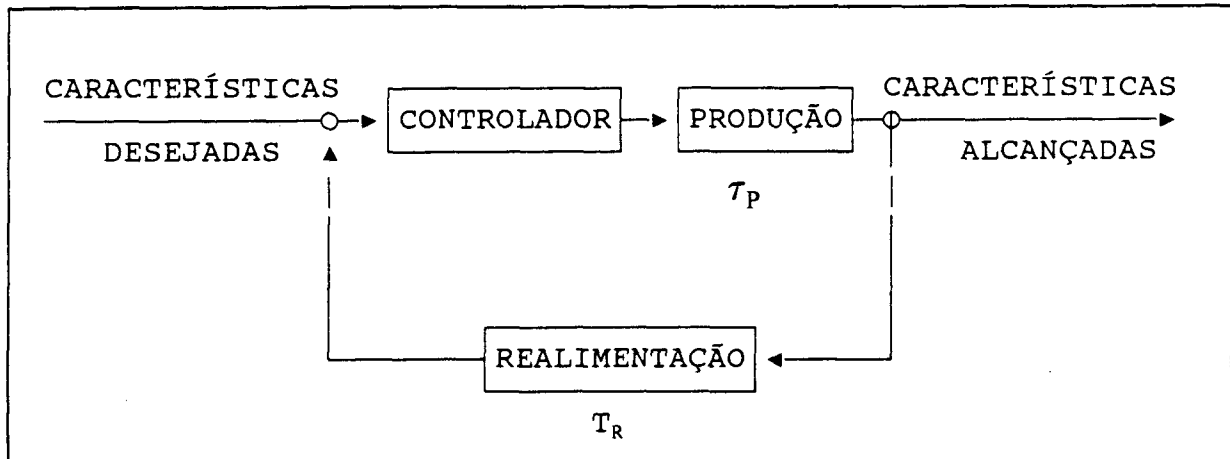


Fig. 1.2 - Diagrama de blocos para controle de processos.

entrada/saída. Um sistema de controle pode ser esquematicamente representado por um diagrama de blocos como o mostrado na figura 1.2. As características principais neste diagrama são a constante de tempo do processo  $\tau_p$  e o tempo de resposta na realimentação  $T_R$ , e o termo *controlador* representa o conjunto de técnicas, métodos ou equipamentos empregados para manter de forma desejável a relação entrada/saída. A constante de tempo do processo representa o tempo necessário para realizar o ciclo completo de fabricação de uma unidade do produto. O tempo de resposta na realimentação é relacionado com a frequência em que a forma de controle recebe informações sobre as variáveis de saída do processo. A tabela 1 mostra uma classificação das diferentes formas de controle segundo o tempo de resposta na realimentação |8|.

O controle em tempo real, em que o tempo de resposta da realimentação emitida ao controlador é menor que a constante de tempo do processo, tem como exemplo o servo-controle de componentes das máquinas tais como mecanismos para definir posicionamento ou velocidade da ferramenta|9|.

O controle adaptativo também é um exemplo onde a realimentação ocorre em tempo real |10-15|. Neste caso, o monitoramento da máquina-ferramenta é a estratégia para

Tabela 1.1: Classificação da forma de controle

Tempo de resposta	Forma de controle
$T_r < \tau_p$	Em tempo real (on-line)
$T_r = \tau_p$	Controle iterativo (off-line)
$T_r \sim 10-100 \tau_p$	Controle estatístico
$T_r \sim 10^3 \tau_p$	Modelamento empírico
$T_r \sim \text{meses}$	Garantia da qualidade ou Exigências de mercado

diagnóstico e controle, que é feito através da introdução de sensores no processo para fornecerem o sinal de realimentação ao controlador. O desenvolvimento de sensores apropriados ao processo, a aplicação de técnicas de processamento de sinal e algoritmos de tomada de decisão são os objetos de pesquisas nesta área.

Estes sistemas podem constar unicamente da identificação de falhas seguida de comando de interrupção do processo para reparos ou de ações de ajustes ou controle automático através da avaliação de parâmetros que possam representar (direta ou indiretamente) o estado do processo [16].

O desenvolvimento de sistemas de monitoramento pode ser visto como resultado da evolução de pesquisas no desenvolvimento de sensores [17-18]. Os sensores com aplicação em processos de usinagem podem ser classificados em dois grupos básicos: sensores locais e remotos [19]. Os ditos locais fornecem um sinal de saída que está diretamente relacionado com a grandeza a ser medida. Este tipo é o mais interessante por ter menos possibilidade do sinal ser afetado por influências desconhecidas. Por outro lado, muitos sinais importantes para o diagnóstico são de acesso difícil. Sensores remotos para medição das variáveis do processo são de emprego mais comum por serem de aplicação mais simples.

Sensoriamento remoto implica em proceder uma medição indireta da grandeza que se deseja analisar. A utilização de um transdutor de indução para medir a corrente de armadura do motor de acionamento da máquina [20], por exemplo, é caracterizado como

um sensoriamento remoto quando o objetivo é avaliar a força de corte. A colocação de um dinamômetro posicionado junto à fixação da ferramenta possibilitaria a medição direta desta variável. Entretanto, em ambos os casos, a obtenção de valores acima de um nível aceitável não implica necessariamente na indicação da causa do problema. Para o exemplo citado, uma força excessiva de corte pode ser causada pelo desgaste da ferramenta ou também por utilização de condições inadequadas de corte.

Para o controle iterativo, a verificação da necessidade de alterações dos parâmetros de entrada é feita a cada conclusão de um ciclo de operação, ou seja, toda peça usinada é medida para verificar a estabilidade do processo. Já para o controle estatístico de qualidade, a frequência desta verificação é menor |21|. A forma de controle caracterizada pelo modelamento empírico é feita pela identificação dos parâmetros de um modelo matemático utilizado para representar o comportamento do processo.

Embora haja diferenças significativas entre os diversos itens desta classificação |22|, em todos eles existe sempre alguma forma de realimentação, independente do tipo de controle. Mesmo os processos onde o controle é dito em ciclo aberto, respostas do próprio mercado estabelecidas por exigências do consumidor é uma forma de realimentação e devem ser utilizadas para promover as alterações necessárias no processo.

Outro campo de pesquisas envolvido na determinação de parâmetros de usinagem é a aplicação de técnicas de inteligência artificial para o desenvolvimento de sistemas especialistas que usam como critérios para tomada de decisões um conjunto de regras associadas a mecanismos de inferência |23|. Estes sistemas têm tido suas maiores dificuldades na formação da base de conhecimento |24|, onde segue-se a idéia de usar a experiência de especialistas para fornecer o conjunto de regras, o que pode ser considerado um tanto subjetivo e relativamente impreciso.

## CAPÍTULO II

### Objetivo

A carência de aplicações de formas modernas de controle do processo de usinagem em sistemas produtivos evidencia as dificuldades de se superar os problemas de adaptação de protótipos desenvolvidos em laboratórios de pesquisas ao ambiente industrial |25|.

Limitações ainda existem em aplicações de controle adaptativo |26-29|, embora as pesquisas nesta área tenham tido uma grande evolução nas duas últimas décadas. Os principais problemas são a necessidade de sensores caros, trabalhar com estes sensores em ambiente hostil, necessidade de ocupação de espaço físico na área de trabalho, e a diminuição da flexibilidade do sistema pela colocação de dispositivos para fixação dos sensores |30|. Além disso, cabe ressaltar que a medida que os sistemas se tornam mais complexos, a confiabilidade geral pode declinar. Por estas razões, sistemas com controle adaptativo são ainda objeto de pesquisa e não têm grande aplicação prática.

Atualmente, as máquinas-ferramentas disponíveis no mercado já apresentam equipamentos na forma de acessórios para controlar o processo a nível de monitoramento através da aplicação de transdutores que medem variáveis como força de corte ou desgaste da ferramenta.

Embora a utilização de tais equipamentos represente uma vantagem significativa em relação aos convencionais |31|, o controle do processo neles embutido é feito com base em restrições e não há aplicação de critérios de otimização.

Considerando os problemas citados para o uso de sistemas complexos de controle e também a importância da aplicação de condições ótimas de usinagem, propõe-se neste trabalho criar uma metodologia alternativa para otimização automática de parâmetros de corte. O objetivo da proposta é o desenvolvimento de um

sistema computacional capaz de prover a técnica de controle por modelamento com ferramentas matemáticas para alcançar as seguintes características (fig. 2.1):

a) Utilização de dados de corte recomendados ou resultados práticos previamente armazenados na inicialização do procedimento de identificação de parâmetros do modelo para minimizar o tempo deste processo.

b) Aplicação de um modelo estatístico sequencial na identificação de parâmetros associando modelamento do processo com controle iterativo, permitindo obter resultados mesmo com poucos dados de realimentação e reduzindo o tempo de realimentação.

c) Organizar os dados práticos obtidos na realimentação de forma a aumentar a precisão na determinação dos parâmetros do processo.

d) Aplicar critérios de otimização ao modelo do processo.

e) considerar restrições do processo de fabricação com avaliações teóricas sobre variáveis do processo desconhecidas ou com valores medidos para as mesmas para o caso de sistemas monitorados.

O sistema proposto foi projetado para servir como módulo de um sistema de planejamento de processos de fabricação [32] onde procura-se explorar os fundamentos sobre o processo de usinagem e aplicar técnicas de identificação de seu comportamento com base na realimentação de informações provenientes do próprio processo de fabricação em aplicações específicas. A identificação de características do processo tem como objetivo otimizar as condições de corte.

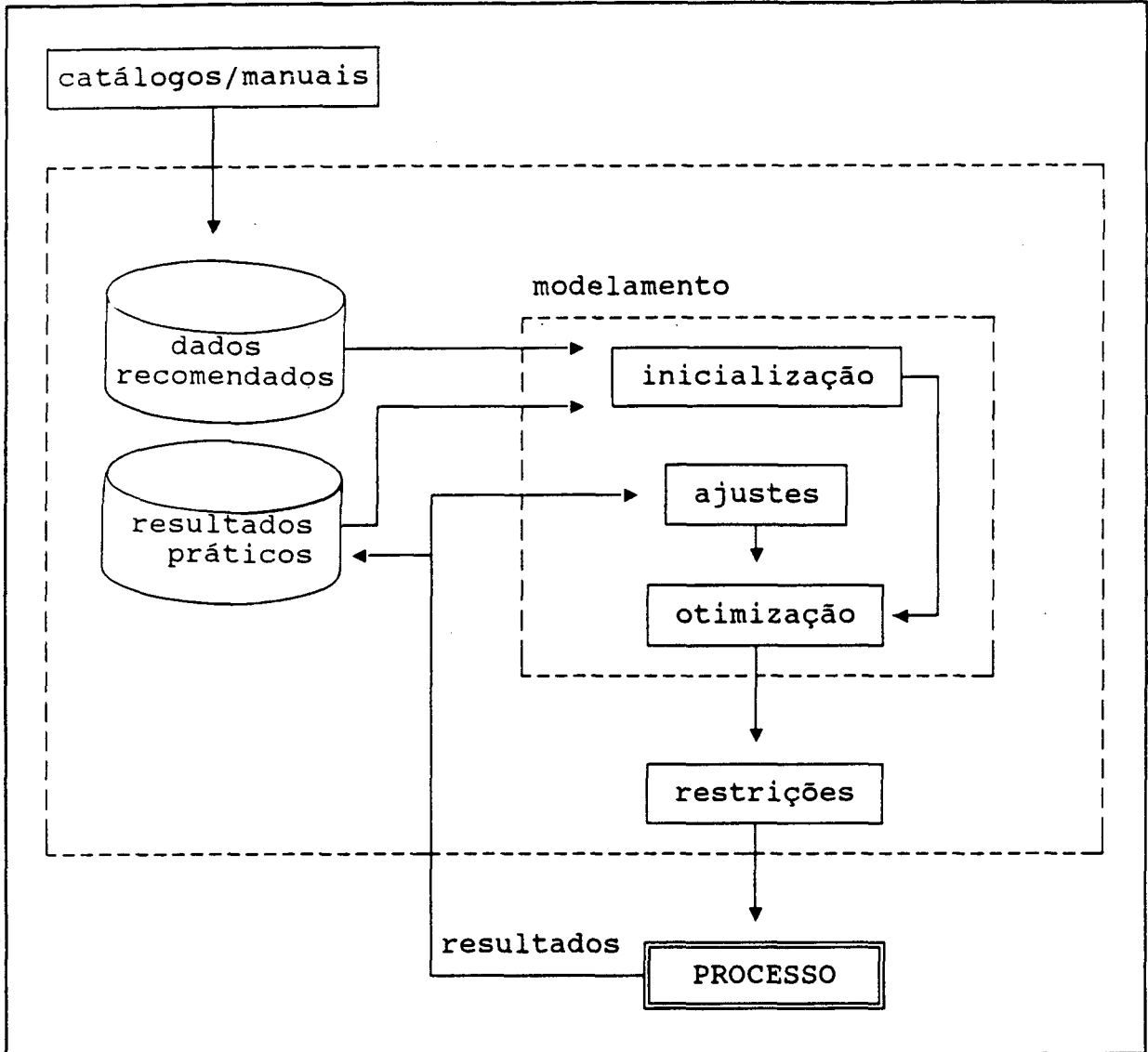


Fig. 2.1 - Procedimento de otimização dos parâmetros de corte



## CAPÍTULO III

### Modelamento do Processo de Usinagem

Modelar um sistema significa associa-lo a um conjunto de hipóteses que sejam capazes de representar ou prever suas propriedades ou o seu comportamento. Muitas têm sido as tentativas de representar através de um modelo adequado o comportamento do processo de usinagem. Neste capítulo é apresentado uma classificação genérica sobre os principais tipo de modelos propostos para a usinagem.

#### 3.1. Parâmetros de Corte

A mais antiga relação matemática da história do corte dos metais é a equação de Taylor, publicada em 1907 por F.W. Taylor [33] e que na sua forma original foi assim apresentada:

$$V_c \cdot T^\alpha = C_T \quad (3.1)$$

onde

$V_c$  = velocidade de corte

$T$  = vida da ferramenta

$C_T$  = coeficiente linear

$\alpha$  = coeficiente angular

Esta equação, ainda hoje utilizada, é válida quando os demais parâmetros do processo de usinagem permanecem constantes e representa uma reta num gráfico bi-logarítmico  $V_c \times T$ .

Posteriormente surgiram variações desta equação tanto para considerar a influência de outras variáveis como também para extrapolar o modelo a outros processos de fabricação além do torneamento, tomado como referência nas primeiras pesquisas desenvolvidas na área de usinagem.

Para os processos de fabricação por torneamento, fresamento

e furação, por exemplo, a equação de Taylor pode ser apresentada na forma estendida – envolvendo outros parâmetros de corte – pelas seguintes expressões |34|:

$$\text{Torneamento:} \quad V_C = C \cdot f^E \cdot a_p^F \cdot T^G \cdot V_B^H \quad (3.2)$$

$$\text{Furação:} \quad V_C = C \cdot f^E \cdot D^F \cdot L^G \cdot V_B^H \quad (3.3)$$

$$\text{Fresamento:} \quad V_C = C \cdot f_z^E \cdot a_p^F \cdot T^G \cdot V_B^H \cdot \left(\frac{a_e}{D}\right)^I \quad (3.4)$$

onde

$V_C$  = velocidade de corte.

$f$  = avanço;  $f_z$  = avanço por gume.

$a_p$  = profundidade de corte.

$T$  = vida da ferramenta.

$V_B$  = largura da marca de desgaste, correspondente ao critério de fim de vida da ferramenta.

$a_e$  = penetração de trabalho.

$D$  = diâmetro da broca ou da fresa.

$L$  = comprimento total de furação, executável durante a vida da broca.

$C, E, F, G, H, I$  = coeficientes da equação ou parâmetros do processo.

Outro exemplo de tentativa para representação do processo de usinagem foi a forma também estendida da equação de Taylor proposta por Colding em 1959 |35| descrita por:

$$V_C \cdot T^\alpha \cdot h_e^m = C_0 \quad (3.5)$$

onde

$V_C$  = Velocidade de corte

$T$  = vida da ferramenta

$C_0, \alpha, m$  = parâmetros do processo

$h_e$  = espessura equivalente do cavaco

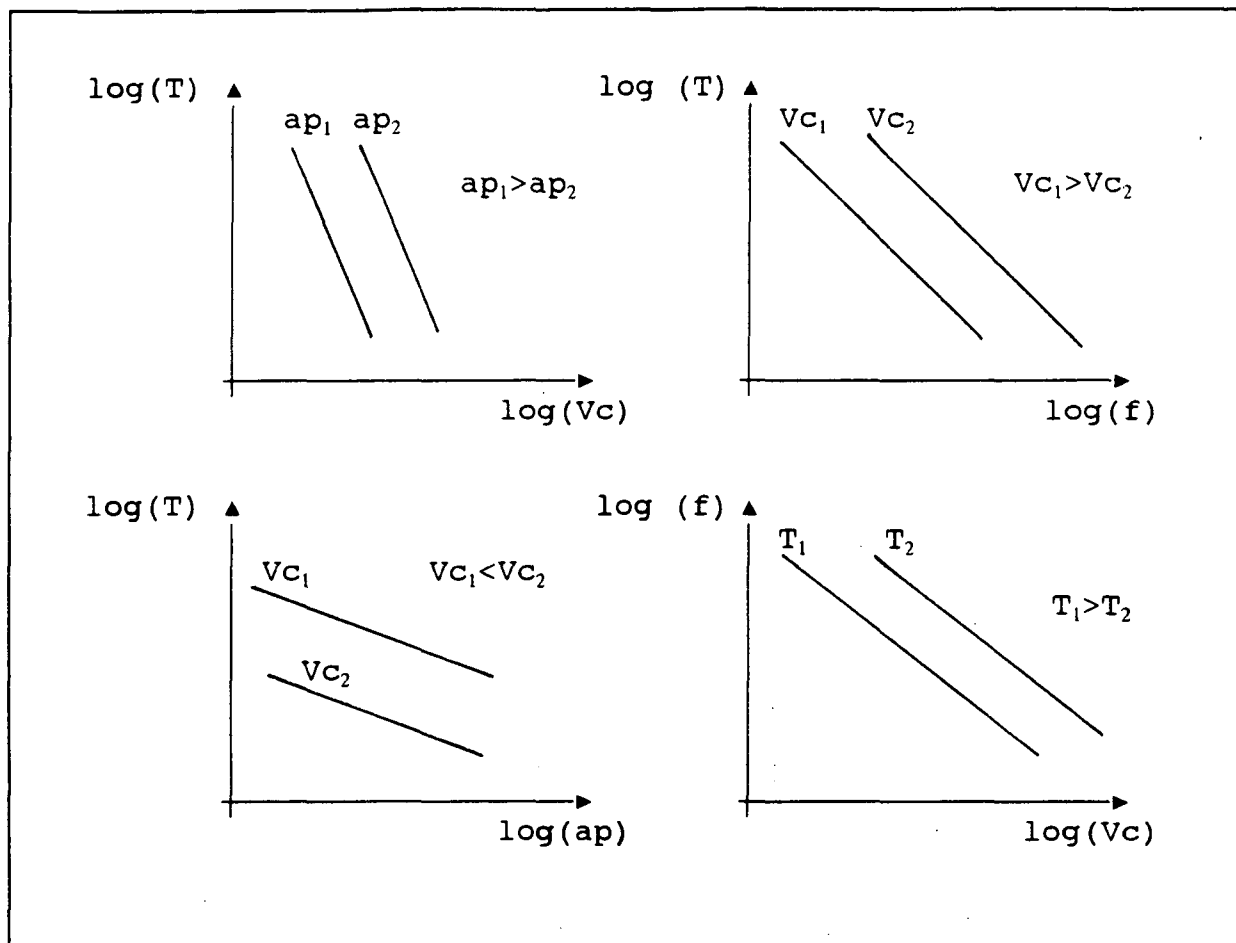


Fig. 3.1- Representação da equação de Taylor.

O expoente  $m$  assume valores definidos por Colding para diferentes faixas de avanço. A espessura equivalente do cavaco  $h_e$ , definida pela razão entre a área da seção de corte ( $ap \times f$ ) e o comprimento de contato entre ferramenta e peça, corresponde ao inverso do equivalente de cavaco definido por Woxén em 1932 [36] e que por sua vez é função do avanço, profundidade de corte, ângulo de posição e raio de ponta da ferramenta. Portanto, a equação (3.5) também contempla a influência destas variáveis no processo.

Colding também mostrou que as curvas de vida de ferramentas podem sofrer variações de sua forma linear principalmente a baixas velocidades de corte e apresentou a equação a seguir para

considerar este comportamento.

$$k+ax+by+cy+dyz+ez+fx+gyz+hxz=0 \quad (3.6)$$

com

$$x=\ln\left(\frac{1}{h_e}\right); y=\ln Vc; z=\ln T \quad (3.7)$$

onde

$k, a, b, c, d, e, f, g, h$  = parâmetros do processo.

Outras equações matemáticas também foram estabelecidas para relacionar os parâmetros de usinagem [37]. A princípio, estes modelos podem ser classificados em três tipos básicos. O primeiro envolve aqueles que têm a forma da equação de Taylor. Analisando graficamente a equação (3.2) ou equivalentes, verifica-se que ela representa uma reta em um gráfico bi-logarítmico quando as variáveis são consideradas aos pares. Matematicamente pode-se também deduzir que a influência de outras variáveis observada em um mesmo gráfico é visualizada como retas paralelas entre si, conforme exemplifica a figura 3.1.

O segundo tipo de modelamento matemático é caracterizado como o apresentado na equação (3.5). A validade da espessura equivalente do cavaco  $h_e$  nesta expressão foi discutida por Veestra et al [38] e a análise do problema mostrou que na equação dada por Colding,  $\alpha = f(Vc, h_e)$  e que variações de avanço e profundidade

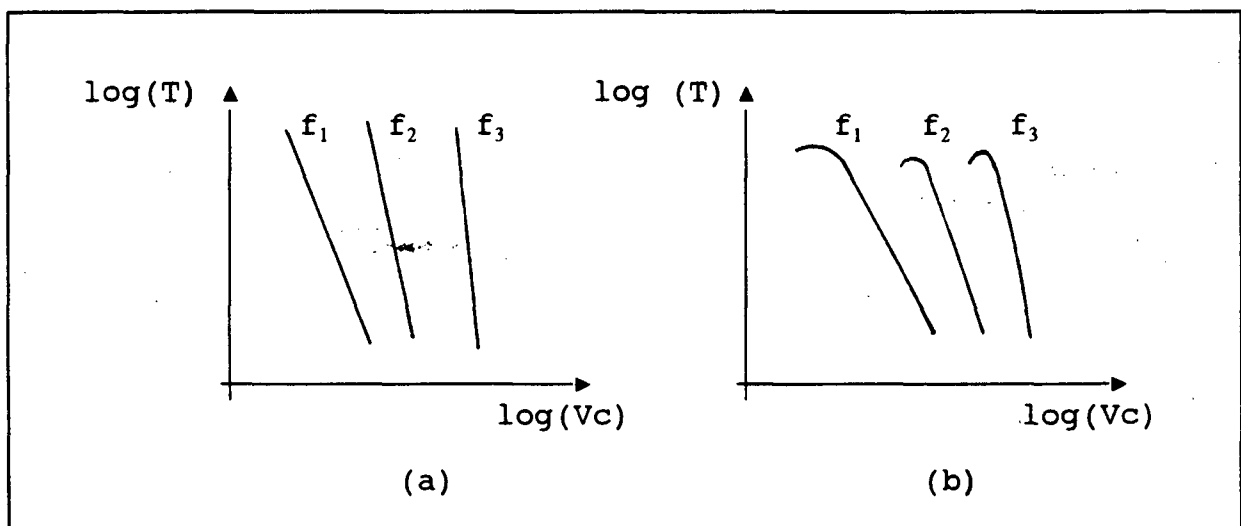


Fig. 3.2- Influência de variações dos parâmetros de usinagem.

de corte provocam alterações em  $h_c$ . Conforme mostrado em [39],  $m$  também é função de  $h_c$ , mesmo para curvas de vida onde o valor de  $\alpha$  é considerado constante. Isto significa que embora esta equação possa ser representada por uma reta, as variações de avanço e profundidade de corte implicam em alteração na inclinação da mesma (fig. 3.2-a).

Finalmente, o processo de corte dos metais pode ser reproduzido por modelos mais complexos (fig. 3.2-b) e que envolvem maior número de variáveis para tentar alcançar maior precisão na identificação de seu comportamento. Conforme estudos mostrados em [40], uma equação como a apresentada em (3.6) não tem grande aplicação prática em função do grande número de constantes a serem identificadas para representar o processo. Além disso, as variáveis consideradas devem ser boas indicadoras do comportamento do processo e não apresentar redundância entre si. Por exemplo, um parâmetro como o ângulo de folga da ferramenta é um indicador relativamente pobre, pois ele tem pouco efeito na maioria das variáveis de estado do processo (vida da ferramenta, acabamento superficial da peça, potência requerida, etc.). Por outro lado, parâmetros como tensão de cisalhamento e dureza do material, apesar de exercerem grande influência nas variáveis de estado, têm efeitos similares e são portanto redundantes.

### 3.2. Força de corte

A força resultante do processo de corte é função basicamente das condições de usinagem e do material da peça trabalhada. Para relacionar estas variáveis, Kienzle [41] sugeriu

a seguinte equação:

$$FC = K_c \cdot A = K_c \cdot b \cdot h \quad (3.8)$$

onde

$F_c$  = força de corte

$K_c$  = força específica de corte

$A$  = área da seção de corte

$b$  = largura de corte

$h$  = espessura de corte

A espessura de corte (fig. 3.1) é a variável que tem maior influência na força específica de corte. Quanto maior  $h$ , menor será  $K_c$ . Esta relação pode ser expressa por:

$$K_c = K_{cl.1} \cdot h^{-m_c} \quad (3.9)$$

onde

$K_{cl.1}$  = pressão específica de corte para um cavaco de

$A = b \cdot h = 1 \times 1 \text{ mm}^2$

$m_c$  = constante do material

Substituindo (3.9) em (3.8) tem-se:

$$FC = K_{cl.1} \cdot b \cdot h^{1-m_c} \quad (3.10)$$

Esta equação visa especialmente a aplicação prática, pois os valores das constantes  $k_{cl.1}$  e  $(1-m_c)$  podem ser encontrados na bibliografia para diferentes tipos de materiais e também por desconsiderar variáveis do processo cuja influência sobre a força de corte é complexa ou incerta.

A equação de Kienzle, como apresentada tem validade para a operação de torneamento (fig. 3.3). As figuras 3.4 e 3.5 identificam as variáveis do processo que são utilizadas para o cálculo da força de corte também para as operações de fresamento tangencial e de topo [42].

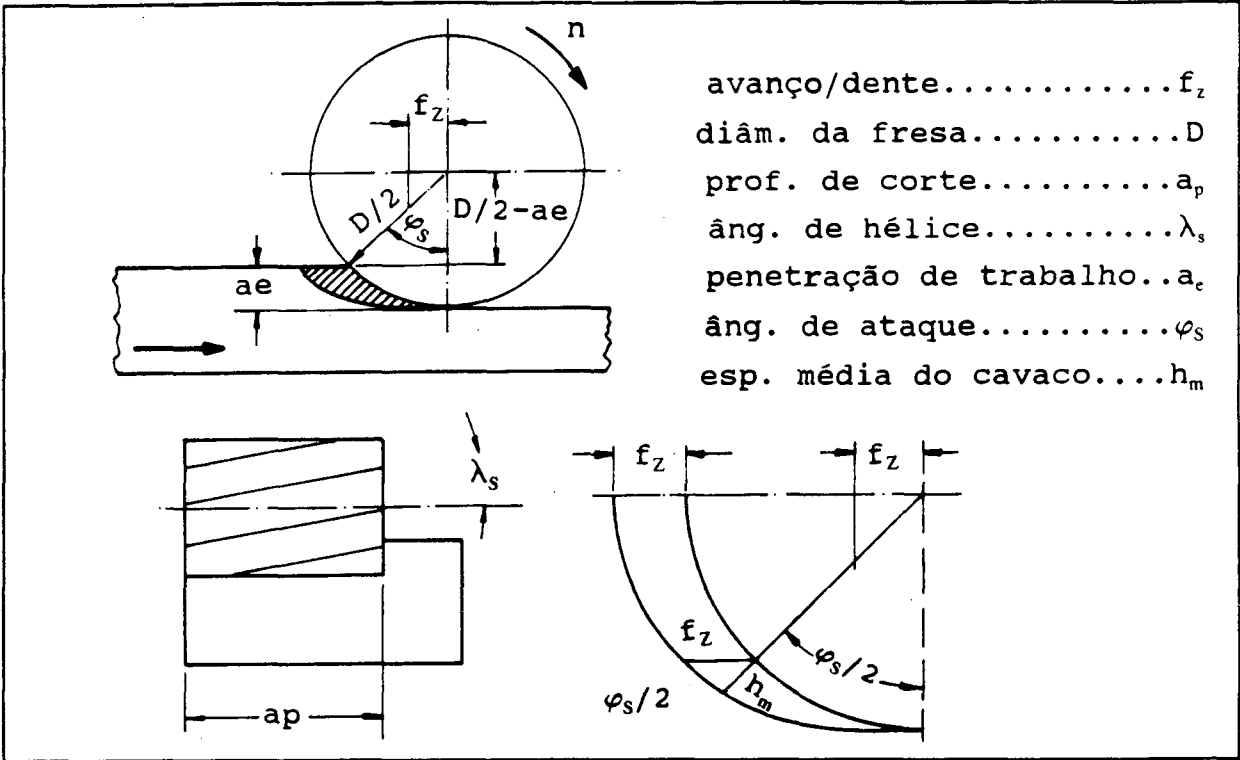


Fig. 3.4 - Variáveis do processo - Fresamento tangencial

Para o caso da operação de fresamento tangencial, a área da seção de usinagem é calculada pela espessura média do cavaco

$$h_m = \frac{360^\circ}{\pi \cdot \varphi_s} \cdot \frac{a_e}{D} \cdot f_z \cdot \text{sen} \chi \quad (3.11)$$

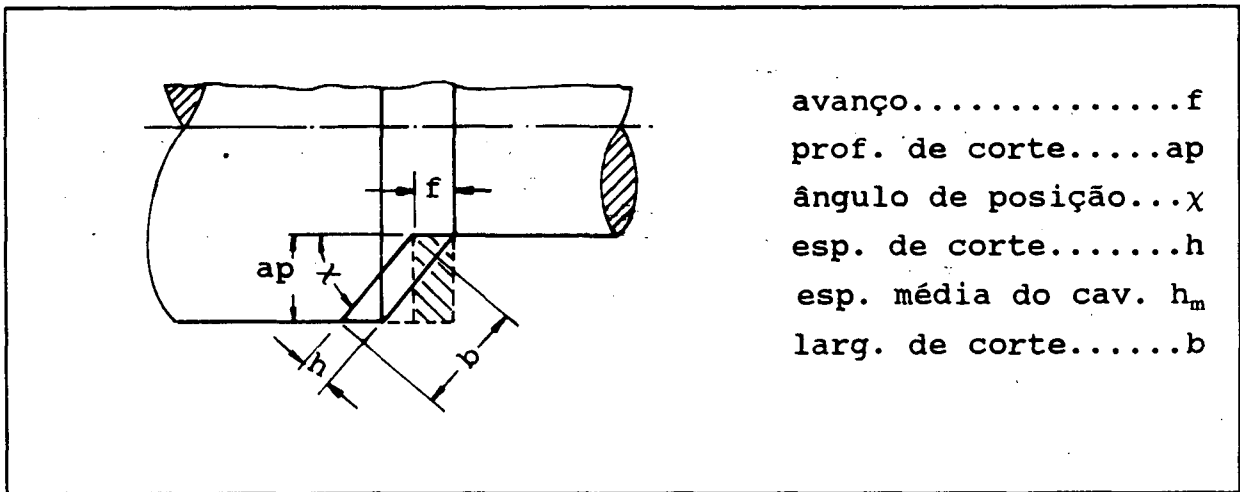


Fig. 3.3 - Variáveis do processo - Torneamento

e pela largura de corte

$$b = \frac{a_p}{\cos \lambda} \quad (3.12)$$

Substituindo (3.11) e (3.12) em (3.8), tem-se a força de corte por gume da ferramenta. A força resultante será a força de corte por gume multiplicada pelo número de gumes efetivamente atuantes ( $Z_E$ ) no corte, que pode ser determinado por:

$$Z_E = \frac{\varphi_s \cdot Z}{360^\circ} \quad (3.13)$$

onde

$\varphi_s$  = ângulo de ataque

$Z$  = número de gumes da fresa

Analogamente, para o fresamento tangencial tem-se:

espessura média do cavaco:

$$h_m = \frac{360^\circ}{\pi \cdot \varphi_s} \cdot f_z \cdot \frac{B}{D} \cdot \text{sen} \chi \quad (3.14)$$

largura de corte:

$$b = \frac{a_p}{\text{sen} \chi} \quad (3.15)$$

### 3.3. Critérios de Otimização das Condições de Corte

O grande número de variáveis envolvidas na usinagem torna complexo o equacionamento da influência das condições de corte como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte sobre as variáveis de estado do processo como vida da ferramenta, forças, forma do cavaco, etc [43].

Equações básicas da economia em usinagem permitem calcular quantitativamente custos e tempos de produção para operações



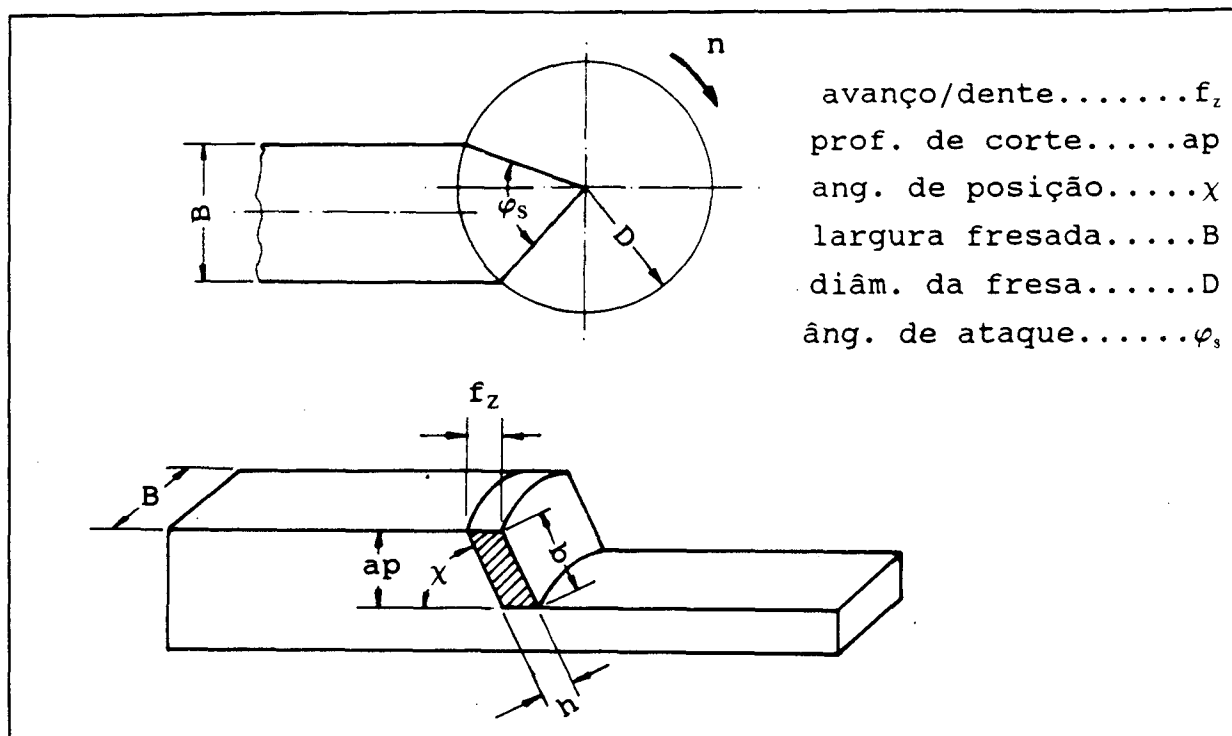


Fig. 3.5 - Variáveis do processo - Fresamento de topo

operações. O custo total de usinagem compreende os custos fixos (custo da matéria-prima, dispositivos, controle de qualidade, etc.), os custos associados com o tempo de utilização da máquina e os custos relativos à ferramenta (para reafiação ou substituição).

Os tempos envolvidos na produção são classificados como tempo principal (durante o qual a ferramenta está efetivamente usinando), tempo de troca de ferramenta e tempo de preparação, que é o tempo necessário para a execução de todos os trabalhos indispensáveis para o início da tarefa. A figura 3.6 mostra a influência da velocidade de corte sobre estes fatores. Assim, a velocidade de corte pode ser otimizada considerando um dos seguintes critérios |44|:

a) velocidade de corte para máxima produção:

$$V_{C_{otm,P}} = \left( - \left( 1 + \frac{1}{G} \right) \cdot \frac{t_c}{C} \right)^{\frac{1}{G}} \quad (3.16)$$

onde

$G$  = expoente da equação de Taylor

$C$  = constante da equação de Taylor

$t_c$  = tempo de troca da ferramenta

ou vida da ferramenta para máxima produção:

$$T_{otm,P} = - \left( 1 + \frac{1}{G} \right) \cdot t_c \quad (3.17)$$

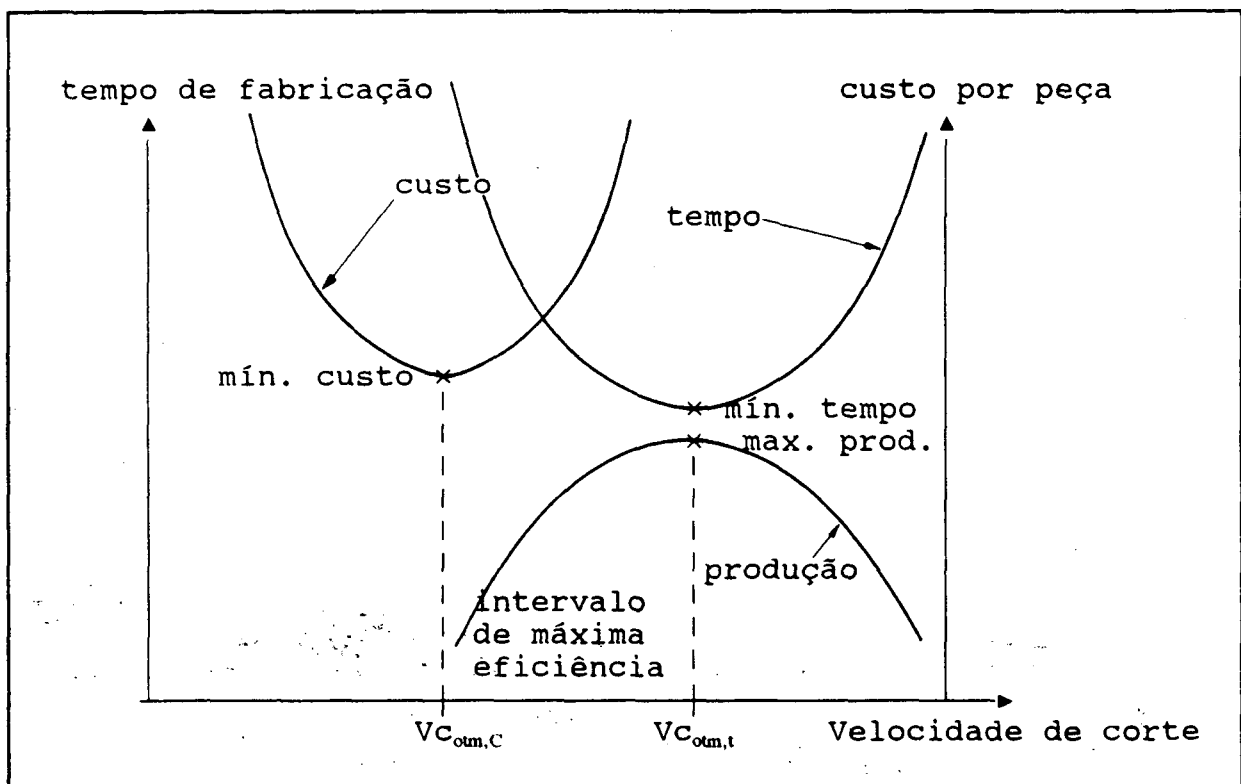


Fig. 3.6 - Influência de  $V_c$  sobre custos e tempos de usinagem.

b) velocidade de corte para mínimo custo:

$$VC_{otm,c} = \left( - \left( 1 + \frac{1}{G} \right) \cdot \frac{\left( t_c + \frac{C_t}{C_m} \right)}{C^{-\frac{1}{G}}} \right)^G \quad (3.18)$$

onde

$C_t$  = custo por gume

$C_m$  = custo de utilização da máquina-ferramenta.

ou vida da ferramenta para mínimo custo:

$$T_{otm,c} = - \left( 1 + \frac{1}{G} \right) \cdot \left( t_c + \frac{C_t}{C_m} \right) \quad (3.19)$$

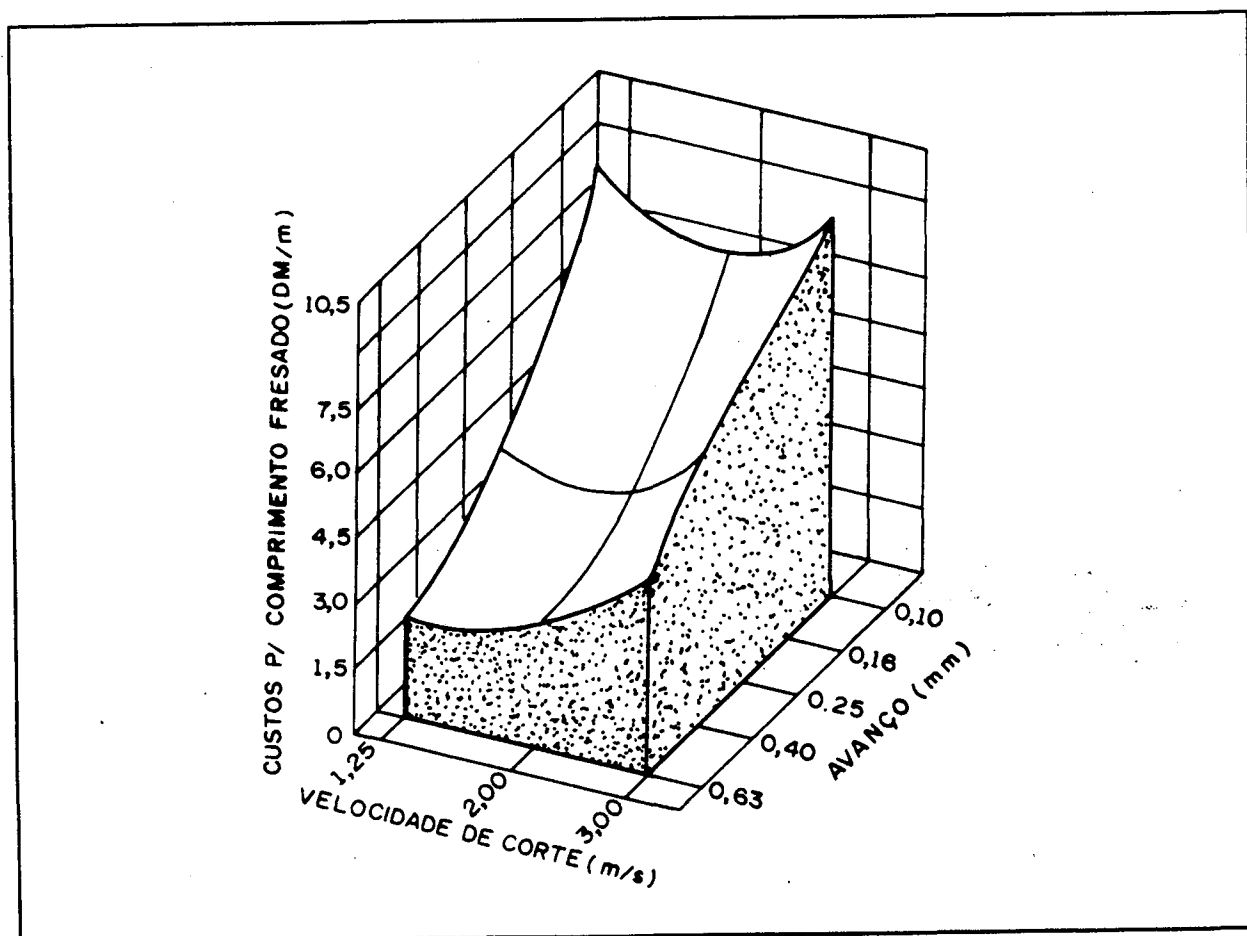


Fig. 3.7 - Influência da variação de  $f$  e  $v$  nos custos de usinagem [45].

O tempo de usinagem utilizado para determinação da taxa de produção e custo de usinagem é calculado como função da vida da ferramenta que é calculada pela fórmula simplificada de Taylor. Isso justifica-se pelo fato que a velocidade de corte é a variável com maior influência sobre a vida da ferramenta. O avanço e a profundidade de corte têm caráter secundário na definição de valores ótimos, pois o ponto ótimo para esses parâmetros tende, na grande maioria dos casos práticos, para os valores máximos possíveis, conforme pode ser observado para o exemplo mostrado em |45| (fig. 3.7), onde os custos de usinagem alcançam valores mínimos para o avanço máximo.

## CAPÍTULO IV

### Identificação de Parâmetros

A correção das informações provenientes de bancos de dados de usinagem, manuais ou tabelas de fabricantes de ferramentas, é necessária para otimizar o processo, uma vez que existem diferenças entre as condições práticas e as de ensaio para alimentação destas fontes.

Utilizando a equação de Taylor como modelo do processo, esta correção pode ser feita através do controle de variáveis de estado do processo como vida ou desgaste da ferramenta, rugosidade superficial obtida, forma do cavaco, força ou potência de corte.

Com a massificação da utilização de sistemas computacionais no auxílio ao planejamento, acompanhamento e análise dos processos de fabricação, torna-se possível calcular e armazenar os coeficientes da equação de Taylor, via estimativa de parâmetros, em função das especificidades encontradas na prática.

Neste capítulo apresenta-se os estimadores de parâmetros utilizados neste trabalho com as respectivas hipóteses assumidas, suas características estatísticas e os estimadores utilizados para avaliação de confiabilidade de resultados obtidos quando dados experimentais são aplicados nos procedimentos de ajuste desenvolvidos. Dois procedimentos de ajuste dos coeficientes da equação de Taylor para serem utilizados diretamente em um sistema produtivo são apresentados: no primeiro, os coeficientes serão obtidos sequencialmente conforme os tempos de vida das ferramentas forem sendo medidos pelos procedimentos convencionais; no segundo, os coeficientes serão obtidos em processos onde haja monitoramento da força de corte, considerando aquisição automatizada dos sinais correspondentes.

#### 4.1. Modelos Usados em Ajustes de Parâmetros

No problema de estimação de parâmetros, a expressão matemática para a função de transferência (TF) do modelo em função dos parâmetros do sistema é suposta conhecida. Os valores das entradas  $e$  e saídas  $Y$  são avaliáveis, e os parâmetros  $\beta$  do modelo são desconhecidos. Caso hajam erros de medição  $\epsilon$  nos dados medidos  $\eta_m$ , uma hipótese comumente utilizada [46] é de que o mesmo é aditivo aos dados  $\eta_r$  do sistema real, como mostrado na figura 4.1. A solução para o problema é obter "a melhor" estimada dos parâmetros desconhecidos, usando alguns valores medidos das excitações e das respostas do sistema.

Para o processo de usinagem, tem-se: a equação de Taylor como expressão matemática da função de transferência TF do modelo; as condições de corte como os valores de entrada  $e$ ; os coeficientes da equação de Taylor como os parâmetros desconhecidos  $\beta$ ;  $\eta_r$  é o tempo de vida ou o desgaste da ferramenta;  $\eta_m$  é o tempo de vida ou desgaste medido para a ferramenta; e  $\epsilon$  é o erro da medição.

O processo de ajuste consiste na construção de uma função objetivo  $r$ , dependente do erro, existente entre os dados do modelo  $\eta$  e os medidos  $\eta_m$ . O ajuste dos parâmetros  $\beta$  do modelo matemático é obtido através da maximização ou minimização da função objetivo  $r$ .

Existem dois modelos de erros utilizados como função objetivo: o modelo de erro na entrada e o modelo de erro na saída.

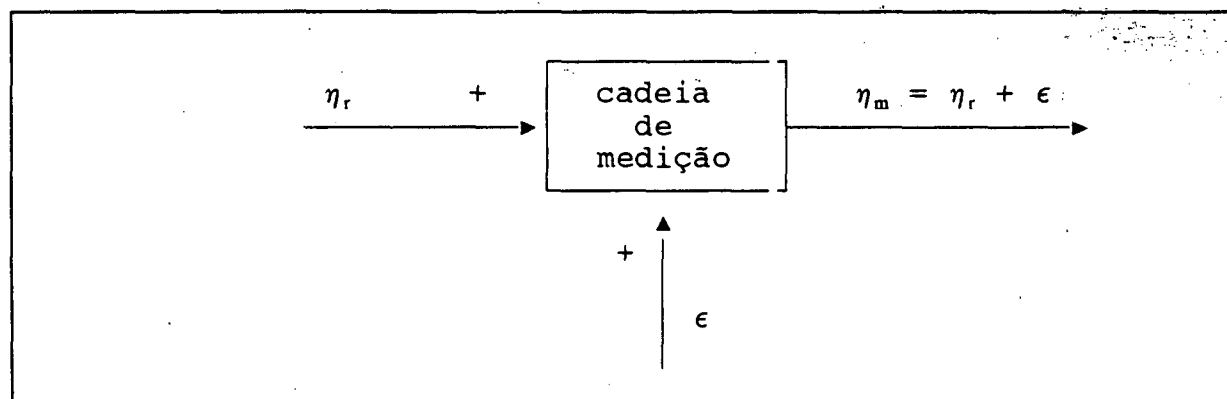


Fig. 4.1 - Hipótese sobre os erros de medição  $\epsilon$ .

O esquema do modelo de erro na entrada está mostrado na figura 4.2, onde pode ser observado que o modelo matemático usado para o ajuste de parâmetros, é dado por:

$$\eta = TF^{-1}(Y, \beta)$$

$$\eta_m = \eta_r + \epsilon \quad (4.1)$$

O modelo de erro na saída (fig. 4.3) usado para o ajuste de parâmetros, é representado matematicamente por:

$$\eta = TF(e, \beta)$$

$$\eta_m = \eta + \epsilon \quad (4.2)$$

Nos casos em que a função de transferência é linear, as equações (4.1) e (4.2) podem ser reescritas nas formas:

$$\eta = X \cdot \beta$$

$$\eta_m = \eta_r + \epsilon \quad (4.3)$$

onde

$X$  = matriz de sensibilidade do modelo.

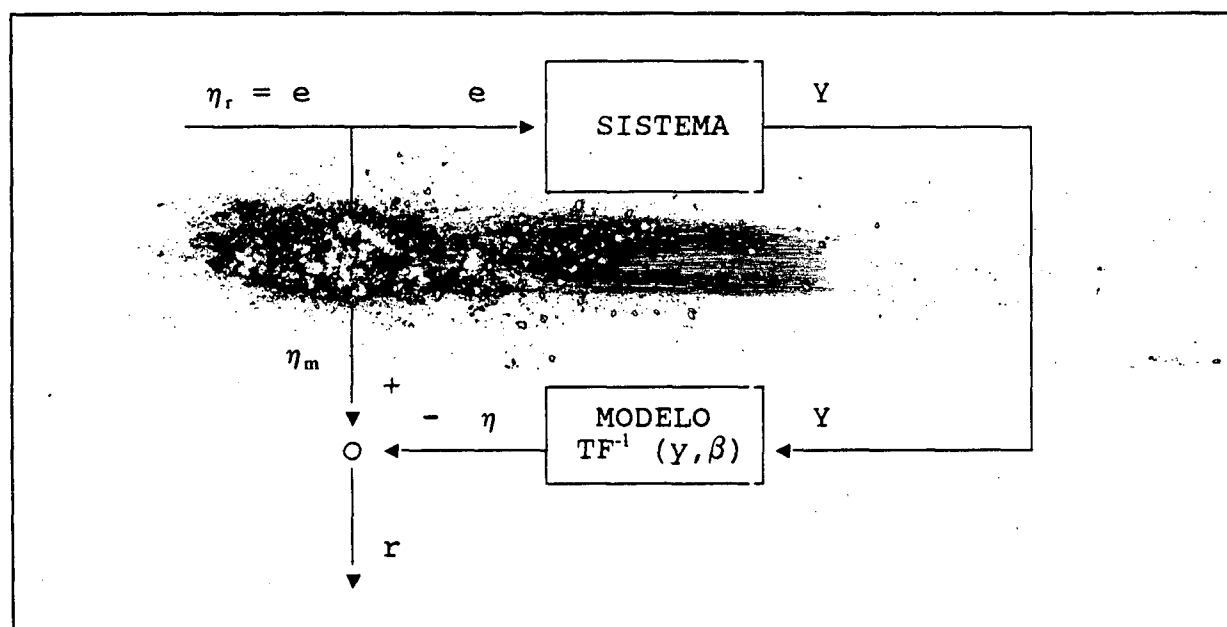


Fig. 4.2 - Modelo de erro na entrada.

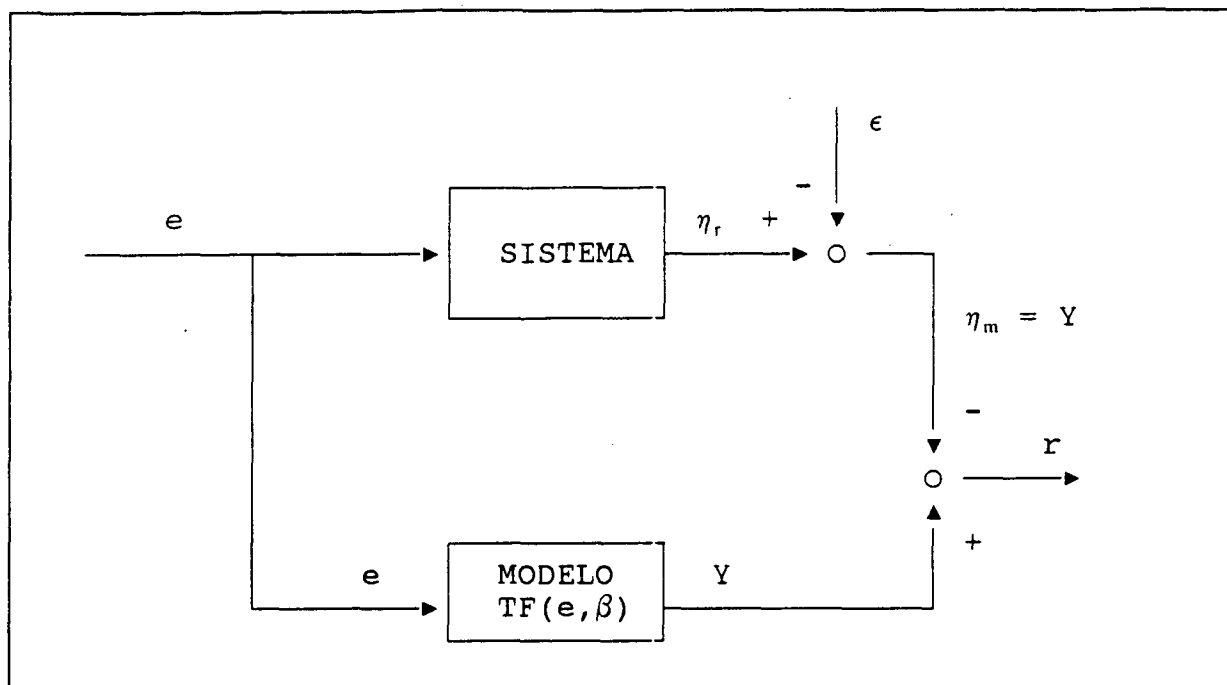


Fig. 4.3 - Modelo de erro na saída ou resposta.

#### 4.2. Estimadores de Parâmetros

Os principais estimadores de parâmetros podem ser desenvolvidos a partir do teorema de Bayes [47], que é definido pela seguinte expressão:

$$P(\beta|\eta_m) = \frac{P(\eta_m|\beta) \cdot P(\beta)}{P(\eta_m)} \quad (4.4)$$

onde

$P(\ )$  = probabilidade

$P(\ | \ )$  = probabilidade condicional

$\beta$  e  $\eta_m$  = variáveis aleatórias.

Tem-se por objetivo maximizar  $P(\beta|\eta_m)$ . Os estimadores ditos Bayesianos utilizam as seguintes informações e hipóteses a priori, com relação às variáveis  $\beta$  e  $\eta_m$ :

-  $\beta$  tem distribuição Normal  $N(\beta_0, V)$ , sendo  $\beta_0$  a esperança matemática  $E[\beta]$  e  $V$  a matriz de covariância  $Cov[\beta]$ .

-  $\epsilon$  é um ruído com distribuição Normal de média zero e covariância  $\psi$ .



- $\beta$  e  $\epsilon$  são estatisticamente independentes.
- Não existe erro na matriz de sensibilidade X.

Com estas hipóteses, a variável aleatória  $\eta_m$  tem distribuição Normal.

O estimador de Máximo a Posteriori (MAP) direto baseia-se na maximização da equação (4.4), que é equivalente à minimização do logaritmo desta equação, resultando em uma função objetivo dada por:

$$r = (\eta_m - \eta) \psi^{-1} (\eta_m - \eta) + (\beta_0 - \beta) V^{-1} (\beta_0 - \beta) \quad (4.5)$$

onde

$\psi$  = matriz de covariância dos erros de medição

$\beta_0$  = valores iniciais dos parâmetros

V = matriz de covariância das medições

O estimador MAP é polarizado com  $E[b_{MAP}] = \beta_0$ , ou seja, o estimador não converge para os valores exatos dos parâmetros com o aumento do número de dados, mas sim para os valores de  $\beta_0$ . Portanto a sua utilização é limitada aos casos em que se conhece com um razoável grau de precisão os valores esperados para os parâmetros do modelo, bem como o valor da matriz de covariância dos mesmos. Por exemplo, utilizando-se o conhecimento de que o valor do módulo de Young do aço está nas proximidades de 21000 kgf/cm<sup>2</sup> e assumindo este valor como esperado ( $\beta_0 = 21000$  kgf/cm<sup>2</sup>), associado a um pequeno valor para sua covariância, o módulo de Young poderá ser ajustado, em uma determinada aplicação, com um elevado grau de precisão, mesmo nos casos em que os dados medidos estejam contaminados por um alto nível de ruído.

Normalmente, nas aplicações de engenharia, tem-se pouco conhecimento a posteriori em relação aos parâmetros, ou seja, os valores de  $\beta_0$  e  $Cov[\beta_0]$ . Nestes casos, o que se faz na prática, é atribuir valores elevados ( $> 10^{10}$ ) para os elementos da diagonal da matriz V. Estatisticamente falando, isso significa que não se tem nenhuma confiança nos valores de  $\beta_0$ . Se a hipótese de

distribuição Normal para  $\eta_m$  for correta e conhecida a priori, para valores nulos de  $\text{Cov}^{-1}[\beta_0]$ , a minimização da equação (4.5) resulta no estimador de Markov [46], cuja principal característica é o fato de ser um estimador de mínima variância. Quando não se tem nenhum conhecimento a priori ou a posteriori a respeito dos dados e parâmetros, respectivamente, e assumindo para valores de  $\Psi$  a matriz identidade  $I$ , a minimização da equação (4.5) resulta no estimador de Mínimos Quadrados, que será um estimador de mínima variância quando  $\Psi = \sigma^2 I$ , ou seja, o erro de medição  $\epsilon$  tem covariância constante independente dos valores dos dados medidos.

Resumindo:

#### ESTIMADOR MAP:

Hipótese a posteriori:  $\beta$  tem distribuição Normal  $N(\beta_0, V)$

Hipótese a priori:  $\epsilon$  tem distribuição Normal  $N(\epsilon, \Psi)$

Condição de utilização: nenhuma

Polariização:  $E[b_{\text{MAP}}] = \beta_0$ , ou seja, o estimador é polarizado.

Eficiência: o estimador é de mínima variância, ou seja, máxima eficiência

#### ESTIMADOR DE MARKOV:

Hipótese a posteriori: nenhuma

Hipótese a priori:  $\epsilon$  tem distribuição Normal  $N(\epsilon, \Psi)$

Condição de utilização: o conjunto de dados precisa ser maior do que o número de parâmetros a serem ajustados

Polariização: o estimador é despolarizado.

Eficiência: o estimador é de mínima variância

#### ESTIMADOR DE MÍNIMOS QUADRADOS:

Hipótese a posteriori: nenhuma

Hipótese a priori: nenhuma

Condição de utilização: o conjunto de dados precisa ser maior do que o número de parâmetros a serem ajustados.

Polariazação: o estimador é despolarizado.

Eficiência: o estimador é de mínima variância caso  $\Psi = \sigma^2 I$

Minimizando a equação (4.5), obtem-se a melhor estimada  $b$  para os parâmetros  $\beta$ , através de:

$$b = \beta_0 + PX^{-1}\Psi^{-1}(\eta - X\beta_0) \quad (4.6)$$

onde:

$$P = (X^T\Psi^{-1}X + V^{-1})$$

e  $X^T$  é a transposta da matriz de sensibilidade dos resultados em função dos valores dos parâmetros.

Para o estimador de Markov, a equação (4.6) resulta em:

$$b = PX^{-1}\Psi^{-1}\eta \quad (4.7)$$

onde:

$$P = X^T\Psi^{-1}X$$

Para o estimador de Mínimos Quadrados, a minimização da equação (4.6) resulta na equação da norma mínima, ou seja:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T \eta \quad (4.8)$$

#### 4.2.1. O Estimador MAP Sequencial

Como pôde ser observado, entre as principais vantagens, o estimador MAP não tem nenhuma restrição quanto às condições de utilização, ou seja, o mesmo pode ser utilizado a partir do primeiro conjunto de dados adquirido. Como o objetivo deste trabalho é desenvolver um estimador que possa ser utilizado

diretamente na indústria, optou-se pela utilização da versão sequencial do MAP, por permitir que os coeficientes da equação de Taylor possam ser ajustados conforme os dados vão sendo adquiridos ao longo do tempo.

O MAP sequencial, que na sua versão dinâmica corresponde ao filtro de Kalman Extendido [48], é um filtro onde, para o  $i$ -ésimo conjunto de dados, se faz na equação (4.6):  $b \rightarrow b_{i+1}$ ;  $Y \rightarrow Y_{i+1}$ ;  $P \rightarrow P_{i+1}$ ;  $V \rightarrow P_i$ ;  $X \rightarrow X_{i+1}$ ; e  $\Psi \rightarrow \psi_{i+1}$ . Neste caso, os valores estimados para os parâmetros são assim atualizados:

$$b_{i+1} = b_i + P_{i+1} X_{i+1}^T \Psi_{i+1}^{-1} (Y_{i+1} - X_{i+1} b_i) \quad (4.9)$$

e

$$P_{i+1} = [X_{i+1}^T \Psi_{i+1}^{-1} X_{i+1} + P_i^{-1}]^{-1} \quad (4.10)$$

A hipótese adicional, quanto a utilização do MAP sequencial, é de que os erros de medição não sejam correlacionados no tempo.

Uma vez que na estimativa dos coeficientes da equação de Taylor é utilizado um único conjunto de dados em cada atualização do filtro, resulta em uma matriz de sensibilidade  $X$  composta por uma única linha. Nestes casos, pode-se utilizar um lema de inversão de matrizes [49] para a minimização do custo computacional para obtenção da matriz  $P$ , também conhecida por matriz de ganho do filtro. Aplicando-se o lema de inversão de matriz na equação (4.10) obtém-se:

$$P_{i+1} = P_i - \frac{(P_i X_{i+1}) (X_{i+1}^T P_i) / \sigma^2}{1 + \frac{X_{i+1}^T P_i X_{i+1}}{\sigma^2}} \quad (4.11)$$

onde

$\sigma^2$  = variância da  $i$ -ésima mais uma medição.

A matriz  $P$  está relacionada com a confiabilidade com que os parâmetros são estimados. Seja  $v_{ii}$  o  $i$ -ésimo valor da diagonal de  $P$ , demonstra-se [46] que a distribuição apresentada pela relação

(4.12) tem uma distribuição t de Student.

$$\frac{(b_i - \beta_i)}{v_{ii}} \quad (4.12)$$

Este teorema permite determinar o intervalo de confiabilidade para os parâmetros ajustados. Para um intervalo de 100% de confiabilidade  $(1 - \alpha)$ , os limites inferiores e superiores para o valor do parâmetro  $b_i$  são calculados pela equação (4.13), onde  $n$  é o número de conjuntos de dados distintos e  $p$  o número de parâmetros estimados.

$$b_i - \Delta b_i < B_i < b_i + \Delta b_i \quad (4.13)$$

onde:

$$\Delta b_i = s v_{ii} t(1 - \frac{\alpha}{2}, n-p) \quad (4.14)$$

Nesta equação, o valor de  $s$  é função da confiabilidade com que os valores da matriz de covariância dos erros de medição,  $\Psi$ , foram estimados. Nos casos em que os valores de  $\Psi$  são estimados com grande confiabilidade (grande volume de medições de ensaios repetidos), o valor de  $s$  tende a um. Quando a confiabilidade das medições é baixa, uma hipótese comumente utilizada é a de que apesar de não se conhecer os valores exatos de  $\Psi$ , a matriz  $W$  com os valores estimados para os erros de medição são, a menos de um produto por uma constante, representativos dos valores reais de  $\Psi$ , ou seja:

$$\Psi = s^2 W \quad (4.15)$$

Por exemplo, quando se utiliza o estimador de mínimos quadrados comum, uma hipótese normalmente assumida é a de que todas as medições são obtidas com a mesma incerteza. Neste caso, a matriz  $W$  é igual a matriz identidade.

Conhecendo-se a matriz  $W$ , a melhor estimada de  $s^2$  é

calculada por |46|:

$$s^2 = \frac{(Y - Xb)^T W^{-1} (Y - Xb)}{n-p} \quad (4.16)$$

#### 4.2.2. O Estimador de Variáveis Instrumentais

Os estimadores baseados na minimização do funcional dado pela equação (4.5) são, normalmente, utilizados tanto para o modelo de erro na saída, quanto para o modelo de erro na entrada. Portanto, deve-se observar que estes estimadores são polarizados quando da existência de erros nos parâmetros de corte, pois o erro ficará embutido na matriz de sensibilidade  $X$  |50|.

Esta polarização pode ser facilmente observada quando utilizado o estimador de mínimos quadrados. Substituindo a equação (4.3) na função de erro (Equação 4.5), resulta para o estimador de Mínimos Quadrados:

$$r = [Y - (X + \epsilon)b]^T [Y - (X + \epsilon)b] \quad (4.17)$$

Utilizando a equação (4.8), obtem-se:

$$b = [X^T X + X^T \epsilon + \epsilon^T X + \epsilon^T \epsilon]^{-1} [X^T Y + \epsilon^T Y] \quad (4.18)$$

Pode-se observar nesta equação que na média ( $n \rightarrow \infty$ ), com as hipóteses de erros com média zero e não correlacionados no tempo, o segundo e terceiro produtos do lado direito tendem a zero, o que nunca ocorre para o somatório de quadrados ( $\epsilon^T \epsilon$ ), o que polariza o estimador.

Quando da existência de erros na matriz de sensibilidade  $X$  pode-se utilizar o estimador de Variáveis Instrumentais, uma vez que este estimador é despolarizado com relação a erros nos dados de entrada |51|.

O estimador das Variáveis Instrumentais é um procedimento recursivo, que pode ser esquematizado como segue:

1ª) Obtem-se, via mínimos quadrados comum, uma primeira

estimativa  $b_i$  para os valores dos parâmetros, utilizando os valores medidos  $Y$  e  $X^m$ .

2º) Com os valores de  $b_i$ , calcula-se os valores teóricos  $X_i$  do modelo.

3º) Calcula-se novos valores de  $b$  utilizando a equação (4.19) até a convergência do procedimento.

$$b_{i+1} = (X_i^T X^m)^{-1} (X_i^T Y) \quad (4.19)$$

Utilizando a equação (4.19), com um erro aditivo em  $X$ , a equação (4.18) pode ser reescrita como:

$$b_i = [X_i^T X^m + X_i^T \epsilon]^{-1} [X_i^T Y] \quad (4.20)$$

onde o segundo produto do lado direito da equação tende a zero quando o número de ensaios tende a infinito, significando que o estimador é despolarizado e portanto convergindo para os valores verdadeiros  $\beta$ , com o aumento do número de ensaios.

### 4.3. Ajuste dos Coeficientes da Equação de Taylor

Para a utilização dos procedimentos de ajuste de parâmetros, descritos neste capítulo, na determinação dos coeficientes da equação de Taylor, é necessário, primeiramente, linearizar o problema. A linearização é conseguida aplicando-se a função logarítmica em ambos os lados da equação (3.2), resultando na equação (4.21).

$$\log Vc = \log C + E \log f + F \log ap + G \log T + H \log V_B \quad (4.21)$$

Utilizando como critério de fim de vida um valor constante para a marca de desgaste  $V_B$ , pode-se colocar a equação (4.21) em

função de T, resultando:

$$\log T = -\frac{1}{G} \log C' + \frac{1}{G} \log Vc - \frac{E}{G} \log f + \frac{F}{G} \log ap \quad (4.22)$$

onde:

$$C' = C V_B^H$$

De posse da equação (4.22) e de resultados experimentais, é possível calcular os coeficientes de Taylor (C', E, F e G).

Se no lugar do critério de fim de vida, utilizar o monitoramento de  $V_B$  em função do tempo, a equação (4.21) pode ser colocada em função de  $V_B$  resultando na equação (4.23). Neste caso, os erros de medição se concentram nos valores de T e  $V_B$ . Como entre os parâmetros medidos, o que apresenta menor confiabilidade é o critério de fim de vida  $V_B$ , a menos que se utilize o estimador de Variáveis Instrumentais, pode-se considerar que o erro esteja concentrado na medição desta variável, assumindo ainda a hipótese de que as outras variáveis do processo são isentas de erros.

$$\log V_B = \frac{1}{H} \cdot (-\log C + \log Vc - E \log f - F \log ap - G \log T) \quad (4.23)$$

Pode-se rearranjar a equação (4.22) de tal maneira que, na forma matricial, a mesma pode ser expressa por:

$$Y = Xb \Rightarrow \log T = [1 \log Vc \log f \log ap] \begin{bmatrix} C^* \\ G^* \\ E^* \\ F^* \end{bmatrix} \quad (4.24)$$



onde:

$$C^* = \frac{\log C}{G}$$

$$G^* = \frac{1}{G}$$

$$E^* = \frac{E}{G}$$

$$F^* = \frac{F}{G} \quad (4.25)$$

Para o ajuste dos coeficientes da equação de Taylor, utiliza-se o estimador MAP sequencial apresentado na seção (4.2.1) tendo-se como função de transferência TF do modelo a equação (4.24).

#### 4.3.1. Escolha dos Valores Iniciais para os Parâmetros $b$ e $V$

Caso não se tenha nenhum conhecimento a priori a respeito dos coeficientes da equação de Taylor para um determinado processo, os valores iniciais para o vetor  $b_0$  utilizado no MAP sequencial podem ser nulos. Porém, a inicialização do filtro com zeros implica na necessidade de um maior número de ensaios até a convergência do procedimento para valores confiáveis de  $b$ , ou seja, não se aproveita a característica de que o estimador MAP é um estimador de mínima variância (máxima eficiência). Por isto deve-se inicializar o filtro com os valores esperados para os coeficientes, desde de que os mesmos estejam disponíveis.

Nos casos em que existem dados na literatura que sejam orientativos para as condições iniciais de corte, a matriz inversa da covariância dos parâmetros ( $P_1 = V^{-1}$ ) deverá ser inicializada com zeros fora da diagonal principal e valores que reflitam a confiança que se tem nestes valores (estimativa para  $b_0$ ). O valor do  $i$ -ésimo elemento da diagonal de  $V^{-1}$  deverá ser a confiança que se tem no  $i$ -ésimo parâmetro  $b_i$ . É importante

estabelecer com cautela os valores que representam a confiança nos parâmetros esperados |52|, uma vez que o estimador MAP é polarizado. Portanto, é preferível assumir valores altos (próximos a  $10^3$ ) para os elementos da diagonal da matriz  $V^{-1}$  do que correr o risco de o procedimento convergir para valores irrealistas dos coeficientes da equação de Taylor. Para se ter uma idéia da sensibilidade deste estimador com relação aos valores iniciais da matriz de confiabilidade nos valores esperados para os parâmetros, basta ressaltar que quando os valores esperados para os parâmetros são inicializados com o vetor nulo, os elementos da diagonal de  $V^{-1}$  deverão ser da ordem de  $10^{13}$ .

#### 4.3.2. Estimativa da Matriz W de Confiabilidade nas Medições

Ao longo de um procedimento de estimação de parâmetros, um determinado processo poderá ser repetido várias vezes antes que haja qualquer mudança nas variáveis de corte. Nestes casos, quando se utiliza o MAP sequencial, pode-se desde o segundo experimento repetido obter uma estimativa para a covariância dos erros de medição. Sabendo-se que o estimador de covariância tem uma distribuição Qui-quadrado  $\chi^2$ , pode-se estimar o valor superior de  $\sigma^2$ , de  $n$  dados com um intervalo de confiança  $\alpha$ , pela seguinte expressão|53|:

$$\sigma_{\max}^2 \leq \frac{1}{\chi_{(n-1, 1-\frac{\alpha}{2})}^2} \sum (y_i - \bar{y}) \quad (4.26)$$

onde:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y$$

#### 4.3.3. Convergência do Estimador MAP

A medida que novos valores de condições de corte e consequentes resultados obtidos vão sendo realimentados no

procedimento de identificação de parâmetros, a matriz de ganho  $P_{i+1}$  é atualizada pela equação (4.11). Se ao longo do procedimento de ajuste, os valores dos elementos da matriz de ganho tenderem a zero, significa que existe uma boa confiança nos parâmetros ajustados, ou seja, o filtro convergiu e novos experimentos terão pouca ou nenhuma influência posterior no ajuste dos valores dos parâmetros identificados. Portanto, caso haja mudança no processo de fabricação, tendo como consequência uma mudança nos coeficientes da equação de Taylor, a matriz de confiabilidade nos valores estimados precisa ser reinicializada conforme discutido na seção (4.3.1).

#### 4.3.4. Intervalo de Confiabilidade

A qualquer momento, durante o procedimento de filtragem, é possível determinar os valores médios dos coeficientes da equação de Taylor, bastando calcular o valor de  $G$  através da segunda expressão do conjunto de equações (4.25) e utilizando as outras expressões, calcula-se os demais coeficientes. Já o intervalo de confiabilidade dos coeficientes não pode ser calculado de forma direta. Pode-se determinar, via equação (4.13), os limites superiores e inferiores, para um intervalo de confiança  $\alpha$ , para os coeficientes modificados ( $G^*$ ,  $C^*$ ,  $E^*$  e  $F^*$ ). Para o cálculo do intervalo de confiabilidade de  $T$ ,  $G$ ,  $C$ ,  $E$  e  $F$ , utiliza-se uma aproximação [54] de uma função de várias variáveis pelos dois primeiros termos de uma expressão em série de Taylor.

Como exemplo, seja  $Q$  uma variável cuja função de transferência  $TF$  tenha duas variáveis independentes chamadas de  $a$  e  $b$ . Conhecendo-se os intervalos  $\Delta$  de confiança  $\alpha$  para estas variáveis, pode-se escrever:

$$Q + \Delta Q = TF(a + \Delta a, b + \Delta b) \quad (4.28)$$

Expandindo-se esta equação em série de Taylor e retendo os

dois primeiros termos, obtém-se:

$$Q + \Delta Q \approx TF(a, b) + \frac{\partial TF(a, b)}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial TF(a, b)}{\partial b} \Delta b \quad (4.29)$$

Uma vez que  $Q = TF(a, b)$ , tem-se que o intervalo de confiança  $\Delta Q$  para a variável  $Q$  pode ser aproximado pela equação:

$$\Delta Q \approx \frac{\partial TF(a, b)}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial TF(a, b)}{\partial b} \Delta b \quad (4.30)$$

#### 4.4. Equações de Taylor Reduzidas

Em um sistema produtivo, as variáveis de um dado processo de usinagem podem não se alterar com frequência. É comum haver alterações nas velocidades de corte  $V_c$ , quando procura-se determinar o tempo ótimo de vida da ferramenta [55] e poucas ou nenhuma variação no avanço  $f$  e na profundidade de corte  $a_p$ . Porém, a menos que um número significativo de variações nas três condições de usinagem tenha ocorrido, os valores ajustados para os parâmetros das equações (4.21) e (4.22) terão, para um dado intervalo de confiança, uma variação muito grande, ou seja, eles são ajustados com grande incerteza.

Como os procedimentos desenvolvidos neste trabalho têm como objetivo a aplicação industrial, contorna-se o problema de incerteza no cálculo dos coeficientes reduzindo-se o número de termos da equação de Taylor. Isto é feito, para um dado conjunto de dados, da seguinte maneira:

1º) Atualiza-se todos os coeficientes das equações (4.21) e (4.22) em um arquivo de dados principal.

2º) Inclui-se a expressão devido a  $a_p$  no termo da constante  $C$ , resultando em um termo constante  $C_1$ . Atualiza-se os demais parâmetros em um conjunto de arquivos dependentes do valor de  $a_p$ .

3º) Inclui-se a expressão devido a  $f$  no termo constante  $C_2$

resultando para o ajuste em um problema com duas variáveis, tendo um termo ligado a  $C_2$  e um termo ligado a  $V_c$ . Atualiza-se os dois parâmetros em um sub-conjunto de arquivos que dependem dos valores de  $f$  e  $a_p$ , considerados como constantes.

Desta maneira, mesmo que haja variações somente na velocidade de corte  $V_c$ , é possível determinar os coeficientes de uma equação de Taylor reduzida que poderão ser utilizados para fins de otimização do processo de usinagem.

## CAPÍTULO V

### Metodologia Proposta

Desde o surgimento das primeiras máquinas controladas numericamente, procedimentos têm sido propostos para o controle do processo, que podem ser caracterizados sob dois aspectos, envolvendo: algoritmos de otimização ou de restrições. No controle por restrições, limites são impostos em um ou mais parâmetros de usinagem como função de restrições do processo. No primeiro caso, funções representativas do processo são otimizadas segundo diferentes critérios com o objetivo de identificar os seus parâmetros. Neste trabalho foram abordados ambos os aspectos de controle do processo com respectivas considerações para implementação da metodologia proposta em microcomputadores, conforme descrito neste capítulo.

#### 5.1. Considerações Iniciais

Embora a técnica desenvolvida tenha aplicações em processos de usinagem de forma genérica, algumas limitações foram feitas para viabilizar a implementação e análise dessa metodologia em um sistema computacional. As considerações iniciais do sistema são:

a) **Modelo do Processo:** Devido a complexidade e principalmente ao envolvimento de um grande número de variáveis no processo de usinagem, pode-se afirmar que ainda não existe modelo matemático que possa equacionar de forma completa este problema. A utilização da equação de Taylor como modelo do processo tem como justificativa a sua ampla aceitação tanto em atividades de pesquisas como também no meio industrial.

b) **Definição do cenário:** A princípio, a metodologia proposta pode ser empregada a qualquer processos de fabricação por usinagem,

cujo comportamento possa ser representado pela equação de Taylor. Porém, para efeito de demonstração de sua aplicabilidade, serão considerados apenas os processos de torneamento e fresamento com geometrias simples de corte.

c) Cálculo da força de corte: Equação de Kienzle. Além de representar satisfatoriamente a influência dos parâmetros de corte na força de usinagem e ser de boa aceitação prática, os parâmetros da equação de Kienzle ( $K_{cl.1}$  e  $1-m_c$ ) são encontrados na bibliografia.

## 5.2 Restrições

As restrições apresentadas neste capítulo são referentes a limitações impostas pelo processo de fabricação.

### 5.2.1. Restrição de Força no Desbaste

Para consideração da restrição de força na operação de desbaste, define-se no sistema a variável  $F_{c_{adm}}$  que corresponde à força de corte máxima admissível para essa operação. Essa variável assume o menor valor entre aqueles deduzidos por um dos seguintes critérios:

- potência do motor da máquina.
- tensão máxima admissível na ferramenta.
- torque admissível.
- máxima deformação admissível na peça.
- rigidez do dispositivo de fixação.
- rigidez da máquina-ferramenta.

Como função da potência disponível na máquina-ferramenta, a limitação da força só pode ser considerada após a determinação das condições de usinagem ou, mais especificamente, da velocidade de corte. Assim,

$$N_c \leq N \cdot \eta \quad (5.1)$$

ou

$$FC \cdot Vc \leq N \cdot \eta \quad (5.2)$$

onde

$N$  = Potência disponível do motor da máquina

$N_c$  = Potência de corte

$Vc$  = Velocidade de corte

$\eta$  = rendimento da máquina

Na sequência de determinação dos parâmetros de corte imposta pelo sistema, a velocidade de corte é o último a ser calculado. Portanto, como o seu valor ainda é desconhecido, a força de corte admissível é determinada levando em consideração os limites de sua faixa de variação ( $Vc_{max} - Vc_{min}$ ). Assim, o máximo nível de força que se poderia ter para força admissível seria a situação em que a velocidade de corte fosse a mínima possível. Dessa forma resulta:

$$FC_{adm.P} = \frac{N \cdot \eta}{Vc_{min}} \quad (5.3)$$

onde

$Vc_{min}$  = velocidade de corte mínima admissível

No caso em que a força admissível, entre outras possibilidades, for especificada pela potência disponível na máquina e a velocidade de corte for maior que a mínima, a limitação dos parâmetros de corte será considerada no procedimento de restrição de potência (item 5.2.5).

Para a velocidade mínima de corte, por sua vez, existem duas maneiras de determinação: pela especificação de velocidade mínima para a ferramenta ( $Vc_{min.ft}$ ); ou como função da rotação mínima disponível na máquina-ferramenta.



$$VC_{\min} = \text{maior} \left( VC_{\min.ft}; \frac{\pi \cdot D \cdot n_{\min}}{1000} \right) \quad (5.4)$$

onde

D = diâmetro da peça e/ou ferramenta

$n_{\min}$  = rotação mínima disponível

Outra forma de se estabelecer a força máxima para o corte é através da tensão máxima admissível na ferramenta, ou seja:

$$FC_{adm.ft} = \sigma_{adm.ft} \cdot A = \sigma_{adm.ft} \cdot ap \cdot f \quad (5.5)$$

onde

$\sigma_{adm.ft}$  = tensão admissível na ferramenta

A = ap.f = área de corte

Como avanço e profundidade de corte são também neste caso ainda desconhecidos, o valor aceitável como limite superior para a força de corte com relação à tensão máxima na ferramenta é aquele em que as condições ap e f são máximas:

$$A = ap_{\max} \cdot f_{\max} \quad (5.6)$$

O avanço máximo pode ser definido por valor estipulado pelo operador (configuração do sistema - capítulo 6 - Características do *Software*) ou também estar contido no arquivo de ferramentas (também descrito no capítulo 6). Assim, tem-se:

$$f_{\max} = \text{menor} (f_{\max.su}; f_{\max.ft}) \quad (5.7)$$

onde

$f_{\max.su}$  = avanço máximo definido pelo operador

$f_{\max.ft}$  = avanço máximo definido no arquivo de dados recomendados

Analogamente pode-se deduzir a profundidade de corte máxima. Porém, quando este dado é fornecido pelo fabricante da ferramenta, a informação é armazenada no arquivo de ferramenta, ou seja:

$$ap_{\max} = \text{menor} (ap_{\max.su}; ap_{\max.ft}) \quad (5.8)$$

onde

$ap_{\max.su}$  = profundidade de corte máxima definida pelo operador

$ap_{\max.ft}$  = profundidade de corte máxima definida no arquivo de ferramenta.

Considerando o torque admissível, a força máxima de corte será dada por:

$$FC_{adm.T} = \frac{\tau_{adm}}{\frac{D}{2}} \quad (5.9)$$

onde

$\tau_{adm}$  = torque admissível

D = diâmetro da peça e/ou ferramenta.

A força máxima relacionadas com outros critérios não são diretamente calculadas pelo sistema, mas se para algum caso for conhecida, pode ser nele introduzida diretamente pelo usuário através da variável  $FC_{adm.su}$  (capítulo 6). Portanto, a força máxima admissível para a operação de desbaste assumirá o menor valor dentre os considerados, ou seja:

$$FC_{adm} = \text{menor} (FC_{adm.p}; FC_{adm.ft}; FC_{adm.T}; FC_{adm.su}) \quad (5.10)$$

A análise feita a seguir [56] tem como objetivo deduzir valores ótimos para os parâmetros de corte envolvidos na equação de Kienzle, que são a profundidade de corte e o avanço, considerando a força admissível proveniente da comparação acima.

Assumindo que a profundidade de corte pode ser expressa como função do número de passes necessários para realizar uma operação de desbaste (fig. 5.1), pode-se escrever:

$$ap = \frac{ap_{total}}{I} \quad (5.11)$$

onde

$ap$  = profundidade de corte

$ap_{total}$  = comprimento a usinar medido na direção da profundidade de corte

$I$  = número de passes.

ou

$$b = \frac{ap_{total}}{I \cdot \text{sen}\chi} \quad (5.12)$$

onde

$b$  = largura de corte

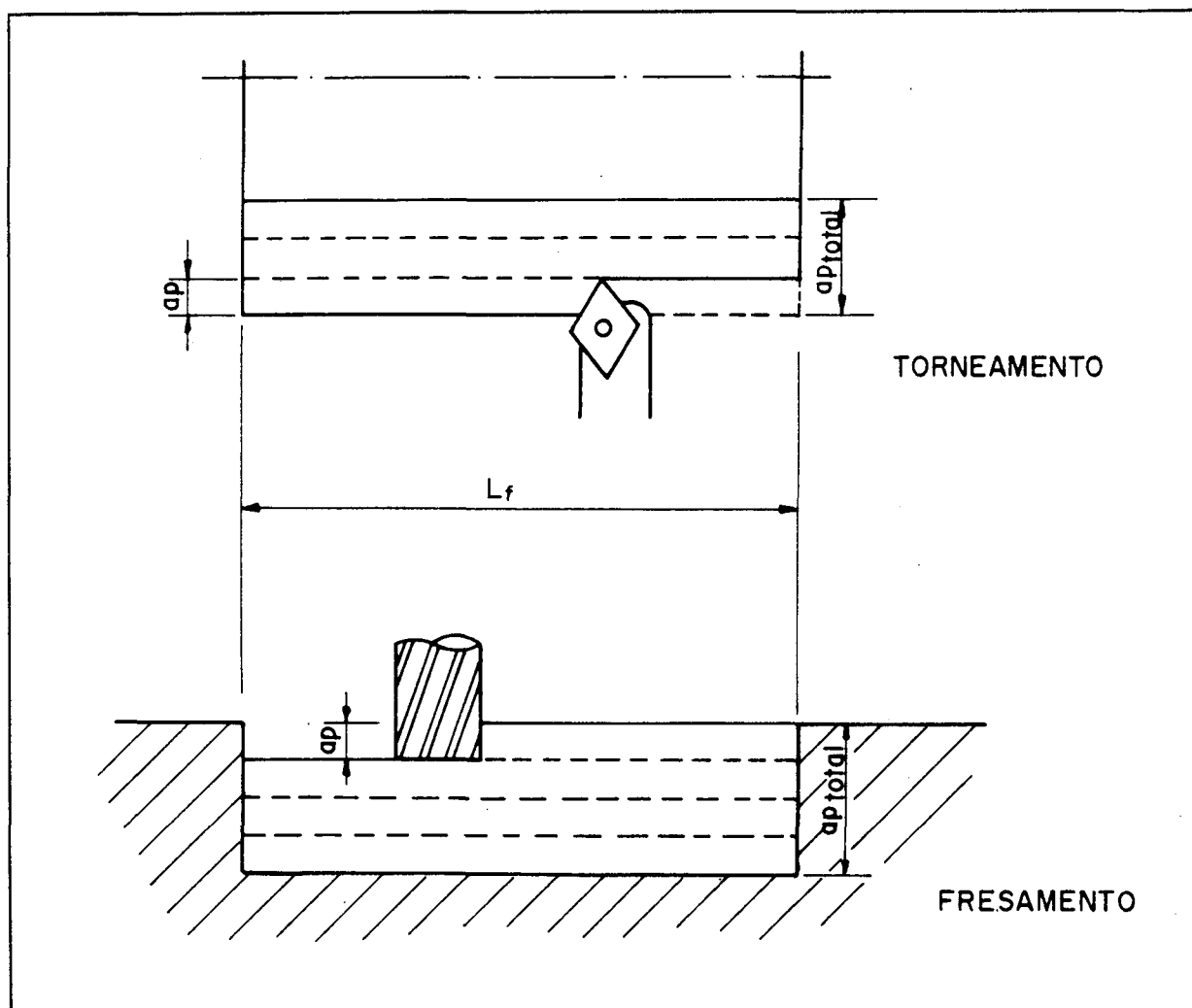


Fig. 5.1 - Operação de desbaste

$\chi$  = ângulo de posição

Substituindo a força de corte pela máxima admissível na equação de Kienzle, a espessura de corte pode ser expressa por:

$$h = \left( \frac{FC_{adm} \cdot I \cdot \text{sen} \chi}{k_{c1.1} \cdot aP_{total}} \right)^{\frac{1}{1-m_c}} \quad (5.13)$$

Como a constante da equação de Kienzle  $m_c$  assume valores entre 0 e 1, pode-se dizer que

$$\frac{1}{1-m_c} > 1 \quad (5.14)$$

Isso garante a forma exponencial da função  $h=f(I)$ , como apresentada na figura 5.2. Embora esta função esteja representada por uma linha contínua no gráfico  $h \times I$  desta figura, combinações reais de condições de corte (avanço e profundidade de corte) só podem ser representados por pontos discretos neste diagrama, visto que o número de passes  $I$  assume somente valores inteiros. Considerando os pontos  $P_1$  e  $P_2$ , como exemplificado na mesma figura, e chamando de  $(f_1; ap_1)$  e  $(f_2; ap_2)$  as combinações de

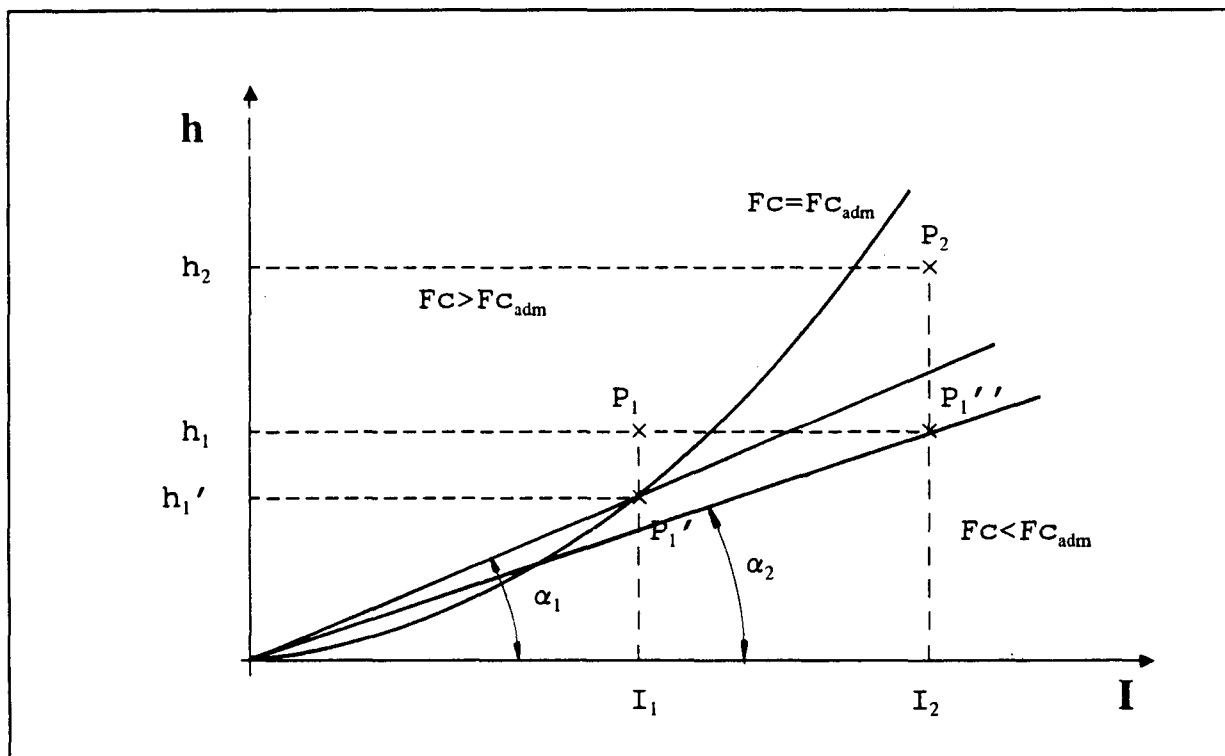


Fig. 5.2 - Curva  $h=f(I, FC=FC_{adm})$  no diagrama  $h \times I$

condições de corte para avanço e profundidade de corte que eles representam, respectivamente, pode-se afirmar que:

$$f_2 > f_1, \text{ pois } h_2 > h_1$$

e

$$ap_2 < ap_1, \text{ pois } I_2 > I_1$$

A posição destes pontos em relação à curva da equação (5.13) indica que a força de corte correspondente às condições que determinam  $P_1$  é maior que para as de  $P_2$ . Além disso, ao contrário de  $P_2$ ,  $P_1$  representa uma situação em que a força de corte é maior que a admissível ( $F_c > F_{c_{adm}}$ ), a exemplo do que ocorre para qualquer ponto situado na região do gráfico acima da curva  $h=f(I)$ .

Partindo-se da hipótese de que as condições de corte originais (antes da consideração da restrição de força) são representadas por  $P_1$ , a redução da força de corte para níveis aceitáveis é feita segundo uma das alternativas:

a) redução do avanço:

Reduzir o avanço significa reduzir a espessura de corte até o valor  $h_1'$  em que a força de corte seja igual a força admissível (a nova situação é representada pelo ponto  $P_1'$  ( $h_1'; I_1$ ) na figura 5.2 que está sobre a curva da força de corte admissível).

b) redução da profundidade de corte:

Reduzir a profundidade de corte implica em aumentar o número de passes, pois a profundidade total de corte  $ap_{total}$  é constante. Isso significa atingir o ponto  $P_1''$  ( $h_1; I_2$ ) resultando assim numa força de corte menor que a força admissível (este ponto está abaixo da curva).

O critério de decisão, adotado para selecionar a melhor situação entre as duas opções apresentadas, é o tempo principal de usinagem, que deverá ser o menor possível e é dado pela seguinte fórmula:

onde

$t$  = tempo principal de usinagem

$$t = \frac{L_f \cdot I}{f \cdot n} = \frac{L_f \cdot I \cdot \text{sen}\chi}{h \cdot n} \quad (5.15)$$

$L_f$  = percurso de avanço

$I$  = número de passes

$f$  = avanço

$n$  = rotação

$h$  = espessura de corte

Colocando-se a espessura de corte como função do número de passes, com excessão de  $I$  e  $t$ , todos os outros parâmetros são constantes nesta expressão e pode-se portanto escrever:

$$h = \frac{Cte}{t} \cdot I \quad (5.16)$$

onde

$Cte$  = constante

Para o torneamento, quando a velocidade de corte deve permanecer constante, a velocidade de rotação é diferente para cada passe. Porém, para a operação completa de desbaste ela pode ser considerada constante e dependerá apenas da diferença entre os diâmetros máximos e mínimos a serem usinados.

A equação (5.16) é uma reta no diagrama  $h \times I$  com coeficiente angular inversamente proporcional ao tempo de usinagem  $t$ . Isso significa que traçando-se uma reta passando pela origem e por qualquer ponto que represente as condições de corte possíveis para uma determinada geometria da peça, a inclinação desta reta fornece uma indicação do tempo total de usinagem. Quanto maior a inclinação, menor este tempo.

Para o exemplo da figura 5.2, as retas que passam pela origem do sistema de coordenadas e que interceptam os pontos que representam as possibilidades de redução da força pela redução do avanço ou da profundidade de corte têm as inclinações  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , respectivamente. Como  $\alpha_1 > \alpha_2$ , pelo raciocínio exposto anteriormente conclui-se que o menor tempo total de usinagem ocorre quando a redução é feita no avanço (ponto  $P_1'$ ).

A figura 5.3 mostra a situação inversa, ou seja, neste caso

a redução da profundidade de corte com conseqüente aumento do número de passes (ponto  $P_1''$ ) propicia uma diminuição menor do tempo total de usinagem se comparado com a possibilidade de redução do avanço ( $P_1'$ ). Conclui-se esta afirmação da observação de que  $\alpha_1 < \alpha_2$ .

As duas possibilidades mostradas para redução da força de corte são exclusivas quando o aumento necessário no número de passes para resultar numa força de corte menor que a admissível corresponde a um incremento unitário, ou seja, aumentando-se o número de passes de uma unidade é suficiente para alcançar um ponto à direita da curva  $h=f(I)$  que representa  $F_c = F_{c_{adm}}$ . Na figura 5.4 apresenta-se um exemplo em que esta condição não é satisfeita e neste caso observa-se que a situação ótima ocorre para o ponto  $P_1''(I_2; h_1'')$ , onde a redução de ambos os parâmetros é observada.

Generalizando, a identificação da melhor situação pode ser feita através da observação do ponto de abscissa  $I^*$ , que é a intersecção entre a função definida em (5.13) e a reta que passa pela origem do sistema de coordenadas e intercepta o ponto definido pelo primeiro valor inteiro de  $I$  na região  $F < F_{adm}$  de coordenada  $h_1$  (ponto  $P^*$  da figura 5.5). Igualando estas duas equações, a abscissa do ponto de intersecção é dado por:

$$I^* = \left( \left( \frac{K_{cl.1} \cdot a p_{total}}{F_{c_{adm}} \cdot \text{sen} \chi} \right) \cdot \left( \frac{h}{I_2} \right)^{(1-m_c)} \right)^{\frac{1}{m_c}} \quad (5.17)$$

A posição de  $I^*$  indica a melhor alternativa para restringir os parâmetros de corte da seguinte maneira:

a) se:  $I^* < I_1 < I_2$

então: reduz-se o avanço (fig. 5.5-a).

Neste caso, o avanço será recalculado pela equação (5.13), com  $I=I_1$ .

ou

b) se:  $I_1 < I^* < I_2$

então: reduz-se a profundidade de corte (fig.5.5-b).

Neste caso, a profundidade de corte será recalculada pela equação (5.11) com  $I=I_2$ .

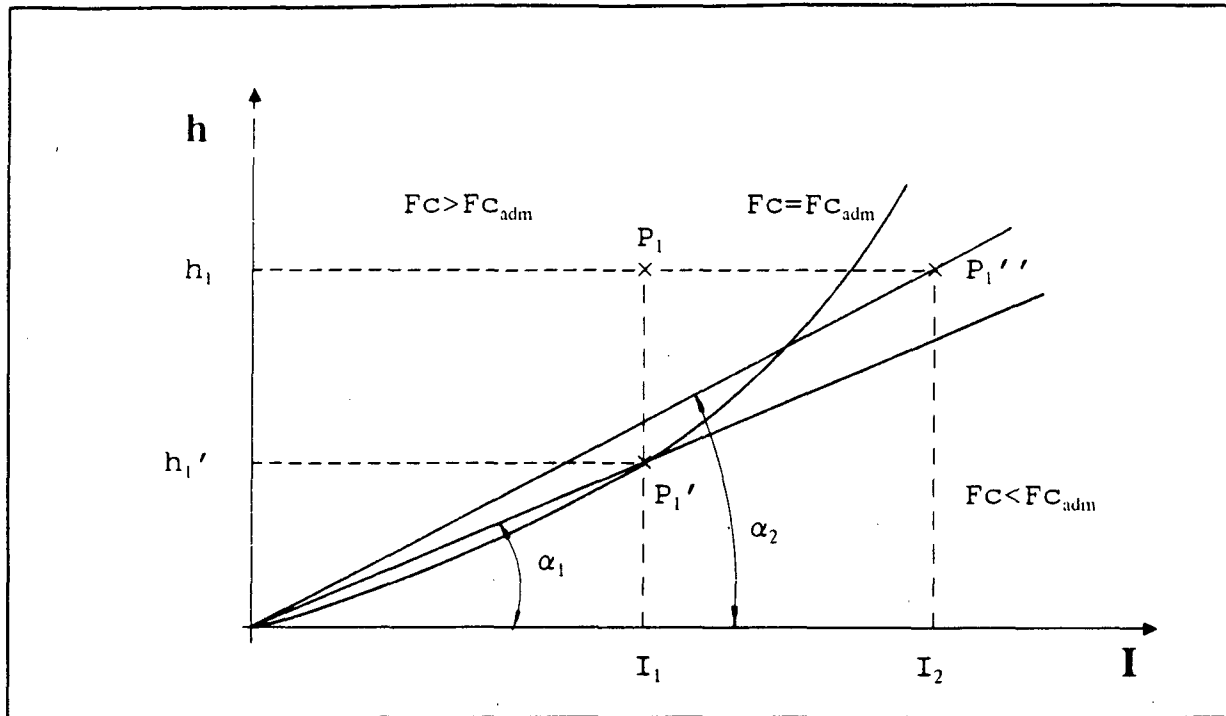


Fig. 5.3 - Alternativas de redução de  $f$  ou  $a_p$  para limitar a força

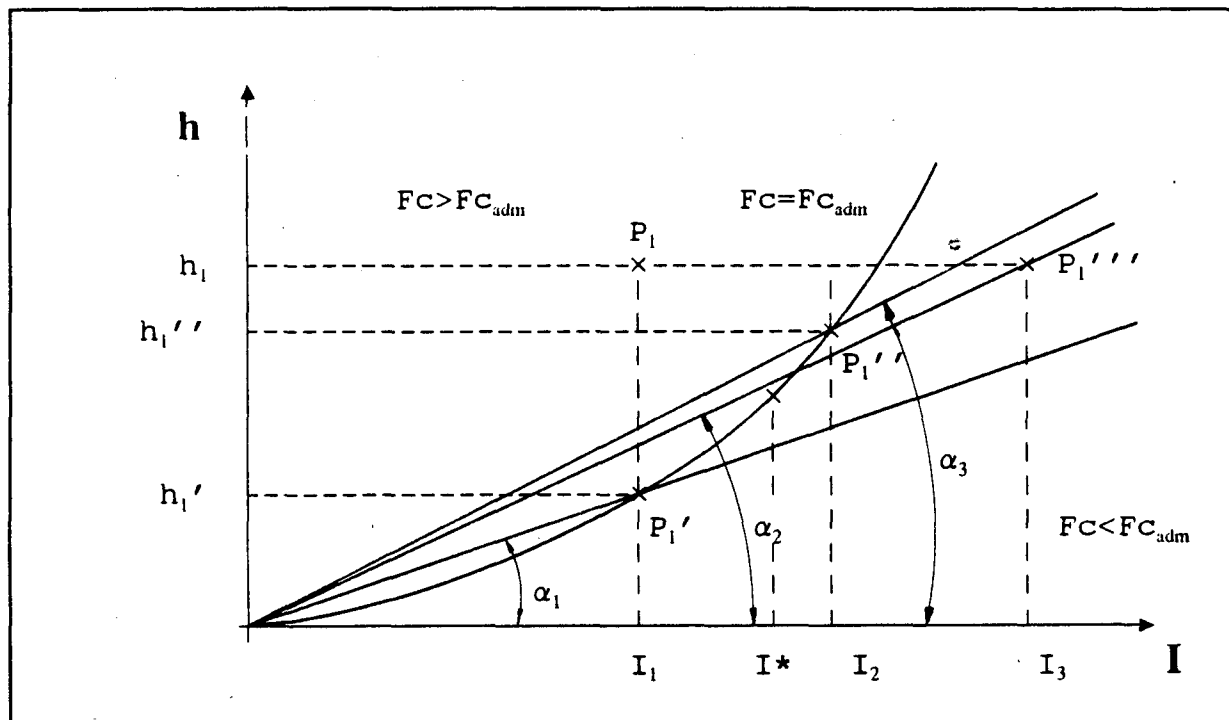


Fig. 5.4 - Alternativas de redução de  $f$  e/ou  $a_p$  para limitar a força



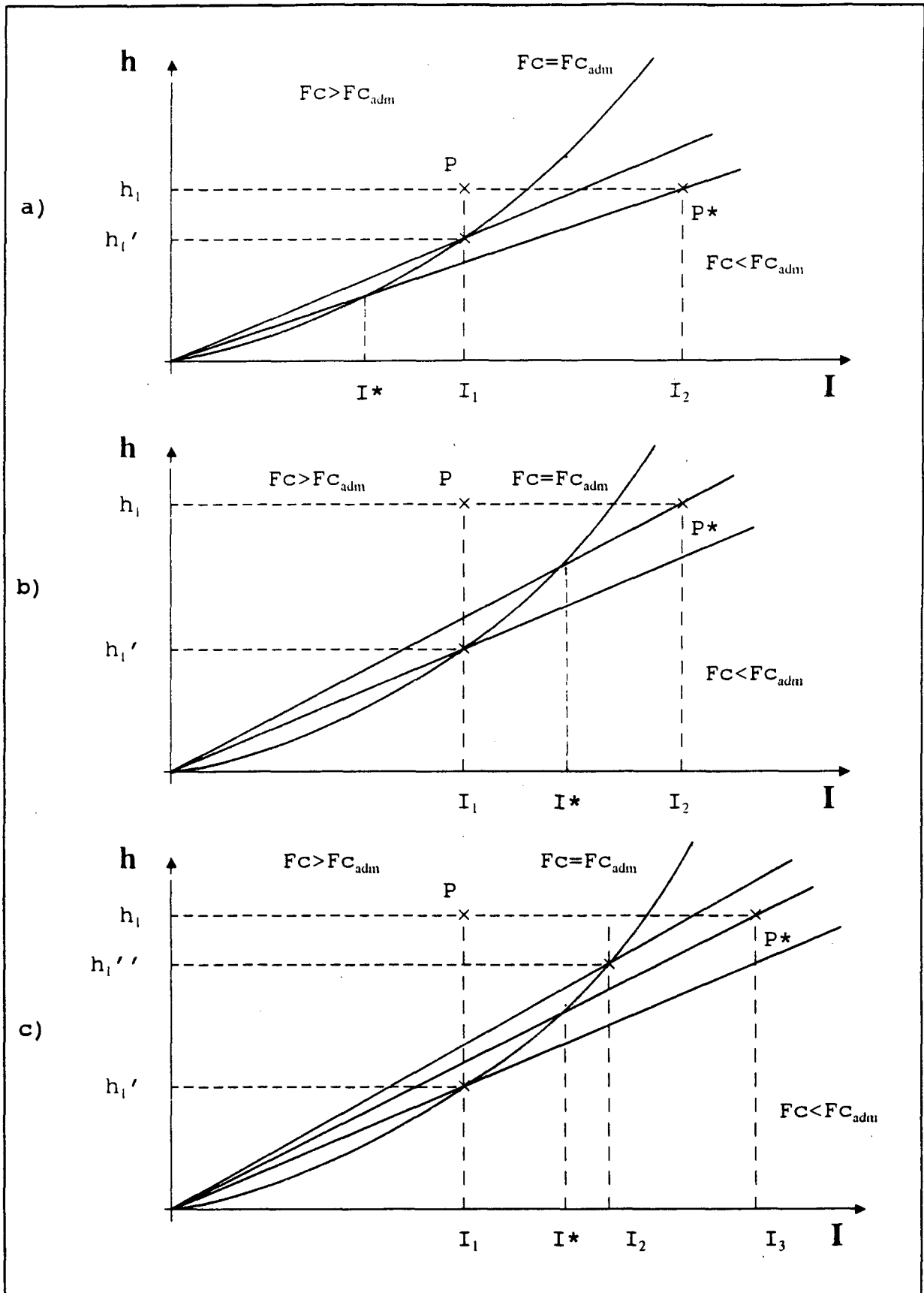


Fig. 5.5 - Opções de redução dos parâmetros:

a) avanço b) profundidade de corte c) ambos

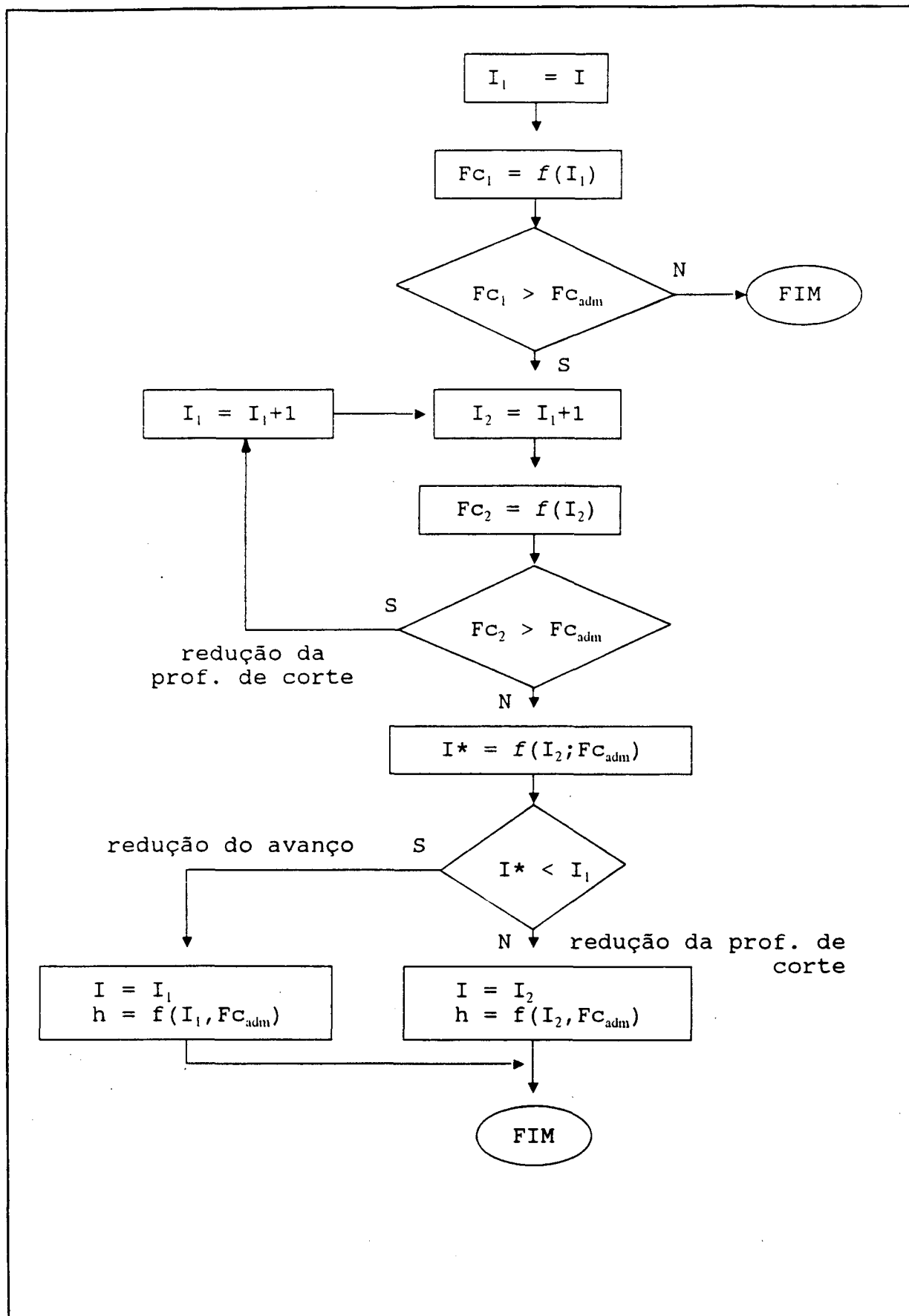


Fig. 5.6 - Algoritmo para redução da força de corte.

- ou
- c) se:  $I_1 < I^* < I_2$
- e  $I_2 - I_1 > 1$ .
- então: reduz-se avanço e profundidade de corte (fig. 5.5-c)

O algoritmo responsável pelo procedimento de identificação da situação ótima esta representado pelo fluxograma da figura 5.6.

### 5.2.2. Restrição de Torque

Com o raciocínio apresentado no item anterior, é analisado um mecanismo de otimização apenas para avanço e profundidade de corte. Esta interpretação é suficiente para o processo de torneamento, mas para fresamento de topo ou tangencial, há ainda

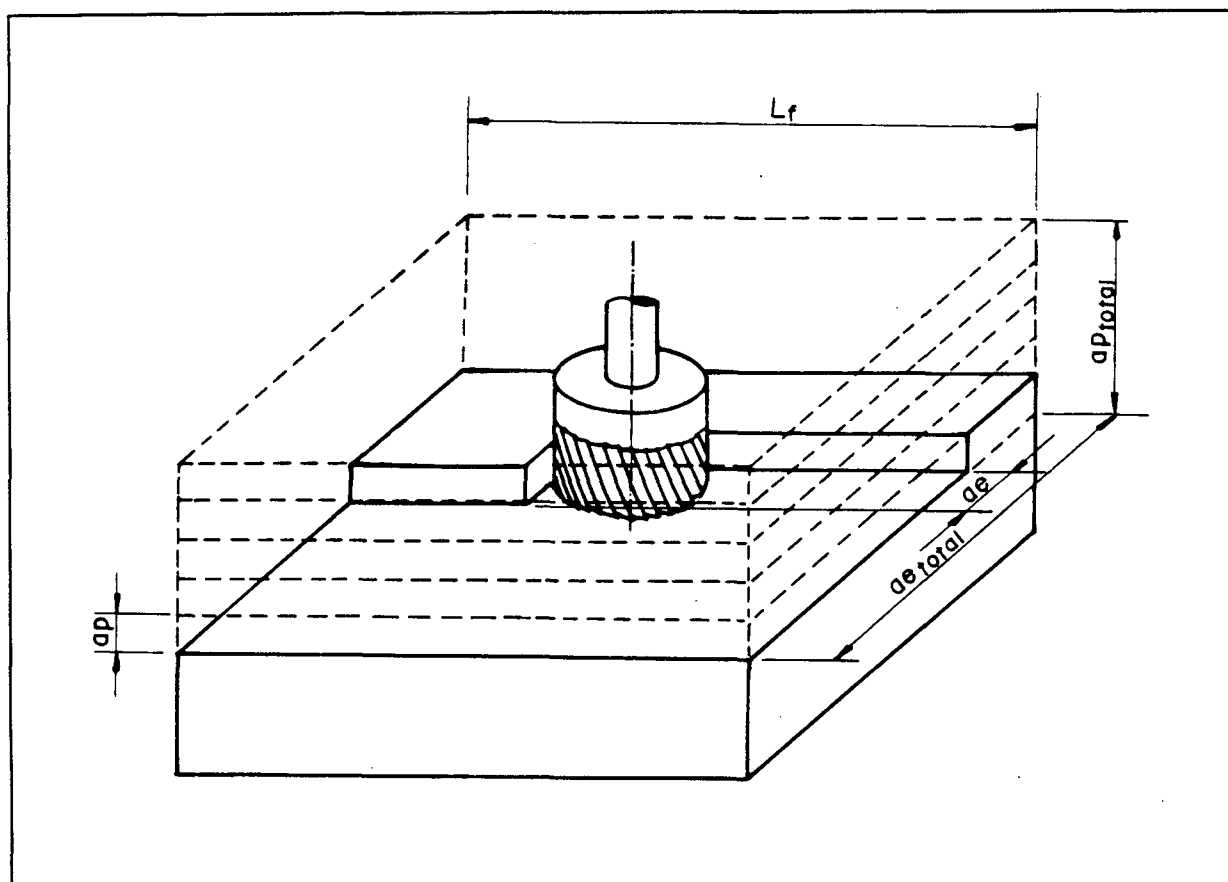


Fig. 5.7- Volume de material removido no fresamento.

que se introduzir neste dispositivo a penetração de trabalho (ae). A figura 5.7 mostra esta grandeza para o fresamento de topo. A variável de controle adotada neste procedimento para determinar a penetração de trabalho ideal é o torque no mandril porta-fresa, visto que aquele parâmetro de corte afeta diretamente esta grandeza, que é calculada por:

$$\tau = FC \cdot \frac{D}{2} \cdot Z_E \quad (5.18)$$

onde

D = diâmetro da fresa

$Z_E$  = número de arestas efetivamente atuantes

A influência da penetração de trabalho é sobre o ângulo de ataque (fig. 5.8) e conseqüentemente sobre  $Z_E$ . Estas relações são representadas pelas fórmulas a seguir:

$$Z_E = \frac{\varphi_s \cdot Z}{360^\circ} \quad (5.19)$$

e

$$\cos \varphi_s = - \frac{ae - \frac{D}{2}}{\frac{D}{2}} \quad (5.20)$$

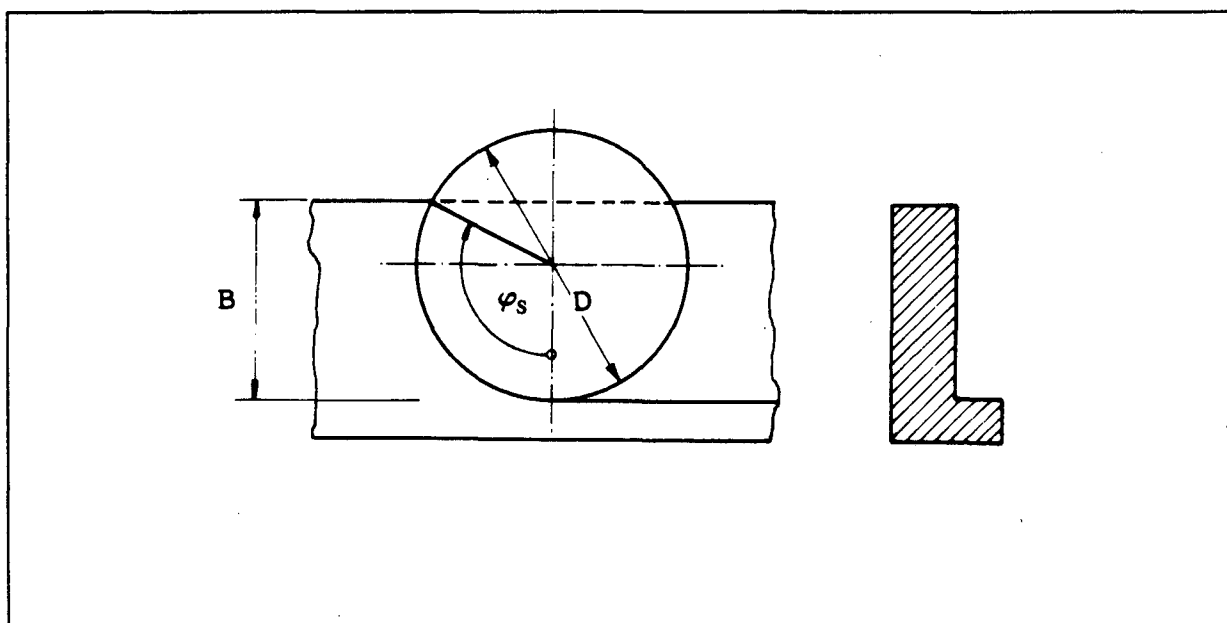


Fig. 5.8 - Determinação do ângulo de ataque

ou

$$\varphi_s = \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot ae}{D}\right) \quad (5.21)$$

Adotando-se portanto um torque admissível para o mandril, este limite deve ser mantido pela manipulação das variáveis  $F_c$  (força de corte) ou  $Z_E$  (número de arestas efetivamente atuantes), conforme pode ser observado na equação (5.18). Para trabalhar com a força de corte, utiliza-se o procedimento já descrito de "Restrição de Força", onde a otimização dos parâmetros avanço e profundidade de corte é feita com base no tempo total de usinagem. A otimização da penetração de trabalho e consequente alteração de  $Z_E$  também considera este tempo.

Para a geometria da peça como mostrado na figura 5.7, quando a sua profundidade (medida perpendicularmente à direção de avanço e aqui definido como penetração total de trabalho) excede o diâmetro da ferramenta, mais de um passe terá de ser executado nesta direção para completar a operação. Neste caso, o tempo total de usinagem é dado por:

$$t = \frac{L_f \cdot I_{ap} \cdot I_{ae}}{f \cdot N} \quad (5.22)$$

onde

$t$  = tempo total de usinagem

$L_f$  = Percurso de avanço

$I_{ap}$  = Número de passes na direção da profundidade de corte

$I_{ae}$  = Número de passes na direção da penetração de trabalho

O número de passes na direção da penetração de trabalho é calculado por:

$$I_{ae} = \frac{ae_{total}}{ae} \quad (5.23)$$

onde

$ae_{total}$  = profundidade da peça

$ae$  = penetração de trabalho para cada passe.

A faixa de variação da penetração de trabalho está compreendida entre o valor máximo, que ocorre quando é igual ao próprio diâmetro da fresa, e o mínimo admissível, que pode ser estipulado pelo fabricante da ferramenta ou proveniente do conhecimento prático. Considerando constante a penetração de trabalho para ambos os casos, o número de passes mínimo e máximo podem ser respectivamente calculados por:

$$I_{ae.min} = \text{inteiro} \left( \frac{ae_{total}}{D} \right) + 1 \quad (5.24)$$

e

$$I_{ae.max} = \text{inteiro} \left( \frac{ae_{total}}{ae_{adm}} \right) + 1 \quad (5.25)$$

onde

$D$  = diâmetro da fresa

$ae_{adm}$  = penetração de trabalho mínima admissível

Resulta que os limites de variação para a penetração de trabalho como função da geometria da peça são:

$$ae_{max} = \frac{ae_{total}}{I_{ae.min}} \quad e \quad ae_{min} = \frac{ae_{total}}{I_{ae.max}} \quad (5.26)$$

A situação que corresponde ao menor tempo total de usinagem considerando as combinações possíveis de avanço, profundidade de corte e penetração de trabalho, é identificada através do processamento apresentado no fluxograma da figura 5.9. Nesta sequência de operações determina-se inicialmente o número de arestas efetivamente atuante ( $Z_E$ ) para a condição correspondente ao número mínimo de passes na direção da penetração de trabalho ( $I_{ae.min}$ ), conforme equacionamento já apresentado.

Caso o torque promovido por esta situação não atinja o valor estipulado como admissível ( $\tau_{adm}$ ), o valor de penetração de trabalho ( $ae$ ) correspondente é adotado no processo e utilizado posteriormente na equação expandida de Taylor para cálculo da

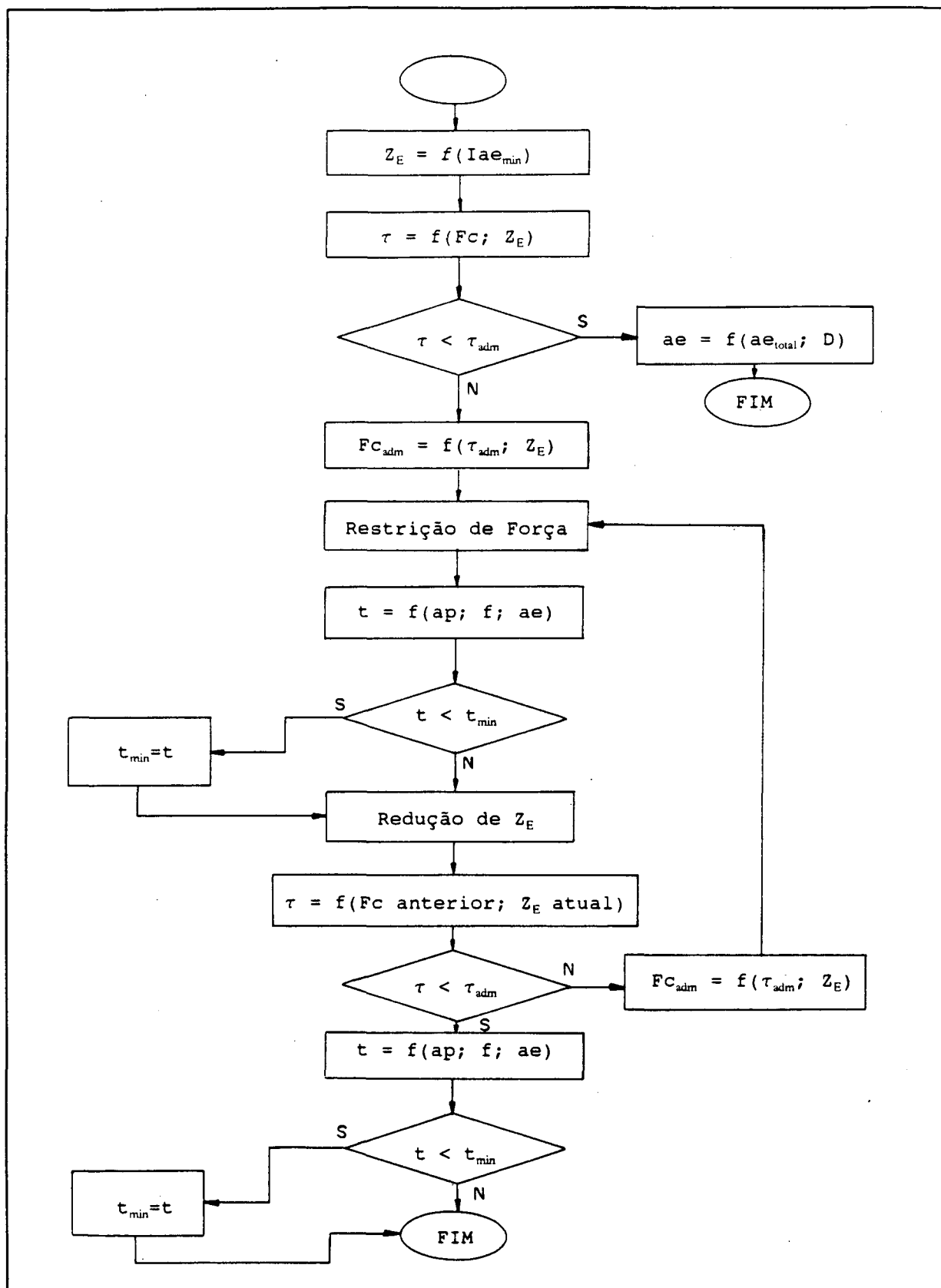


Fig. 5.9 - Restrição de torque para o fresamento

velocidade de corte.

Por outro lado, se este valor ultrapassar o admissível, tenta-se inicialmente reduzir o valor de torque pela redução da força através do procedimento "Restrição de Força". O que corresponde a uma tentativa de resolver o problema com a redução de avanço e/ou profundidade de corte. A variável "força admissível" assumirá neste caso o seguinte valor, deduzido da expressão (5.18):

$$FC_{adm} = \frac{2\tau_{adm}}{D \cdot Z_E} \quad (5.27)$$

Com os novos valores de avanço e profundidade de corte, procura-se analisar a sua influência sobre o tempo total de usinagem. Como a velocidade de rotação da ferramenta ainda é uma variável desconhecida e como o comprimento a ser fresado  $L_f$  é uma constante, esta análise é feita pelo fator proporcional ao tempo de usinagem  $t_f$ , dado por:

$$t_f = \frac{Iap \cdot Iae}{f} \quad (5.28)$$

Conforme poderá ser observado no decorrer da explanação deste algoritmo, este fator também será calculado para a outra possibilidades de redução do torque, que é através da redução de  $Z_E$ . Como o objetivo é encontrar o menor tempo entre todas as combinações possíveis, neste ponto tem que haver a comparação com a variável que armazena o tempo mínimo já encontrado ( $t_{min}$ ). Toda vez que uma nova condição atingir valor menor que o mínimo, o respectivo fator de tempo passa a assumir esta variável e adicionalmente os parâmetros de corte correspondentes são armazenados.

Na sequência, testa-se a outra possibilidade: redução de  $Z_E$ . Neste caso, como está se verificando a melhor alternativa, se redução de  $F_c$  ou  $Z_E$ , os parâmetros que definem a força de corte são os precedentes (avanço e profundidade de corte antes da última passagem pelo algoritmo "Restrição de Força"). O novo valor de  $Z_E$  é determinado pelo incremento no número de passes ( $Iae = Iae + 1$ ) e conseqüente redefinição da penetração de



trabalho  $ae$ .

Ao se calcular novamente o torque com o valor agora reduzido de  $Z_E$ , se ficar satisfeita a condição  $\tau < \tau_{adm}$ , encerra-se a necessidade de novas reduções nos parâmetros de corte e portanto basta calcular o fator de tempo  $t_f$  para esta última situação e compará-lo com o tempo mínimo já encontrado. Caso contrário, haverá a necessidade de novamente se fazer a comparação: ou mantem-se o último  $Z_E$  e recalcula-se a força admissível; ou reduz-se mais uma vez  $Z_E$ . Isso ocorrerá até que a condição citada esteja satisfeita.

### 5.2.3. Restrição de força no acabamento

A limitação da força de corte no último passe é normalmente decorrente da necessidade de eliminação de vibrações ou deformações na peça ou dispositivo de fixação para garantir a qualidade do acabamento e da forma geométrica da peça.

Pela equação de Kienzle, a força de corte no acabamento é determinada por:

$$FC_{acab} = K_{c1.1} \cdot b_{acab} \cdot h_{acab}^{(1-m_c)} \cdot Z_E \quad (5.29)$$

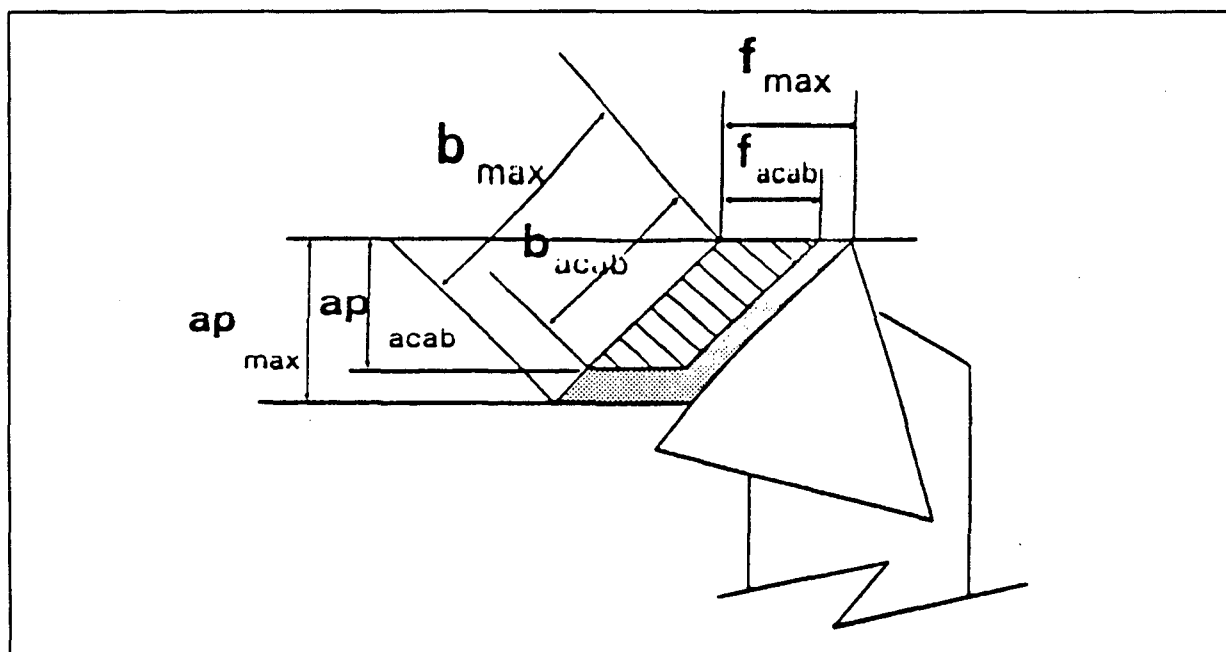


Fig. 5.10 - Área da seção do cavaco.

No caso em que a força de corte assim calculada supera a força limite especificada, a redução de  $h_{acab}$  e  $b_{acab}$  (ou  $f_{acab}$  e  $ap_{acab}$ , respectivamente) será feita de forma que a área de seção do cavaco seja proporcional àquela definida pelas condições extremas dos parâmetros de corte ( $ap_{max}$  e  $f_{max}$ ), conforme mostra a figura 5.10.

Para que esta proporcionalidade seja mantida, o percentual  $x$  de redução de ambos os parâmetros deve ser o mesmo, ou seja,

$$b_{acab} = x \cdot b_{max} \quad (5.30)$$

$$h_{acab} = x \cdot h_{max} \quad (5.31)$$

Substituindo estas variáveis na equação (5.29), tem-se:

$$FC_{adm. acab} = K_{c1.1} \cdot (b \cdot x) \cdot (h \cdot x)^{(1-m_c)} \quad (5.32)$$

ou

$$x = \left( \frac{FC_{adm. acab}}{K_{c1.1} \cdot b \cdot h^{(1-m_c)} \cdot Z_E} \right)^{1/(2-m_c)} \quad (5.33)$$

Porém, com o objetivo de minimizar o tempo total de usinagem, a redução de  $ap$  no passe de acabamento não deveria provocar um aumento do número total de passes. Isto aconteceria se, em consequência da redução do valor original da profundidade de corte no acabamento ( $ap_{acab}$  para  $ap'_{acab}$  na figura 5.11), a operação de desbaste ficasse acrescida de mais um passe.

Portanto, para evitar o aumento do número de passes, a profundidade de corte nesta operação ( $ap''_{desb}$  na figura 5.11) deve assumir o valor máximo admissível  $ap_{acab.lim}$ , dado por:

$$ap_{acab.lim} = ap_{total} - (I \cdot ap_{max}) \quad (5.34)$$

onde

$ap_{total}$  = comprimento a usinar medido na direção da profundidade de corte.

$I$  = nº de passes no desbaste.

$ap_{max}$  = máxima profundidade de corte =  $b_{max} \cdot \text{sen } \chi$

Com a nova profundidade, a força de corte novamente

ultrapassa o valor admissível, pois  $ap_{acab.lim}$  é maior que  $ap'_{acab}$ , valor originalmente calculado pela restrição de força. Portanto, haverá a necessidade de se recalcular o avanço para a nova condição, ou seja:

$$h''_{acab} = \left( \frac{FC_{adm.acab}}{K_{C1.1} \cdot ap_{acab.lim} \cdot Z_E} \right)^{1/(1-m_c)} \quad (5.35)$$

e

$$f''_{acab} = \frac{h_{acab}}{\text{sen} \chi} \quad (5.36)$$

Se a imposição de restrição de força para o desbaste provocar um aumento do número de passes nesta operação, torna-se desnecessário recalcular as condições de corte no acabamento para otimizar o tempo de usinagem e as condições ideais a serem adotadas são as mostradas no item (b) da figura 5.11.

#### 5.2.4. Restrição de Rugosidade

A especificação de acabamento através da indicação da rugosidade desejada limita o avanço nesta operação. A relação entre estas duas variáveis considerando aspectos geométricos teóricos, pode ser dada pela fórmula:

$$f_{max.acab} = \sqrt{8 \cdot R_{max} \cdot \bar{r}} \quad (5.37)$$

onde

$f_{max.acab}$  = avanço máximo no acabamento

$R_{max}$  = rugosidade superficial dada pela distância entre duas linhas, paralelas à linha média que tangencia ao perfil no pico mais alto e no vale mais profundo.

$r$  = raio de ponta da ferramenta  
(torneamento ou fresamento de topo) ou  
raio da fresa (fresamento tangencial)

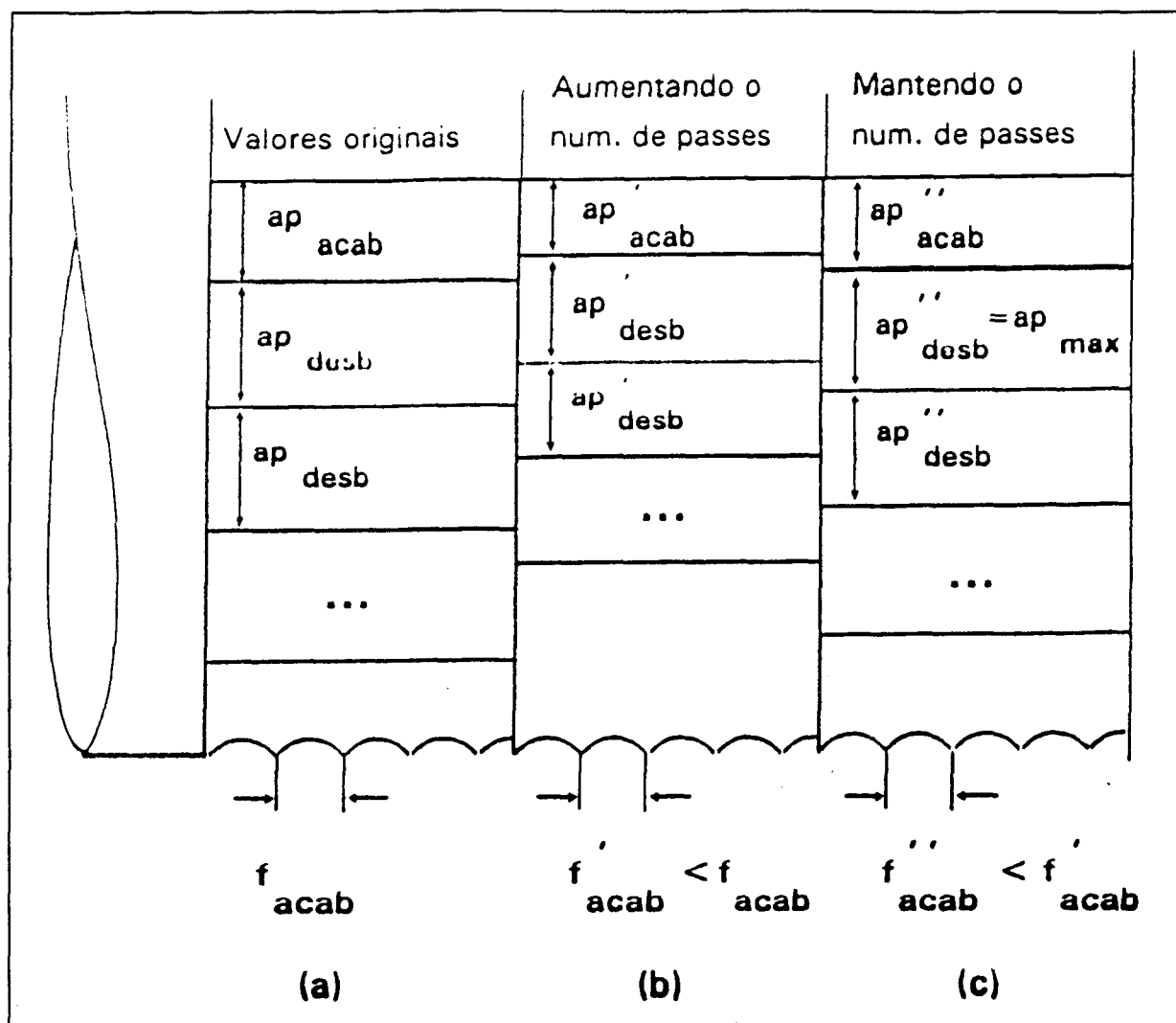


Fig. 5.11 - Restrição de força no acabamento.

Expressões semelhantes podem ser encontradas, considerando variações em função da geometria do corte [57]. O limite de avanço para o acabamento pode também ser determinado com base em informações do banco de dados do sistema. Utilizando-se valores de avanços adotados em aplicações anteriores e semelhantes, associados aos respectivos dados de rugosidade superficial obtidos, calcula-se o polinômio de 2º grau que relaciona estas variáveis. Desta forma, abre-se não apenas a possibilidade de se utilizar dados provenientes da experiência prática para cálculo do avanço, como também permite a utilização de outros parâmetros de especificação de rugosidade superficial.

### 5.2.5. Restrição de potência

A restrição de potência de corte só pode ser verificada depois que todos os parâmetros de corte forem estabelecidos. Pela fórmula da potência e substituindo-se a força de corte pela dada na equação de Kienzle, tem-se:

$$P_C = F_{C_{\max}} \cdot V_C = K_{C_{1.1}} \cdot b \cdot h^{1-m_C} \cdot V_C \quad (5.38)$$

Se a potência de corte superar a potência disponível da máquina, a redução do nível de potência na usinagem pode ser feita pela redução de um ou mais dos parâmetros de usinagem, ou seja, da profundidade de corte (redução de  $b$ ), do avanço (redução de  $h$ ), da profundidade de trabalho (redução de  $Z_E$  no fresamento), e/ou da velocidade de corte.

Como a velocidade de corte é a variável que tem maior influência sobre a vida da ferramenta, motivo pelo qual só ela é considerada nos critérios de otimização para determinação da vida ótima para a ferramenta, é recomendável que não seja feita nenhuma alteração neste parâmetro.

A influência dos outros parâmetros é na força de corte e portanto a manipulação destes deve ser observada na restrição de força. Neste caso, a força admissível para o corte será:

$$F_{C_{adm.P}} = \frac{P \cdot \eta}{V_{C_{otm}}} \quad (5.39)$$

onde

$F_{C_{adm.P}}$  = força admissível no corte

$P$  = potência da máquina

$\eta$  = rendimento da máquina

$V_{C_{otm}}$  = velocidade ótima de corte.

Cabe ressaltar que após redefinir as condições de usinagem que afetam a força de corte, a velocidade de corte não pode ser recalculada como função dos novos valores, pois pela equação de Taylor ela resultaria maior que a precedente e portanto o valor de potência disponível na máquina novamente seria transposto.

### **5.3. Otimização dos Parâmetros de Usinagem**

Para se alcançar os objetivos pretendidos de otimização dos parâmetros de usinagem, três etapas distintas têm de ser atingidas:

1ª) Aproveitar o conhecimento existente no campo de usinagem dos materiais para determinar valores iniciais de condições de corte para o processo de otimização (primeira aproximação).

2ª) Utilizar a experiência previa sobre o processo de fabricação em questão para aprimorar a precisão na tentativa de se atingir valores ótimos.

3ª) Observar o comportamento do processo para proceder as possíveis correções nos parâmetros de usinagem para compensar variações momentâneas em qualquer característica do processo de fabricação.

Os procedimentos descritos neste capítulo foram desenvolvidos para que o sistema de otimização dos parâmetros de usinagem tenha condições de executar estas três fases.

#### **5.3.1. Inicialização do Banco de Dados**

O banco de dados, projetado para o sistema e que tem a finalidade de suprir as informações necessárias aos algoritmos de otimização, promove o aproveitamento pelo sistema da experiência adquirida em casos específicos. Isto é realizado considerando que nele são mantidos, juntamente com as condições de corte adotadas para cada um desses casos, os resultados obtidos desta aplicação.

Em casos de aplicação do sistema em que nenhuma informação desta natureza existe para a combinação selecionada entre material da peça e ferramenta, a determinação das condições de corte iniciais é feita com base em dados de corte recomendados

por fabricantes de ferramentas ou através de valores orientativos para os expoentes da equação de Taylor, conforme apresentado a seguir.

a) explorando os dados de corte recomendados:

Na grande maioria dos casos em que condições de usinagem precisam ser especificadas, o procedimento convencional adotado por especialistas da área é usar condições de usinagem recomendadas, adaptadas com base em sua experiência à aplicação em questão. Condições de corte recomendadas são normalmente apresentadas por fabricantes de ferramentas e mais raramente pelo fabricante do material sob corte ou também podem ser encontradas em manuais de usinagem [58].

Existem diferentes formas de indicação de valores recomendados. Na figura 5.12 tem-se os exemplos mais comuns da forma de apresentação de tabelas com estes dados.

As duas combinações de avanço e velocidade de corte apresentados na figura 5.12 - tipo A, para cada combinação material/ferramenta, são valores indicados para operações de desbaste e acabamento. Em ambos os casos a vida prevista para a ferramenta é a mesma (normalmente 15min), se considerado que os outros parâmetros permanecem constantes. Para este caso, a equação de Taylor pode ser simplificada para:

$$VC = C_{T, tab} \cdot f^E \quad (5.40)$$

onde  $C_{T, tab}$  é uma constante que engloba as outras variáveis e considera o tempo de vida da ferramenta para o qual a tabela foi construída. Em um gráfico bi-logaritmico esta função constitui uma reta, onde o expoente E representa a sua inclinação e pode ser calculado por:

$$E = \frac{\log\left(\frac{VC_2}{VC_1}\right)}{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)} \quad (5.41)$$

Fatores de correção para o cálculo de velocidades de corte com tempos de vida da ferramenta diferentes do valor usado nesta

tabela podem ser assim encontrados nos catálogos:

Vida da ferramenta T	$T_1$	$T_2$	...	$T_{tab}$	$T_{tab+1}$	...
Fator de correção FC	$FC_1$	$FC_2$	...	1	$FC_{tab+1}$	...

$$VC = FC \cdot VC_{tab} \quad (5.42)$$

Com estas informações pode-se deduzir a reta que representa a vida da ferramenta em função da velocidade de corte em um gráfico bi-logaritmico Vc-T, e portanto determinar o expoente G da equação de Taylor através da expressão:

$$G = \frac{\log\left(\frac{FC_2}{FC_1}\right)}{\log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} = \frac{\log(FC_{tab+1})}{\log\left(\frac{T_{tab+1}}{T_{tab}}\right)} \quad (5.43)$$

Para o caso de tabelas da figura 5.12 - tipo B, fatores de correção para a velocidade de corte para valores de avanços diferentes daquele usado nesta tabela, são assim indicados:

Avanço f	$f_1$	$f_2$	...	$f_{tab}$	$f_{tab+1}$	...
Fator de correção FC	$FC_1$	$FC_2$	...	1	$FC_{tab+1}$	...

Assim, o coeficiente E da forma de Taylor para cada



combinação material/ferramenta também pode ser estimado por:

$$E = \frac{\log\left(\frac{FC_2}{FC_1}\right)}{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)} = \frac{\log(FC_{tab+1})}{\log\left(\frac{f_{tab+1}}{f_{tab}}\right)} \quad (5.44)$$

De forma semelhante, os coeficientes E e G na forma expandida da equação de Taylor podem ser avaliados para outros tipos de tabelas com dados de corte recomendados por fabricantes de ferramentas como na figura 5.12 - tipo C, quando auxiliadas por fatores de correção em função do avanço ou vida desejada para a ferramenta.

Para tabelas com o formato apresentado na figura 5.12 - tipo E, com exceção do expoente H, todos os outros coeficientes da equação de Taylor podem ser calculados também de forma semelhante.

b) outras fontes:

Além de valores recomendados por fabricantes e por manuais, outras fontes para inicialização do banco de dados podem ser adotadas. São elas:

- bancos de dados de usinagem: fornecem diretamente os coeficientes da equação de Taylor [59].

- ensaios de usinabilidade: dos resultados de pesquisas publicadas no campo da usinagem calcula-se os coeficientes da equação de Taylor, considerando-se que neles sejam apresentados dados de entrada (condições de corte) e de saída (desgaste e vida da ferramenta, rugosidade da peça, força de corte) do processo.

- processo produtivo: através da documentação do processo produtivo, onde critérios de troca de ferramenta são estabelecidos, também é possível avaliar os parâmetros do modelo do processo.

- valores orientativos para os coeficientes: da bibliografia sobre usinagem é possível chegar-se a valores aproximados para os coeficientes da equação de Taylor, subdividindo-se os materiais em categorias com características semelhantes.

Quando mais de uma destas fontes estão disponíveis, os

Tabela tipo A

FERRAMENTA →	Ferram. 1		Ferram. 2		...
MATERIAL DA PEÇA ↓	Avanço $f_1$ $f_2$		Avanço $f_1$ $f_2$		
	Velocidade de corte ( $T_{tab}$ )				
Material 1	$V_{C_{1,1,f_1}}$	$V_{C_{1,1,f_2}}$	$V_{C_{2,1,f_1}}$	$V_{C_{2,1,f_2}}$	...
Material 2	$V_{C_{1,2,f_1}}$	$V_{C_{1,2,f_2}}$	$V_{C_{2,2,f_1}}$	$V_{C_{2,2,f_2}}$	...
...	...	...	...	...	...

Tabela tipo B

FERRAMENTA →	Ferram. 1		Ferram. 2		...
MATERIAL DA PEÇA ↓	Vida ( $T_{tab}$ )	Faixa de veloc.	Vida ( $T_{tab}$ )	Faixa de veloc.	...
	$V_{C_{1,1}}$	$V_{C_{1,1,min}} - V_{C_{1,1,max}}$	$V_{C_{2,1}}$	$V_{C_{2,1,min}} - V_{C_{2,1,max}}$	...
Material 2	$V_{C_{1,2}}$	$V_{C_{1,2,min}} - V_{C_{1,2,max}}$	$V_{C_{2,2}}$	$V_{C_{2,2,min}} - V_{C_{2,2,max}}$	...
...	...	...	...	...	...

Tabela tipo C

FERRAMENTA →	Faixa de velocidades	Ferram.1	Ferram.2	...
MATERIAL DA PEÇA ↓			Avanço	
Material 1	$V_{C_{1,1,min}} - V_{C_{1,1,max}}$	$f_{1,1}$	$f_{2,1}$	...
Material 2	$V_{C_{1,2,min}} - V_{C_{1,2,max}}$	$f_{1,2}$	$f_{2,2}$	...
...	...	...	...	...

Fig. 5.12. Exemplos de tabelas para dados de corte

Tabela tipo D

FERRAM. →	Ferram. 1		Ferram. 2	
MATERIAL DA PEÇA	Faixa de veloc.	Faixa de avanço	Faixa de veloc.	Faixa de avanço
Mat. 1	$f_{1,1,\min} - f_{1,1,\max}$	$Vc_{1,1,\min} - Vc_{1,1,\max}$	$f_{2,1,\min} - f_{2,1,\max}$	$Vc_{2,1,\min} - Vc_{2,1,\max}$
Mat. 2	$f_{1,2,\min} - f_{1,2,\max}$	$Vc_{1,2,\min} - Vc_{1,2,\max}$	$f_{2,2,\min} - f_{2,2,\max}$	$Vc_{2,2,\min} - Vc_{2,2,\max}$
...	...	...	...	...

Tabela tipo E

MT	FT	ap	avanço			VB	T1	T2	T3
			f1	f2	...				
mt <sub>1</sub>	ft <sub>1</sub>	ap <sub>1</sub>	Vc <sub>1,1,1,1</sub>	Vc <sub>1,1,1,2</sub>	...	VB <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	FC <sub>1,1</sub>	FC <sub>1,2</sub>	FC <sub>1,3</sub>
		ap <sub>2</sub>	Vc <sub>1,1,2,1</sub>	Vc <sub>1,1,2,2</sub>	...				
		...	...	...	...				
	ft <sub>2</sub>	ap <sub>1</sub>	Vc <sub>1,2,1,1</sub>	Vc <sub>1,2,1,2</sub>	...	VB <sub>2</sub> K <sub>2</sub>			
		ap <sub>2</sub>	Vc <sub>1,2,2,1</sub>	Vc <sub>1,2,2,2</sub>	...				
		...	...	...	...				
	ft <sub>3</sub>	ap <sub>1</sub>	Vc <sub>1,3,1,1</sub>	Vc <sub>1,3,1,2</sub>	...	VB <sub>3</sub> K <sub>3</sub>			
		ap <sub>2</sub>	Vc <sub>1,3,2,1</sub>	Vc <sub>1,3,2,2</sub>	...				
		...	...	...	...				
...	...	...	...	...	...	...	...	...	
mt <sub>2</sub>	ft <sub>1</sub>	...	...	...	...	...			
	ft <sub>2</sub>	...	...	...	...	...			
	...	...	...	...	...	...			
...	...	...	...	...	...	...	...	...	

Fig. 5.12 - Exemplos de tabelas para dados de corte  
(continuação)

critérios de escolha devem considerar as semelhanças entre as condições em que os dados foram gerados para estas e as do processo para o qual se pretende obter condições de usinagem. Valores orientativos para os coeficientes só devem ser adotados quando não se tem outra fonte de informação ou as características de outra fonte, cuja influência no processo não é contemplada pela equação de Taylor, diferem de forma significativa do processo considerado. Informações provenientes do próprio processo produtivo quando novas condições de corte são geradas são, logicamente, a melhor maneira de se chegar a valores mais próximos dos ideais no início do procedimento de otimização, pois a usinagem pode ser afetada pelas condições da máquina ferramenta, condições atmosféricas, estado de deterioração do fluido de corte, entre outros fatores específicos. Daí a importância de se fazer a documentação, durante a produção, das condições adotadas e consequentes resultados alcançados. O aproveitamento da experiência adquirida em aplicações específicas do sistema é possível, quando em cada oportunidade que condições de corte forem geradas, ele for realimentado com resultados obtidos da aplicação destas.

### 5.3.2. Cálculo de $V_c$ Inicial

Como pela análise de tabelas com dados recomendados, consegue-se avaliar apenas os expoente  $E$  e/ou  $G$  dessa equação, a velocidade de corte pode ser inicialmente assim determinada:

a) Quando disponíveis  $E$  e  $G$ :

Na avaliação de  $G$ , a reta obtida no gráfico bi-logaritmico  $T-V_c$  é válida para o avanço especificado na tabela ( $f_{tab}$ ). Considerando como constante os expoentes da equação, a reta correspondente ao avanço real definido pelas restrições ( $f_{restr}$ ) é paralela a essa, e portanto a velocidade de corte pode ser

expressa por (fig. 5.13):

$$VC = C_{f, restr} \cdot T^G \quad (5.45)$$

Colocando-se esta fórmula também como função de  $f$ , vem:

$$VC = C' \cdot f^E \cdot T^G \quad (5.46)$$

Substituindo  $f$  por  $f_{restr}$ , tem-se:

$$VC = C' \cdot f_{restr}^E \cdot T^G \quad (5.47)$$

Comparando (5.45) com (5.47), pode-se escrever:

$$C_{f, restr} = C' \cdot f_{restr}^E \quad (5.48)$$

ou

$$C' = \frac{C_{f, restr}}{f_{restr}^E} \quad (5.49)$$

Usando o mesmo raciocínio para  $f = f_{tab}$ , chega-se a:

$$C' = \frac{C_{f, tab}}{f_{tab}^E} \quad (5.50)$$

Igualando (5.49) e (5.50), tem-se:

$$C_{f, restr} = C_{f, tab} \cdot \left( \frac{f_{restr}}{f_{tab}} \right)^E \quad (5.51)$$

Finalmente substituindo (5.51) em (5.45), conclui-se:

$$VC = C_{f, tab} \cdot \left( \frac{f_{restr}}{f_{tab}} \right)^E \cdot T^G \quad (5.52)$$

b) Quando disponível E:

Quando existir apenas a possibilidade do cálculo de E pela

análise de dados recomendados, a velocidade de corte só pode ser calculada para o tempo expresso na tabela de valores recomendados ( $T_{tab}$ ) e é determinada por:

$$VC = C_{T, tab} \cdot f_{restr}^E \quad (5.53)$$

c) Quando disponível G:

Neste caso, a utilização da velocidade de corte calculada pela expressão a seguir garante teoricamente o tempo ótimo de vida da ferramenta ( $T_{om}$ ) somente se adotado o avanço indicado na tabela.

$$VC = C_{f, tab} \cdot T^G \quad (5.54)$$

d) Para bancos de dados de usinagem:

Com os valores de avanço e profundidade de corte já determinados em função das restrições do processo e o tempo de vida da ferramenta definido pelo critério de otimização, a velocidade de corte pode ser calculada diretamente pela equação expandida de Taylor, quando disponíveis seus coeficientes em banco de dados de usinagem.

### 5.3.3. Otimização pela realimentação do sistema

A otimização dos parâmetros de corte decorre da identificação dos parâmetros do processo que nesta implementação da metodologia proposta corresponde aos coeficientes da equação de Taylor.

O procedimento computacional para determinação dos coeficientes das equações de Taylor utiliza como dados de entrada os parâmetros de corte e a vida da ferramenta, de um processo de fabricação por usinagem com características específicas e gera como saída os coeficientes da equação de Taylor com respectivos

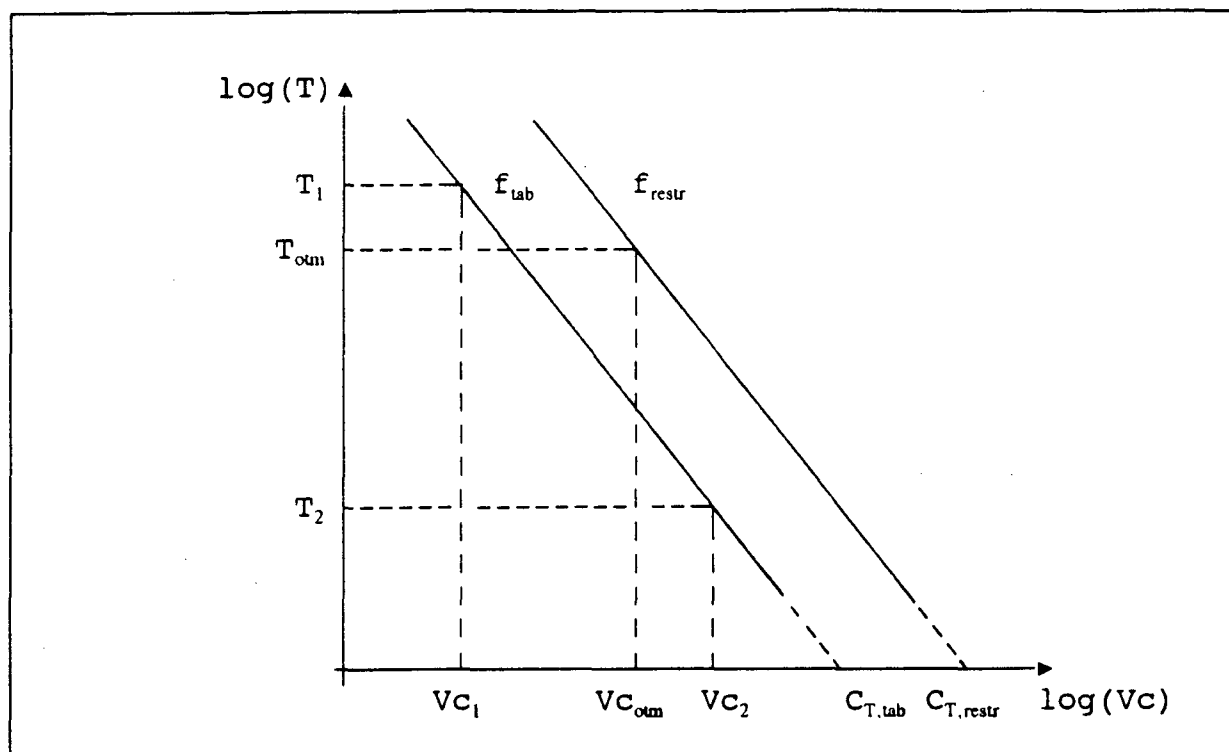


Fig. 5.13 - Equação de Taylor para dados recomendados.

limites inferiores e superiores para um intervalo de confiança  $\alpha=99,87\%$ . Os limites, inferiores e superiores, são calculados para fins de análise de confiabilidade dos coeficientes de Taylor. Com o objetivo de tornar o procedimento flexível utilizou-se, para o ajuste dos coeficientes, o modelo de erro na saída com o estimador de Máximo a Posteriori (MAP) sequencial. O MAP foi escolhido por permitir que, em função da experiência do profissional com relação ao processo, os coeficientes possam ser ajustados com um grau de confiabilidade razoável a partir dos primeiros dados realimentados no sistema referentes a medições de vida da ferramenta. Nos casos em que não se tenha nenhum conhecimento prévio a respeito dos coeficientes da equação de Taylor, o procedimento pode ser inicializado com zeros e conforme o filtro for sendo alimentado com dados sobre condições de corte e vida da ferramenta, os coeficientes vão sendo ajustados com um maior grau de precisão. A manipulação de dados por parte do programa é feita por intermédio de arquivos de forma a permitir que o filtro seja atualizado conforme os dados sobre a vida forem sendo gerados e também para possibilitar que vários processos distintos possam ser monitorados simultaneamente. Para cálculo

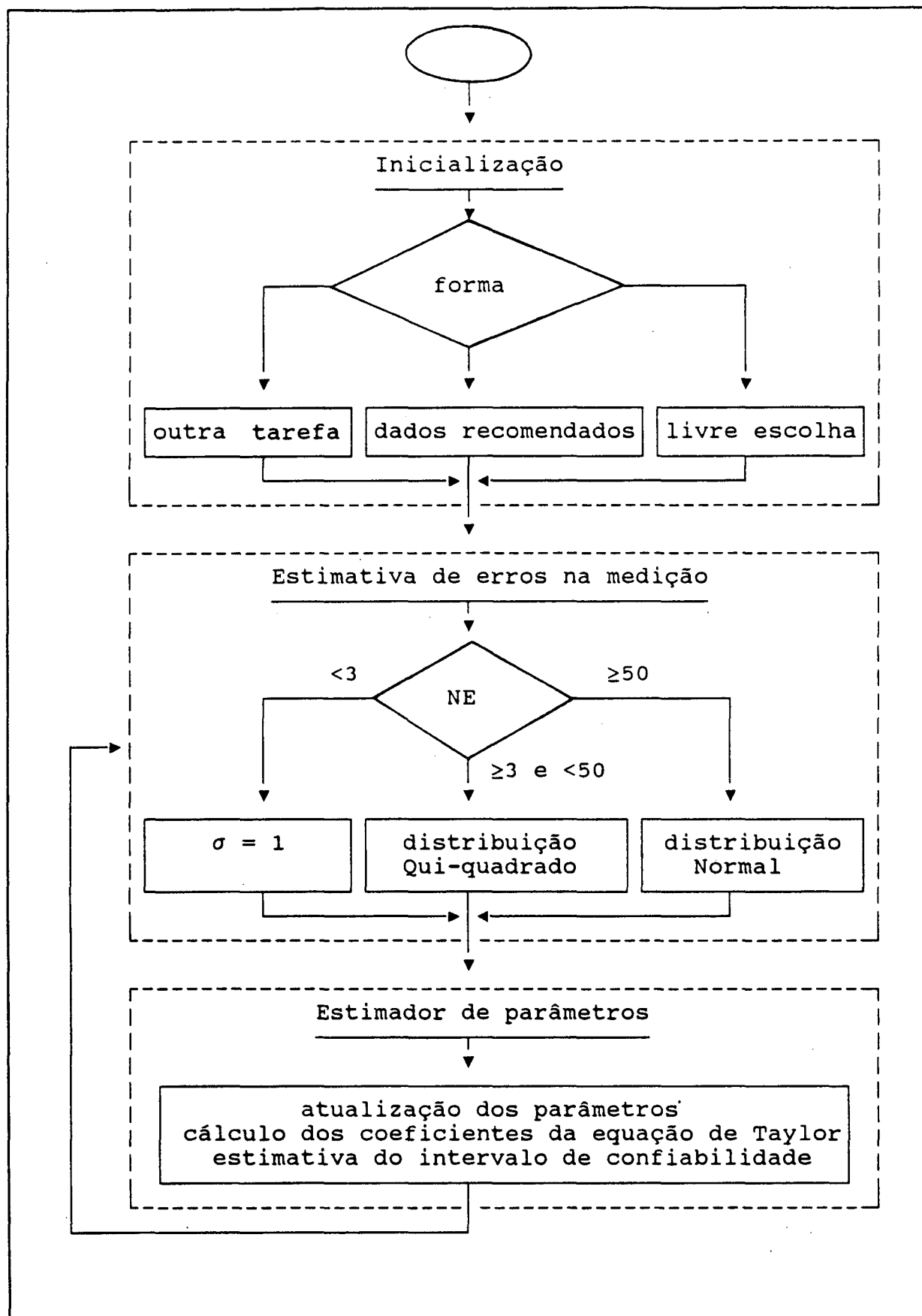


Fig. 5.14 - Ajuste de parâmetros com dados realimentados.



do tempo de vida da ferramenta, foi desenvolvido um procedimento que, utilizando o banco de dados gerado pelo módulo de ajuste, calcula o tempo de vida médio e respectivos limites inferiores e superiores do intervalo de 99.87% de confiabilidade para um processo específico.

O procedimento para identificar os parâmetros do processo pela realimentação do sistema para determinação das condições ótimas de usinagem (fig. 5.14) tem as seguintes etapas:

1ª) Inicialização do Módulo de Ajuste:

No módulo de inicialização são verificados se os arquivos de trabalho com a extensão dada pelo código de identificação existem. A existência dos arquivos significa que já ocorreu a inicialização e o sistema retorna ao módulo principal. Caso contrário, as seguintes possibilidades para definição dos valores iniciais são consideradas:

a) Inicialização com parâmetros identificados em outra tarefa:

O sistema permite inicializar o procedimento de identificação com valores de parâmetros já identificados em outra aplicação do sistema. A escolha dos dados neste caso é feita pela seleção de uma tarefa anteriormente definida, cuja semelhança com a atual seja a maior possível.

b) Inicialização por tabela de dados recomendados:

Caso seja possível, os valores iniciais dos parâmetros podem ser calculados dos arquivos de dados recomendados contidos no sistema.

c) Inicialização por livre escolha:

Valores iniciais para o processamento de identificação provenientes de qualquer outra fonte poderão ser adotados através desta opção. Caso o primeiro dado de entrada for zero, o programa atribui ao conjunto de parâmetros iniciais  $b_0$  o vetor nulo e os valores da diagonal da matriz de ganho  $P_0$  são inicializados com  $10^{13}$ . Caso o primeiro dado de entrada for diferente de zero, a rotina calcula os valores iniciais para  $b_0$  e a confiança do

usuário nos valores iniciais dos coeficientes deve ser informada.

### 2ª) Estimativa dos Erros de Medição:

Durante uma tarefa de usinagem, pode-se utilizar várias ferramentas antes que alguma modificação ocorra nas variáveis de corte. Prevendo esta repetibilidade de experimentos, o programa desenvolvido tem uma rotina para estimar a variância  $\sigma^2$  do erro  $\psi$  de medição de T, para o caso de repetição de experimentos.

Para estimar o valor de  $\sigma^2$  é preciso, primeiramente, saber se o experimento em questão é repetido ou ocorre uma nova combinação nas condições de velocidade, avanço e profundidade de corte novo. Isto é feito através de uma busca no arquivo de trabalho vigente. Caso se encontre o conjunto de dados referente ao experimento, incrementa-se o contador de experimentos deste conjunto ou, caso contrário, inicializa-se um contador de experimento com o valor unitário que é inserido no final do arquivo de trabalho do conjunto de dados relativos a este novo experimento.

Em função do valor do contador de experimentos NE, três caminhos distintos podem ser seguidos:

#### a) $NE < 3$ :

Assume-se que não existe repetibilidade suficiente para uma boa estimativa de  $\sigma^2$ . Neste caso, arbitra-se um valor unitário para  $\sigma$ . O valor  $\sigma = 1$  é atribuído ao erro de medição porque, como não há repetibilidade do experimento, o estimador MAP trabalha como um estimador de mínimos quadrados comum. Isto significa que o valor escolhido para  $\sigma$  não terá nenhuma influência nos resultados.

#### b) $3 \leq NE < 50$ :

O valor de  $\sigma^2$  é estimado pela equação (4.26) com  $\alpha = 0,9987$ .

#### c) $NE \geq 50$ :

Para NE grande, a distribuição  $\chi^2$  tende à distribuição Normal. Neste caso, utiliza-se o estimador não polarizado para

estimar o valor de  $\sigma^2$ , dado pela equação:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})}{n-1} \quad (5.55)$$

3ª) Estimador de Parâmetros:

A matriz de covariância dos parâmetros é atualizada pela equação (4.11). Os valores esperados para os parâmetros, são calculados utilizando a equação (4.9).

Os coeficientes da equação de Taylor são calculados utilizando as seguintes equações:

$$G = \frac{1}{G^*}$$

$$\bar{C} = \exp(G\bar{C}^*)$$

$$E = GE^*$$

$$F = GF^* \quad (5.59)$$

Os intervalos de 99,87% de confiança para os parâmetros  $G^*$ ,  $C^*$ ,  $E^*$  e  $F^*$  são calculados utilizando as equações (4.13) e (4.16). Caso exista mais de 50 ensaios diferentes assume-se que a distribuição  $t$  já tenha convergido para a distribuição Normal, neste caso utiliza-se  $t = 3$  na equação (4.13).

Os intervalos de 99,87% de confiança para os coeficientes  $G$ ,  $C$ ,  $E$ , e  $F$  são calculados pela equação (4.35). Deve-se salientar que, no desenvolvimento desta equação, assume-se a hipótese de pequenas alterações dos valores das variáveis independentes. Neste trabalho, caso algum intervalo, com 99,87% de confiança nos parâmetros, tenha amplitude maior do que 10% do

valor do parâmetro, o intervalo de confiança dos coeficientes não são estimados. Neste caso o programa, para efeito de saída de resultados, assume que os intervalos de confiança nos coeficientes são iguais aos valores dos mesmos.

#### 5.3.4. Ajuste dos parâmetros com monitoramento de força

Em processos de usinagem com monitoramento de forças de corte [60], a aplicação do procedimento de identificação de parâmetros apresenta três grandes vantagens para a estimação dos coeficientes da equação de Taylor, que são:

- 1ª) Possibilidade de automatização do procedimento de aquisição de dados;
- 2ª) Possibilidade de utilização de grande volume de dados para cada ensaio, o que tende a diminuir a variância dos erros de medição;
- 3ª) Eliminação de erros nas variáveis de corte quando se utiliza diferentes condições de corte para uma determinada ferramenta.

A hipótese fundamental utilizada para a determinação dos coeficientes da equação de Taylor via medição das forças de corte é a de que estas variam linearmente com  $V_B$  [61-63]. Com esta hipótese, a força de corte  $F_c$ , pode ser calculada, em função da força inicial  $F_{ini}$  e um coeficiente  $\alpha$ , pela equação:

$$F_{C_{max}} = F_{C_{ini}} + \alpha V_B \quad (5.60)$$

O procedimento proposto neste trabalho consiste em estimar, primeiramente, o valor de  $\alpha$  e depois substituir a equação (4.21), tendo  $V_B$  como variável dependente, na equação (5.60). Com isso, o procedimento de identificação de parâmetros pode ser utilizado normalmente na determinação dos coeficientes das equações de Taylor. Entretanto, é necessário medir alguns valores de  $V_B$ ,

antes que o procedimento possa ser utilizado.

Existem basicamente duas possibilidades para a medição do desgaste da ferramenta: na primeira, o processo de corte é interrompido várias vezes para a medição de  $V_B$ ; na segunda, caso o ensaio seja repetido várias vezes, pode-se medir os valores de  $V_B$  para os tempos de fim de vida. Em ambos os casos, o problema na estimação dos coeficientes  $\alpha$   $F_{C_{ini}}$  é o fato de existir erros na medição de  $V_B$ , o que caracteriza o procedimento de ajuste como sendo um modelo de erro na entrada. Neste caso, há a necessidade de se utilizar o estimador de variáveis instrumentais para a determinação destes parâmetros, uma vez que os estimadores baseados no modelo de erro na saída tornam-se polarizados nestas condições.

Uma vez estimado o valor de  $\alpha$ , pode-se escrever:

$$\frac{F_{C_{max}} - F_{C_{ini}}}{\alpha} = V_B \quad (5.61)$$

Aplicando-se o logaritmo em ambos os lados desta expressão, e substituindo  $\log(V_B)$  da equação (4.21), obtém-se:

$$\log\left(\frac{F_{C_{max}} - F_{C_{ini}}}{\alpha}\right) = -\frac{1}{H}\log C + \frac{1}{H}\log V_c - \frac{E}{H}\log f - \frac{F}{H}\log a_p - \frac{G}{H}\log T$$

Observa-se que esta equação tem a mesma estrutura da equação (4.22), ou seja: o programa de ajuste de parâmetros pode ser utilizado normalmente bastando substituir, como dado de entrada, o tempo de vida  $T$  pela razão  $(F_{C_{max}} - F_{C_{ini}})/\alpha$  e aumentar o número de variáveis de corte de três para quatro.

#### 5.4. Considerações sobre Quebra de Ferramenta

A frequência de troca de aresta de corte em um sistema produtivo pode ser definido por diferentes critérios. Entre os

mais utilizados, podemos citar:

- desgaste da ferramenta.
- aumento da força de corte.
- máxima rugosidade superficial da peça produzida.
- variação dimensional da peça.
- quebra de ferramenta.

O desgaste de flanco da ferramenta é considerado neste trabalho como o critério de fim de vida da ferramenta por ser o que está incluído na equação de Taylor.

A quebra de ferramenta é um fato indesejável no processo de usinagem. Ela pode provocar perturbações no sistema e portanto deve ser evitada. O gráfico da figura 5.15 apresenta a frequência de falha da ferramenta como função do seu tempo de vida útil. A quebra prematura de ferramentas, isto é, nos primeiros instantes de contato com a peça, é geralmente provocada por problemas de fabricação ou por operar em condições de corte abusivas (geometria da ferramenta, avanço, profundidade de corte, etc.) ou inadequadas. Se a falha prematura for evitada, a frequência de quebra cai praticamente a zero até o ponto de vida  $T_{max}$ , que

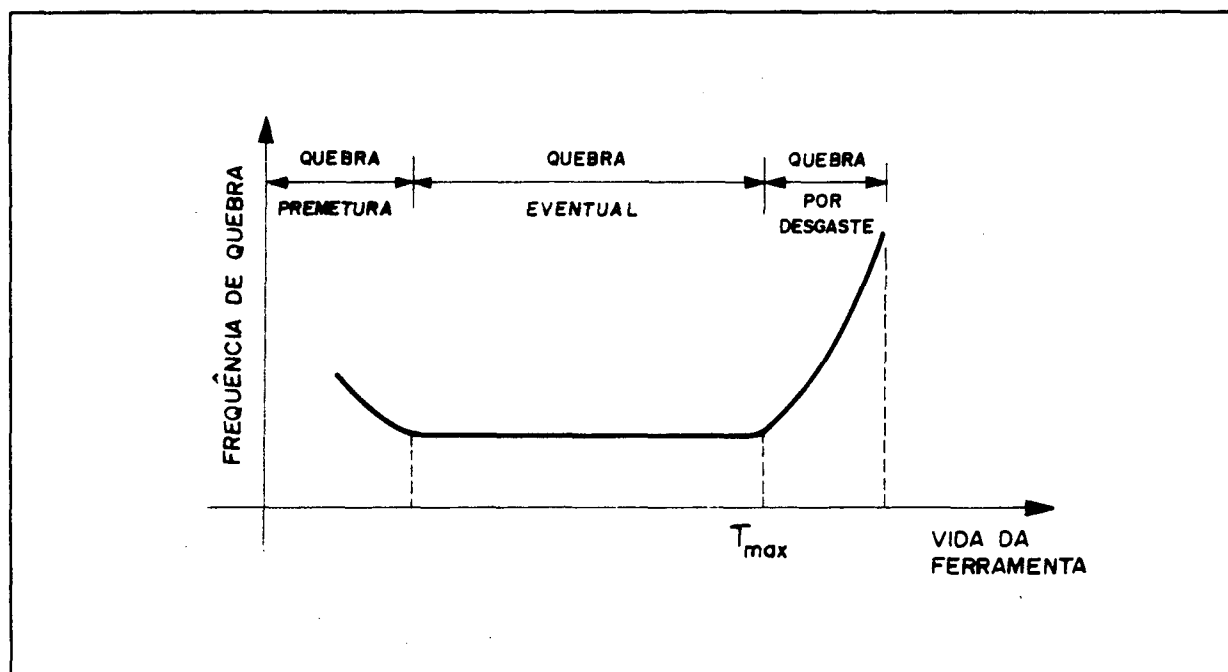


Fig. 5.15 - Frequência de quebra de ferramenta

é atingido por quase a totalidade das ferramentas. Após este tempo as falhas são provocadas pelo desgaste das ferramentas. Para garantir maior estabilidade do processo e como consequência maior uniformidade quanto ao acabamento, geometria e dimensão das peças produzidas, a troca de ferramenta deve ser limitada a esta vida. A identificação destas características no processo de fabricação, é portanto de grande interesse [64-65]. Uma forma de procedimento para isso é como a apresentada em [66], onde um conjunto de ferramentas é utilizada até a quebra para o levantamento da curva vida da ferramenta x frequência de quebra.

Como  $T_{om}$  é calculado por critérios de otimização que são função de tempos e custos do processo e a partir dele é que são geradas condições de corte, a possibilidade de atingi-lo deve ser garantida. Sendo a forma da curva apresentada na figura 5.15 típica para condições específicas, ela vai ser influenciada pela escolha do critério de fim de vida para a ferramenta, conforme indica a figura 5.16 onde a influência da velocidade de corte sobre a vida e o desgaste da ferramenta é mostrada. Nesta figura vale a relação  $Vc_3 > Vc_2 > Vc_1$ . Se  $VB_1$  for o critério inicialmente estipulado para fim de vida da ferramenta e  $T_1 = T_{om}$ , nenhum destes valores terá sido atingido se ocorrer uma quebra de ferramenta. Admitindo que a principal causa de quebra é a força de corte e que esta força depende do desgaste da ferramenta, ou seja, a força de corte cresce proporcionalmente ao desgaste, conclui-se que o desgaste estipulado para o fim da ferramenta ( $VB_1$  para o exemplo citado) foi superestimado. Cabe, portanto, reavaliar o valor de  $VB$  que garanta a vida pretendida para a ferramenta, o que equivale a encontrar uma situação como o da curva para  $Vc_1$  na figura apresentada, onde a vida  $T_1$  (vida ótima) seja atingida. Isso significa que o valor de  $VB$  inicialmente estipulado em  $VB_1$  deva ser reduzido para  $VB_2$ .

O método empregado neste trabalho para deduzir um valor adequado para o desgaste de flanco da ferramenta de forma que  $T_{om}$  seja possível de ser obtido ( $T_{om} < T_{max}$ ) assume que, a exemplo do procedimento de identificação de parâmetros, as possíveis quebras estão ocorrendo quando da aplicação do sistema em um processo

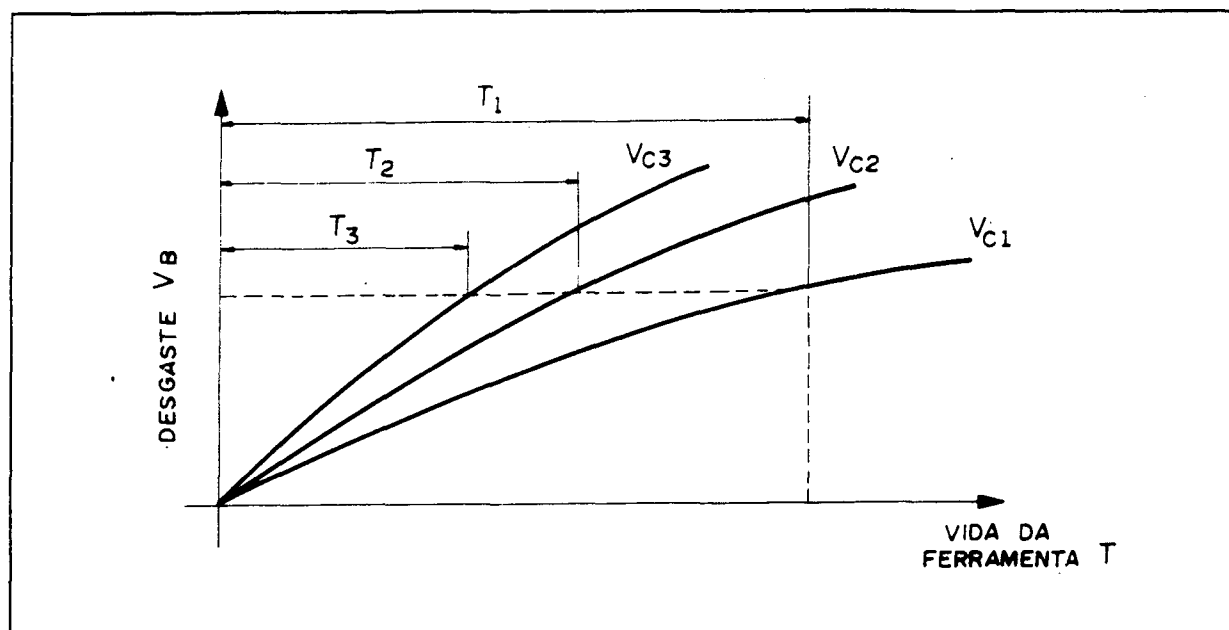


Fig. 5.16 - Influência da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta.

produtivo.

Mantendo-se as hipóteses anteriormente citadas, quando ocorre uma quebra e o critério de desgaste estipulado ainda não tenha sido atingido, significa que o aumento da força provocada por ele foi suficiente para promover o colapso da ferramenta. Como não há condições práticas de se medir o desgaste no instante imediatamente precedente à quebra, ele pode ser avaliado isolando esta variável na equação de Taylor. A única variável desconhecida neste caso é a vida da ferramenta. Admitindo-se que o tempo que ela durou até a quebra tenha sido medido,  $V_B$  pode ser calculado por:

$$V_{B_2} = \left( \frac{V_C}{C \cdot f^E \cdot a_p^F \cdot T_q^G} \right)^{\frac{1}{H}} \quad (5.63)$$

onde

$V_{B_2}$  = desgaste de flanco até o instante da quebra

$T_q$  = tempo de vida de ferramenta até a quebra.

O valor de  $V_B$  assim determinado será estipulado como novo critério de fim de vida da ferramenta na subsequente determinação de condições de usinagem.

Outra razão para a quebra, também a ser considerada, é a



força excessiva de corte provocada por especificação inadequada de avanço e/ou profundidade de corte. Isto significa que a força máxima de corte definida na restrição de força foi superestimada. Para analisar este ponto, a força de corte foi classificada no sistema em três níveis:

$FC_{max}$   $\Rightarrow$  Força de corte suficiente para provocar a quebra da ferramenta. É uma característica da ferramenta e independe do processo. É função da máxima tensão admissível pelo material da ferrameta.

$FC_{adm}$   $\Rightarrow$  Força de corte admissível definida para o processo. É função das características da máquina, dispositivos de fixação, ou tipo de operação (desbaste ou acabamento). É a variável utilizada no módulo de restrição de força e seu valor é estabelecido pelas limitações do processo ou pelo usuário do sistema.

$FC_{ini}$   $\Rightarrow$  Força inicial de corte. Força calculada pela fórmula de Kienzle que depende do avanço e da profundidade de corte. É a força teórica para o início do corte, com ferramenta nova e, portanto, sem considerar o seu desgaste.

Para que a probabilidade de quebra da ferramenta se mantenha baixa, é recomendável a situação:

$$FC_{ini} \leq FC_{adm} \quad (5.64)$$

A ocorrência de quebra pode significar que esta condição não está satisfeita, como esquematizado na figura 5.17.

Como o incremento da força de corte em função do desgaste tem um comportamento bastante próximo ao linear, na situação ideal, a força máxima  $FC_{max}$  só deveria ser atingida no desgaste correspondente à vida prevista para a ferramenta ( $VB_1$  nesta figura). A quebra da ferramenta significa que esta força foi atingida antes de alcançar o desgaste esperado  $VB_1$  e tem, então

de ser corrigida. Tendo-se conhecimento do tempo de uso da ferramenta até a quebra, determina-se teoricamente o desgaste  $VB_2$  até este instante, como dedução feita para a equação (29). Para o desgaste  $VB_1$ , inicialmente previsto para o fim de vida da ferramenta, a parcela de força que excederia à força admissível, caso a quebra não tivesse ocorrido, pode ser calculada extrapolando-se a curva de força até este ponto, ou seja:

$$\Delta F = \frac{(VB_1 - VB_2)(FC_{\max} - FC_{ini})}{VB_2} - FC_{\max} \quad (5.65)$$

onde

$\Delta F$  = força excedente

$VB_1$  = marca de desgaste previsto

$VB_2$  = marca de desgaste até a quebra

Portanto, considerando a linearidade do comportamento da força, para que a força de corte seja igual à força admissível no fim da vida da ferramenta, a nova condição de força de corte

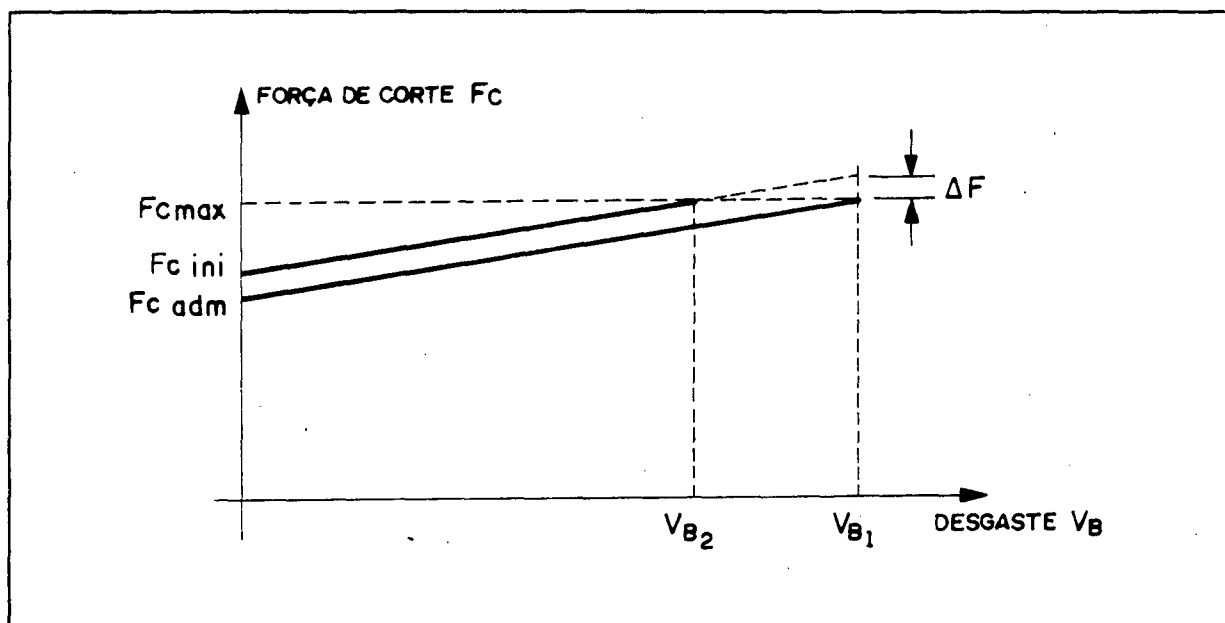


Fig. 5.17 - Influência do desgaste sobre a força de corte

admissível  $FC_{adm}$  (a ser aplicada em "restrição de força") deve assumir o valor da força inicial de corte (calculada com as condições de corte que proporcionaram a quebra) deduzida desta

parcela, ou seja:

$$FC_{adm} = FC_{ini} - \Delta F \quad (5.66)$$

Pelo visto até aqui, as causas que se admite para quebra de ferramenta são :

- escolha inadequada para o critério de fim de vida da ferramenta ( $V_B$  muito alto).
- especificação incorreta da força máxima no corte ( $a_p$  e  $f$  muito altos).

Como as duas situações foram analisadas separadamente e não há indicação sobre qual dos motivos recai maior responsabilidade no caso de ocorrência de quebra, a técnica de correção para ambos os casos tem de ser aplicada. Duas possibilidades existem para se fazer isso. A primeira seria fazer a redução em ambas as variáveis ( $V_B$  e  $F_{max}$ ) como se cada uma delas fosse isoladamente responsável pela falha da ferramenta. Em outra possibilidade, distribui-se igualmente a responsabilidade para os dois fatores. No primeiro caso joga-se com a segurança, o que significa que reduzindo suficientemente todos os parâmetros de corte, haverá pouca chance de ocorrer nova quebra. Já no segundo caso, embora haja maior probabilidade de nova ocorrência de quebra, se ela não ocorrer, os valores adotados como condições de corte estarão mais próximos dos ótimos. Nesta segunda opção, os valores a serem corrigidos para o critério de vida da ferramenta e força máxima admitida no corte, seriam calculados, respectivamente por (fig. 5.17):

$$V_B = \frac{V_{B_1} + V_{B_2}}{2} \quad (5.67)$$

e

$$FC_{adm} = FC_{ini} - \frac{\Delta F}{2} \quad (5.68)$$

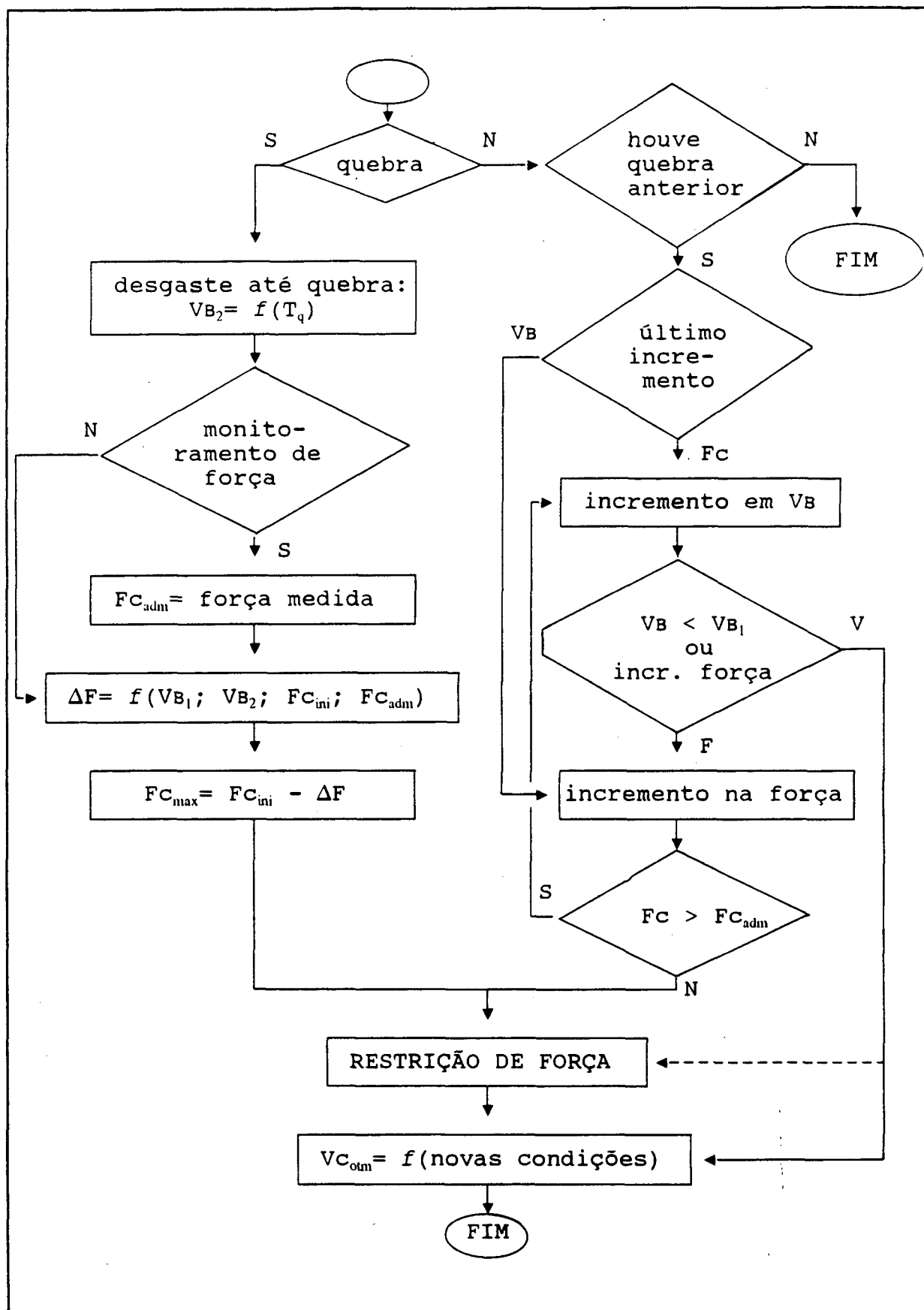


Fig. 5.18 - Otimização dos parâmetros considerando quebra de ferramenta.

Feitas as devidas correções, torna-se então necessário otimizar as variáveis do processo (avanço, profundidade de corte e critério de vida). A figura 5.18 apresenta a metodologia adotada para este fim. Quando ocorre a primeira quebra, o procedimento tem início com a redução dos parâmetros de usinagem conforme já descrito. Após esta correção, não ocorrendo mais quebras, o sistema começa o processo de otimização de  $V_B$  e  $F_{c_{max}}$  fazendo incrementos sucessivos e alternados nestas variáveis, até que nova quebra venha a ocorrer ou os valores originais sejam novamente atingidos. A variável que sofreu o último incremento antes de nova quebra é considerada responsável por ela e o seu valor atingido antes do último incremento é compreendido como sendo o valor limite para a mesma. O aumento incremental continua a partir daí apenas na outra variável até que também o seu valor limite seja encontrado como decorrência de quebras ou até atingir seu valor original.

## CAPÍTULO VI

### Características do Sistema Computacional

A implementação da metodologia proposta em um sistema computacional procura seguir a tendência atual de aplicação de microcomputadores tipo pessoal (PC) na automação de funções dentro de um meio produtivo envolvendo processos de fabricação, a exemplo do que acontece com outros elementos de auxílio à fabricação apoiados por computador, como o planejamento de processos, programação automática de máquinas de comando numérico, integração com sistemas CAD, etc. As características planejadas e aplicadas ao sistema computacional, conforme descrição neste capítulo, visam facilitar o trabalho em operações de entrada e saída de dados, possibilitar o interfaceamento com outros sistemas auxiliados por computador e contemplar a diversidade que normalmente ocorre entre os processos.

#### 6.1. Estrutura Modular

A constante inovação nos métodos de determinação e otimização de condições de corte para o processo de usinagem fazem com que qualquer sistema que se proponha a esse fim seja sempre passível de ampliações. A facilidade de adaptação a outros processos, a possibilidade de utilização de diferentes modelos que os represente ou a utilização de novos métodos de estimativa de parâmetros ou técnicas de otimização são aspectos relevantes no trabalho desenvolvido. A elaboração do sistema computacional através de uma estrutura modular composta de unidades independentes e interligadas por um módulo principal para o controle das funções do sistema tem o intuito de atingir esta característica. A figura 6.1 apresenta as unidades que compõem a estrutura global. A linguagem computacional adotada foi o Turbo Pascal, por apresentar características favoráveis a esse tipo de

estrutura.

As unidades que trabalham com "entrada e saída de dados" são responsáveis pela criação de janelas na tela do computador contendo menus e sub-menus para seleção de opções de trabalho. No módulo de "manipulação de cadastros", elementos cadastrados no sistema (item 6.3.1) são apresentados em forma de listas cujos componentes ficam disponíveis para opções de seleção, consulta, impressão ou inclusão de mais elementos. Os módulos de "definição de constantes e variáveis" envolvidas no programa, "controle de arquivos" e documentação de dados através da "apresentação gráfica" são mantidos em unidades separadas para dar maior facilidade a adaptações no sistema. A modularidade das unidades com operações envolvendo "determinação dos dados de corte", "restrições" impostas nestes cálculos, "definição de funções matemáticas" aplicadas aos mesmos, e "determinação de parâmetros do modelo" adotado para representar o comportamento do processo torna o sistema flexível à implementação de outros meios para os mesmos fins. Também o módulo de "dados recomendados" pode ser ampliado conforme a necessidade, já que os formatos das tabelas fornecidas principalmente por fabricantes de ferramentas e manuais de usinagem são bastante variados.

## **6.2. Seleção das Funções do Sistema**

As funções atribuídas ao sistema são acessadas por meio de opções disponíveis em uma estrutura de menus que são organizados segundo a classificação apresentada a seguir.

### **6.2.1. Geração de condições de usinagem**

Esta opção do menu contém o programa principal onde está inserida a metodologia desenvolvida para geração de parâmetros de corte.

Toda a operação a ser realizada no sistema estará sempre relacionada ao elemento denominado tarefa. Uma tarefa contém as

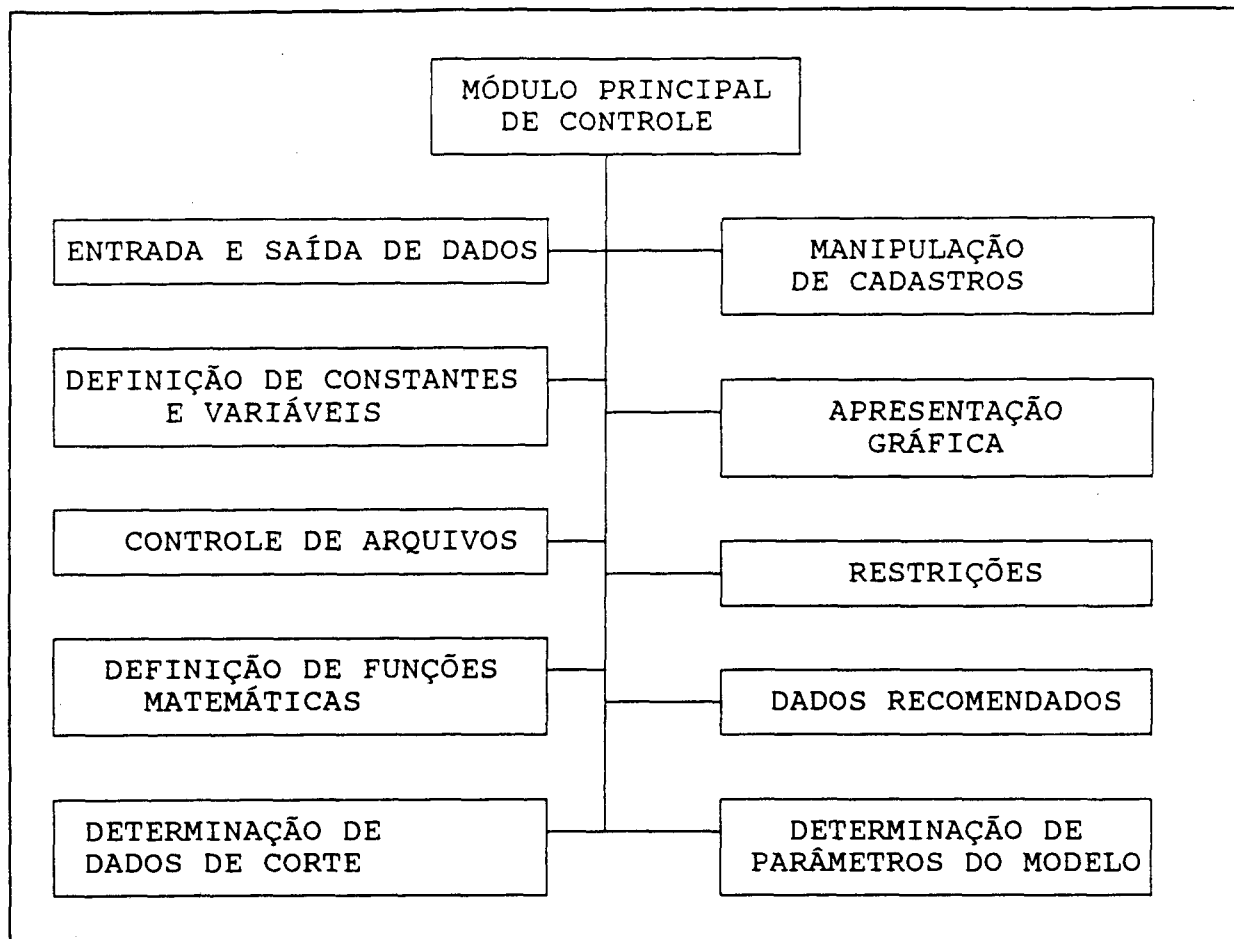


Fig. 6.1 - Módulos do Sistema Computacional

definições necessárias ao processamento e os itens que compõem o seu conteúdo são apresentados na figura 6.2. Assim, a geração de condições de corte se dará mediante a seleção da respectiva tarefa, que pode estar previamente definida ou ser estabelecida pela opção "Definição da tarefa". A possibilidade de seleção de uma tarefa já definida simplifica o trabalho de geração de condições de corte onde as características do processo permanecem constantes.

Na definição da tarefa, a seleção de itens que podem ser cadastrados, como peça a ser usinada, ferramenta de corte ou máquina para realizar a operação, é feita utilizando-se a estrutura de listas conforme apresentado no item anterior. Para auxiliar na seleção da ferramenta, são indicadas aquelas que já foram utilizadas em outras tarefas no corte do mesmo material da peça selecionada.

A configuração do sistema que está associada a cada tarefa



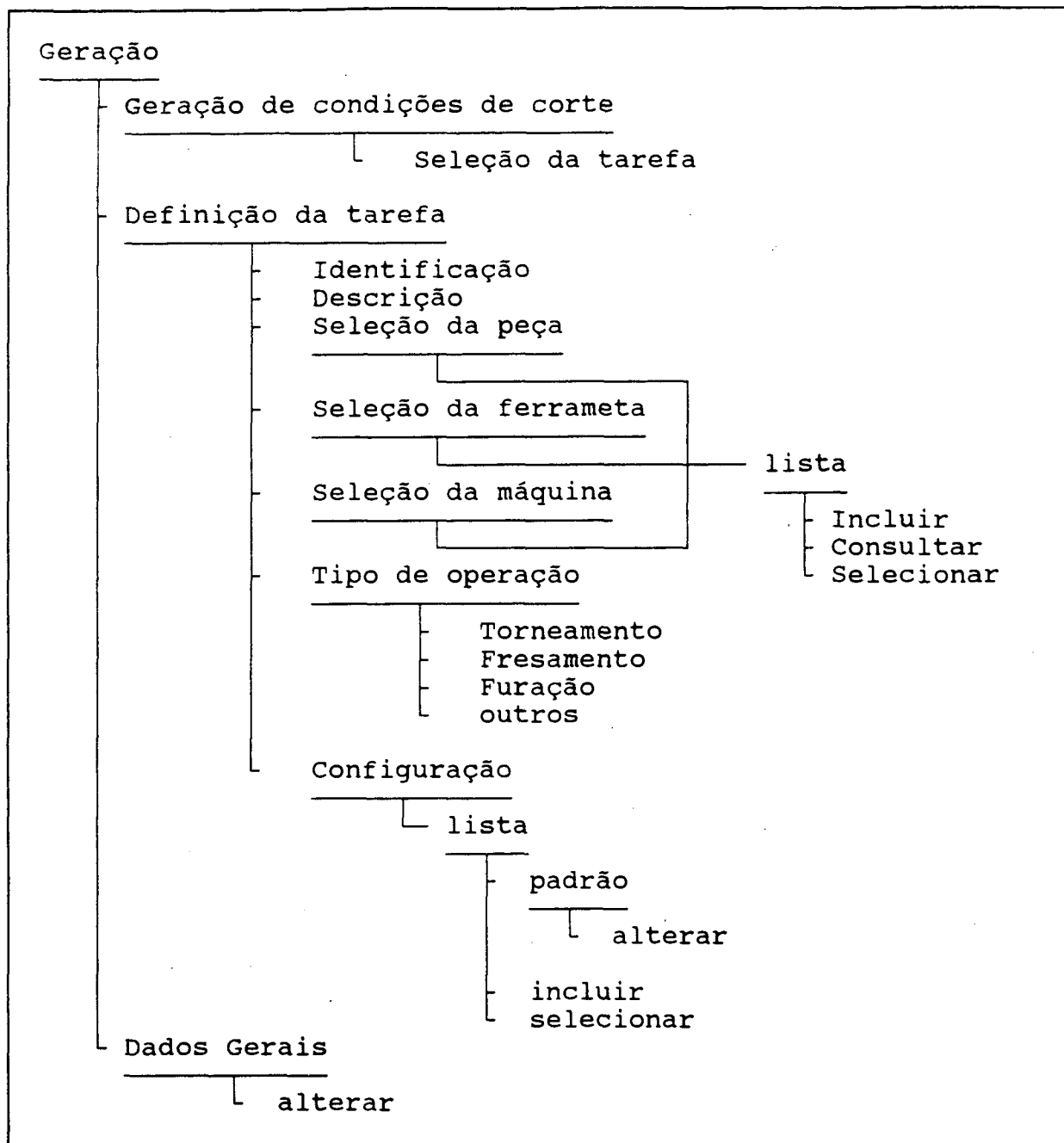


Fig. 6.2 - Opções disponíveis no menu de "Geração"

estabelece a forma de procedimento para o processamento dos dados, conforme pode ser visto no item 6.2.3.

### 6.2.2. Realimentação

A otimização dos parâmetros de corte baseia-se na experiência. Esta experiência é armazenada pela realimentação de resultados obtidos da utilização no processo de usinagem de

condições de corte geradas em cada aplicação (identificada por uma tarefa). Para a entrada de dados de corte adotados pode-se optar pela seleção dos valores calculados mais recentemente ou pela repetição de dados já realimentados anteriormente. Também é possível informar ao sistema outras condições adotadas que não aquelas por ele geradas. Os dados referentes a resultados obtidos estão relacionados na figura 6.3.

### 6.2.3. Configuração do Sistema

Por ser a usinagem um processo complexo, não se pode generalizar conceitos. Por isso, procedimentos adotados para um determinado caso podem não ser adequados para outras situações. Para transpor essa dificuldade e dar diversificação de possibilidades de manipulação dos dados, sob a opção *configuração* (fig. 6.4) é permitido selecionar o procedimento mais adequado para cada caso. Os pontos que apresentam processamento alternativo são:

#### a) Critério de otimização:

Conforme visto no terceiro capítulo, a otimização da velocidade de corte pode seguir dois critérios: mínimo custo ou máxima produção. Estes valores definem uma faixa ótima para a velocidade. Para permitir o uso de qualquer valor dentro desta faixa, definiu-se o índice de otimização ( $I_o$ ) que varia entre zero e dez, onde zero representa o valor mínimo da faixa (velocidade ótima para mínimo custo) e dez o valor máximo (velocidade ótima para máxima produção). Portanto, a velocidade ótima é assim calculada:

$$V_{C_{otm}} = V_{C_{otm,c}} + I_o \cdot \frac{(V_{C_{otm,p}} - V_{C_{otm,c}})}{10} \quad (6.1)$$

onde

$I_o$  = índice de otimização

$V_{C_{otm}}$  = velocidade ótima a ser adotada

$V_{C_{otm,c}}$  = velocidade ótima para mínimo custo

$V_{C_{otm,p}}$  = velocidade ótima para máxima produção

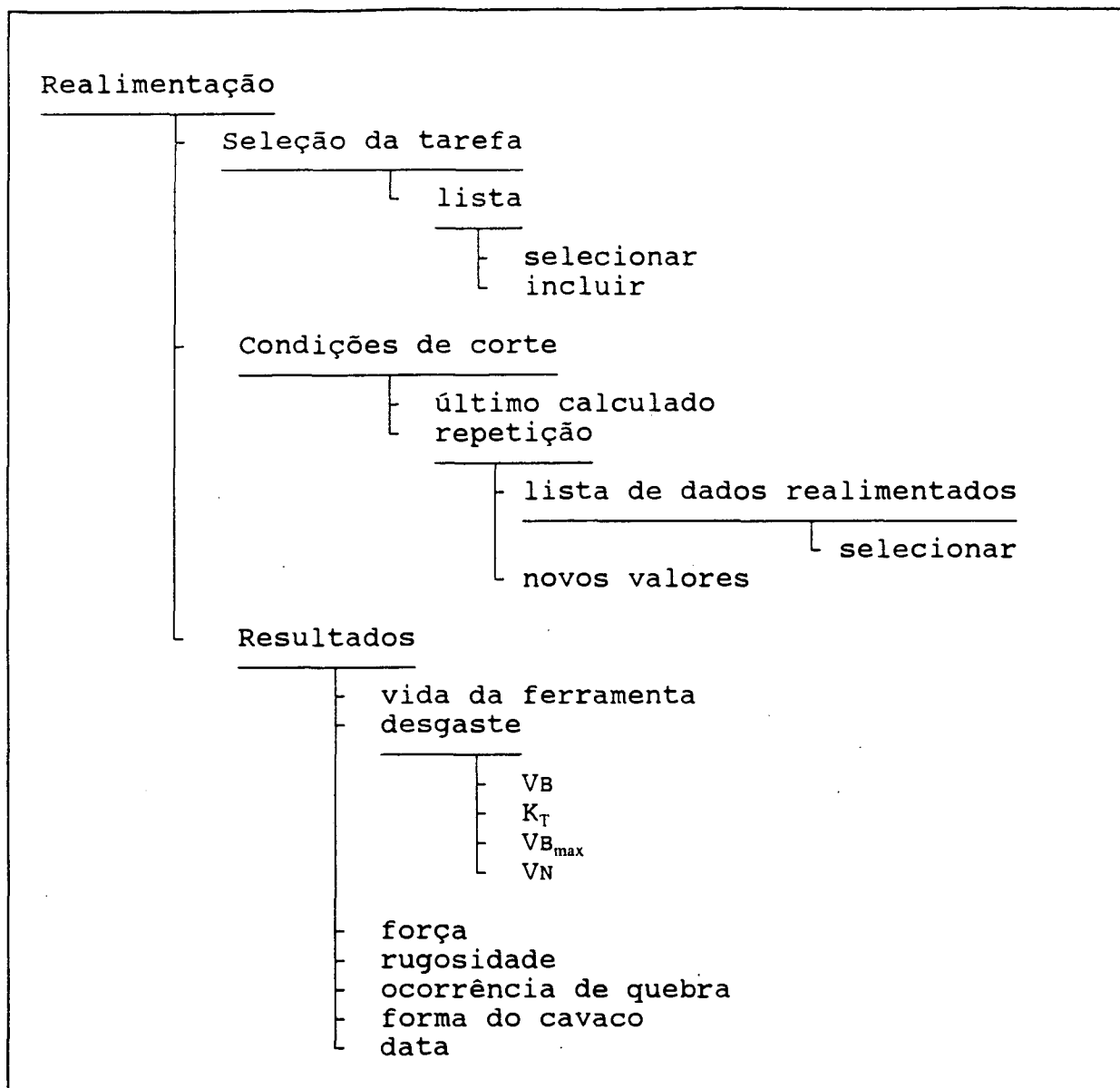


Fig. 6.3 - Opções disponíveis no menu de "Realimentação"

O critério de otimização serve para identificar o tempo ótimo de vida útil da ferramenta. O cálculo da velocidade vem como consequência deste tempo e das condições de avanço e profundidade de corte inferidas pelo processamento. Entretanto, em casos particulares, a pré-determinação deste tempo é uma alternativa necessária. Exemplo disso é a produção de lotes de peças em sistemas flexíveis de fabricação. Nestas circunstâncias, como cada lote exige uma preparação do ferramental necessário, é interessante que seja feito um planejamento da produção de forma a não haver necessidade de parar o processo para realizar substituições de ferramentas antes do final da execução de todo

o lote. A vida da ferramenta neste caso deve assumir o valor do tempo total de usinagem, que pode ser calculado como função da geometria da peça e condições de avanço e profundidade de corte pré-determinadas.

b) Critério fim de vida:

Refere-se ao critério adotado para determinar o fim da vida da ferramenta. Os critérios considerados foram: desgaste de flanco, desgaste de cratera, rugosidade da peça usinada e força de corte.

c) Limites de avanço:

Os valores máximos e mínimo admissíveis para o avanço podem ser provenientes dos limites estabelecidos pela máquina ferramenta ou de tabelas de dados recomendados (valores extremos). Estes limites podem também serem pré-fixados considerando-se outros critérios, como por exemplo, o acabamento superficial requerido.

d) Limites de profundidade de corte:

Quando a largura de corte máxima recomendada é informada pelo fabricante da ferramenta, a profundidade máxima de corte que dela deriva será:

$$ap_{\max} = b_{\max} \cdot \text{sen} \chi_r \quad (6.2)$$

onde

$ap_{\max}$  = limite superior para profundidade de corte

$b_{\max}$  = largura de corte máxima

$\chi_r$  = ângulo de posição da ferramenta

Em outros casos, este limite também pode ser indicado como função do comprimento da aresta de corte, ou seja:

$$ap_{\max} = x \cdot L \cdot \text{sen} \chi_r \quad (6.3)$$

onde

L = comprimento da aresta de corte

x = fator de multiplicação ( $0 < x < 1$ )

Para o limite inferior, uma possibilidade de definição da forma de cálculo é seguir recomendações como em [67], que indicam a profundidade mínima de corte como função do raio de cunha da ferramenta, que é o raio de arredondamento entre a superfície de folga e a superfície de saída:

$$a_{p_{\min}} = (2a_3) \cdot r_c \quad (6.4)$$

onde

$a_{p_{\min}}$  = limite inferior para profundidade de corte

$r_c$  = raio de cunha da ferramenta

Em tabelas de dados recomendados em que este parâmetro é indicado, os valores extremos também podem ser adotados como limites e para poder considerar outras formas de definição, o sistema ainda permite tomar valores pré-fixados tanto para a máxima como para a mínima profundidade de corte.

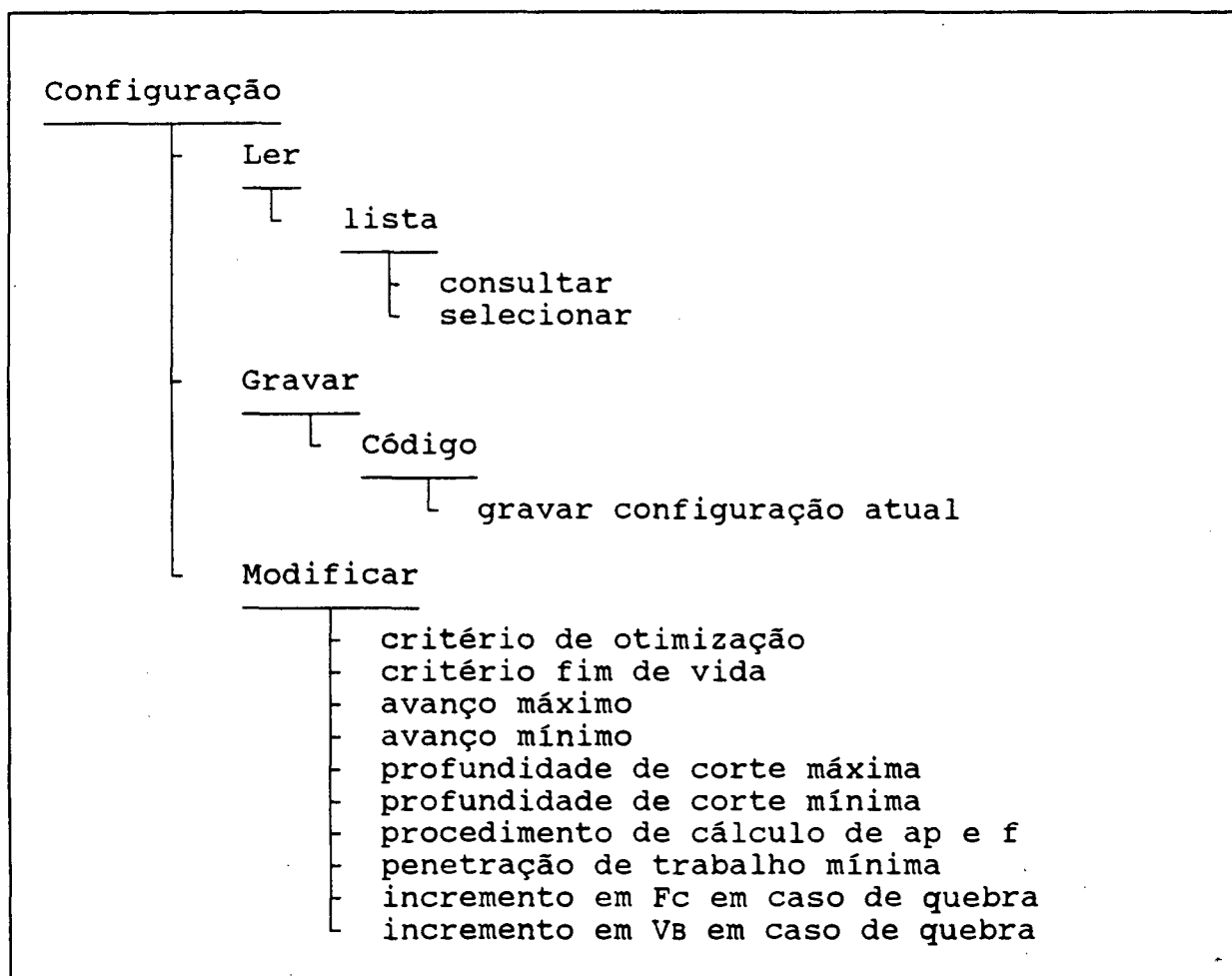


Fig. 6.4 - Opções disponíveis no menu de "Configuração"

e) Forma de cálculo de avanço e profundidade de corte:

Admitir os valores máximos como determinados acima para estes parâmetro é uma estratégia indicada para se obter melhores índices de produtividade. Entretanto outras limitações existem. Entre elas, as consideradas no sistema são a forma do cavaco e o índice de esbeltez.

A forma do cavaco |68| deve ser apropriada para prevenir problemas principalmente em processos automáticos, onde o volume de material removido é grande. Basicamente são as combinações de avanço e profundidade de corte que definem a forma do cavaco |42|. Armazenando-se no arquivo do sistema, a cada realimentação do mesmo, informações sobre a forma do cavaco obtido, definições posteriores da combinação de avanço e profundidade de corte podem ser estabelecidas através da reativação destes dados.

Outra forma de relacionar avanço e profundidade de corte é através do índice de esbeltez, que é assim definido |69|:

$$I_e = \frac{a_p}{f} \quad (6.5)$$

A imposição de um limite para este índice (nomalmente igual a 20 |70|) estabelece duas formas de cálculo de condições de usinagem: determinação inicial do avanço máximo admissível e profundidade de corte calculada pela relação acima; ou a situação inversa.

É importante observar que os procedimentos descritos até aqui não são necessariamente exclusivos. A livre escolha para as condições de avanço e profundidade de corte também é possível para que outros critérios de decisão não contemplados pelo sistema possam ser considerados.

f) Penetração de trabalho mínima:

Este parâmetro de corte é relacionado ao processo de fresamento e pode ser indicado pelo fabricante da ferramenta ou pré-fixado na configuração.

g) Considerações sobre a quebra de ferramenta:

Como visto no capítulo quinto, a tentativa de solução do

problema da quebra de ferramenta para condições de corte previamente adotadas implica na redução na força de corte máxima admissível e no critério de fim de vida da ferramenta (desgaste de flanco) para geração de novas condições de usinagem. Cessando a ocorrência de quebras, incrementos alternados nestas variáveis em determinações subsequentes de dados de corte são admitidos. Sob a opção de configuração, define-se o valor desses incrementos que podem ser em termos absolutos ou relativos.

h) Tempo de troca de ferramenta:

O tempo médio para substituir uma ferramenta é uma variável considerada na determinação de sua vida ótima. Este tempo é uma característica do processo. Em sistemas convencionais o tempo de troca pode considerar apenas a remoção da ferramenta desgastada e substituição pela nova ou também incluir o tempo de reafiação. Em processos automatizados, como máquinas com comando CNC e magazine de ferramentas com troca automática, apenas o tempo que o equipamento gasta para substituir uma ferramenta é considerado se no magazine houver uma igual a que deve ser substituída. Caso contrário, o tempo necessário para trocar a ferramenta no seu dispositivo de fixação deve ser acrescentado. De forma genérica, o tempo de troca de ferramenta pode ser expresso por:

$$t_t = n_f \cdot t_s + t_r \quad (6.6)$$

onde

$t_t$  = tempo de substituição ou reafiação de uma ferramenta

$n_f$  = número de ferramentas no suporte

$t_s$  = tempo de retirada e colocação do conjunto ferramenta/suporte na máquina

Portanto, o tempo de troca será definido como função de características da máquina e/ou ferramenta.

#### 6.2.4. Apresentação

Com a escolha desta opção, torna-se possível verificar o

conteúdo de todos os diferentes tipos de arquivos que o sistema trabalha, conforme relacionados na figura 6.5. Estes arquivos incluem dados alimentados no sistema (necessários à definição da tarefa), dados por ele determinados (dados de corte e parâmetros da equação de Taylor) e dados de realimentação (resultados de aplicações de condições de corte geradas).

Para melhor análise destas informações, procedimentos para visualização gráfica envolvendo dados de corte gerados e consequentes respostas do processo de fabricação são apresentados.

#### **6.2.5. Dados recomendados**

A introdução e/ou visualização de dados de corte recomendados por manuais ou fabricantes de ferramentas é feita nesta opção. Conforme visto no capítulo anterior, existem diferentes formas de indicação destes valores, e isto torna necessário particularizar o tipo de tabela que se deseja trabalhar. A forma de manipulação das tabelas e o conteúdo das mesmas estão indicados na figura 6.6. Para dados recomendados que têm como fonte bancos de dados de usinagem, as informações aqui tratadas são os coeficientes da equação de Taylor.

### **6.3. Estrutura de Arquivos**

Este item expõe a disposição dos arquivos usados como meio de armazenamento de dados gerados pelo sistema ou nele introduzidos durante suas aplicações.

#### **6.3.1. Cadastros**

Cadastros são arquivos que contêm informações necessárias ao processamento de dados referentes ao processo produtivo e são alimentados no sistema pelo usuário. O uso de elementos



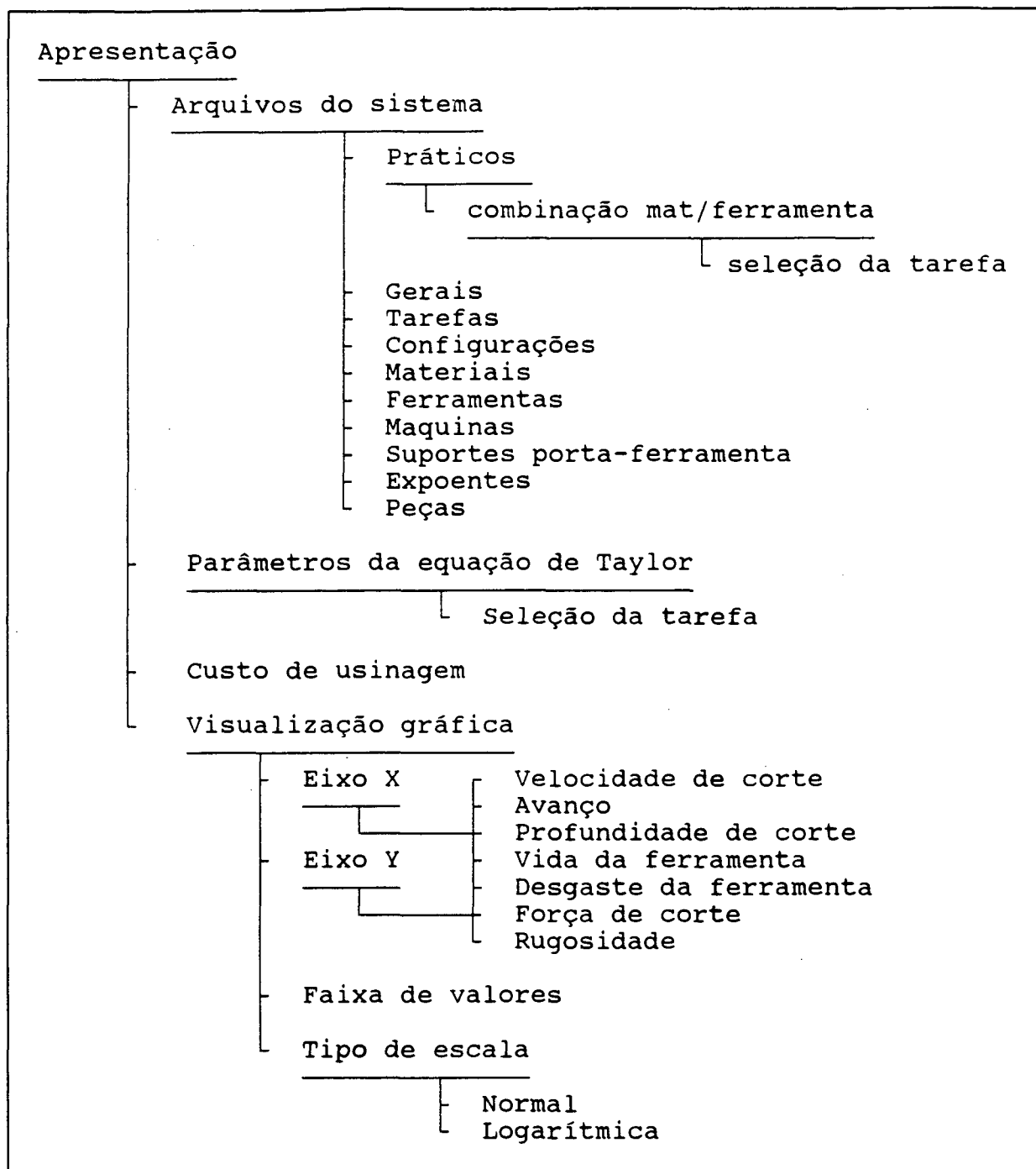


Fig. 6.5 - Opções disponíveis no menu de "Apresentação"

cadastrados simplifica o trabalho de definição da tarefa, pois os mesmos dados podem servir para diferentes tarefas, evitando redefinições. Os tipos de cadastros contidos no sistema são apresentados a seguir e suas estruturas indicadas pelas figuras 6.7 a 6.11:

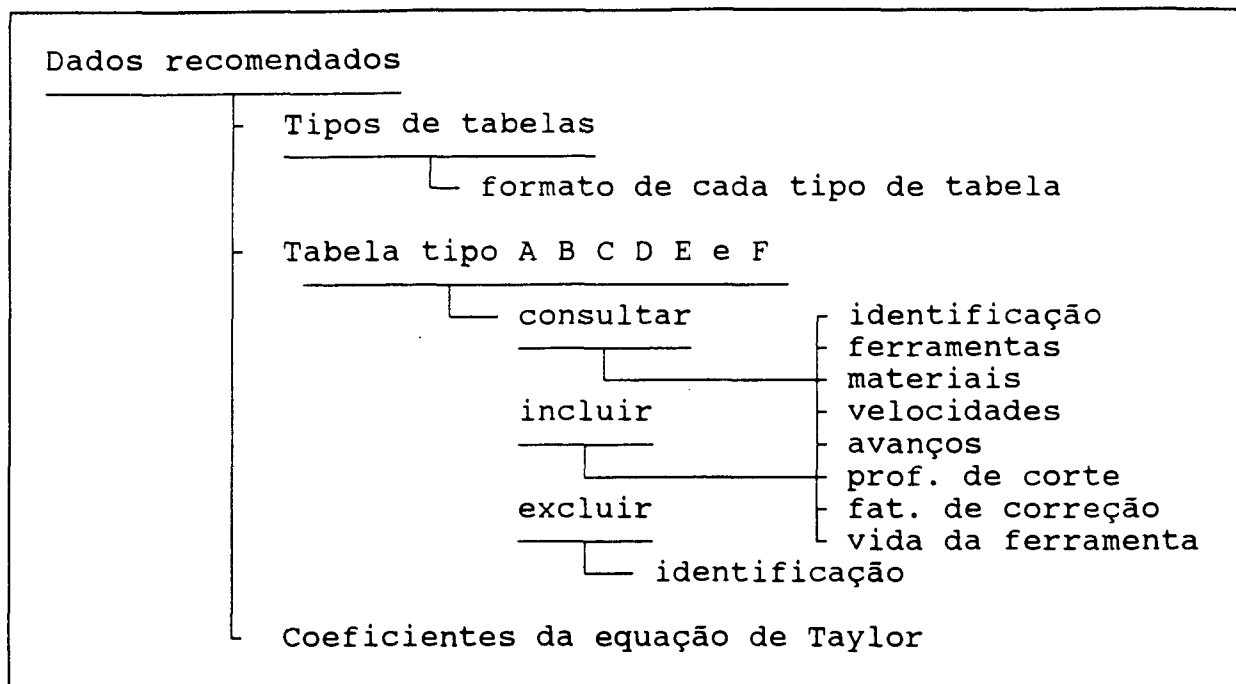


Fig. 6.6 - Opções disponíveis no menu de "Dados recomendados"

a) material da peça (fig. 6.7):

A identificação do material da peça a ser usinada é feita por dois registros deste arquivo. O primeiro contém o seu código que é usado como elemento de ligação para relacionar com outros arquivos como aqueles referentes a tarefas definidas ou coeficientes da equação de Taylor. O segundo serve para fazer uma breve descrição do material e auxilia na sua identificação. Para operações destes arquivos como consulta ou seleção, utiliza-se o procedimento de manipulação de listas como anteriormente descrito, onde a relação de materiais transcritos é apresentada pela indicação dos campos de *código* e *descrição* de seus arquivos. Também fazem parte desse arquivo um registro para enquadrá-lo numa classificação geral dos materiais e outros que contém suas principais características bem como custo de aquisição.

b) ferramenta de corte (fig. 6.7):

A exemplo do que também acontece com outros tipos de arquivos descritos adiante, os registros *código* e *descrição* do arquivo projetado para guardar informações sobre ferramentas de corte funcionam com o mesmo objetivo e da mesma forma como no caso de arquivo de materiais. Os dados contidos nos campos ou

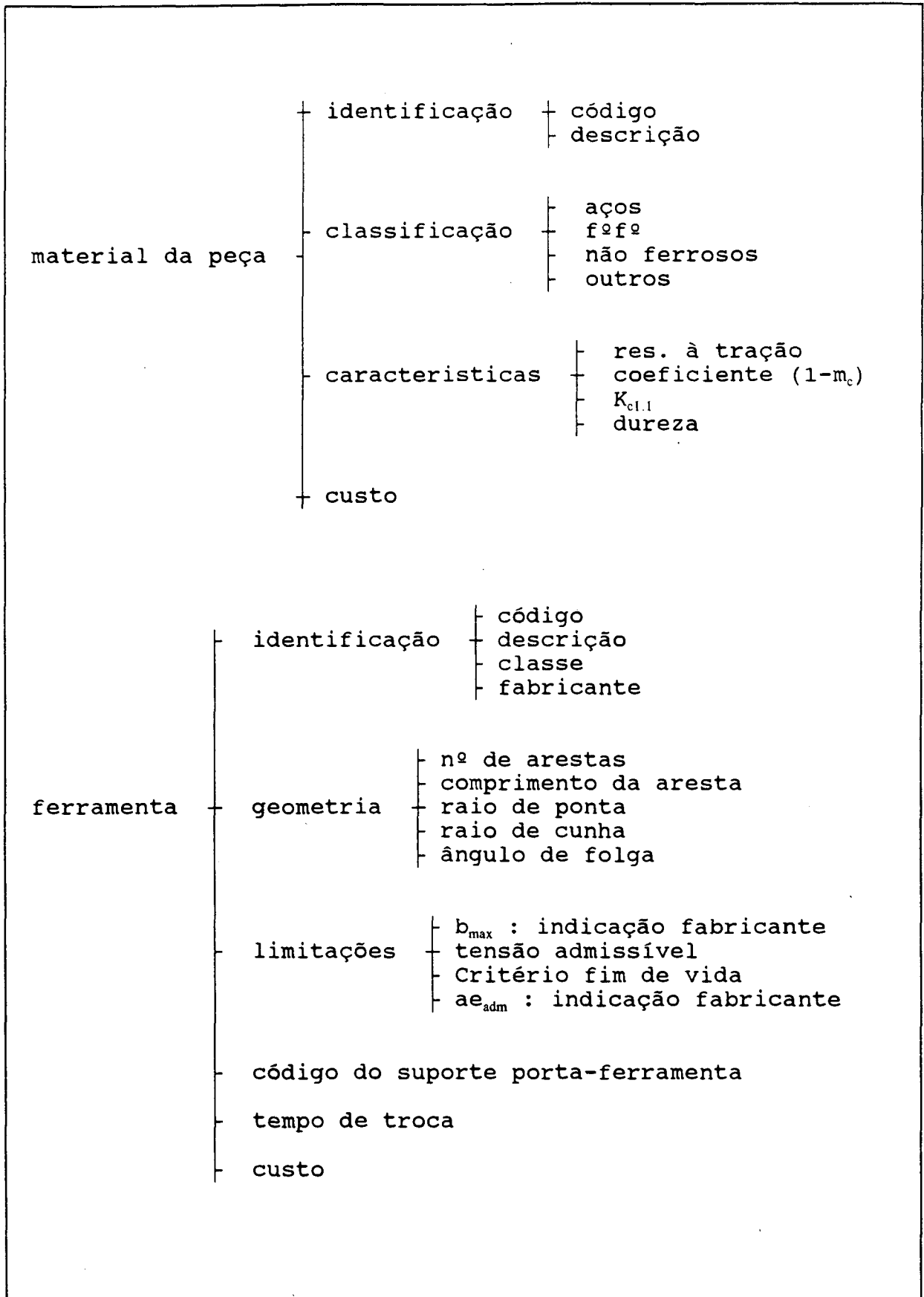


Fig. 6.7 - Registros dos arquivos de material e ferramenta

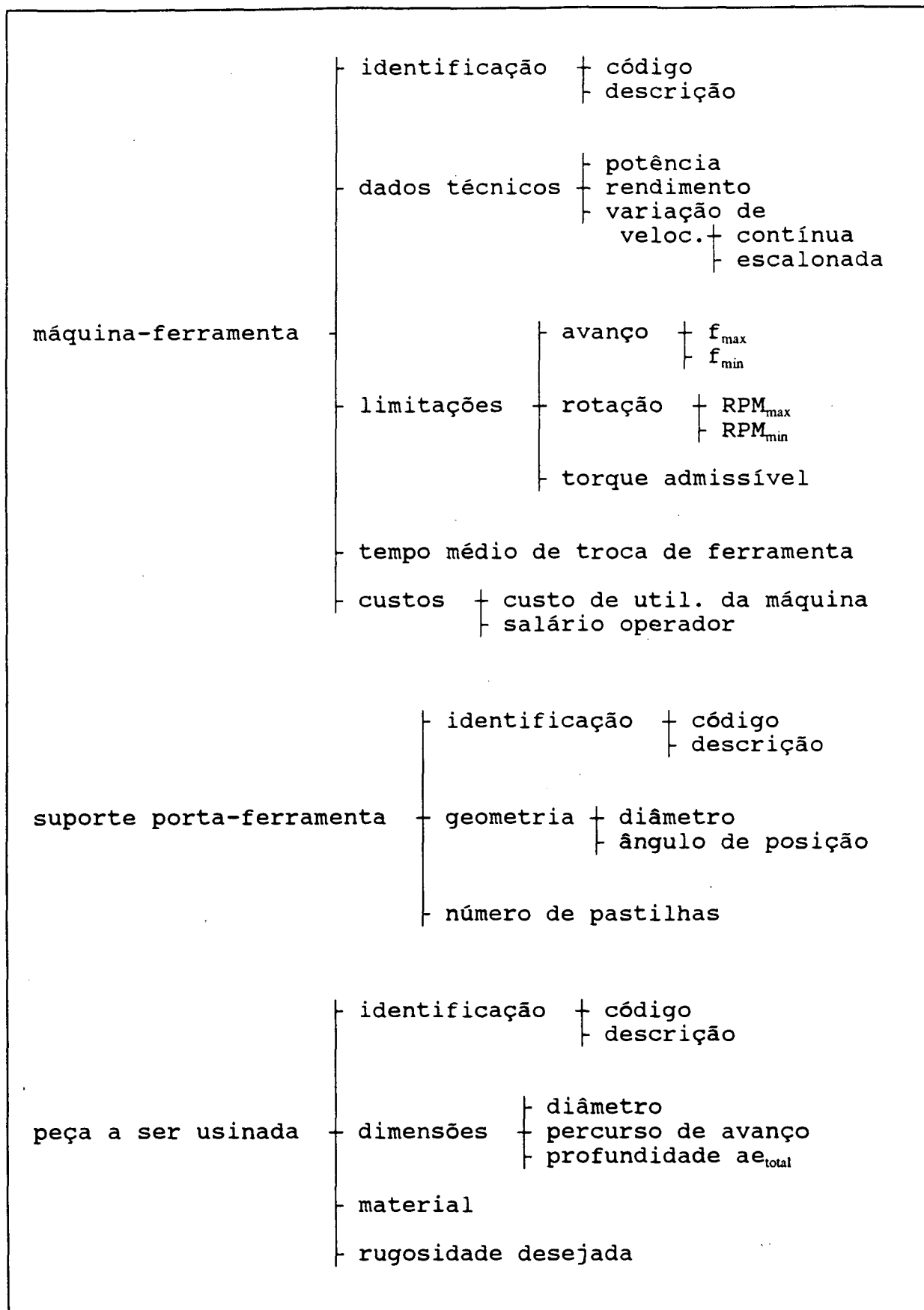


Fig. 6.8 - Registros dos arquivos de máquinas, suportes e peças

registros onde estão as características geométricas e as limitações da ferramenta são informações necessárias ao processamento na determinação de condições de usinagem.

O conteúdo do registro *código do suporte porta-ferramenta* é o mesmo do registro *código* contido no arquivo definido para armazenar as características do tipo de suporte usado para a fixação da ferramenta (item "d"). É portanto o ponto de ligação entre estes dois tipos de arquivos. Além do registro para armazenar o custo da ferramenta, também contém este arquivo o registro *tempo de troca*, que refere-se ao tempo médio necessário para substituir uma ferramenta no seu suporte.

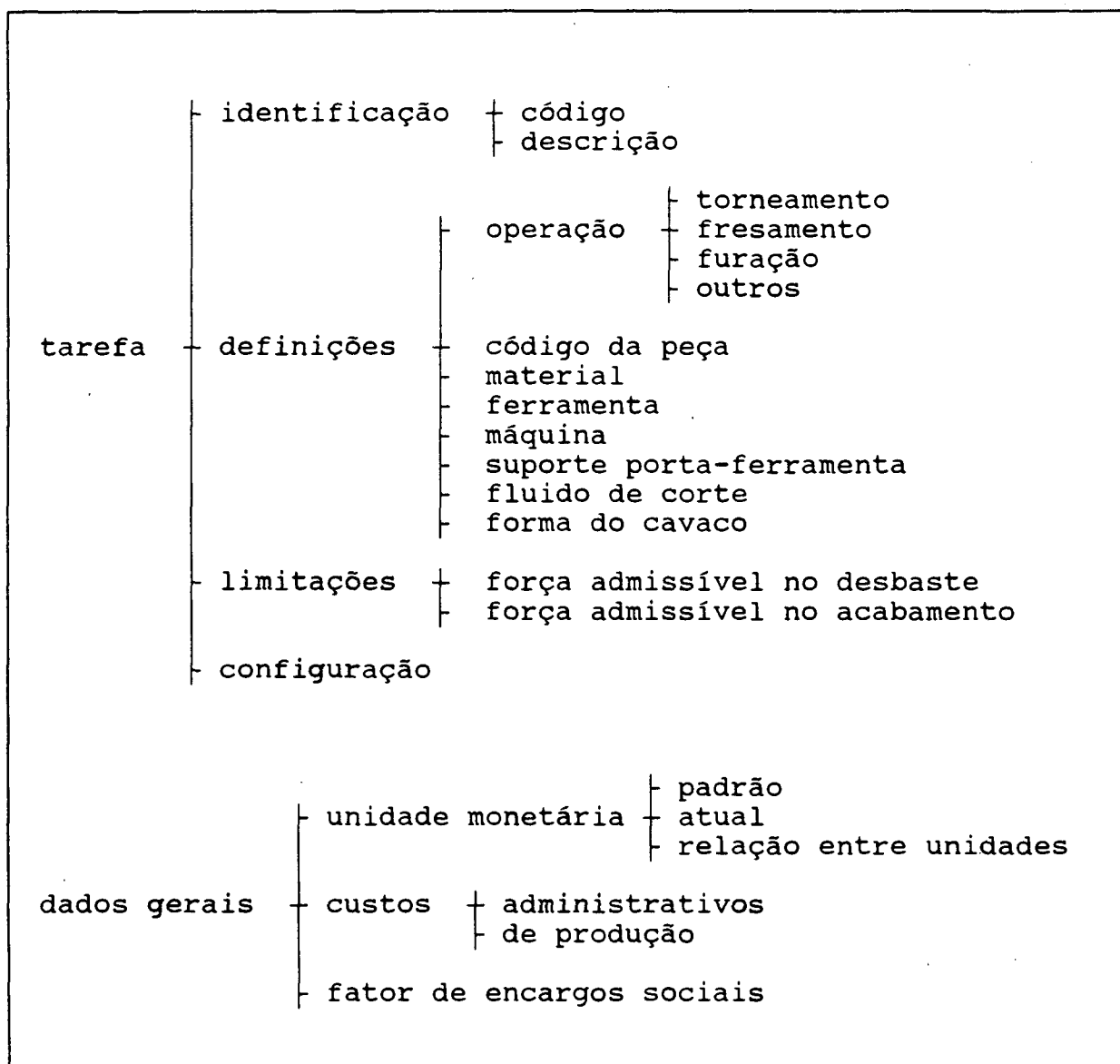


Fig. 6.9 - Registros dos arquivos de tarefas e dados gerais

c) Máquina-ferramenta (fig. 6.8):

De forma semelhante aos arquivos de materiais e ferramentas, os arquivos com as informações sobre as máquinas disponíveis também apresentam os registros de identificação, características e limitações. O campo que estabelece a forma de variação da velocidade de rotação do eixo árvore pode conter no seu conteúdo o valor das rotações quando a variação for escalonada ou os seus valores extremos quando a máquina apresentar a possibilidade de variar a velocidade de rotação e conseqüentemente a velocidade de corte de forma contínua.

d) Suporte porta-ferramenta (fig. 6.8):

As informações a respeito do suporte da ferramenta são armazenadas em arquivo próprio porque este acessório define características do processo. Largura de corte e espessura de corte são grandezas que dependem do ângulo de posição da ferramenta, que por sua vez é função da posição de fixação da ferramenta neste elemento. Para os casos de fresamento com pastilhas intercambiáveis, o diâmetro final da ferramenta, usado para determinar a velocidade de corte, depende essencialmente da dimensão deste suporte.

e) Peça a ser usinada (fig. 6.8):

Além dos de identificação, este arquivo contém registros para as dimensões de uma geometria simples de operações de desbaste ou acabamento, registro para identificar a rugosidade desejada e o registro para especificar o material, que está relacionado com algum dos arquivos de materiais.

f) Tarefa (fig. 6.9):

O arquivo para armazenamento de dados sobre uma tarefa específica apresenta basicamente registros que fazem o encadeamento entre os demais arquivos, como por exemplo os que relacionam com a escolha da peça, ferramenta ou máquina. Também está reservado neste arquivo espaço para informações sobre o tipo de operação a ser executada e limitações de força para consideração nas restrições.

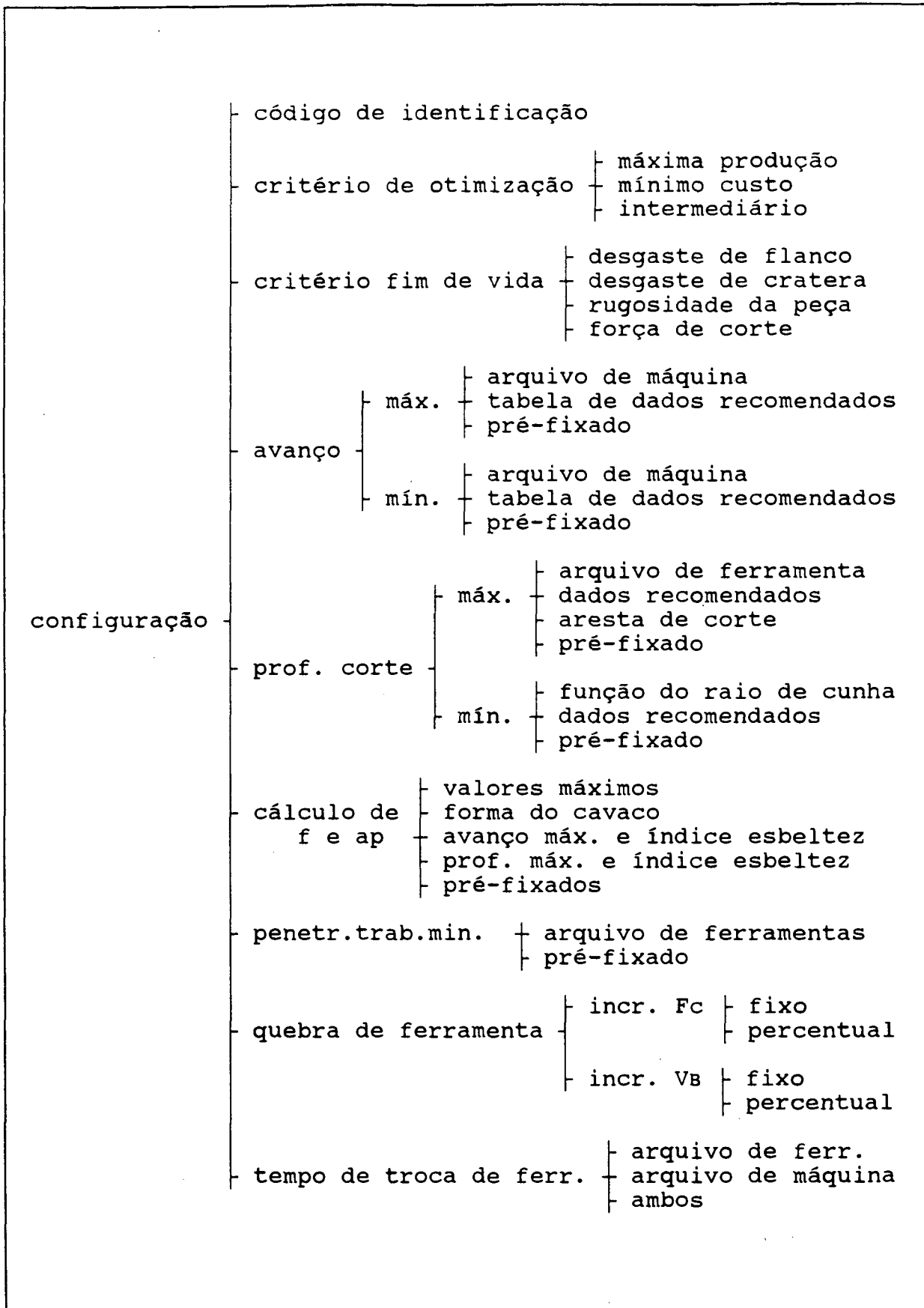


Fig. 6.10 - Registros dos arquivos de configurações

tabela tipo A	nome		
	materiais (máximo 10)		
	ferramentas (máximo 10)		
	avanços (máximo 10)	+ $f_1$	
		- $f_2$	
	Velocidades de corte (máximo 10x10)	+ $Vc_1$	
		- $Vc_2$	
fatores de correção (máximo 10)	+ vida desejada		
	- FC		
	número de ferramentas definidas		
	número de materiais definidos		
	número de fatores de correção definidos		
tabela tipo B	nome		
	materiais (máximo 10)		
	ferramentas (máximo 10)		
	vida prevista para os dados da tabela		
	velocidades de corte (máximo 10x10)	+ Vc para a vida prevista	
		+ Vc mínima	
		- Vc máxima	
fator de correção (10)	+ avanço		
	- FC		
	número de ferramentas definidas		
	número de materiais definidos		
	número de fatores de correção definidos		
tabela tipo C	nome		
	materiais (máximo 10)		
	ferramentas (máximo 10)		
	condições de corte (máximo 10x10)	+ veloc. de corte	+ Vc mín.
			- Vc máx.
	+ avanço		
	número de ferramentas definidas		
	número de materiais definidos		

Fig. 6.11 - Registros dos arquivos de dados recomendados



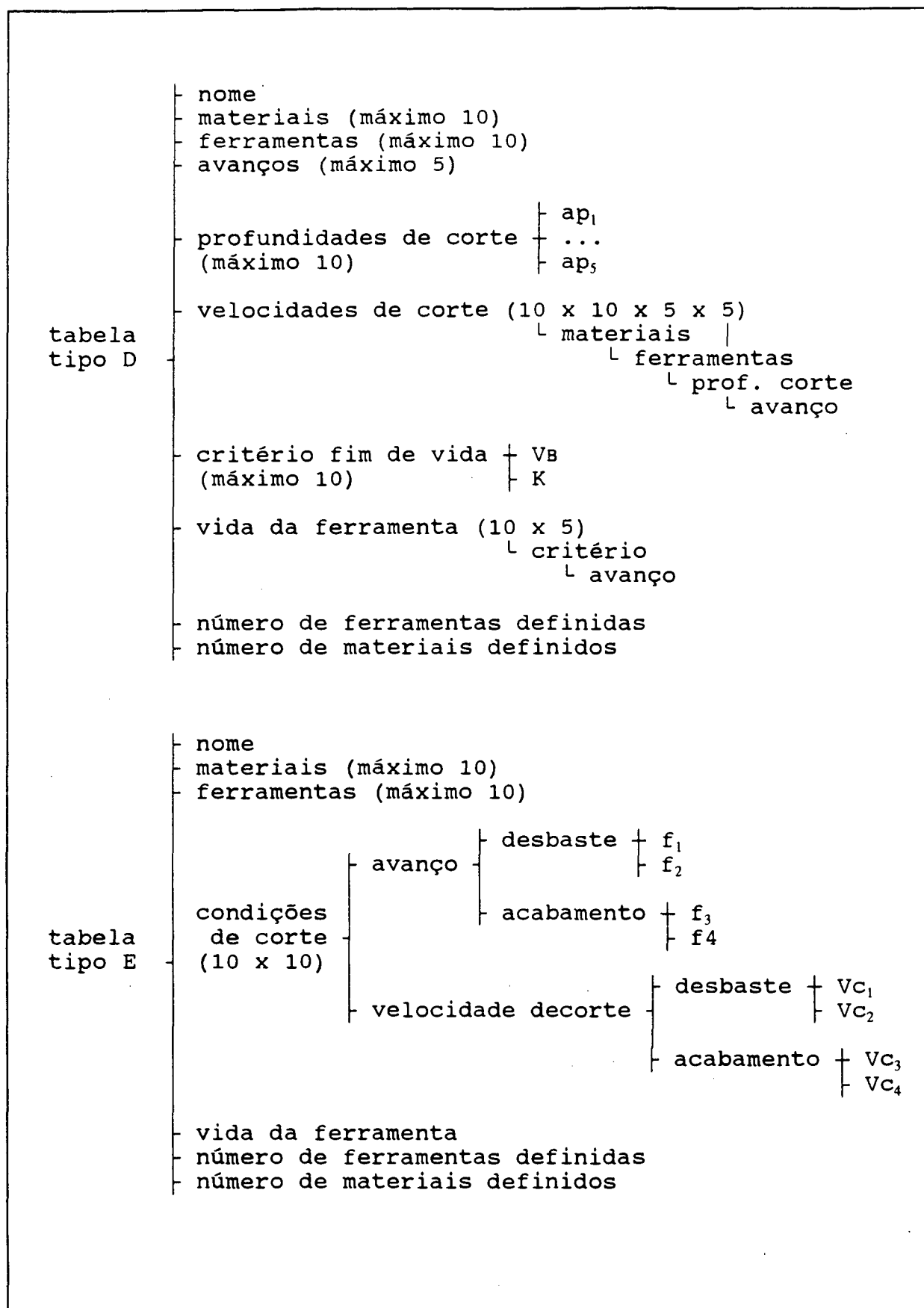


Fig. 6.11 - Registros dos arquivos de dados recomendados  
(continuação)

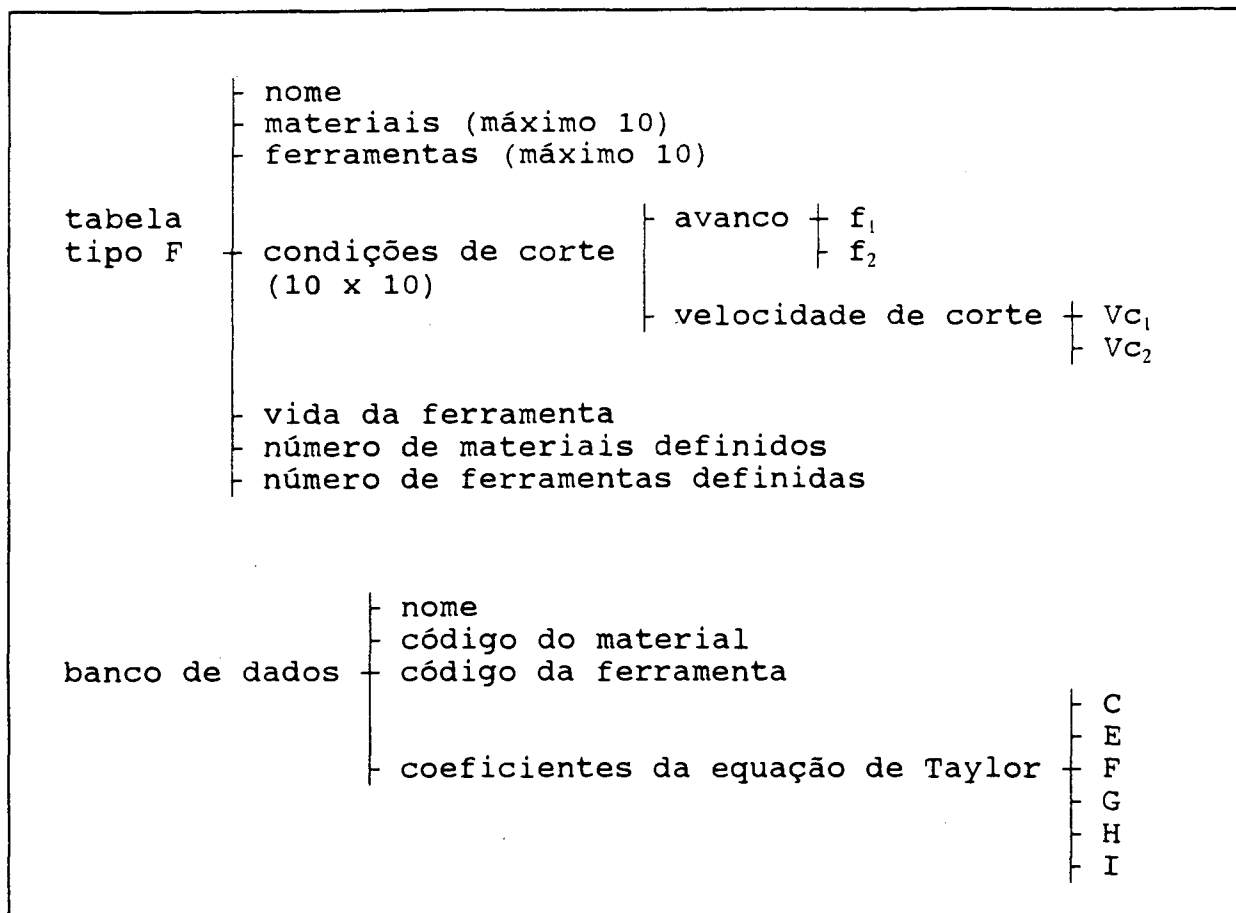


Fig. 6.11 - Registros dos arquivos de dados recomendados (continuação)

g) Dados gerais (fig. 6.9):

Os dados mantidos neste arquivo destinam-se a determinação dos custos elementares de usinagem. Custos administrativos e de produção assim como fator de encargos sociais são aplicados nos cálculos dos custos indiretos. A possibilidade de utilização de duas unidades monetárias, além de permitir a apresentação dos custos em duas moedas diferentes, é também uma forma de se fazer uma indexação destes custo, quando uma destas moedas é usada como referência ou padrão.

h) Configuração (fig. 6.10):

Manter arquivos para gravar os dados de diversas configurações do sistema (descritos no item 6.2.3) também reduz o trabalho de definição da tarefa, uma vez que cada processo de fabricação tem suas particularidades transcritas em arquivos

deste tipo. Também é este um meio de se ter um histórico das tarefas já realizadas, pois a cada tarefa estará associada uma configuração que descreve a forma como os dados foram calculados.

i) Dados recomendados (fig. 6.11):

Dados de corte recomendados são cadastrados para serem adaptados ao processo de fabricação selecionado ou para inicializar o procedimento estatístico na determinação de seus parâmetros. Os registros dos arquivos de dados de corte recomendados por fabricantes de ferramentas ou manuais de usinagem estão estruturados de acordo com os tipos de tabelas mostradas no capítulo "otimização dos parâmetros de usinagem".

### 6.3.2- Arquivo de Dados Práticos

O arquivo de dados práticos é reservado para guardar informações no sistema computacional que são provenientes de aplicações práticas. Estes dados são relativos a resultados obtidos da aplicação de condições de corte geradas no próprio sistema ou também independentes deste. Os campos de registro deste tipo de arquivo são apresentados na figura 6.12.

Nestes arquivos, a distribuição dos parâmetros de corte dentro de suas faixas de variação ocorrerão provavelmente de forma irregular. O número de variações de valores também poderá ser diferente para cada parâmetro. Isso ocorre devido aos diferentes tipos de aplicações que podem ter o sistema. Se, por exemplo, em um ensaio de usinabilidade pretende-se analisar a influência da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta, os parâmetros avanço e profundidade de corte permanecerão constantes em todo o conjunto de dados práticos. Se, por outro lado, o sistema for aplicado para gerar dados para um processo com restrição de força em que esta não é diretamente medida, variações destes parâmetros ( $f$  e  $a_p$ ) surgirão até que a restrição em questão seja satisfeita.

Considerando esta característica da forma de distribuição dos dados, o sistema apresenta uma metodologia de agrupamento de

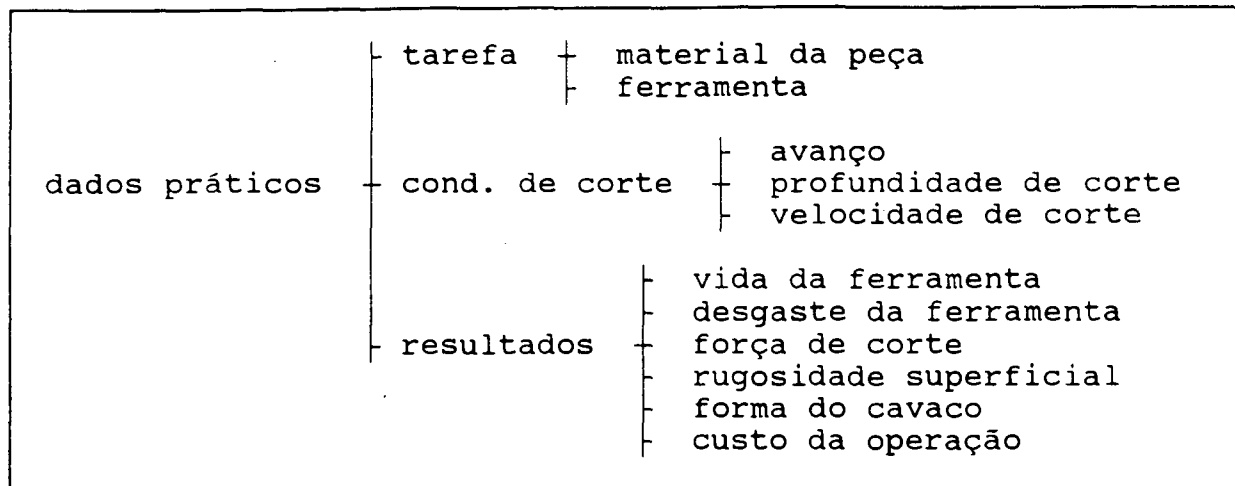


Fig. 6.12 - Registros dos arquivos de dados práticos

dados realimentados que tem como objetivo aumentar a precisão na determinação dos coeficientes da equação de Taylor através da redução do seu número de termos. Para tanto, é necessário buscar entre os dados práticos ou realimentados (condições de corte adotadas associadas a resultados obtidos), aqueles em que um ou mais termos permanecem constantes. O procedimento descrito a seguir é aplicado na organização deste arquivo de dados para alcançar este objetivo.

A distribuição dos parâmetros de corte ( $V_c$ ,  $a_p$  e  $f$ ) no arquivo de dados práticos é feita subdividindo-se o campo de aplicação de cada uma destas variáveis em intervalos ou faixas de amplitudes iguais, definidas de tal forma que a variação dos valores de cada parâmetro contido em uma mesma faixa possa ser considerada desprezível.

Adotando o índice  $i$  ( $i_1$  para  $V_c$ ;  $i_2$  para  $f$ ;  $i_3$  para  $a_p$ ) para identificar cada uma destas faixas e o índice  $j$  ( $j_1$  para  $V_c$ ;  $j_2$  para  $f$ ;  $j_3$  para  $a_p$ ) para identificar cada elemento na faixa, cada parâmetro de corte pode ser representado no arquivo de dados práticos por (fig. 6.13):

$$V_{c_{i_1, j_1}}; \text{ com } \begin{array}{l} i_1=1 \\ i_1=2 \\ \dots \\ i_1=n_1 \end{array} \quad \text{e} \quad \begin{array}{l} j_1=1 \\ j_1=2 \\ \dots \\ j_1=m_1 \end{array}$$

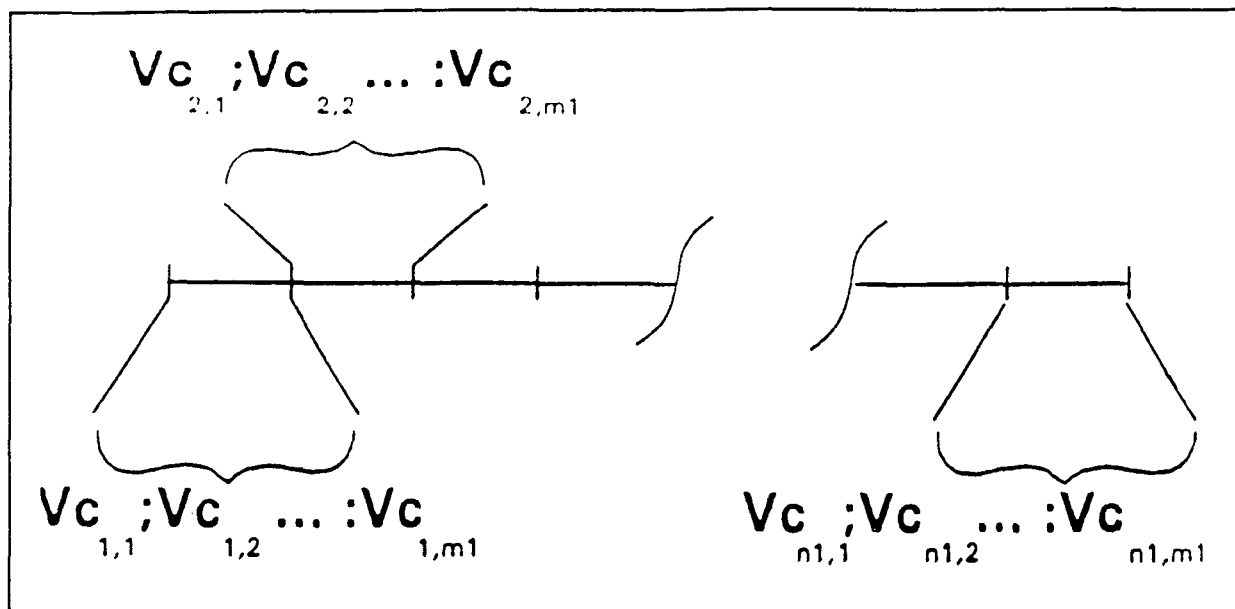


Fig. 6.13 - Faixas de velocidades

$f_{i_2, j_2}$ com	$i_2=1$	e	$j_2=1$
	$i_2=2$		$j_2=2$
	...		...
	$i_2=n_2$		$j_2=m_2$

$ap_{i_3, j_3}$ com	$i_3=1$	e	$j_3=1$
	$i_3=2$		$j_3=2$
	...		...
	$i_3=n_3$		$j_3=m_3$

onde

$n_1, n_2, n_3 = n^\circ$  de intervalos em que foram subdivididas as faixas de variação total de cada uma das variáveis ( $V_c$ ,  $f$  ou  $ap$ , respectivamente).

$m_1, m_2, m_3 = n^\circ$  de elementos ( $V_c$ ,  $f$  ou  $ap$ , respectivamente) contidos em cada intervalo.

Podemos então definir uma variável  $k$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ), que representa o número total de dados no arquivo. Com o objetivo de se analisar a influência de cada combinação das variáveis que representam as condições de entrada do processo de usinagem ( $V_c$ ,  $f$  e  $ap$ ) sobre as variáveis de saída, ou seja, que representam os resultados alcançados (vida da ferramenta, rugosidade superficial obtida, força de corte, etc.), as informações contidas no arquivo

podem ser organizadas como mostra a figura 6.13.

Numa primeira etapa de reordenação, os dados são agrupados por faixas de subdivisão dos parâmetros de corte. Como em cada campo do arquivo de dados práticos existe uma combinação de  $V_c$ ,  $f$  e  $a_p$  associados aos respectivos dados de saída, esta ordenação deverá ser feita de três formas diferentes: classificadas segundo  $V_c$ ,  $f$  ou  $a_p$ .

Os dados organizados desta forma estão indicados pelo nível 1 da figura 6.14. Como a variação entre dados contidos em cada um destes intervalos não é significativa, eles são representados por

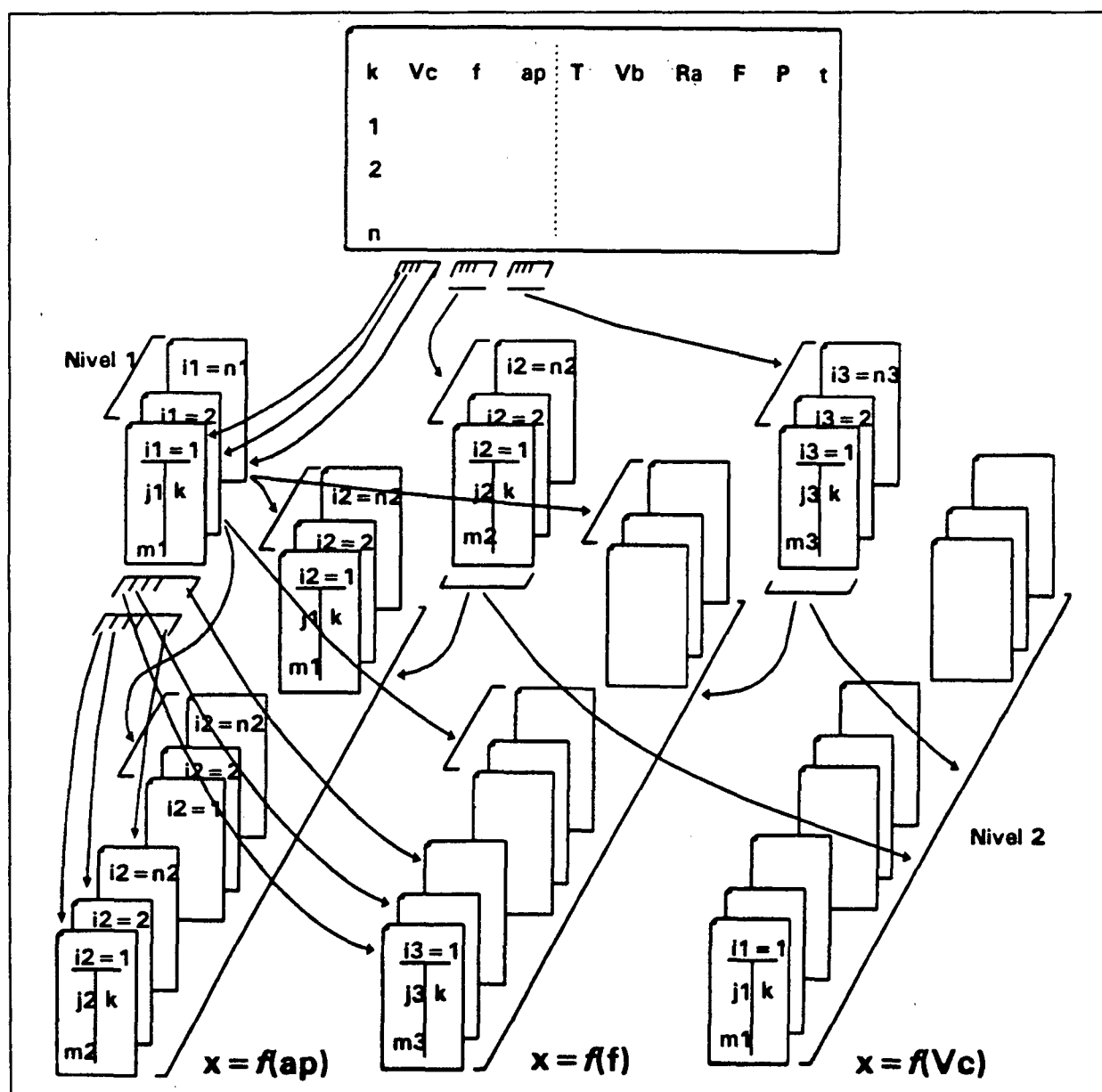


Fig. 6.14 - Organização dos arquivos de dados práticos

constantes. Estes sub-conjuntos podem ser assim definidos:

Classificação segundo  $V_c$ :

Sub-conjunto nº 1 → todos os campos  $k$  do arquivo em que os valores de  $V_{c_k}$  satisfazem a condição

$$V_{c_{1,1}} \leq V_{c_k} \leq V_{c_{1,m1}}$$

Sub-conjunto nº 2 → idem para  $V_{c_{2,1}} \leq V_{c_k} \leq V_{c_{2,m1}}$

....

Sub-conjunto nº  $n1$  → idem para  $V_{c_{n1,1}} \leq V_{c_k} \leq V_{c_{n1,m1}}$

Classificação segundo  $f$ :

Sub-conjunto nº 1 → todos os campos  $k$  do arquivo em que os valores de  $f_k$  satisfazem a condição

$$f_{1,1} \leq f_k \leq f_{1,m2}$$

Sub-conjunto nº 2 → idem para  $f_{2,1} \leq f_k \leq f_{2,m2}$

....

Sub-conjunto nº  $n2$  → idem para  $f_{n2,1} \leq f_k \leq f_{n2,m2}$

Classificação segundo  $ap$ :

Sub-conjunto nº 1 → todos os campos  $k$  do arquivo em que os valores de  $ap_k$  satisfazem a condição

$$ap_{1,1} \leq ap_k \leq ap_{1,m3}$$

Sub-conjunto nº 2 → idem para  $ap_{2,1} \leq ap_k \leq ap_{2,m3}$

....

Sub-conjunto nº  $n2$  → idem para  $ap_{n3,1} \leq ap_k \leq ap_{n3,m3}$

Cada grupo formado desta maneira pode ainda ser subdividido da mesma forma, considerando um dos outros parâmetros de corte (nível 2 da figura 6.14). Assim, por exemplo, um grupo definido por um determinado sub-conjunto de velocidade de corte pode ainda ser reordenado em outros sub-conjuntos segundo nova classificação quanto ao avanço ou profundidade de corte. Os dados assim reagrupados são definidos por:

Sub-conjunto onde  $V_c$  e  $f$  são considerados constantes:

$$\begin{aligned} & (( V_{c_{1,1}} \leq V_{c_k} \leq V_{c_{1,m1}} ) \\ & \quad e \quad ( ( f_{1,1} \leq f_k \leq f_{1,m2} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad ( f_{2,1} \leq f_k \leq f_{2,m2} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad ( f_{n2,1} \leq f_k \leq f_{n2,m2} ) ) ) \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} & (( V_{c_{2,1}} \leq V_{c_k} \leq V_{c_{2,m1}} ) \\ & \quad e \quad ( ( f_{1,1} \leq f_k \leq f_{1,m2} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad ( f_{2,1} \leq f_k \leq f_{2,m2} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad ( f_{n2,1} \leq f_k \leq f_{n2,m2} ) ) ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad \dots \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} & (( V_{c_{n1,1}} \leq V_{c_k} \leq V_{c_{n1,m1}} ) e \\ & \quad e \quad ( ( f_{1,1} \leq f_k \leq f_{1,m2} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad ( f_{2,1} \leq f_k \leq f_{2,m2} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad ( f_{n2,1} \leq f_k \leq f_{n2,m2} ) ) ) \end{aligned}$$

Sub-conjunto onde  $V_c$  e  $ap$  são considerados constantes:

$$\begin{aligned} & (( V_{c_{1,1}} \leq V_{c_k} \leq V_{c_{1,m1}} ) \\ & \quad e \quad ( ( ap_{1,1} \leq ap_k \leq ap_{1,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad ( ap_{2,1} \leq ap_k \leq ap_{2,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad ( ap_{n3,1} \leq ap_k \leq ap_{n3,m3} ) ) ) \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} & (( V_{c_{2,1}} \leq V_{c_k} \leq V_{c_{2,m1}} ) \\ & \quad e \quad ( ( ap_{1,1} \leq ap_k \leq ap_{1,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad ( ap_{2,1} \leq ap_k \leq ap_{2,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad ( ap_{n3,1} \leq ap_k \leq ap_{n3,m3} ) ) ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad \dots \end{aligned}$$



ou

$$\begin{aligned} & (( Vc_{n1,1} \leq Vc_k \leq Vc_{n1,m1} ) \\ & \quad e \quad ( ( ap_{1,1} \leq ap_k \leq ap_{1,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad ( ap_{2,1} \leq ap_k \leq ap_{2,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad ( ap_{n3,1} \leq ap_k \leq f_{n3,m3} ) ) ) \end{aligned}$$

Sub-conjunto onde  $f$  e  $ap$  são considerados constantes:

$$\begin{aligned} & (( f_{1,1} \leq f_k \leq f_{1,m2} ) \\ & \quad e \quad ( ( ap_{1,1} \leq ap_k \leq ap_{1,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad ( ap_{2,1} \leq ap_k \leq ap_{2,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad ( ap_{n3,1} \leq ap_k \leq f_{n3,m3} ) ) ) \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} & (( f_{2,1} \leq f_k \leq f_{2,m2} ) \\ & \quad e \quad ( ( ap_{1,1} \leq ap_k \leq ap_{1,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad ( ap_{2,1} \leq ap_k \leq ap_{2,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad ( ap_{n3,1} \leq ap_k \leq f_{n3,m3} ) ) ) \end{aligned}$$

.....

.....

ou

$$\begin{aligned} & (( f_{n2,1} \leq f_k \leq f_{n2,m2} ) \\ & \quad e \quad ( ( ap_{1,1} \leq ap_k \leq ap_{1,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad ( ap_{2,1} \leq ap_k \leq ap_{2,m3} ) \text{ ou} \\ & \quad \quad \dots \\ & \quad \quad ( ap_{n3,1} \leq ap_k \leq f_{n3,m3} ) ) ) \end{aligned}$$

A organização dos dados desta maneira permite que se possa analisar a influência individual dos dados de entrada do processo de usinagem sobre as variáveis de controle, ou seja,

$$x = f(Vc); \quad x = f(f); \quad x = f(ap),$$

onde

$x$  = vida da ferramenta, ou

força de corte, ou

rugosidade superficial ou

desgaste da ferramenta, etc.

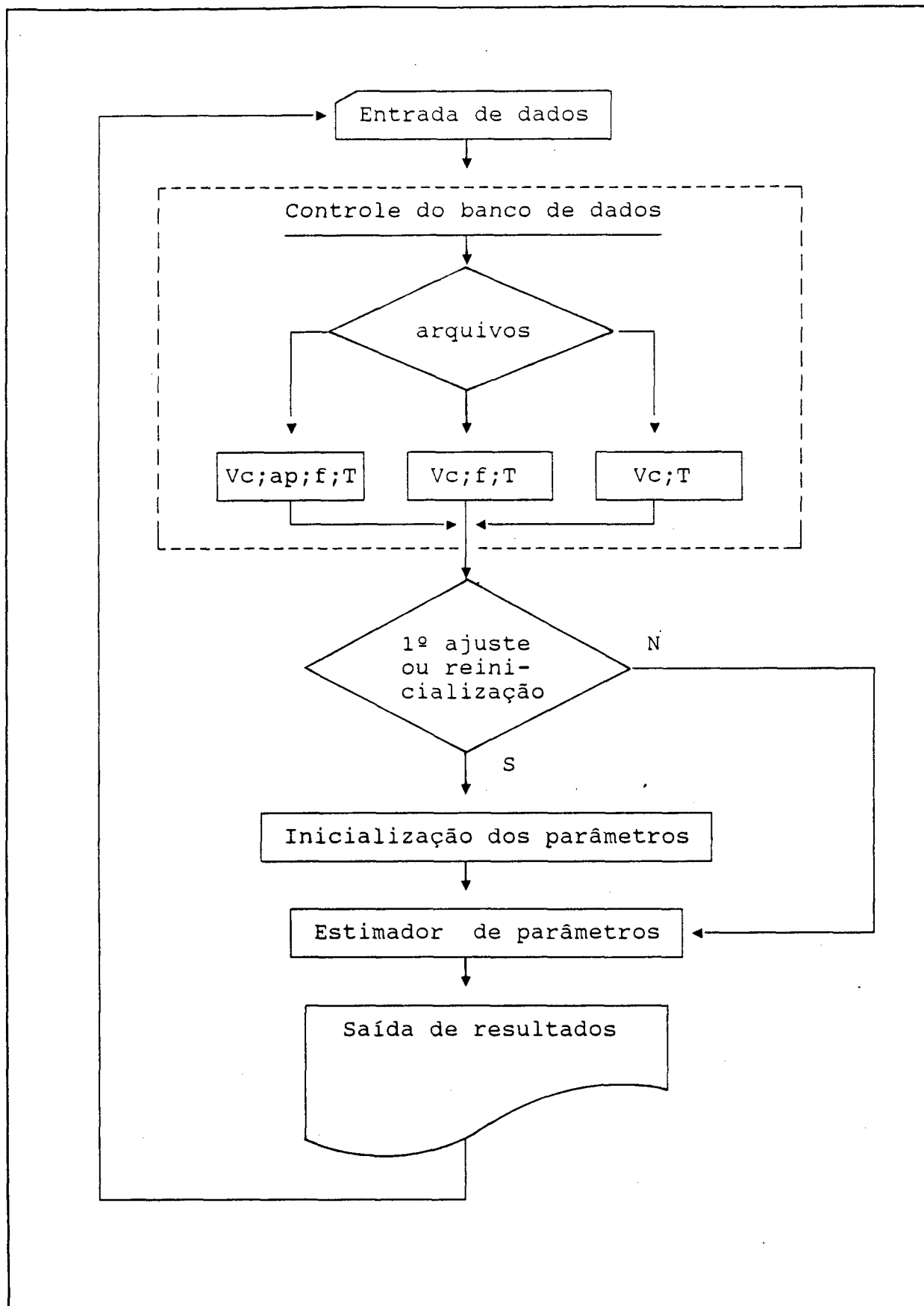


Fig. 6.15 - Fluxograma do programa de ajuste de parâmetros.

#### 6.4. Módulo de Ajuste de Parâmetros

A figura 6.15 mostra o fluxograma do procedimento computacional de ajuste de parâmetros desenvolvido neste trabalho. O programa é constituído de módulos interligados para atingir os seguintes objetivos:

- controle de entrada de dados
- controle do banco de dados
- inicialização do procedimento de ajuste
- ajuste dos parâmetros
- geração de um arquivo de saída com resultados.

##### 6.4.1. Entrada de Dados

O operador deverá fornecer como dados, via teclado em formato livre, quando solicitado, os valores de velocidade de corte  $V_c$ , avanço  $f$ , profundidade de corte  $a_p$  e vida  $T$ . Deverá fornecer ainda: um código com três caracteres para identificar os dados e um código, com um caracter, que identifica o valor de  $a_p$  utilizado. Estes dois códigos são utilizados para o controle do banco de dados. A figura 6.16 ilustra um exemplo típico de entrada de dados.

ENTRE COM OS DADOS PARA O AJUSTE :

170.	{ velocidade de corte }
.20	{ avanço }
1.0	{ profundidade de corte }
10.0	{ vida da ferramenta }
F3S	{ código de identificação }
W	{ código significando avanço = .2 }

Fig. 6.16 - Entrada de dados do programa de ajuste.

#### 6.4.2. Controle do Banco de Dados

Neste módulo são abertos os arquivos de trabalho cuja identificação é função dos dados de entrada. O objetivo é controlar a organização dos três tipos de arquivos de trabalho do filtro. No primeiro são calculados e atualizados os quatro parâmetros da equação (22). No segundo arquivo, considera-se a profundidade de corte como uma constante que será adicionada à constante  $\log C$  desta equação e no terceiro arquivo, considera-se a profundidade de corte e o avanço constantes, sendo que na equação (22) têm-se apenas dois parâmetros a serem ajustados, que são uma constante e o coeficiente ligado à vida da ferramenta.

Todos os arquivos de trabalho têm como extensão o código da identificação. Os nomes dos arquivos de trabalho são função do número de parâmetros que estão sendo ajustados. Os arquivos que contêm quatro parâmetros para serem ajustados recebem o nome PRINCIP. Aqueles onde  $ap$  é mantido constante, recebem a denominação "AP" e o valor constante de  $ap$ , com no máximo cinco dígitos, onde o símbolo "\_" significa ",". Os arquivos com dois parâmetros para ajustar recebem: no primeiro campo alfa-númerico a letra "F", no segundo campo o código que representa o valor de  $f$  e nos demais, o valor da profundidade de corte. A título de exemplo, os valores das variáveis de corte apresentadas na figura 6.16 resultam na manipulação, ou criação, dos seguintes arquivos de trabalho: PRINCIP.F3S, AP1\_000.F3S e FW1\_000.F3S.

#### 6.4.3. Inicialização do Módulo de Ajuste

No módulo de inicialização é verificada a existência dos arquivos de trabalho com a extensão dada pelo código de identificação. A resposta afirmativa a essa condicionante significa que já ocorreu a inicialização, o que provoca um desvio da sequência de processamento ao módulo do estimador de parâmetros. Caso contrário, as possibilidades de inicialização dos parâmetros como apresentado no item (5.3.3) são consideradas.

Alterações em características do processo, como troca do fluido de corte ou variações na composição do material, podem ocorrer durante um procedimento de identificação de seus parâmetros. Se alguma perturbação desta natureza ocorrer após a convergência do filtro, ele deve ser reinicializado para que os parâmetros representativos da nova situação possam ser identificados. Portanto, se modificações na tarefa forem observadas, os arquivos com extensão "código de identificação" são eliminados e o procedimento de ajuste é reinicializado normalmente. Caso as alterações na tarefa não forem significativas, a reinicialização pode ser feita com os valores médios dos coeficientes obtidos no ajuste anterior, com valores da ordem de  $10^3$  para a confiabilidade. No caso de grandes modificações, não há nenhuma restrição na utilização dos coeficientes médios, da tarefa anterior, para inicialização dos coeficientes, porém recomenda-se utilizar o valor zero para a confiabilidade, ou seja, não se tem nenhuma confiança nos valores médios dos coeficientes da equação de Taylor.

#### **6.4.4. Saída dos Resultados**

O sistema computacional gera um arquivo, cuja denominação é definida pelo usuário, com os valores médios ajustados para os coeficientes da equação de Taylor e os valores inferiores e superiores para um intervalo de 99,87% de confiabilidade nos coeficientes. Vale ressaltar que, valores inferiores ou superiores nulos para todos os coeficientes, significa que não existe volume de dados suficiente para o cálculo dos intervalos de confiança.

#### **6.5. Sequência do Processamento**

Com base nas definições apresentadas, a determinação das condições de usinagem tem a sequência de processamento como mostra a figura 6.17.

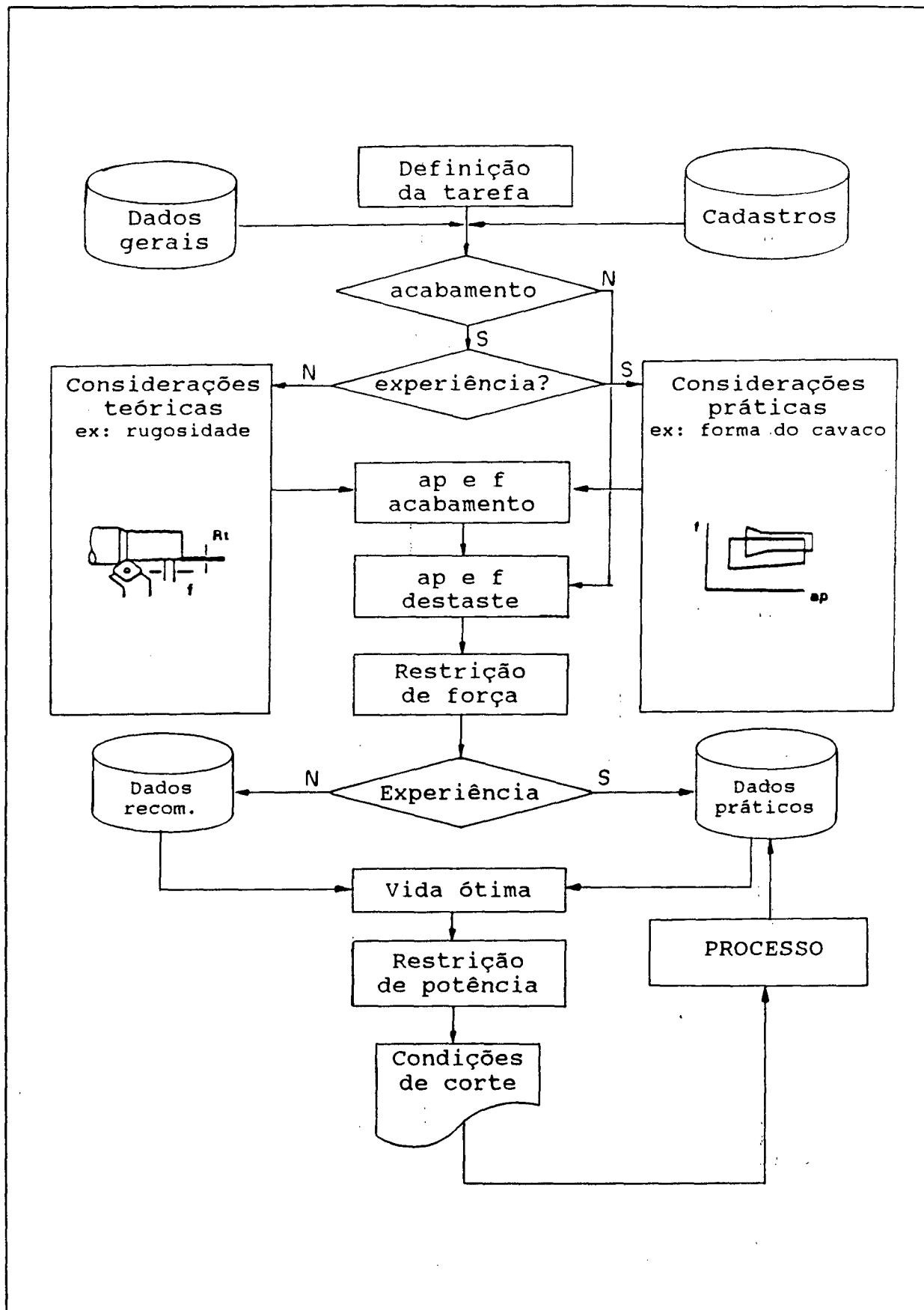


Fig. 6.17 - Sequência do processamento

A definição da tarefa estabelece as condições de entrada do sistema através dos arquivos *dados gerais* e *cadastros*, com informações sobre as variáveis envolvidas no trabalho a ser executado e o procedimento de cálculo (configuração do sistema).

Os parâmetros a serem determinados inicialmente são as condições de avanço e profundidade de corte, pois a aplicação destes valores na equação de Taylor somente é possível após considerar suas limitações. Dados distintos para desbaste e acabamento são possíveis através da especificação na tarefa de acabamento superficial para o último passe e em ambos os casos informações teóricas ou práticas sobre o processo podem ser consideradas para gerar estes valores. Com o cálculo do tempo de vida da ferramenta, que é função de resultados práticos (quando disponíveis) ou recomendações, complementa-se os dados necessários à determinação da velocidade ótima de corte.

Obtidas as condições de corte devidamente adequadas ao processo em questão, os resultados obtidos devem ser realimentados na forma de arquivos de dados práticos para garantir um contínuo aumento da precisão de dados processados em aplicações posteriores do sistema computacional.

## CAPÍTULO VII

### Simulações

Para a validação e análise dos procedimentos desenvolvidos, fêz-se várias simulações com o programa de ajuste de parâmetros e determinação de condições ótimas de usinagem.

As simulações foram utilizadas para analisar: o desempenho dos estimadores de Mínimos Quadrados (MQ), Markov (MAK) e Máximo a Posteriori (MAP); a taxa de convergência dos coeficientes das equações de Taylor reduzidas; o comportamento dos intervalos de confiabilidade em função do número de ensaios; a influência do erro de medição dos tempos de vida nos valores estimados para os coeficientes; a influência do tipo de erro de medição na convergência dos estimadores MQ, MAK e MAP; a influência dos valores iniciais da matriz de covariância dos parâmetros na convergência do estimador MAP; e a convergência do estimador MAP quando utilizado para otimização da velocidade de corte.

#### 7.1. Características do Processo Simulado

Para efeito de simulação de dados medidos como resposta do processo de usinagem, adotou-se como coeficientes ideais para a equação de Taylor (parâmetros ideais do processo) os valores contidos no banco de dados de usinagem INFUS [71] e que foram determinados em ensaios no processo cujas características são mostradas na tabela 7.1.



Tabela 7.1: Características do processo.

Material da peça	Ferramenta
42 CrMo 4 Res. a tração: 1050 N/mm <sup>2</sup> Dureza: 309 HV 10 K <sub>cl.1</sub> = 162 1-m <sub>c</sub> = 0,84	Metal duro Cód. pastilha: SPUN 120308 Âng. de folga: 5° Âng. de saída: 6° Âng. de posição: 70° VB = 0,5 mm
Coef. de Taylor: C=181 E=-0,29 F=-0,1 G=-0,14 H=0,24 C' = C.VB <sup>H</sup> = 153,26	
Vc <sub>min</sub> = 100 m/min      Vc <sub>max</sub> = 180 m/min	

Nos procedimentos de ajuste, para um conjunto de variáveis de corte, estes coeficientes foram utilizados para calcular o valor exato de T. Para a simulação de erros de medição adicionou-se, ao tempo exato, um ruído gaussiano [53], cujo desvio padrão  $E_p$  foi escolhido em função da análise a ser realizada.

Como valores iniciais  $\beta_0$  para o procedimento de identificação de parâmetros, utilizou-se os valores contidos na tabela de dados de corte recomendados apresentada em [42]. A escolha desta tabela é justificada por possuir valores para a mesma combinação de material e ferramenta do processo considerado ideal e também por ser do tipo que contém informações mais completas para estimar os coeficientes da equação de Taylor (tabela tipo E descrita em 5.3.1). A tabela 7.2 resume as condições de corte deduzidas desta fonte de dados recomendados e correspondentes fatores de correção, bem como os valores para os coeficientes da equação de Taylor por meio destes calculados e os respectivos erros em relação ao processo considerado como ideal.

Tabela 7.2 - Dados de corte recomendados

Vc	f	ap	T	Vb
330,0	0,10	1,0	15	0,2
379,5	0,10	1,0	8	0,2
280,5	0,10	1,0	30	0,2
231,0	0,10	1,0	60	0,2
290,0	0,16	1,0	15	0,2
260,0	0,25	1,0	15	0,2
230,0	0,40	1,0	15	0,2
310,0	0,10	2,0	15	0,2
280,0	0,10	4,0	15	0,2
—	E	F	G	C'
—	-0,2668	-0,0998	-0,2599	363,00
Erro (%)	7,96	0,2	85,64	136,37

## 7.2. Ajuste dos Coeficientes da Equação de Taylor

Para analisar o desempenho dos estimadores MAP, MAK e MQ, foram simulados 165 ensaios para: cinco condições de avanço (0,20; 0,25; 0,315; 0,40 e 0,50 mm/rot); três profundidades de corte (1, 2 e 3mm); e onze velocidades de corte escolhidas de maneira que o tempo de vida não fosse inferior a 10 minutos e nem superior a 60 minutos para um determinado conjunto das outras três condições de corte. Para simular erros de medições, adicionou-se um ruído branco com variância constante e igual a 2 minutos e para cálculo da matriz de covariância dos erros de medição cada ensaio foi repetido dez vezes para cada conjunto de variáveis de corte. A Tabela 7.3 mostra os resultados finais ( $V_f$ ) e respectivos valores inferiores ( $V_i$ ) e superiores ( $V_s$ ), para

um intervalo de confiança de 99,89%, obtidos com a utilização dos estimadores MAP (matriz de covariância  $V$  inicial igual a  $10^3.I$ ), MAK e MQ.

Tabela 7.3: Coeficientes estimados

Coeficiente		MAP	MAK	MQ
C'	Vs	152.53	150.60	157.51
	Vf	147.91	147.77	146.96
	Vi	143.29	144.94	136.41
G	Vs	-0.1393	-0.1392	-0.1373
	Vf	-0.1397	-0.1395	-0.1384
	Vi	-0.1402	-0.1397	-0.1394
E	Vs	-0.2896	-0.2810	-0.2913
	Vf	-0.2898	-0.2901	-0.2920
	Vi	-0.2899	-0.2902	-0.2928
F	Vs	-0.0999	-0.1003	-0.0999
	Vf	-0.1002	-0.1005	-0.1008
	Vi	-0.1005	-0.1006	-0.1017

Observa-se que todos os estimadores convergiram para valores bem próximos dos valores exatos dos coeficientes G, E e F. O erro observado no ajuste de C' se deve ao fato de o mesmo ser estimado na sua forma logarítmica C\*. Devido aos erros de medição, ocorre um pequeno erro na estimação de C\* que será ampliado pela função exponencial quando se calcula C'. Outro fato que pode ser observado nesta tabela é a precisão com que os intervalos de confiança foram estimados nesta simulação.

A boa aproximação entre os resultados mostrados na tabela 7.3 e os valores ideais dos coeficientes, acontece em virtude do elevado número de dados utilizados. A ocorrência de poucos dados

com a mesma combinação das condições de corte, dificultaria esta tendência na estimação dos coeficientes da equação de Taylor. A convergência do estimador na identificação dos parâmetros é mostrada na figura 7.1, onde o erro na estimação via MAP, do coeficiente G (EG) para o arquivo principal (—), o arquivo com  $f$  constante e igual a 0,2 mm (\*) e para o arquivo  $f$  e  $a_p$  constantes e iguais a 0,2 mm e 1,0 mm (- - -), respectivamente, são mostrados. Na elaboração do gráfico desta figura utilizaram-se oito variações para a velocidade de corte e os ensaios foram repetidos dez vezes para cada condição de corte.

Observa-se que o coeficiente G é determinado, para os três casos, com um elevado grau de precisão a partir do terceiro ensaio diferente. Outro ponto a ser observado é que a influência da matriz de covariância inicial para os parâmetros fica bem caracterizada para o arquivo com  $f$  e  $a_p$  constantes, pois neste

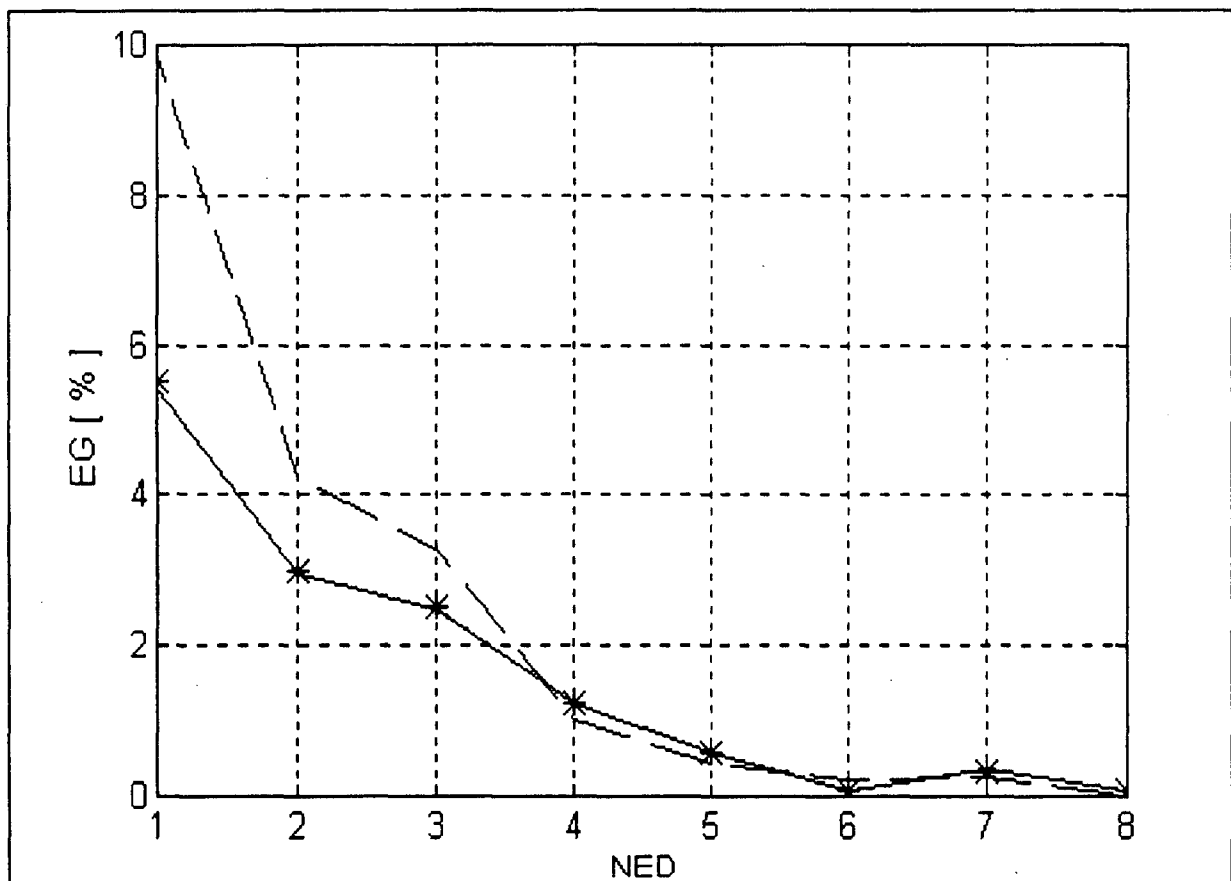


Fig. 7.1 - Erro percentual na estimação de G utilizando o estimador MAP para o arquivo principal (—), arquivo com  $f$  constante (\*) e arquivo com  $f$  e  $a_p$  constantes (- - -).

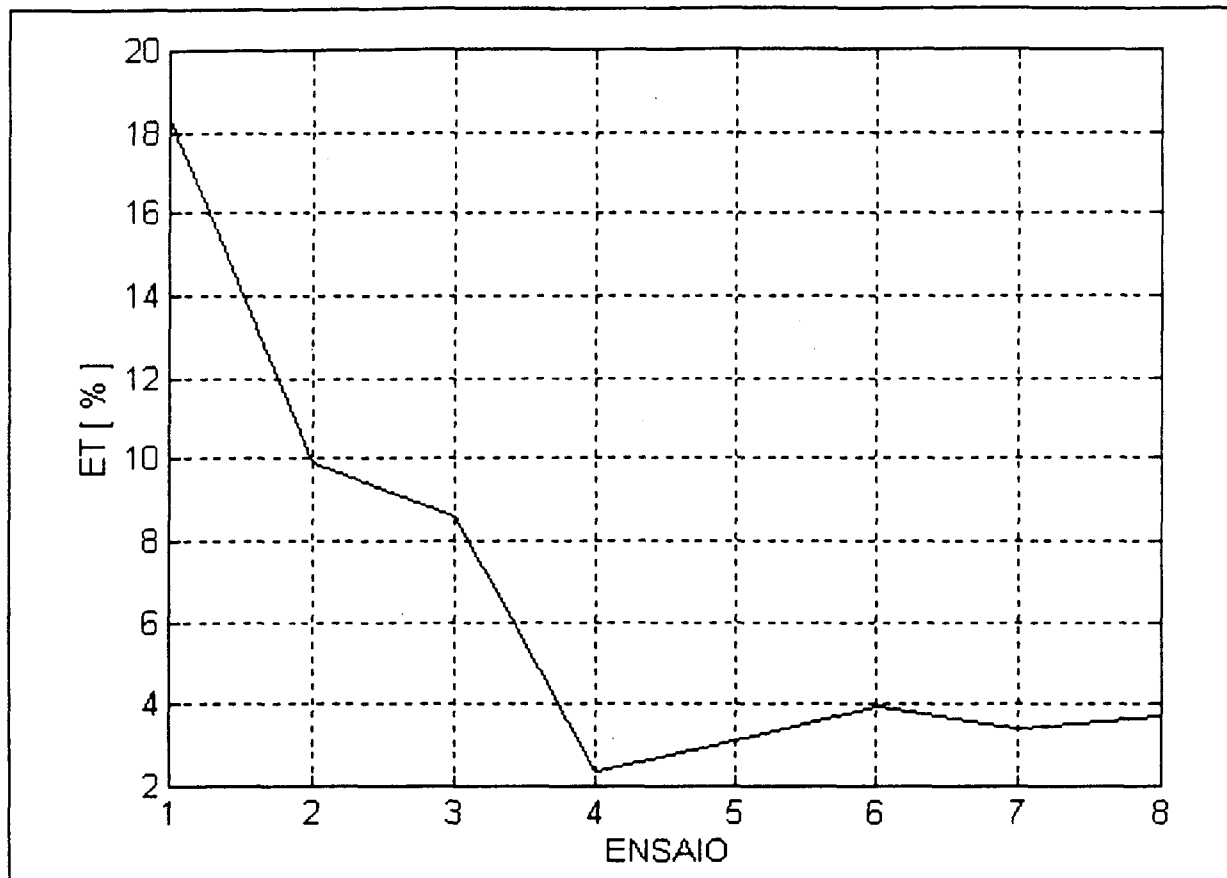


Fig. 7.2 - Convergência na avaliação da vida em função do número de ensaios.

caso, a convergência do filtro foi mais lenta indicando a influência dos valores iniciais escolhidos para os parâmetros. Como  $G$  é o principal parâmetro a ser considerado em problemas de otimização do processo, conclui-se que não há necessidade de se ter variações significativas nas condições de corte para que se tenha uma boa estimativa deste coeficiente.

A figura 7.2 mostra o erro percentual na avaliação do tempo de vida da ferramenta (ET), em função do número de ensaios diferentes. As condições de corte foram as mesmas utilizadas para o caso da figura 7.1. Neste caso, o tempo de vida foi avaliado utilizando a equação de Taylor reduzida ( $V_B$ ,  $a_p$  e  $f$  constantes), uma vez que houve mudanças em apenas um parâmetro. Observa-se que a partir do quinto ensaio diferente, a precisão com que se avalia o tempo de vida da ferramenta é menor do que 5%.

A figura 7.3 mostra a performance dos estimadores MAP (—), MAK (-o-) e MQ (- -) para a avaliação de  $G$  em função do número de ensaios. Observa-se que para a condição de erro assumido (erro

independente do valor de  $T$ ) todos os estimadores são de mínima variância, ou seja, convergem rapidamente para a solução. O fato de que o estimador MAP converge mais lentamente dos que os demais decorre de o mesmo levar em conta os valores iniciais assumidos para os parâmetros. Entretanto, deve-se considerar que nas quatro primeiras iterações ainda não existe nenhuma confiabilidade nos valores estimados para os parâmetros. Caso o processo fosse real (coeficientes desconhecidos) nenhuma conclusão a respeito da velocidade de convergência poderia ser tirada pelos primeiros ensaios.

A velocidade de convergência, ou divergência, do estimador MAP, pode ser aumentada ao assumir um valor maior para a incerteza nos valores iniciais dos coeficientes. A figura 7.4 mostra o desempenho do estimador MAP com dois graus de incerteza para os coeficientes iniciais:  $V = 10^3.I$  (—) e  $10^9.I$  (- -). Observa-se que com o aumento da incerteza nos coeficientes

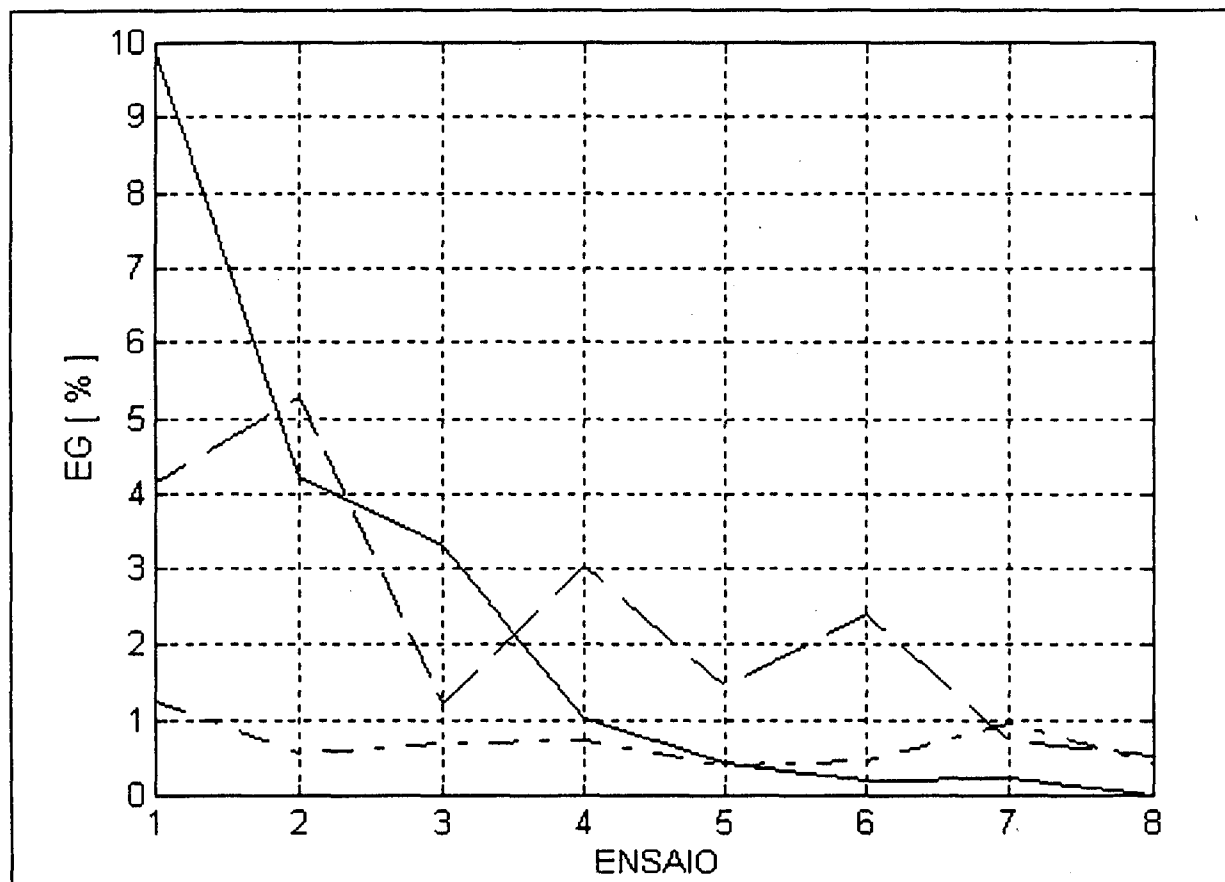


Fig.7.3 - Performance dos estimadores MAP (—), MQ (- -)  
MAK (- · -)

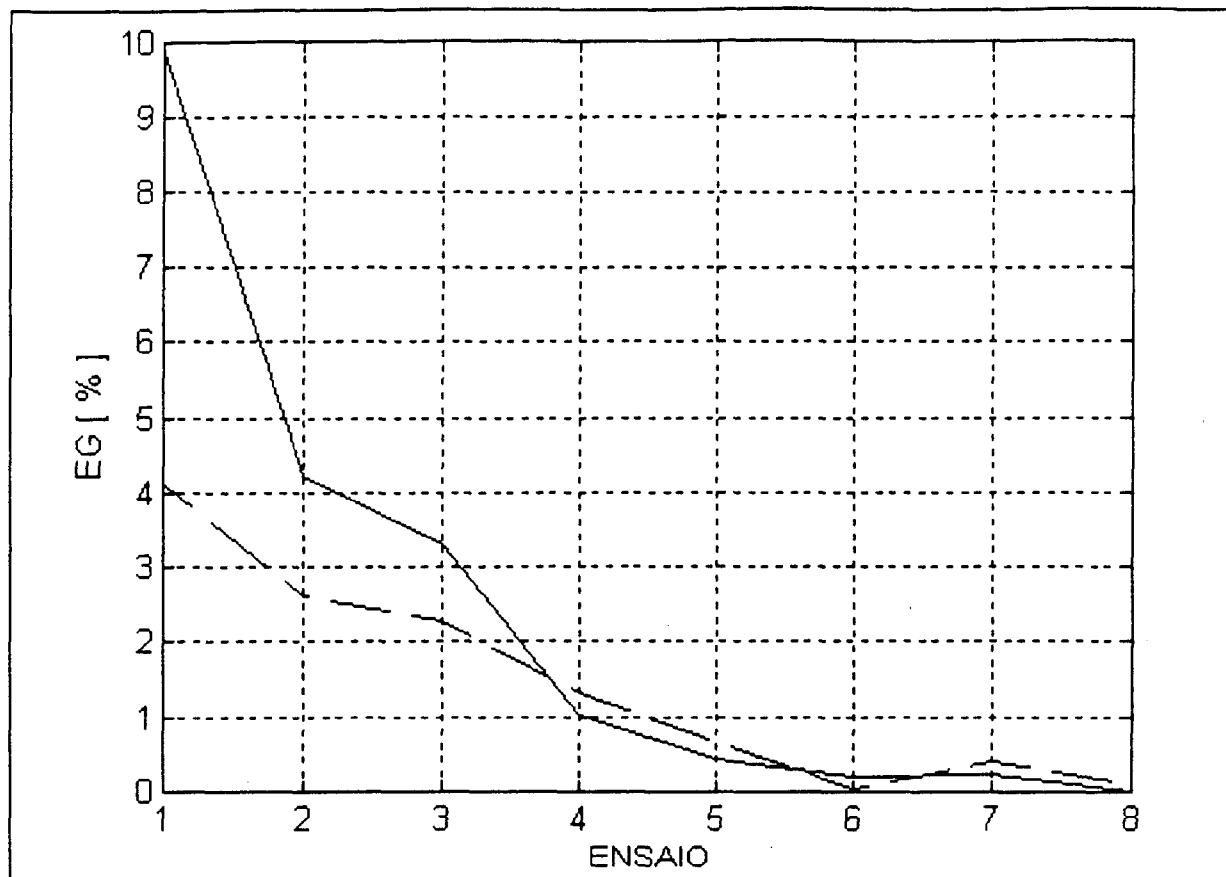


Fig. 7.4 - Velocidade de convergência do estimador MAP em função do valor inicial assumido para  $V$ .  $V=10^3$  (-);  $V=10^9$  (---).

iniciais a convergência é mais acelerada, e caso assumam-se uma confiança ( $V < 10^2 \cdot I$ ) nos valores de  $\beta_0$  que não é compatível com os valores reais dos mesmos, o procedimento pode até não convergir para a solução real.

As figuras 7.5, 7.6, e 7.7 mostram o desempenho dos estimadores MQ (Fig. 5), MAK (Fig. 6) e MAP (Fig. 7) em função do nível de ruído aditivo nas medições do tempo de vida. As variâncias para os ruídos aditivos simulados foram: 1 (—), 2 (-.-), 3 (- -) e 4 (---) minutos. Destas figuras, pode-se observar que o desempenho do estimador MAP e MAK foi pouco influenciado pelos erros de medições, enquanto que a precisão do estimador MQ está intimamente relacionada com a precisão com que as medições dos tempos de vida da ferramenta são realizadas. Os resultados obtidos para os estimadores MAP e MAK validam o procedimento desenvolvido para a estimação dos erros de medição do programa de identificação de parâmetros.

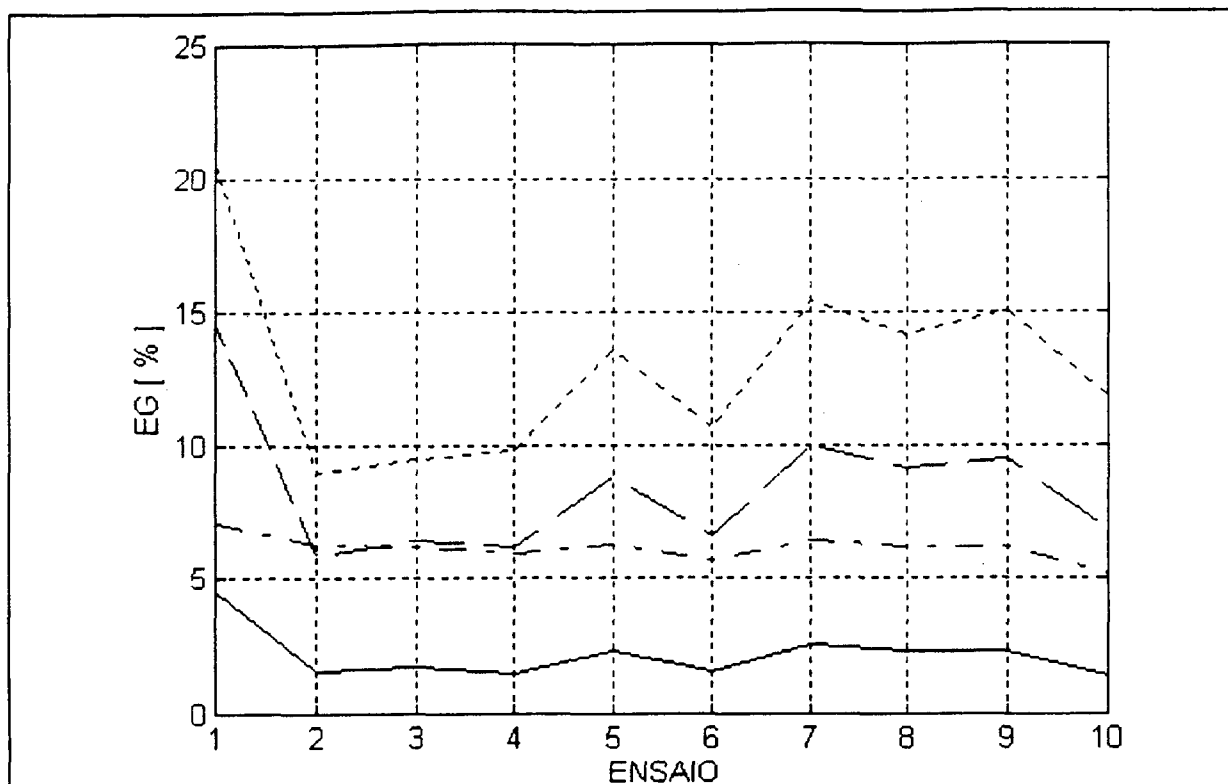


Fig. 7.5 - Desempenho do estimador de Mínimos Quadrados.

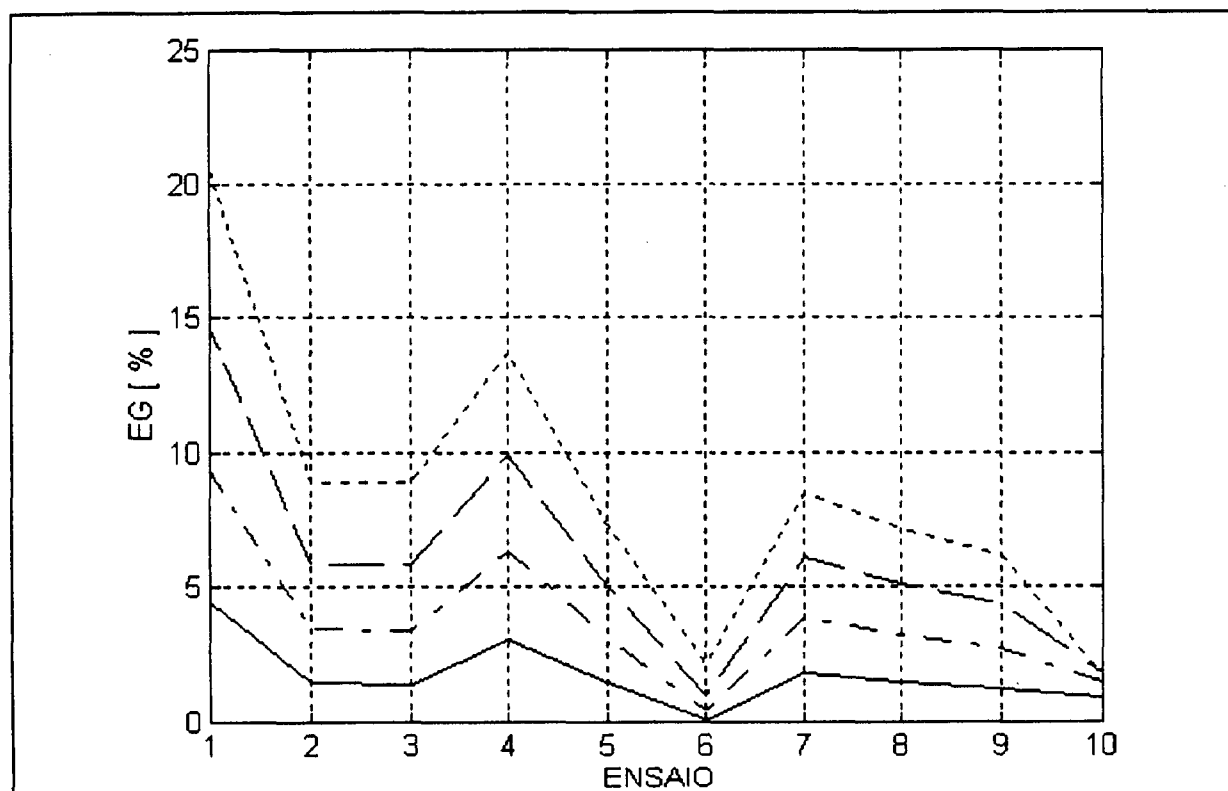


Fig. 7.6 - Desempenho do estimador de Markov.



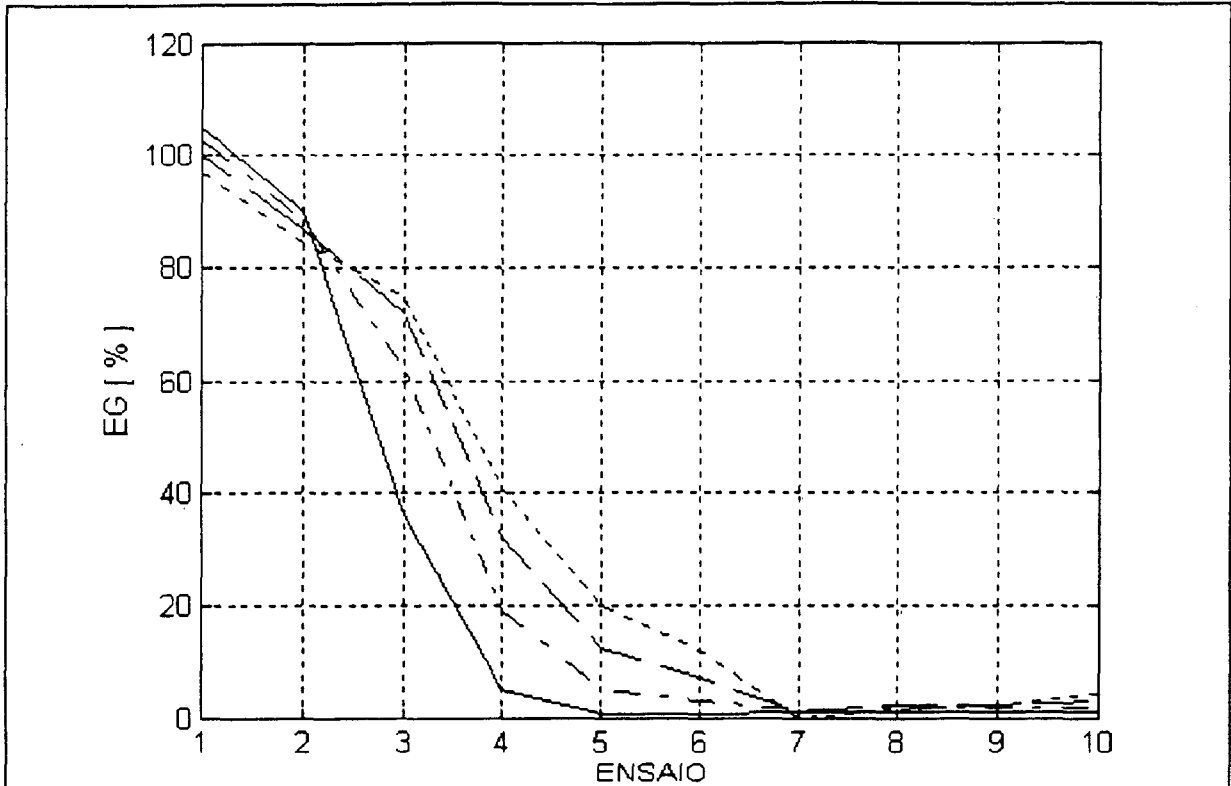


Fig. 7.7 - Desempenho do estimador Máximo a Posteriori.

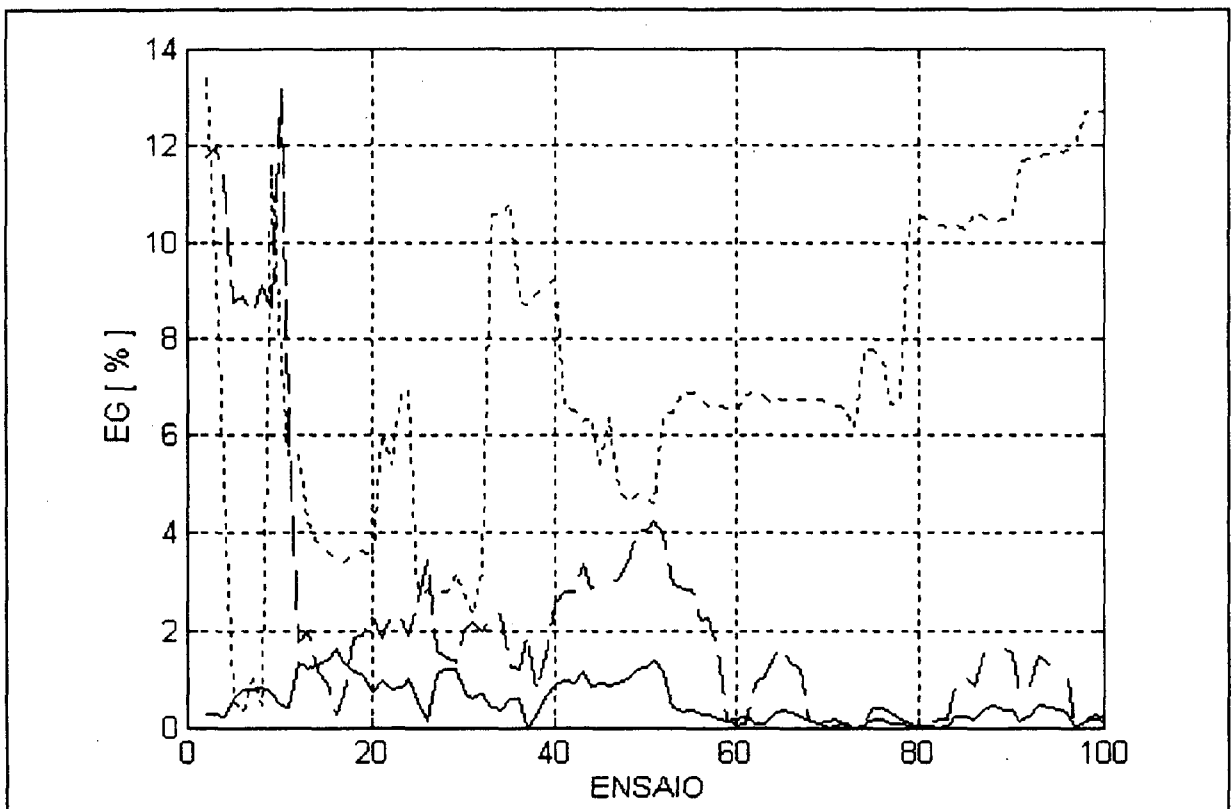


Fig. 7.8 - Comparação entre os estimadores para variância ponderada de erros.

A hipótese de ruído com distribuição Normal, com variância constante e aditivo às respostas é comumente utilizada na modelagem de erros de medição [46]. Porém, alguns erros creditados a erros de medição se devem a erros de modelo e erros aditivos aos elementos da matriz de sensibilidade X. Como exemplo do primeiro caso (erros do modelo) podemos assumir que as equações de Taylor não são válidas, com igual probabilidade, em toda gama de condições de corte da máquina-ferramenta. No segundo caso (erros na matriz de sensibilidade X), tem-se que em um determinado processo, a velocidade de corte não é constante em toda a operação ou existe diferentes etapas no processo, tais como condições de corte diferentes para desbaste e acabamento para uma mesma ferramenta. Nestes casos, pode-se assumir valores médios para os dados e, em função de seu conhecimento a respeito do processo, ponderar os erros de medição em função dos parâmetros de corte utilizados. Neste caso, a hipótese de erro com variância constante não é mais válida, porém não invalida a utilização dos procedimentos de estimação de parâmetros apresentados neste trabalho. Como exemplo, a figura 7.8 mostra o desempenho dos estimadores MAP (—), MAK (— —) e MQ (--) com relação a uma variância do ruído ponderada em relação às condições de corte, ou seja, quanto menor for a vida da ferramenta, maior o valor atribuído à variância do valor medido para T. Como as simulações ficaram limitadas entre os valores de 10 e 60 minutos para a vida, assumiu-se uma variância de 5 minutos para o tempo de vida de 10 minutos, e de 1 minuto para a vida de 60 minutos, sendo que a variância para os tempos de vidas intermediários foram interpolados entre estes valores extremos (5 e 1 minutos). Ao contrário do procedimento utilizado nas simulações anteriores, os valores de  $V_c$  foram obtidos aleatoriamente, ou seja, cada ensaio representa uma condição de corte diferente, e não à média de várias repetições de condição de corte. Os valores de  $a_p$  e  $f$  foram mantidos constantes e iguais a 1 mm e 0,25 mm, respectivamente.

A grande variação observada em G (fig. 7.8), para os estimadores MAK e MQ se deve ao fato de não ter havido repetições

nas condições de corte. Outra observação importante está no fato de que o estimador de Mínimos Quadrados (MQ), não ser um estimador de mínima variância nesta aplicação (variância do erro de medição variável), o que justifica o seu baixo desempenho quando comparado com os demais.

Os resultados apresentados na figura 7.8 mostram bem as diferenças existentes entre os três estimadores sequenciais. O estimador MQ tem por hipótese fundamental o fato de que todos

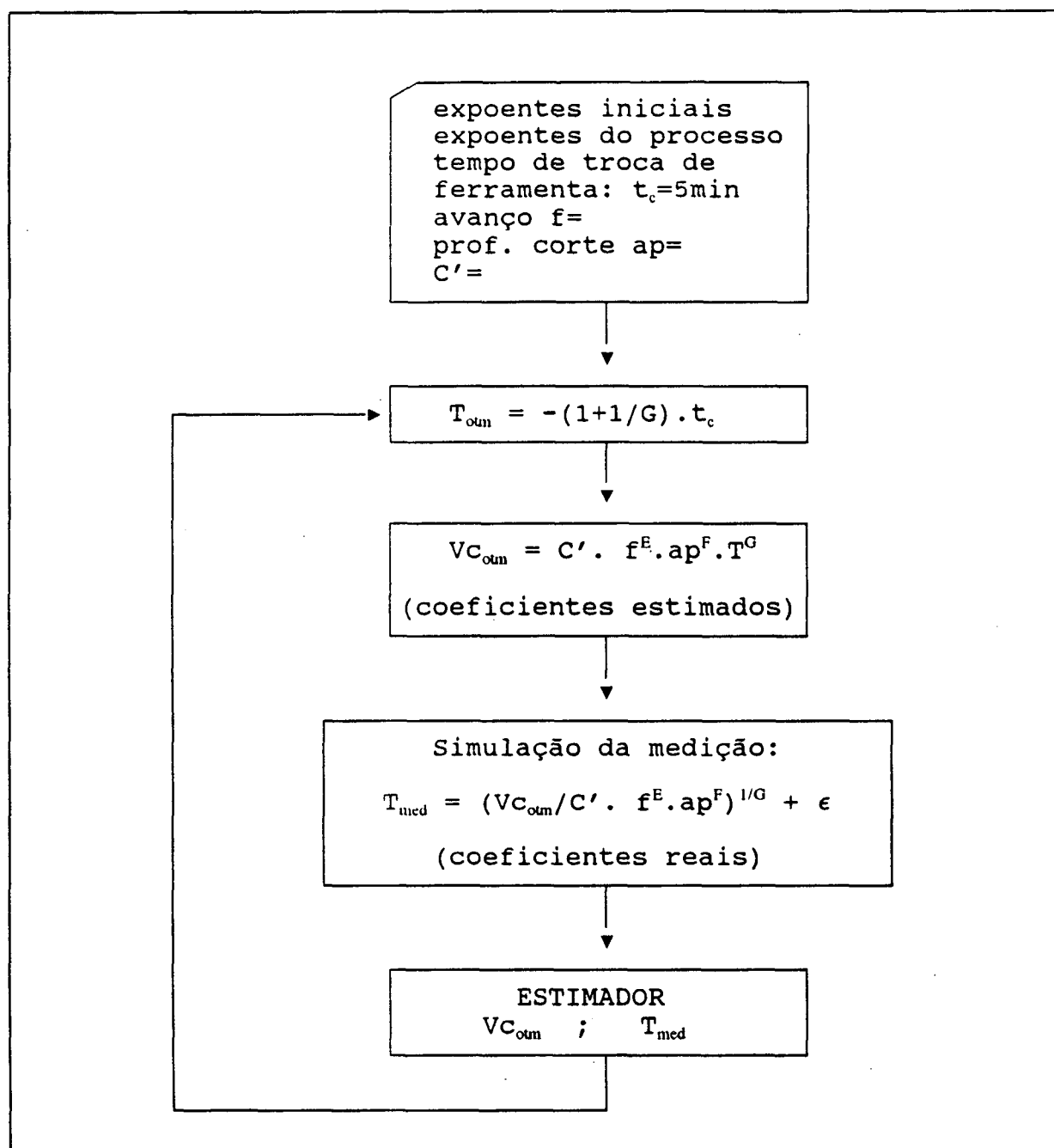


Fig. 7.9 - Procedimento para simulação de ajuste de Totm

os dados são obtidos com igual precisão. Por isso, se observa uma grande variação nos valores de  $G$  para os ensaios iniciais e como os valores da matriz de covariância dos parâmetros vão diminuindo ("fechando") com o aumento do número de ensaios, o filtro tende a convergir para valores errados para os parâmetros. Para o filtro MAK, também se observa grandes variações iniciais nos valores dos parâmetros. Porém, a matriz de covariância dos parâmetros não se "fecha", devido às incertezas nas medições dos tempos de vida iniciais. Quando a estatística das medições torna os dados confiáveis, o filtro começa a "fechar" dando pesos maiores para os resultados que apresentam menores erros de medição. O estimador MAP sequencial tem um princípio de funcionamento semelhante ao MAK, sendo que a grande diferença reside no fato de que o estimador MAP dá grande peso (como função da matriz  $V_0$ ) aos valores de  $\beta_0$  fornecidos ao sistema. Só a partir do momento em que as estatísticas tornam-se confiáveis é que o estimador MAP começa a "fechar" como ocorre no estimador MAK. O

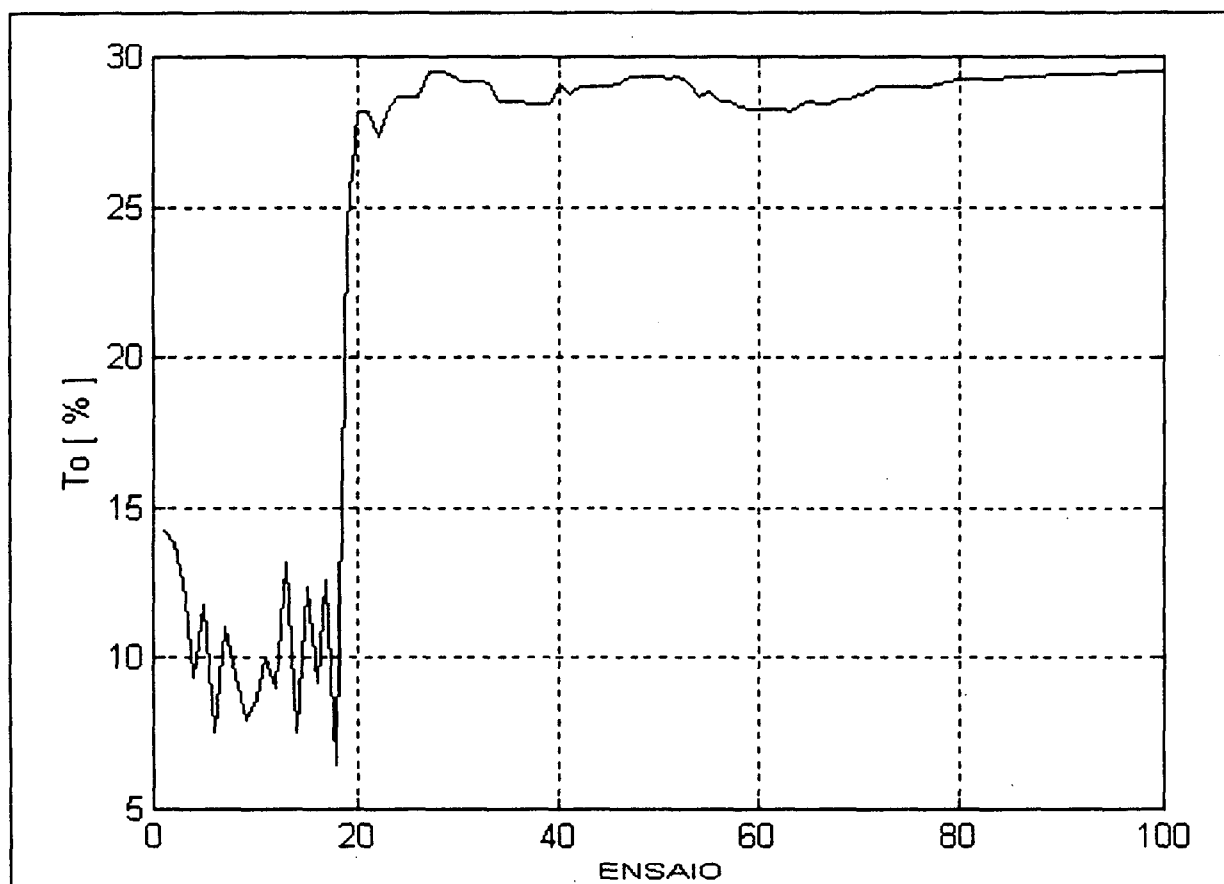


Fig. 7.10 - Ajuste de  $T_{otm}$  como função do número de ensaios

peso dado aos valores iniciais dos parâmetros e respectivas covariâncias faz com que o estimador MAP não oscile nas iterações iniciais e tenda a convergir para os melhores resultados, como pode ser observado nas figuras de 7.1 a 7.8.

### 7.3. Otimização de $V_c$

Com as condições de simulação apresentadas em (7.1), a determinação da velocidade ótima de corte para o processo considerado foi feita para a velocidade de máxima produção com um tempo de troca de ferramenta estipulado em 5 minutos. O fluxograma da figura 7.9 mostra a sequência de operações para esta simulação. Neste procedimento foi utilizada a equação de Taylor na forma reduzida considerando a maior influência de  $V_c$ , comparada com os outros parâmetros de corte, sobre a vida da ferramenta.

A determinação da velocidade ótima de corte, a ser estimada para o processo é feita inicialmente substituindo-se na equação de Taylor o tempo ótimo calculado pela equação (3.17), onde é aplicado inicialmente para o expoente  $G$  o valor deduzido da tabela de dados de corte recomendados (tabela 7.2:  $G = -0,2599$ ). A simulação de medição do tempo de vida da ferramenta ( $T_{med}$ ) é feita isolando-se esta variável na fórmula de Taylor e considerando-se os valores reais dos coeficientes do processo de usinagem escolhido. Com as condições de corte utilizadas e o tempo de vida medido, o estimador de parâmetros ajusta o coeficiente  $G$  para que o tempo ótimo possa ser recalculado em cada iteração do procedimento de identificação.

A figura 7.10 mostra os resultados obtidos, onde observa-se que por volta da vigésima variação da velocidade de corte, o procedimento converge rapidamente para o valor real ótimo de vida. Este fato ocorre porque neste caso o número de repetições de cada combinação de condições de corte é pequeno e também por ter influência no estimador MAP os valores iniciais dos parâmetros até que haja estatísticas das medições.

#### 7.4. Identificação de Parâmetros com Monitoramento de Força

Conforme analisado no item (5.3.4), a identificação de parâmetros para o caso de processos com monitoramento de força de corte caracteriza-se por um sistema com erro na entrada, o que justifica a utilização do estimador de variáveis instrumentais. A simulação apresentada visa demonstrar esta afirmação.

A tabela 7.4 mostra um quadro comparativo entre os valores estimados para  $\alpha$  utilizando o procedimento das variáveis instrumentais (VI), e mínimos quadrados (MQ), para diferentes níveis percentuais de erro ( $E_b$ ) em relação ao valor exato, para a variância de erro de medição de  $V_b$ . A variância do erro de medição da força foi feita constante e igual a 1% do valor de  $F_c$ . Utilizou-se os valores de  $K_{C1.1}$  e  $(1-m_c)$  para o mesmo material das aplicações anteriores (valores na tabela 7.1) para a simulação de medição de força. Os valores utilizados foram  $F_{ini} = 129,77N$  (determinado pela fórmula de Kienzle) e  $\alpha = 30,00 N/mm$  (estipulado). Para a estimação de  $\alpha$  foram utilizados os resultados de simulações de cinco vidas de ferramenta. Observa-se na tabela 7.4, o efeito de polarização que os erros de medição

Tabela 7.4: Valores estimados para  $\alpha$

Eb [%]	$\alpha$ [N/mm]	
	MQ	VI
1	27.00	28.28
2	27.39	28.85
5	24.47	28.30
7.5	23.35	28.55

de  $V_B$  têm sobre o estimador MQ. Já o estimador de variáveis instrumentais é menos susceptível a erros de medição de  $V_B$ . Para o nível de 1 % de erro de medição de  $V_B$ , os estimadores não convergiram para resultados melhores devido ao número pequeno (cinco) de ensaios utilizados.

## CAPÍTULO VIII

### Conclusão

A implementação da metodologia proposta em sistemas produtivos tem como vantagens:

- Eliminação das principais dificuldades práticas para utilização de condições ótimas de corte, uma vez que os parâmetros de um dado processo podem ser estimados através de variáveis de saída que são relativamente simples de serem medidas (desgaste e tempo de vida da ferramenta).

- Precisão na determinação dos parâmetros de um dado processo. Simulações mostraram que os coeficientes das equações de Taylor e Kienzle podem ser estimadas com boa precisão mesmo que os erros de medição sejam grandes ou hajam mudanças em poucas variáveis de corte (equações de Taylor reduzidas). Volume suficiente de dados para se alcançar boa precisão é facilmente alcançado com dados de produção.

- Melhor aproveitamento de dados de corte provenientes de bancos de dados de usinagem ou de recomendações fornecidas em manuais ou por fabricantes de ferramentas. O sistema permite ajustar estas informações para situações particulares. De forma recíproca, dados gerados em aplicações do sistema podem servir para realimentar estas fontes de informações sobre dados de usinagem.

- Redução do tempo necessário à identificação das características de um processo. Demonstrou-se que a velocidade de convergência do método aplicado para estimar os parâmetros (Estimador de Máximo a Posteriori - MAP) é bastante influenciada pela precisão que se tem nos valores iniciais do procedimento. A utilização, no sistema computacional desenvolvido, de bancos



de dados para armazenar parâmetros já identificados em um determinado processo e a possibilidade de utilizá-los como valores iniciais em novas situações garante esta precisão, mesmo que algumas variações em relação à situação precedente possa ter ocorrido.

- Adequação a processos monitorados. A perspectiva da utilização das forças de corte para a estimação de coeficientes para a otimização do processo de usinagem, apresenta como grande vantagem o fato de permitir a automatização dos procedimentos de ajuste e otimização.

A característica de modularidade do sistema desenvolvido permite que lhe sejam atribuídas algumas perspectivas de continuidade, tais como:

- Utilização de outros modelos representativos do processo de usinagem.

- Desenvolvimento de procedimentos para determinação do erro do modelo.

- Desenvolvimento de métodos para determinar a forma ideal de como condições de corte devem variar para se alcançar condições ótimas de corte com menor número de experimentos.

- Adaptação dos procedimentos de restrições para outros processo de usinagem.

- Possibilidade de implementação no ambiente de *configuração* de características específicas de processos.

- Desenvolvimento de um módulo de interfaceamento com o comando de máquinas CNC para aquisição automática de condições de corte, tempos de usinagem, e tempo de troca de ferramenta.

## REFERÊNCIAS

- | 1 | REMBOLD U., et al, "CAM-handbuch", Springer-Verlag, 1990.
- | 2 | WECK, M., "Werkzeugmaschinen Band 3 - Automatisierung und Steuerungstechnik", VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1990.
- | 3 | OBERMANN, K., "CAD/CAM Handbuch 1992", Verlag für Computergrafik GmbH, München, 1992.
- | 4 | KIEF, H.B., "NC/CNC Handbuch '91", Carl Hanser Verlag München Wien", 1991.
- | 5 | ASTRÖM, K.J.; WITTENMARK, B., "Computer Controlled Systems", Prentice-Hall, New Jersey, 1984.
- | 6 | REINTJES, J., "Numerical Control", Oxford U. Press, New York, 1991.
- | 7 | COLDING, B.N., "A boa escolha de parâmetros de usinagem leva a muitos ganhos", Máquinas e Metais, Fev. 1992, Tradução: Norberto de Paula Lima.
- | 8 | HARDT, D.E., "Modeling and Control of Manufacturing Processes: Getting More Involved", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp 291,300, Junho 1993,
- | 9 | LO, C.C.; KOREEN, Y., "Evaluation of Servo-Controllers for Machine Tools", Proceedings of the American Control Conference, Chicago, IL, pp. 370-374, 1992.
- | 10 | ULSOY, A.G.; KOREN, Y.; RASMUSSEN, F., "Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 105, pp 107-112, 1983.
- | 11 | CHRYSSOLOURIS, G.; PATEL, S., "Industrial High Technology for Manufacturing", Marcel Dekker Inc., 1987.
- | 12 | CHEN, J.S.; YUAN, J.X.; NI, J., WU, S.M. "Real-Time Compensation for Time-Variant Volumetric Error on a Machining Center", ASME Winter Annual Meeting, GA, 1991.
- | 13 | CHUANG, H.Y.; LIU, C.H., "Cross-Coupled Adaptive Feedrate Control for Multiaxis Machine Tools", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, nº 3, pp. 451-457, 1991.
- | 14 | FUSSELL, B.K.; SRINIVASAN, K., "Adaptive Control of Force in End Milling Operations - An Evaluation of Available Algorithms", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 10,

nº1, pp. 8-20, 1991.

- | 15 | KOREN, Y.; ULSOY, A.G., "Adaptive Control in Machining", Metals Handbook: Machining, J. R. Davis (ed.), Vol. 16, ASM International, Metals Park, OH, pp. 618-626, 1989.
- | 16 | KOREN, Y.; DANAI, K.; ULSOY, A.G.; KO, T.R., "Monitoring Tool Wear Through Force Measurement", XV NAMRC, SME, pp 463-468, 1987.
- | 17 | IOANNOU, P.A.; SUN, J., "Theory and Design of Robust Direct and Indirect Adaptive Control Schemes", International Journal of Control, Vol. 47, nº 3. pp. 775-813, 1988.
- | 18 | ARSECULARATNE, J.A., "A Process Monitoring System to Optimize Cutting Conditions in Turning", tese de doutorado, University of Manchester Institute of Science and Technology, 1990.
- | 19 | STEIN, J.L., "Modeling and State Estimator Design Issues for Model-Based Monitoring Systems", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp 318-327, Junho 1993.
- | 20 | WU, C.L., "Técnicas desenvolvidas "dentro de casa": benefícios e problemas", 4ª Conferência Internacional de Engenharia de Máquinas-Ferramentas (Osaka, Japão), tradução: Norberto de Paula Lima, Máquinas e Metais, Fevereiro, 1994.
- | 21 | MONTGOMERY, D.C., "Introduction to Statistical Quality Control", Wiley, New York, 1991.
- | 22 | BOX, G.; KRAMER, T., "Statistical Process Control and Automatic Process Control - A Discussion", Report 42, Center for Quality and Productivity Improvement, College of Engineering, Univ. of Wisconsin, Madison, 1990.
- | 23 | KUHN, R.; SCHMIDT, J., "Die Wahl der richtigen Technologie", Technische Rundschau, vol. 41, pp 90-95, 1990.
- | 24 | MERTENS, P., "Analyse Konventioneller und wissens basierter Arbeitsplanung", CIM Management, vol.3, pp S9-S12, 1991.
- | 25 | TLUSTY, J.; ANDREWS, G., "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining", CIRP vol.32, pp 563-572, 1983.
- | 26 | LANDAU, D.L., "Evolution of Adaptive Control", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp 381-391, vol.115, 1993.
- | 27 | NARENDRA, K.S.; LIN, Y., "Stable Discrete Adaptive Control", IEEE Trans.A.C., Vol. AC25, nº 3, 1980.
- | 28 | ASTRÖM, K.J.; WITTENMARK, B., "Adaptive Control", Addison-Wesley, New York, 1989.

- |29| BITMEAD, R.R.; GEVERES, M., WERTZ, V., "Adaptive Optimal Control: The Thinking Man's GPC, Prentice Hall International, 1990.
- |30| RATHMILL, K., "Control and Programming in Advanced Manufacturing", IFS Publications Ltd, UK, Springer Verlag, 1988.
- |31| ULSOY, A. G.; KOREN, Y., "Control of Machining Process", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp 301-308, vol.115, 1993.
- |32| BRITE/EURAM projeto nº 0317: "Manufacturing Cell Operator's Expert System - Machining Parameter Selection System Definition". Nov. 1991.
- |33| TAYLOR, F.W., "On the Art of Cutting Metals", ASME, vol 28, pp 31-279, 1907.
- |34| STEMMER, C.E., "Ferramentas de Corte", editora da UFSC, 1989.
- |35| COLDING, B.N., "A Wear Relationship for Turning, Milling and Grinding Machining Economics", tese KTH, Estocolmo, 1959.
- |36| WOXÉN, R., "A Theory and an Equation for the life of Lathe Tools", IVA, Handlingar, 1932.
- |37| MILLS, B.; REDFORD, A. H., "Machinability of Engineering Materials", Applied Science Publishers, 1983.
- |38| BUS, C.; TOUWEN, N.A.L.; VEENSTRA, A.C.H., "On the Significance of Equivalent Chip Thickness, CIRP vol. 19, pp 121-124, 1971.
- |39| LINDSTROM, B., "Cutting Data Field Analysis and Predictions - Part 1: Straight Taylor Slopes", CIRP vol. 38, pp 103-106, 1989.
- |40| COLDING, B.; KÖNIG, W, "Validity of the Taylor Equation in Metal Cutting", CIRP vol. 19, pp 793-812, 1971.
- |41| KIENZLE, O., "Bestimmung von Kräften an Werkzeugmaschinen", VDI-94, pp. 299-305, 1952.
- |42| TSCHÄTSCH, H., "Handbuch spanende Formgebung", Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, 1991.
- |43| GORCZYCA, F.E., "Applications of Metal Cutting Theory", Industrial Press, 1987.
- |44| PAUCKSCH, E., "Zerspantechnik". Friedr. Veizeg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, 1992.

- | 45 | KUHN, R.; SCHMIDT, J., "Die Wahl der richtigen Technologie", Technische Rundschau, 41/90, pp 90-95, 1990.
- | 46 | BECK, J.V. ; ARNOLD, K.J., "Parameter Estimation in Engineering Problems", Computational Mechanics Publications, England, 1985.
- | 47 | EYKHOFF, P., "Parameter Estimation in Engineering and Science", John Wiley, New York, 1977.
- | 48 | FRITZEN, C.P.; SEIBOLD, S., "Identification of Mechanical Systems by Means of The Extended Kalman Filter", Proc. of the 3rd IFTOMM Conference on Rotordynamics, p. 437 - 440, 1990.
- | 49 | MARPLE Jr., S.L., "Digital Spectral Analysis With Applications", Inc., New Jersey, USA, 1987.
- | 50 | FRITZEN, C., "Identification of Mass, Damping and Stiffness Matrices of Mechanical Systems", Proc. of 8th Int. Modal Analysis Conference, Los Angeles, USA, p.1 - 11, 1986.
- | 51 | MOTTERSHEAD, J.E.; FOSTER, C.D., "An Instrumental Variable Method for the Estimation of Mass, Stiffness and Damping Parameters from Measured Frequency Response Functions", Mechanical Systems and Signal Processing, p. 379 - 390, 1988.
- | 52 | DUARTE, M.A.V., "Ajuste de Modelos Dinâmicos de Estruturas com Não Linearidades Concentradas", tese de doutorado, Unicamp, 1994.
- | 53 | BENDAT, J.S.; PIERSOL, A.G., "Random Data Analysis and Measurement Procedures", John Wiley & Sons, New York, 1986.
- | 54 | DOEBLIN, E.O., "Measurement Systems Application and Design". Mc Graw-Hill Inc., 1983.
- | 55 | KÖNIG, W. "Fertigungsverfahren Band 1 - Drehen, Fräsen, Bohren", VDI-Verlag GmbH, 1990.
- | 56 | SILVA, A.D.; TONELLI, P.A., "Consideração de Força de Corte na Determinação de Condições de Usinagem", COBEM 93, Brasília, Dezembro, 1993.
- | 57 | JUNEJA, B.L.; SEKHON, G.S., "Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools", John Wiley & Sons, 1987.
- | 58 | DROZDA, T.J.; WICK, C., "Tools and Manufacturing Engineers Handbook, vol. 1: Machining", SME, 1983.
- | 59 | BOEHS, L., "Projeto e Implantação de um Sistema Computadorizado de Banco de Dados de Usinagem (CINFUS)", tese de doutorado - UFSC, 1988.

- | 60 | BRAGA, D.U.; DINIZ, A.E.; CUPINI, N.L., "Monitoramento Indireto da Vida da Ferramenta de Torneamento Usando Parâmetros Elétricos da Máquina-Ferramenta", Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, ABCM, p. 210-220, 1993.
- | 61 | PARK, J.J.; ULSOY, A.G., "On-Line Flank Wear Estimation Using an Adaptive Observer and Computer Vision, Part1: Theory", Journal of Engineering for Industry, vol 115, p. 30 - 36, 1993.
- | 62 | PARK, J.J.; ULSOY, A.G., "On-Line Flank Wear Estimation Using an Adaptive Observer and Computer Vision, Part 2: Experiment", Journal of Engineering for Industry, vol 115, p. 36 - 43, 1993.
- | 63 | LANGHAMMER, K., "Cutting Forces as Parameters for Determining Wear on Carbide Lathe Tools and as Machinability Criterion for Steel", The Carbide Journal, Maio-Junho, 1976.
- | 64 | LAUFFER, H.J., LUDWIG, H.R., "Anwendung statistischer Methoden in der Fertigungstechnik am Beispiel von Standzeituntersuchungen hartstoffbeschichteter Windelbohrer", wt Werkstattstechnik 78/6, pp 373-376, 1988.
- | 65 | Junike, W.: Zellenrechner-Funktionserweiterung der CNC-Steuerung", wt Werkstattstechnik 78/8, pp 441-444, 1988.
- | 66 | HAUSSMANN, U., "Prüfhäufigkeit aus der Werkzeugstandzeit", Werkstattstechnik 79, p. 545-548. 1989.
- | 67 | "DREHEN - Grundlagen und Anwendungs-technik", Plansee TIZIT GmbH, 1987.
- | 68 | SMITH, G.T., "Advanced Machining - The Handbook of Cutting Thechnology", IFS Publications, 1989.
- | 69 | ISO - "Tool Life Testing with Single Point Turning Tools", ISO 3685, 1977.
- | 70 | CHANG, T.C., WYSK, R.A., "An Introduction to Automated Process Planning Systems", Prentice-Hall, 1985.
- | 71 | KÖNIG, W., "Zerspanwerte für die Fertigung aus der INFUS Datenbank, wt-Zeitschrift für industrielle Fertigung , p. 58-59, 1979.

## **ANEXO**

### **Telas Principais do Sistema**

Geracao	Realimentacao	Setup	Apresentacao	reComendacoes
---------	---------------	-------	--------------	---------------

Defin. Tarefa
Gera Condicao

OTIMIZACAO  
DE  
CONDICOES DE USINAGEM  
DEEME - UFU  
Data: DEZ/1994

↑ Selecionam    <ENTER> Executa Opção    ESC volta ao DOS

Fig. A.1 - Menu principal e submenu Geração

Entrada de nova tarefa				
Codigo:				
Descrição:				
Tipo De Operacao:				
Profundidade Total de Corte:				[mm]
Rugosidade Maxima Permitida:				[um]
Material Utilizado na Confeccao da Peca:				
Codigo da Ferramenta Utilizada:				
Maquina Utilizada no ensaio:				
Configuracao padrao:				
Angulo de posicao da Ferramenta:				[Graus]
Forca Maxima no Acabamento:				[N]
Dimensao A1:				[mm]
Dimensao A2:				[mm]
Diametro (Peca ou Fresa):				[mm]
Numero de Passes de Desbaste:				
Coeficientes da equacao de Taylor:				
C:	E:	F:	G:	H:
Custo De Usinagem:	[R\$]		Custo Ferramenta:	[R\$]
Custo Troca Fer.:	[R\$]		Custo De Opercao:	[R\$]
Custo Preparacao:	[R\$]		Custo Fixo:	[R\$]
Tecla "HOME" ou "BACKSPACE" para entrar com novo valor				ESC Retorna

Fig. A.2 - Entrada de dados para definição da tarefa



Geracao	Realimentacao	Setup	Apresentacao	reComendacoes
Defin. Tarefa Gera Condicao				
Condicientes De Corte				
Dados para Acabamento:				
Velocidade de Corte :	0.0000	[M/Min]		
Avanco de Corte :	0.0000	[mm/Rot]		
Profundidade de Corte :	0.0000	[mm]		
Forca de Corte Prevista:	0.00	[N]		
Dados para Desbaste:				
Velocidade de Corte :	142.3891	[M/Min]		
Avanco de Corte :	1.0000	[mm/Rot]		
Profundidade de Corte :	2.5000	[mm]		
Forca de Corte Prevista:	405.00	[N]		
Numero de Passes (Desb):	4			
↑↓ Seleccionar <ENTER> Executa Opção				ESC volta ao DOS

Fig. A.3 - Exemplo de dados de corte gerados.

Geracao	Realimentacao	Setup	Apresentacao	reComendacoes
Relação de Tarefas				
Codigo	Descrição			
DEMO	demonstração			
INPUS	banco de dados de usinagem			
UITA	dados recomendados - Ischatsch			
UITA1	ex. de torneamento			
ROMI1.1	ex. de Fresamento			
FCM	Restricao de forca			
RMAX	restricao de acabamento			
CINPUS	banco de dados			
Incluir Consultar Listar Seleccionar ↑↓ PgUp PgDn				ESC Retorna

Fig. A.4 - Seleção de tarefa para realimentação.

Geracao	Realimentacao	Setup	Apresentacao	reComendacoes
Realimentacao de Dados				
Item				Valor
Avanco	[mm/Rot]			
Profundidade	[mm]			
Velocidade	[M/Min]			
Vida da Fer.	[Min]			
Desgaste	[mm]			
Rugosidade	[um]			
Forca de Corte	[N]			
Houve quebra ?				
Acabamento ?				
Data	[Dia/Mes/Ano]			
↵ Seleccionam <ENTER> Executa Opção      ESC Retorna				

Fig. A.5 - Realimentação do sistema.

Geracao	Realimentacao	Setup	Apresentacao	reComendacoes
Minimos Quadrados Markov <b>Maximo a Posteriori</b> Variaveis Instrumentais				
Coeficientes Finais Item                      Valor				
C                              147.911250				
F                              -0.289801				
F                              -0.100201				
G                              -0.139713				
H                              1.000000				
← Seleccionam <ENTER> Executa Opção      ESC volta ao DOS				

Fig. A.6 - Indicação dos coeficientes da equação de Taylor.



Fig. A.7 - Definição da configuração.



Fig. A.8 - Formas de apresentação dos dados do sistema.

Geracao	Realimentacao	Setup	Apresentacao	reComendacoes
				<b>Tipos de tabela</b> tabela tipo A tabela tipo B tabela tipo C tabela tipo D tabela tipo E Banco de Dados
↑↓ Seleccionam				ESC Retorna

<ENTER> Executa Opção

Fig. A.9 - Seleção do tipo de tabela para dados recomendados.

Geracao	Realimentacao	Setup	Apresentacao	reComendacoes
Consulta a Tabela de Dados Recomendados				
Titulo: handbuch 88				
Material		Ferramenta		
C15-C22		P10		
		Velocidades [M/Min] Uc1 [m/min] Uc2 [m/min]		
Nome	Ferram/Mater	Velocidades	Avancos	FatorCorrec
↑↓↔ Seleccionam				ESC Retorna

<ENTER> Executa Opcao

Fig. A.10 - Entrada de dados de corte recomendados.