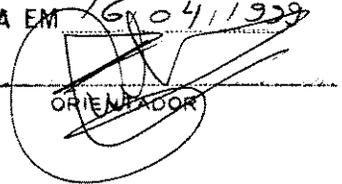


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR MARCOS VALÉRIO  
RIBEIRO E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 16/04/1999

  
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Otimização das Condições de Corte Assistida por Computador Durante o Desenvolvimento do Processo**

Autor: **Marcos Valério Ribeiro**  
Orientador: **Nivaldo Lemos Coppini**

009/99

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

# **Otimização das Condições de Corte Assistida por Computador Durante o Desenvolvimento do Processo**

**Autor: Marcos Valério Ribeiro  
Orientador: Nivaldo Lemos Coppini**

**Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação**

**Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.**

**Campinas, 1999  
S.P. - Brasil**



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	1101 Am
V.º	39341
PREÇO	229/99
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	29/10/99
N.º CPD	

CM-00136608-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

R354o

Ribeiro, Marcos Valério

Otimização das condições de corte assistida por computador durante o desenvolvimento do processo. / Marcos Valério Ribeiro.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Nivaldo Lemos Coppini.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

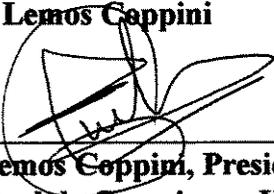
1. Usinagem – Banco de dados. 2. Máxima e mínima. 3. Custo-benefício. I. Coppini, Nivaldo Lemos. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

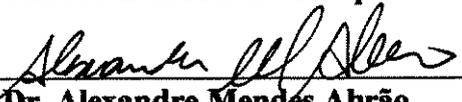
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

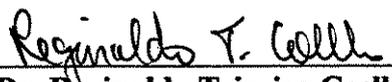
**TESE DE DOUTORADO**

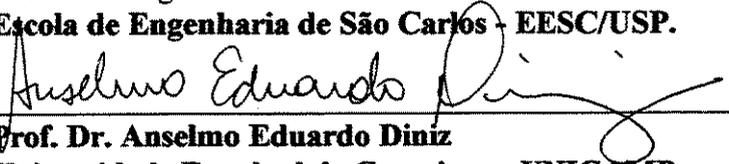
**Otimização das Condições de Corte Assistida  
por Computador Durante o Desenvolvimento  
do Processo**

**Autor: Marcos Valério Ribeiro  
Orientador: Nivaldo Lemos Coppini**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, Presidente  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão  
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho  
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP.**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Olívio Novaski  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.**

Campinas, 16 de abril de 1999.

## **Dedicatória:**

Dedico este trabalho à minha esposa Valéria e a meus filhos Larissa, Suzana e Luís Felipe, que são o meu maior incentivo.

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar a DEUS, o engenheiro do Universo. pois sem seu consentimento nada se faz.

À minha esposa e meus filhos, pelo carinho e compreensão constantes.

Aos meus pais Alcides e Santina, pelos exemplos de vida e de trabalho.

Ao Prof. Coppini, que além de ser um orientador, foi *mestre* e amigo.

Ao pessoal do *corredor* dos alunos: João, Durval, Dalberto, Marcão, Hipólito, Max, Fábio, Gilberto, Adalberto, Breda, Carlão, Valtair, Paulinho, Hidekasu, Deoclécio, Édimo, Duran e Osiris; pela amizade e solidariedade.

Aos professores do DEF pela formação e informação, em especial aos Profs. Anselmo e Olívio pela amizade e incentivo.

Aos funcionários do DEF por toda a colaboração, em especial à Marília, pelo bom humor e dedicação constantes.

À Faculdade de Engenharia Química de Lorena - FAENQUIL; pelo apoio e incentivo à realização deste trabalho de doutorado.

Ao Eng.º Jefferson Luiz Nogueira, pelo total apoio computacional.

À SANDVIK-COROMANT DO BRASIL, em especial ao Eng.º Francisco C. Marcondes, pela possibilidade da realização deste trabalho conjunto.

À EATON Ltda. Divisão de Produtos Automotivos, unidade de São José dos Campos, pelo apoio e colaboração.

À CAPES, pelo apoio financeiro à realização do trabalho.

*Deus criou a Natureza.  
Para compreendê-la o homem criou a Matemática.  
E para poder fazer uso dela, criou a Engenharia.*

## **Resumo**

Ribeiro, Marcos Valério, *Otimização das Condições de Corte Assistida por Computador Durante o Desenvolvimento do Processo*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 143 p. Tese (Doutorado)

Neste trabalho será discutida a aplicação do sistema de Assistência Técnica Assistida por Computador (ATAC) à luz da sua utilização como uma alternativa de procedimento para a otimização dos parâmetros de usinagem e custos de produção. Este sistema possui funções para se efetuar testes comparativos de usinagem usando diferentes ferramentas e otimizando seus resultados, permitindo assim, comparações mais efetivas para diferentes ferramentas na mesma situação. O objetivo é encontrar condições de corte possíveis de serem usadas em escala industrial. A seleção das condições de corte otimizadas foi baseada nas condições de máxima produção, calculadas em ambiente fabril. Isto permite traduzir a realidade a respeito do comportamento dos conjuntos máquina-ferramenta-peça, não incorrendo em imprecisões devido à utilização de dados retirados de catálogos ou manuais. Com a possibilidade de se armazenar os resultados dos ensaios em uma base de dados e permitir sua rápida recuperação, pode-se estimar valores confiáveis para peças diferentes em situações similares, permitindo assim a obtenção de valores iniciais para futuros testes. Neste trabalho será evidenciada a importância da utilização das informações de usinagem, permitindo desta maneira, garantir os mais altos níveis de otimização nos sistemas de processos de usinagem.

### *Palavras Chave*

Usinagem, Banco de Dados, Otimização, Condições Econômicas.

## **Abstract**

Ribeiro, Marcos Valério, *Computer Aided Optimization of Cutting Conditions During the Process Development*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 143 p. Tese (Doutorado)

In this work the application of the Computer Aided Technical Assistance (CATA) system will be discussed on the light of its utilization as an alternative procedure for optimizing the machining parameters and production costs. This system has procedures to make comparative tests of machining using different tools and optimizing their results, providing by the way, more effective comparisons for different tested tools in the same situation. The objective is to find possible cutting conditions to be used under industrial scale. The selection of the optimized conditions were based on the maximum production condition calculated in the industrial plant. This should to render the reality with respect to the performance of machine-tool-workpiece sets, avoiding in this way, imprecise results due to the utilization of data taken from catalogues or handbooks. By suitable storing in a database of the results and their fast recovery, reliable information can be estimated for different workpieces under similar situations, which allows the acquisition of initial values for future tests. It will be left clear in this work, the importance of the use of machining information, allowing in such a the use of the highest level of optimization in machining process systems.

### *Key Words*

Machining, Database, Optimization, Economical Conditions.

# Índice

1	Introdução	001
2	Aspectos do cenário de manufatura	003
2.1	Automação e Manufatura	003
2.1.1	O ambiente das máquinas CNC	004
2.2	As Ferramentas e os Sistemas Flexíveis de Manufatura	006
2.2.1	O cenário da manufatura flexível	008
2.2.2	O gerenciamento de ferramentas e os FMSs	009
2.3	Planejamento do Processo e Bases de Conhecimento	010
2.3.1	Conhecimentos de usinagem	011
2.3.2	Sistemas de base de conhecimento	012
2.4	Otimização das Condições de Corte	015
2.4.1	Características do processo	016
2.4.2	Funções-objetivo	018
2.4.3	A manufatura e a otimização	022
2.5	Seleção de Ferramentas	025
2.5.1	Planos de processo	026
2.5.2	Características da seleção de ferramentas	027
2.5.3	Alguns sistemas para a seleção de ferramentas	029

3	Bancos de dados em usinagem	033
3.1	Usinagem e Banco de Dados	034
3.2	Banco de Dados e Planejamento do Processo	037
3.3	Gerenciamento de Ferramentas	039
3.4	Exemplos de Gerenciadores de Ferramentas	045
4	Aspectos da usinagem dos metais	050
4.1	Vida da Ferramenta de Corte	052
4.2	Desgastes Convencionais	054
4.3	Equivalência nas Operações de Usinagem	057
4.3.1	Equação de Taylor Equivalente	060
4.3.2	Diâmetro equivalente	062
5	Modelo de Otimização e Seleção	067
5.1	Modelo de Custo Corrente	068
5.2	A Função-Objetivo	070
5.3	A Metodologia Proposta	073
5.3.1	Determinação dos parâmetros	074
5.3.2	Seleção da velocidade	082
5.3.3	Relação custo/benefício	084
5.3.4	Relação de similaridade de peças	086
6	Uma visão do Sistema ATAC	088
6.1	Operações de Manipulação de Dados	091
6.2	Aspectos Gerais do Sistema	093
6.2.1	Módulos primários de informação	094
6.2.2	Módulos de informações dos ensaios	099
6.2.3	A Função Pesquisa	108

7	Validação do Sistema	112
7.1	Montagem Experimental	113
7.1.1	O Teste	114
7.2	Resultados	116
7.2.1	Pré teste	116
7.2.2	Testes	119
7.3	Análise e Comentários	128
8	Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos	130
8.1	Conclusões	130
8.2	Sugestões	132
	Referências Bibliográficas	133

## Lista de Figuras

2.1	Simplificação dos bancos de dados na engenharia de manufatura	006
2.2	Representação das bases de dados do sistema de Maropoulos e Gill	015
3.1	Fatores que influenciam em um ambiente integrado por computador	040
3.2	Diagrama do fluxo de ferramentas e dispositivos no FMS	047
4.1	Representação dos desgastes: de flanco ( $VB_B$ ) e cratera (KT)	055
4.2	Gráfico do comportamento dos desgastes ( $VB_B$ e KT) em relação à $v_c$ e ao $f$	056
4.3	Esquema de uma operação de torneamento com velocidade de corte variável	058
4.4	Esquema de uma operação a velocidade de corte constante equivalente à anterior	058
4.5	Representação da <i>Equação de Taylor Equivalente</i> para o intervalo [ $i'$ , $i''$ ]	062
4.6	Torneamento cônico de uma peça	063
4.7	Torneamento cilíndrico de uma peça com vários diâmetros	064
5.1	Representação gráfica da obtenção do ( $d_e$ e $l_e$ ) para um trecho com conicidade	080
5.2	Representação gráfica da obtenção do ( $d_e$ e $l_e$ ) para um trecho de concordância	081
5.3	Representação gráfica da obtenção do ( $d_e$ e $l_e$ ) para uma série de cilindros	082
6.1	Módulos de informação do sistema ATAC	089
6.2	Tela de apresentação do sistema ATAC	094
6.3	Tela das opções para o módulo <i>fornecedor</i>	095
6.4	Tela da lista de fornecedores cadastrados	095
6.5	Tela de <i>consulta</i> de um registro do módulo <i>fornecedor</i>	096
6.6	Tela de <i>consulta</i> de um registro do módulo <i>ferramenta</i>	096
6.7	Tela de <i>consulta</i> de um registro do módulo <i>material</i>	097

6.8	Tela de <i>consulta</i> de um registro do módulo <i>máquina</i>	097
6.9	Tela de <i>consulta</i> de um registro do módulo <i>cliente</i>	098
6.10	Tela de <i>consulta</i> de um registro do módulo <i>peça</i>	098
6.11	Tela de <i>consulta</i> de um registro do módulo <i>peça</i> através da sua <i>denominação</i>	099
6.12	Tela de <i>cadastro</i> de uma peça através do módulo <i>dados operacionais</i>	100
6.13	Tela inicial de <i>cadastro</i> do módulo <i>dados operacionais</i>	101
6.14	Tela de opção do tipo de ensaio a ser cadastrado no módulo <i>dados operacionais</i>	101
6.15	Tela completa dos dados de um ensaio no módulo <i>dados operacionais</i>	102
6.16	Tela de <i>cadastro</i> do módulo <i>condições de corte</i>	102
6.17	Tela de <i>cadastro</i> do módulo <i>resultados</i>	103
6.18	Tela de <i>consulta</i> de <i>resultados</i>	104
6.19	Tela de cálculo da condição de máxima produção	104
6.20	Tela de sugestões de novos testes para a <i>otimização</i>	105
6.21	Tela final da <i>otimização</i> de uma <i>condição</i>	105
6.22	Tela de opções de <i>consulta</i> do módulo <i>custo</i>	106
6.23	Tela de <i>consulta</i> do módulo <i>custo tradicional</i>	106
6.24	Tela final de <i>consulta</i> do módulo <i>custo tradicional</i>	107
6.25	Tela de <i>consulta</i> do módulo <i>custo otimizado</i>	107
6.26	Tela final de <i>consulta</i> do módulo <i>custo otimizado</i>	108
6.27	Tela de opções da função <i>pesquisa</i>	109
6.28	Tela de busca de peça similar	110
6.29	Tela inicial dos dados para a função <i>pesquisa</i>	110
6.30	Tela completa dos dados para a função <i>pesquisa</i>	111
7.1	Válvula de admissão V4961	113
7.2	Curva de vida da <del>ferramenta</del> usada no pré-teste	117
7.3	Dispersão dos <del>valores</del> de vida da ferramenta usada no pré-teste	117
7.4	Curva de vida da <del>ferramenta</del> no teste	121
7.5	Dispersão dos <del>valores</del> de vida da ferramenta usada no teste	121
7.6	Separação da peça em <del>seções</del>	122
7.7	Perfil da variação da velocidade para o teste	124

## Lista de Tabelas

2.1	Fases do planejamento do processo	014
6.1	Os módulos de informação e as operações de manipulação disponíveis	091
6.2	Opções disponíveis para a operação de consulta	094
6.3	Opções para a operação de consulta dos ensaios	099
6.4	Opções do Pesquisa para cada <i>módulo</i>	109
7.1	Composição química do NIMONIC 80A	115
7.2	Valores de vida da ferramenta no pré-teste	118
7.3	Valores de tempo do pré-teste	119
7.4	Valores de custos do pré-teste	119
7.5	Valores de tempo do teste	120
7.6	Valores de vida da ferramenta no teste	120
7.7	Informações sobre a peça	122
7.8	Resultados da otimização	123
7.9	Valores de custos do teste	124
7.10	Valores de produção do teste	126
7.11	Valores do consumo de pastilhas no teste	127
7.12	Valores com a substituição da velocidade de corte	128

## Lista de Equações

4.1	velocidade equivalente	058
4.2	diâmetro equivalente para rotação constante	059
4.3	diâmetro equivalente para velocidade constante	059
4.4	equação da vida de Taylor reduzida	060
4.5	vida da ferramenta	061
4.6	equação de Taylor equivalente	061
4.7	equação de Taylor equivalente	062
4.8	diâmetro equivalente para o caso de rotação constante	063
4.9	diâmetro equivalente para trecho cônico com rotação constante	063
4.10	diâmetro equivalente de cilindros escalonados para rotação constante	064
4.11	diâmetro equivalente para o caso de velocidade constante	065
4.12	diâmetro equivalente para trecho cônico com velocidade constante	065
4.13	diâmetro equivalente de cilindros escalonados para velocidade constante	066
5.1	custo por peça tradicional	068
5.2	tempo de utilização da máquina	068
5.3	custo de utilização da máquina	069
5.4	custo do porta-ferramenta	069
5.5	custo da pastilha	069
5.6	custo da troca de ferramenta	070
5.7	velocidade de mínimo custo	071
5.8	custo da ferramenta por aresta	071

5.9	velocidade de máxima produção	073
5.10	rotação efetiva máxima	075
5.11	rotação efetiva mínima	075
5.12	expoente $x$ da equação de Taylor para velocidade constante	075
5.13	coeficiente $K$ da equação de Taylor	076
5.14	expoente $x$ da equação de Taylor para rotação constante	076
5.15	velocidade equivalente de corte	077
5.16	rotação efetiva do eixo-árvore	077
5.17	velocidade de corte equivalente	078
5.18	menor diâmetro crítico	078
5.19	maior diâmetro crítico	078
5.20	comprimento equivalente de trecho cônico	079
5.21	comprimento equivalente de trecho cônico	079
5.22	comprimento equivalente de trecho cônico	079
5.23	comprimento equivalente da concordância	080
5.24	velocidade limite devido à rotação mínima	083
5.25	velocidade limite devido à rotação máxima	083
5.26	velocidade limite devido ao material	083
5.27	custo por peça otimizado	085
5.28	constante independente da velocidade	085
5.29	relação custo/benefício	086
5.30	definição de elemento neutro	086
5.31	definição de inverso	086
5.32	prova do inverso	087
5.33	relação de similaridade	087
7.1	velocidade de corte selecionada inicial	123
7.2	vida de uma aresta da ferramenta	125
7.3	vida <i>total</i> da aresta	125
7.4	quantidade de arestas consumidas por turno	125

7.5	tamanho do lote produzido por turno	125
7.6	custo de usinagem para o lote	126
7.7	tempo de corte total	126
7.8	fração do tempo com a máquina usinando	126
7.9	tempo total de troca de ferramenta	127
7.10	fração do tempo com a máquina parada para troca de ferramenta	127
7.11	número de pastilhas utilizadas por turno	127

## Nomenclatura

### *Letras Latinas*

$\alpha$ - profundidade de suinagem	[mm]
b - espessura máxima para fixação da peça	[mm]
C - custo	[US\$]
d - diâmetro	[mm]
e - espessura total da base da peça	[mm]
$f$ - avanço da ferramenta	[mm/volta]
K - coeficiente da Equação de Taylor.	
KT - desgaste de cratera	[mm]
$l$ - percurso no sentido do comprimento	[mm]
N - número de arestas de uma pastilha.	
n - rotação do eixo-árvore	[rpm]
P - preço	[US\$]
r - raio	[mm]
t - tempo	[min]
T - vida da aresta	[min]
VB - desgaste de flanco	[mm]
v - velocidade de corte	[m/min]
x - expoente da Equação de Taylor.	
z - vida da aresta	[pç]

### *Letras Gregas*

$\alpha$ - ângulo da conicidade	[°]
$\phi$ - diâmetro da peça	[mm]
$\eta$ - rendimento do motor elétrico de acionamento	[%]

### *Superescritos*

'	- 1ª condição.
''	- 2ª condição.
'''	- 3ª condição.
^	- parâmetro constante.
-	- valor médio.

### *Subscritos*

0	- mínimo.
1	- menor.
2	- maior.
<i>a</i>	- real.
A	- relativo à aresta.
B	- relativo ao desgaste de flanco médio
c	- parâmetro de corte.
CB	- custo/benefício.
E	- efetivo.
e	- equivalente.
<i>h</i>	- relativo ao operador.

*I* - inicial.  
*i* - relativo ao trecho.  
*ins* - relativo ao inserto ou pastilha.  
*iv* - independente da velocidade.  
*lim* - limite.  
*m* - relativo à máquina.  
*m* - relativo à medição.  
*máx* - máximo.  
*min* - mínimo.  
*mlim* - mínima limite.  
*mxp* - relativo à máxima produção.  
*ref* - referência.  
**SEL** - relativo ao parâmetro selecionado.  
*sup* - relativo ao suporte da ferramenta.  
**T** - relativo à vida da aresta.  
*t* - relativo ao turno de trabalho.  
*Tf* - relativo à troca de ferramenta.  
*tp* - total por peça.  
**TP** - tradicional por peça.  
*um* - relativo à utilização da máquina.  
*z* - média.

### ***Abreviações***

**AGV** - *Automated Guided Vehicle* (Veículo Guiado Automaticamente).  
**AO** - Algoritmo de Otimização.  
**APC** - Aresta Postiça de Corte.  
**ATAC** - Assistência Técnica Auxiliada por Computador.  
**BC** - Base de Conhecimento.

CAD	- <i>Computer Aided Design</i> (Projeto Assistido por Computador).
CAM	- <i>Computer Aided Manufacturing</i> . (Fabricação Assistida por Computador)
CAPP	- <i>Computer Aided Process Planning</i> (Planejamento do Processo Assistido por Computador).
CIM	- <i>Computer Integrated Manufacturing</i> (Fabricação Integrada por Computador).
CNC	- <i>Computer Numerical Control</i> (Controle Numérico por Computador).
FMC	- <i>Flexible Manufacturing Cell</i> (Célula Flexível de Fabricação).
FMS	- <i>Flexible Manufacturing System</i> (Sistema Flexível de Fabricação).
GT	- <i>Group Technology</i> (Tecnologia de Grupo).
JIT	- <i>Just-in-time</i> .
TIMS	- <i>Tool Inventory Management System</i> (Sistema de Gerenciamento de Inventário de Ferramenta).

### ***Siglas***

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais).
EMBRAER	- Empresa Brasileira de Aeronáutica.
ISO	- <i>Isométrico</i> .
JIS	- <i>Japanese Institut for Standart</i> (Instituto Japonês de Padronização).
SAE	- <i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros Automotivos).
UNS	- <i>Unified Numbering System</i> (Sistema de Numeração Unificado).

# **Capítulo 1**

## **Introdução**

A informação desempenha um papel muito importante no cenário atual da manufatura, pois na maior parte dos casos as empresas são compostas de sistemas que devem ser integrados. Isso significa que o fluxo de informações entre eles é grande e deve possuir muita fluidez. Assim sendo, o gerenciamento das informações na manufatura integrada deve ser motivo de especial atenção, pois este tem ingerência direta sobre a eficiência dos processos de fabricação.

O sistema ATAC (Assistência Técnica Assistida por Computador), que é objeto deste trabalho, foi desenvolvido no sentido de facilitar este fluxo de informações no que diz respeito à usinagem. Para tanto ele desempenha as funções de armazenar de modo amigável as informações referentes aos processos de usinagem imediatamente após estes serem otimizados e proporcionar ainda um rápido e fácil acesso a estes dados para consulta.

Através das funções de banco de dados do sistema ATAC se objetiva fazer com que as informações normalmente dispersas pela empresa possam, de uma maneira bem sistemática, fazer parte realmente do acervo de documentos da empresa, garantindo assim que este conhecimento possa ser utilizado como uma vantagem competitiva pela empresa.

No decorrer do trabalho será fundamentada a metodologia utilizada pelo sistema e por fim o sistema será apresentado. Sistema este desenvolvido com o intuito de se constituir em uma alternativa de otimização de parâmetros e custos de usinagem, ele se baseia num modelo de determinação da vida da ferramenta em ambiente fabril, não incorrendo em erros que possam surgir quando da transposição dos valores obtidos em laboratório para o chão de fábrica.

O sistema, que inicialmente foi concebido para gerenciar informações originadas de ensaios de usinagem e proceder os cálculos de custo dos mesmos, passou a contar com novos algoritmos que permitem que ele passe a auxiliar na escolha de ferramentas e condições de corte com base em otimizações feitas a partir da condição de máxima produção.

Através deste procedimento de otimização, busca-se uma avaliação mais criteriosa do desempenho das ferramentas testadas, pois as mesmas irão trabalhar em suas melhores faixas de utilização, permitindo assim uma comparação mais eficiente das mesmas.

O presente trabalho foi então dividido da seguinte forma:

- Capítulo 2 - aspectos a respeito do ambiente de manufatura;
- Capítulo 3 - aspectos a respeito de banco de dados e sua relação com a usinagem;
- Capítulo 4 - aspectos relativos à usinagem dos metais;
- Capítulo 5 - apresentação da metodologia adotada no sistema;
- Capítulo 6 - aspectos acerca do sistema ATAC;
- Capítulo 7 - apresentação de dados provenientes dos testes de validação do sistema;
- Capítulo 8 - comentários e conclusões.

## **Capítulo 2**

### **Aspectos do cenário de manufatura**

#### **2.1 Automação e Manufatura**

A manufatura com arranjo celular visa o aumento da produtividade e a redução dos tempos envolvidos, particularmente em ambientes de chão de fábrica com pequenos lotes. Espera-se eficácia da manufatura celular, especialmente quando usada com Tecnologia de Grupo (GT). O caminho das implementações tem variado muito e muitas delas têm reportado êxito. A GT se desenvolveu inicialmente, como uma técnica de redução de variedade de produto, até se tornar uma filosofia de emprego geral. Pesquisas em GT e manufatura celular têm se concentrado nos benefícios derivados da codificação e classificação de peças, e na operação das células. Assim sendo, segundo Burgess et al. (1993), as conclusões gerais são que a GT reduz a variedade e aumenta a produtividade. Pesquisas em formação de célula têm resultado em conclusões similares.

Os avanços na tecnologia têm sido viáveis devido aos computadores serem usados de uma forma mais ampla numa variedade de aplicações, incluindo aí a tecnologia de manufatura. Sistemas CAD/CAM (projeto e fabricação assistidos, respectivamente) já estão solidamente estabelecidos em indústrias de manufatura, e têm-se alcançado agora um estágio onde é imperativo adotar estas técnicas para manter-se competitivo. De acordo com Ssmakula (1990), se por um lado, com a aplicação de CAD tem se tornado muito comum ter módulos de CAM tais como: CAPP

(planejamento do processo), CNC (controle numérico), FMS (sistemas flexíveis) e AGV (veículos automáticos). Por outro lado, tem se tornado aparente a necessidade de integração destes sistemas.

O conceito de Manufatura Integrada por Computador (CIM), segundo Cho et al. (1991), é a integração do fluxo de materiais e do fluxo de informações tecnológicas e administrativas, dentro do princípio fundamental dos sistemas de engenharia de manufatura. No sentido de implementar sistemas CIM para manufatura discreta de peças tipo lote, sistemas CAD/CAPP para o fluxo de informações tecnológicas, CAM para o fluxo de materiais e CAP para o fluxo de informações de administração devem ser integrados.

CAD/CAM é um ramo emergente da tecnologia e se preocupa com o uso de computadores para realizar várias funções e integrá-las, tais como projeto, planejamento de processo e programação de peças em CNC, no ciclo da manufatura.

### 2.1.1 O ambiente das máquinas CNC

Segundo Eversheim et al. (1991.a), o processo de produção industrial possui uma estreita relação entre projeto e fabricação, com respeito a aspectos organizacionais e de dados. Pesquisas têm sido dirigidas tipicamente à decomposição arbitrária de subproblemas definidos sobre diferentes domínios de geometria da peça e de processo, levando a resultados amplamente diversos, tipicamente incompatíveis com o conceito de sistema integrado. A geração de planos de processos em geral inclui as seguintes funções:

- determinação do material da peça;
- determinação da seqüência das atividades de processo;
- seleção da máquina-ferramenta, ferramentas e dispositivos de fixação e;
- cálculo do tempo.

O resultado é documentado em um plano de processo, que em geral é subdividido em uma seção de cabeçalho e a sequência das atividades de processo. Quanto à geração de dados do programa CNC, o processista até agora tem somente decisão sobre certas tarefas a fazer, com o auxílio da máquina CNC. Estas decisões atualmente são a única ligação entre o planejamento do processo e a programação CNC.

Ainda segundo Eversheim et al. (1991.a), para se gerar um programa de CNC as seguintes funções, subdividas em dois estágios têm de ser cumpridas.

- o primeiro estágio inclui: definição da geometria da peça para a aplicação em CNC; decomposição do processo em operações referentes a cada ferramenta; cálculo de velocidades, avanços e profundidades de corte, e seleção de ferramentas.
- num segundo estágio um sistema de planejamento de processo poderia realizar a: determinação do número de passes e outros parâmetros de trajeto da ferramenta; descrição do trajeto da ferramenta pelos pontos críticos, para evitar possíveis colisões.

Numa simulação geométrica de corte dos sistemas CAM, não somente a geração do trajetória da ferramenta, mas também a seleção de ferramenta são saídas importantes do sistema. Eles afetam o tempo total de usinagem e a área não cortada da peça. Uma simulação geométrica de corte é importante no problema de seleção de ferramentas porque a área a ser cortada pela ferramenta deve ser considerada no problema (Mizugaki et al. 1994).

As dificuldades técnicas na implementação dos sistemas de CAD e CIM, segundo Cho et al. (1991) estão na integração das atividades que apoiam as de produção, tais como de projeto do produto e planejamento de processo, e atividades de controle tais como monitoramento dos processos de manufatura e processamento de dados/conhecimentos. Também uma das razões do porquê das abordagens atuais para o CIM serem difíceis é porque as mais usadas, são baseadas em técnicas de processamento de dados e não de conhecimento. Dados são inerentemente rígidos, já o conhecimento é mais adaptável às tarefas de automação flexível e integrada.

No sentido de melhorar a integração dentro de um sistema CAD/CAM, é importante usar o mesmo dado para diferentes tarefas. Isso têm acentuado a importância do uso de banco de dados na engenharia de manufatura (Jang e Bagchi 1989). Por exemplo, o tempo necessário para a obtenção da primeira peça aceita, em um sistema CIM pode ser reduzido grandemente pelo uso de um banco de dados comum para projeto, planejamento e fabricação (figura 2.1). Conforme as peças e a variedade das tecnologias de fabricação aumentem, o banco de dados pode ser atualizado, reduzindo deste modo a dependência da coleção dos arquivos de projeto da existência de peças e processos anteriores.

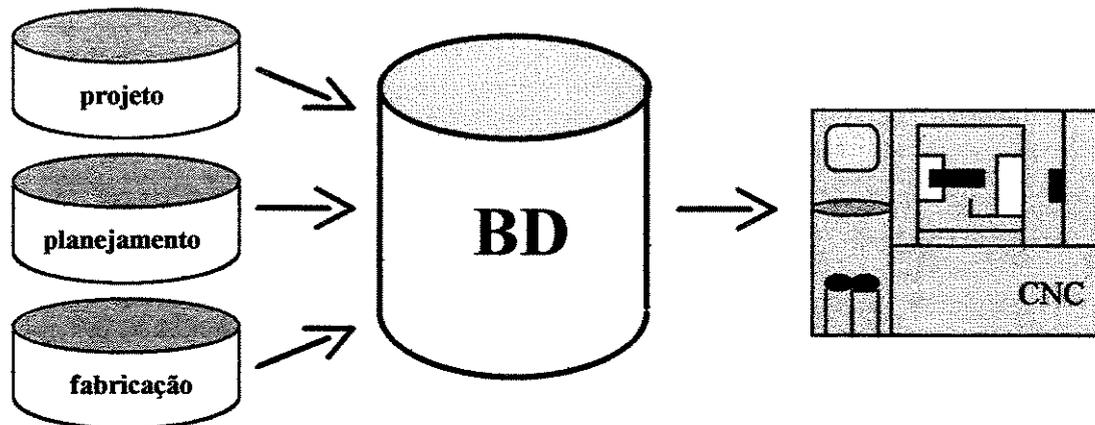


Figura 2.1 - Simplificação dos bancos de dados na engenharia de manufatura

## 2.2 As Ferramentas e os Sistemas Flexíveis de Manufatura

A importância do gerenciamento de ferramenta nas aplicações bem sucedidas de FMS está sendo reconhecida gradualmente tanto pelos *práticos* como pelos pesquisadores (Gyampah et al. 1992). Tem sido estimado que o ferramental compreenda cerca de 20 % do custo de novos sistemas de manufaturas, e para sistemas FMS a proporção pode ser ainda maior desde que o ferramental inclua fixações e *pallets* de alto custo. Apesar deste alto custo de ferramental, muita atenção não tem sido *paga* para questões de ferramentas.

Ainda segundo Gyampah et al. (1992), nota-se que após o desastre financeiro de muitos FMSs, muitas indústrias de manufatura e fabricantes de máquinas-ferramenta têm começado a perceber que o ferramental tem um impacto significativo no desempenho efetivo de um FMS. Observa-se também que, apesar do advento dos FMSs ter aumentado grandemente o potencial de produtividade dos fabricantes, o gerenciamento de um número crescente de componentes de ferramentas e suas aplicações têm impedido aumentos na produtividade. Portanto, cada vez mais, a pesquisa se faz necessária no gerenciamento de ferramentas para FMS.

Existem questões críticas no gerenciamento de ferramentas que afetam a produtividade de muitos sistemas de manufatura flexível e automática. De acordo com Gray et al. (1993), fabricantes e fornecedores de máquinas-ferramenta reconhecem que a falta de atenção para tais questões de gerenciamento de ferramentas é a razão primordial para o fraco desempenho de muitas instalações.

Muitas companhias têm percebido que o desempenho e a eficiência nos custos de uma célula de manufatura flexível dependem, em considerável grau, da organização e preparação das ferramentas necessárias para se processar o trabalho. O ferramental pode representar um investimento significativo especialmente em sistemas altamente automáticos, tanto no estágio de projeto da instalação quanto nas operações do dia-a-dia (Coleman et al. 1996.a). Conseqüentemente, o planejamento e controle do fluxo de ferramentas é um importante fator, que não deve ser omitido, e que necessita ser considerado simultaneamente com o fluxo de trabalho.

Os recentes aperfeiçoamentos dos FMS e dos instrumentos de controle computadorizados, têm implicado na necessidade de novas abordagens para se estimar parâmetros e avaliar a utilização de recursos conectados com os processos de produção (Zavanella et al. 1990). Neste cenário, um elemento de interesse significativo, tanto a partir de aspectos tecnológicos quanto econômicos, é o espectro necessário de ferramentas para se completar o ciclo de remoção de cavacos, ou seja o número ótimo de itens em cada família de ferramentas.

Para assegurar a qualidade do desempenho de um sistema automático, é necessário um alto nível de integração entre a capacidade do ferramental e as outras funções de programação básica, incluindo: o planejamento do processo, a programação, o projeto e a programação das peças. Um sistema de informação efetivo, bem gerenciado é necessário para se coletar e distribuir dados sobre ferramental através destas funções (Gray et al. 1993).

### 2.2.1 O cenário da manufatura flexível

Um grande desenvolvimento no processo de integração por computador dos FMSs tem sido a implementação da troca automática de ferramentas (Sharit e Elhence 1989). Este desenvolvimento tem servido para promover a remoção de operadores do FMS embora esse não fosse o objetivo intrínseco. Este desenvolvimento tecnológico porém, nada acrescenta sobre uma importante questão também relacionada: quando a ferramenta deve ser trocada ?

De acordo com Coleman et al. (1996.a), em muitas células de usinagem flexíveis, a interação entre trabalho e fluxo de ferramentas é dominado pela programação de trabalho, e esta é restrita pela necessidade de encontrar uma seqüência de trabalho específica ditada pelas devidas datas ou alguma outra ordem de prioridades. A política para distribuição de trabalho que reflete esta necessidade é referida como “*orientada a trabalho*” ou “*orientada a peça*”. Dentro desta estratégia de gerenciamento, as peças ganham prioridade dentro da célula. Isto se evidencia nas células que tem uma produção única de trabalhos com ferramentas especiais, com o custo de ferramental ficando insignificante em comparação às peças caras, ou onde as máquinas compartilham ferramentas comuns e as peças então podem ser programadas para qualquer máquina.

Já na abordagem de gerenciamento “*orientada a ferramenta*” (Newnes e Bell 1996) as ferramentas impõem quais peças processar pelo exame das ferramentas montadas na máquina. A desvantagem é que não se considera o efeito que isso pode ter na carga de máquina ou sobre as datas devidas para trabalhos. Os objetivos são dois, segundo Coleman et al. (1996.b). O primeiro é reduzir o custo e a complexidade do gerenciamento de ferramentas em termos de quantidade de

trocas de ferramenta necessárias para processar a lista de trabalho. Isto é alcançado pela redução do número de vezes que uma montagem de ferramenta precisa ser enviada para a célula e pela promoção da utilização eficiente de ferramentas individuais nas máquinas, maximizando assim a quantidade de ferramentas completamente gastas devolvidas. O segundo objetivo é controlar a seqüência de trabalho através da *produção* de cada máquina em relação à lista inicial de trabalho, minimizando o tempo relativo à cada trabalho.

Inicialmente, a lista de trabalhos a ser completada durante cada período de manufatura necessita ser detalhada. Esta lista de trabalho organiza as entradas para o algoritmo, as quais realizam o planejamento para duas funções chaves: distribuição de trabalho e gerenciamento de ferramentas.

Ainda segundo Coleman et al. (1996.b), a distribuição de trabalhos é encaminhada pela geração de uma fila para cada máquina, usando dois estágios de análise de agrupamento os quais levam em conta a similaridade nas ferramentas necessárias entre os trabalhos individuais. O fator dominante que restringe a distribuição de trabalho é a necessidade em manter uma carga de trabalho balanceada para cada máquina.

Finalmente, o problema de gerenciamento das ferramentas é encaminhado pela geração de *kits* de ferramentas que necessitam ser emitidos e devolvidos à cada máquina, no sentido de processar os trabalhos em cada fila. Estes são determinados segundo o número de regras de troca de ferramentas as quais são adicionalmente restringidas pela capacidade limitada de cada magazine de máquina.

### 2.2.2 O gerenciamento de ferramentas e os FMSs

Através do sistema de controle computacional que rege as atividades do FMS e de uma interface homem/computador apropriada, os operadores monitoram e diagnosticam as informações, formulam e executam as estratégias de intervenção e planejamento conduzidas para otimização do desempenho global do sistema (Sharit e Elhence 1989). Porém, a despeito desta

ampliação de papéis, ainda não está claro quais funções podem ser alocadas para o operador e quais devem ser alocadas para o computador.

Questões específicas da ferramenta, e que são importantes no gerenciamento incluem o número e tipos de ferramentas, taxas de velocidade da ferramenta, taxas de avanço da ferramenta e a tecnologia usada para monitorar e controlar a usinagem e as condições de ferramental. Para um dado conjunto de máquinas, estes fatores determinam a qualidade das peças produzidas e a efetiva capacidade das máquinas. De acordo com Gray et al. (1993), em manufatura automática, estas escolhas são mais críticas do que nas operações manuais, por causa do nível de integração necessário entre as várias funções de produção, e o maior capital e tempo envolvidos no desenvolvimento do *software*, *hardware* e suporte técnico para a manufatura automática.

Muitos benefícios têm sido apontados devido ao aumento de integração do gerenciamento de ferramentas dentro de sistemas de projeto, planejamento, programação e controle. Os benefícios citados incluem redução nos custos de produção devido à minimização do número e tipos de ferramentas necessárias, aumento da produtividade devido à redução dos estoques e tempo de *set-up*, melhorias na flexibilidade de peças e roteiros e melhores trajetórias e contabilidade de custo de ferramental.

### 2.3 Planejamento do Processo e Bases de Conhecimento

“*Produção em massa e vendas em massa*” tem prevalecido no mundo desde que a América instituiu o “*sistema americano de fabricação*” na metade do último século. Porém na década de 80 a produção “*just-in-time*” (JIT) - fabricação dos produtos necessários nas quantidades necessárias e no tempo necessário - se tornou a principal corrente (Hitomi 1990), e ainda hoje ela é a meta de muitas empresas. Esta fabricação de multi-produtos (ou itens) em pequenas quantidades oferece uma produtividade mais baixa do que a produção em massa, mas a lógica e a metodologia efetiva deste tipo de produção pode ser pesquisada e determinada para a manufatura que está por vir. Equipamentos de *hardware* para este propósito têm sido desenvolvidos como os FMSs e as células flexíveis (FMCs).

A introdução da automação flexível, manufatura integrada por computador (CIM) criaram novos requisitos para o uso de sistemas de base de conhecimento. A redução do tamanho dos lotes e a aceleração de todo o processo de fabricação requerem rápidos posicionamentos e reações. Segundo Spur e Specht (1992), é questionável se as características técnicas do equipamento de manufatura flexível podem continuar a ser economicamente representadas nos programas convencionais. Emergirá no futuro um grande campo de aplicações para sistemas de base de conhecimento no ambiente CIM, no tocante à preparação dos dados, ao planejamento e ao controle.

### 2.3.1 Conhecimento em usinagem

Tradicionalmente, o planejamento de processos tem sido feito por processistas, com larga experiência. Conseqüentemente, o plano gerado é estritamente dependente da experiência e habilidades de tais pessoas. Elaborar tais planos é uma tarefa que requer grande dispêndio de tempo para testar todas as alternativas possíveis, objetivando obter a melhor solução (Coppini e Costa 1995). Atualmente, entretanto, a necessidade de integração das atividades de projeto e manufatura - como conseqüência da demanda por qualidade, produtividade e competitividade - tem conduzido ao desenvolvimento de sistemas computacionais para apoiar o planejamento de processos (CAPP).

Planejamento de processo para peças mecânicas envolve a preparação de um plano que resuma o percurso do processamento, as operações, máquinas-ferramenta, fixações, e ferramentas necessárias para produzir a peça com o menor custo e a melhor qualidade. Esta é uma tarefa importante na produção e é realizada tipicamente por pessoas especializadas. Porém, segundo Kusiak (1991), tem sido uma tendência nos anos recentes automatizar o planejamento de processo. Automatizar a tarefa de planejamento de processo tem as seguintes vantagens:

- redução do *lead time*;
- aumento da consistência dos planos de processo; e

- eficiência e economia na produção.

Como resultado, um certo número de sistemas de planejamento têm sido desenvolvidos.

A seleção de parâmetros de corte é uma etapa muito importante na geração de um plano de usinagem completo. Entretanto, isso não é uma tarefa muito simples, devido ao volume e complexidade do conhecimento necessário à tomada de decisões (Coppini e Costa 1995).

Devido à diversidade das tarefas de planejamento do processo, isso dificulta a aplicação de uma abordagem uniforme para a sua automação. A atividade de planejamento do processo pode ser dividida em várias fases, conforme Kusiak (1991): como uma primeira fase, é imperativo que a geometria e o perfil da peça sejam completamente entendidas antes que o plano de processo seja gerado. Após esta fase, segundo a interpretação da peça, são selecionados os processos de usinagem apropriados. A seguir, têm de ser selecionadas as máquinas-ferramenta e as fixações. Dependendo dos parâmetros de usinagem, o volume total de material removido pode ser decomposto em *volumes* menores. Na seqüência, são geradas as precedências das restrições para se realizar as operações de usinagem. Então os *volumes* são listados em uma certa seqüência para a geração do plano final de processo.

### 2.3.2 Sistemas de base de conhecimento

Sistemas de base de conhecimento se distinguem dos *softwares* convencionais pela maneira na qual é representado e processado o conhecimento, e pelo grande espectro de utilizações as quais se direcionam para novas áreas de aplicação. A solução de problemas nestas áreas de conhecimento é freqüentemente relegada a pessoas especializadas, ou a técnicos da fábrica que agem com base na experiência adquirida (Spur e Specht 1992).

Um sistema pode trabalhar com êxito em ambientes onde existam poucos conhecimentos prévios sobre os processos, ou quando exista pouca confiança na qualidade das informações existentes, segundo Maropoulos e Alamin (1995). Muitos ambientes de usinagem têm uma grande

quantidade de informação sobre usinagem, com respeito à ferramentas e condições de corte para diferentes operações e materiais de peça. Portanto, pode ser desejável usar muitas destas informações durante a atividade de planejamento do processo. A este respeito, a fragilidade do modelo algorítmico é que ele não considera as informações que podem estar disponíveis, como comprovadas e de confiança. Porém, deve sempre se ter em mente esta questão de quão boa é a informação disponível e como avaliar sua qualidade.

Sistemas de base de conhecimento para suporte de aquisição de conhecimento ou para pesquisa de informação em áreas especiais, podem ser usados em uma variedade de aplicações. Segundo Spur e Specht (1992), sistemas que sejam apropriados para uma utilização prática estão sendo buscados atualmente. O futuro do desenvolvimento da tecnologia de conhecimento é um desafio para engenheiros e cientistas da computação, e para pesquisadores interdisciplinares. Máquinas que processam conhecimento e são capazes de aprender estarão aptas a armazenar suas próprias experiências operacionais e compará-las com a dos seus programas.

A informação armazenada também pode ser atualizada de acordo com a necessidade. A nova possibilidade resulta essencialmente do acesso havido para o conhecimento e experiência dos funcionários mesmo quando eles estão ausentes ou sempre que eles se aposentem.

Na tabela 2.1 são listadas as oito fases da tarefa de planejamento de processo com a abordagem de solução para cada fase individual, de acordo com Kusiak (1991). Cada fase na tabela 2.1 tem atribuída a ela uma abordagem de solução dominante. Por exemplo, todas as funções da fase 1 são basicamente desempenhadas por sistemas de base de conhecimento (BC), enquanto na fase 4 algoritmos de otimização (AO) são complementados com sistemas de base de conhecimento.

Tabela 2.1 - Fases do planejamento do processo

Fase Nº	Nome da fase	Solução
1	Interpretação dos dados de projeto da peça	BC
2	Seleção dos processos de usinagem	BC
3	Seleção das Máquinas-ferramenta e fixações	BC
4	Otimização da usinagem	AO/BC
5	Decomposição em <i>volumes</i> de material removido	BC
6	Seleção da seqüência dos <i>volumes</i>	AO/BC
7	Geração da seqüência de restrições	BC
8	Seqüenciamento dos <i>volumes</i>	AO/BC

Um outro sistema com um módulo de base de conhecimento (Maropoulos e Gill 1995) possui duas funções principais:

- primeiramente, a seleção de ferramentas para operações de torneamento, faceamento ou furação e,
- em segundo lugar, a especificação de condições de corte eficientes para estas ferramentas ou para uma nova ferramenta definida pelo usuário.

Para desempenhar estas funções, o sistema utiliza informações de ferramental e dados de corte de operações aprovadas quer estas sejam idênticas ou similares às novas operações. Obviamente, para operações idênticas as ferramentas e as condições de corte podem ser usadas para as novas operações sem qualquer alteração. Porém, em muitas situações somente operações similares podem ser encontradas e uma função chave é a definição dos critérios de similaridade com respeito aos componentes, geometrias de perfil, detalhes de operação, suportes de ferramenta, insertos de carbetto e condições de corte.

Por exemplo: dois componentes são considerados similares quando existe uma certa correlação entre as suas razões comprimento/diâmetro e seus diâmetros. Os critérios de

similaridade são usados para o agrupamento e classificação de operações dentro de classes de similaridades.

O sistema ainda, tem acesso a 5 bases de dados (figura 2.2). As bases de ferramentas, máquinas, materiais e usinabilidade, são estáticas já que elas não são alteradas pelo uso do sistema através de um período de tempo, ao passo que a base de operações aprovadas é dinâmica porque se atualiza como resultado da operação do próprio sistema.

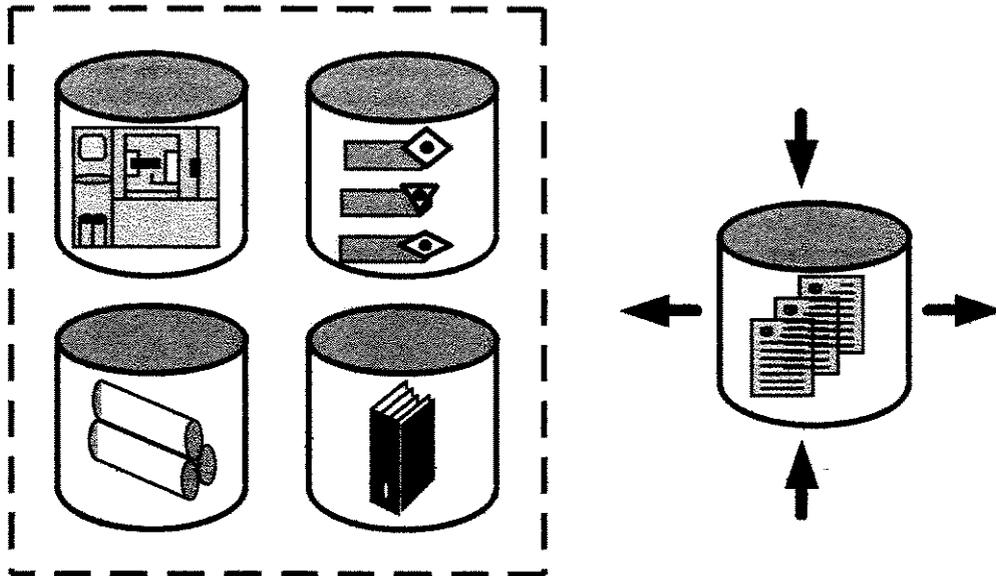


Figura 2.2 - Representação das bases de dados do sistema de Maropoulos e Gill (1995)

#### 2.4 Otimização das Condições de Corte

A análise do custo de produção de lotes de peças é um aspecto fundamental na avaliação do sistema de manufatura, devido à necessidade de um cálculo preciso e confiável da rentabilidade do investimento e do seu tempo de amortização. Neste aspecto, de acordo com Maccarini et al. (1991), os ciclos de usinagem das peças passam a ter um papel fundamental e enfatizam a função básica das ferramentas, como uma consequência da contribuição delas para um relevante aumento do valor agregado do produto compatível com o trabalho de corte.

As informações inicialmente disponíveis antes do planejamento da operação são o material da peça e normalmente o processo de fabricação. A seleção do material e geometria da ferramenta, tanto quanto o cálculo das condições ótimas de corte, de acordo com as quais a máquina-ferramenta é economicamente operacional, representa uma parte importante da programação CNC e da geração das folhas de planejamento de processo (Kastelic et al. 1993).

Na visão das reduções significativas no custo que podem ser obtidas pela seleção da ferramenta correta e suas condições de corte ótimas associadas, particularmente para operações de torneamento externo, é considerado segundo Hinduja et al. (1993), que qualquer sistema de seleção que não leve em conta todos os parâmetros tecnológicos importantes tem severas limitações. A vantagem está portanto, em tirar proveito do uso de condições de corte ótimas.

Com o sempre decrescente tamanho dos lotes e melhoria nos *softwares*, sistemas de programação de peças que geram automaticamente as instruções de controle para as máquinas CNC, estão sendo considerados como um meio econômico e eficiente de reduzir os *lead times* (Arsecularatne et al. 1992). *Softwares* têm surgido com lógica e capacidade de tomada-de-decisões suficientes para reconhecer a geometria do componente em relação ao blanque, o que permitirá a ele determinar o volume de material a ser removido. Os estágios que são automaticamente implementados pelos *softwares* incluem também:

- a seqüência de operações;
- selecionar as ferramentas apropriadas;
- determinar as condições ótimas de corte;
- determinar a trajetória da ferramenta; e
- gerar as instruções para o CNC.

#### 2.4.1 Características do processo

O desenvolvimento de um sistema que satisfaça as condições reais de fabricação necessita não somente de soluções determinísticas mas também heurísticas. Conforme Lukic et al. (1991),

as condições reais de fabricação são definidas pelo efeito da interação entre o material da peça, a ferramenta e o sistema de fabricação. A usinabilidade do material da peça, características da aresta da ferramenta e condições do sistema de usinagem, todas contribuem para a natureza não-determinística do processo.

Ainda segundo Lukic et al. (1991), as características de usinabilidade do material da peça não podem ser exatamente definidas por causa das seguintes razões:

- o mesmo material da peça varia em características para peças de lotes diferentes;
- materiais de peça fabricados de acordo com padrões de países diferentes e oficialmente aceitos como equivalentes, diferem em usinabilidade;
- o mesmo estado térmico abrange diferentes estruturas cristalinas no material, resultando em diferentes características mecânicas; e
- as mesmas categorias de tensão de ruptura e dureza do material da peça pode na realidade corresponder a valores diferentes dentro dos limites prescritos.

A influência da aresta da ferramenta sobre a natureza não determinística da usinabilidade é significativa, e é caracterizada pelo seguinte:

- arestas de ferramentas de metal duro da mesma classe ISO e de diferentes fabricantes não têm exatamente as mesmas estruturas, as quais fazem então diferença nas características de corte;
- arestas de ferramenta do mesmo fabricante, com a mesma classe, e do mesmo lote, podem diferir, em qualidade e características de corte.

Assim, segundo Kastelic et al. (1993), a qualidade dos parâmetros de processo otimizados para máquinas CNC e a programação das operações dependem basicamente da qualidade e confiabilidade dos dados de usinabilidade disponíveis em um banco de dados correspondente e do modelo de otimização aplicado nos cálculos. Se a estratégia de controle é baseada por exemplo num critério de mínimo custo por peça, é necessário selecionar um procedimento de otimização

que proporcione em um curto espaço de tempo, os valores ótimos para as condições de usinagem relevantes.

#### 2.4.2 Funções-objetivo

No sentido de alcançar objetivos econômicos do processo, condições ótimas de usinagem devem ser determinadas. Embora se possa determinar condições de corte desejáveis baseadas na experiência ou em dados de manuais, isto não assegura que os dados obtidos serão ótimos ou perto de ótimos para aquele ambiente e montagem de máquina em particular (Chua et al. 1993). A fim de se determinar as condições de corte ótimas, modelos matemáticos confiáveis precisam ser determinados.

Procedimentos relatados na literatura para determinar as condições ótimas de corte incluem entre outros, desde regressões múltiplas (Jang 1992), programação geométrica (Koulamas 1991), gradientes de 1ª ordem (Billatos e Kendall 1991, Malakooti 1991), programação linear (Agapiou 1992.a, 1992.b, 1992.c), programação quadrática seqüencial (Chua et al. 1993) a modelo de redes de filas (Schweitzer e Seidmann 1991). Em linhas gerais estes são comentados a seguir.

Um modelo de otimização integrado é proposto por Jang (1992), no sentido de possibilitar a inclusão do controle da integridade de superfície no processo de fabricação. Este modelo proposto, pode também ser aplicado para o desenvolvimento de um banco de dados de tomada de decisão de um controle adaptativo do processo de usinagem. Este modelo inclui falha de ferramenta, integridade de superfície, precisão dimensional e as condições de formação de cavaco bem como as restrições do processo de otimização.

A integridade de superfície é quantificada neste estudo, a partir de equações empíricas, para possibilitar a obtenção da rugosidade superficial especificada e a distribuição de tensões residuais na superfície usinada. Uma análise de regressão é usada para desenvolver estas equações, a partir de resultados de simulações que cobrem uma faixa de aplicação prática.

Koulamas (1991) apresenta um modelo analítico para simultaneamente determinar as condições ótimas de usinagem (velocidade de corte e avanço) e a melhor política de troca de ferramenta em problemas de restrição econômica, através do uso de programação geométrica. A política ótima de troca de ferramenta é inicialmente determinada como uma ruptura da vida da ferramenta (independente da distribuição subjacente da vida da ferramenta) e ela é então expressa como vida atual da ferramenta através da consideração da distribuição da vida da ferramenta aplicável. São consideradas distribuições de vida de ferramenta aplicáveis para várias faixas de velocidades de corte e processos de falha de ferramentas, e são consideradas também restrições à respeito dos valores máximos disponíveis de avanço e/ou acabamento superficial requerido.

Segundo Malakooti (1991), numa fase inicial, um possível ponto é selecionado da base de dados de usinabilidade (ou de uma aproximação multi-objetiva *on-line*). Esta informação é enviada ao controlador, que implementa as variáveis de decisão (velocidade, avanço e profundidade de usinagem). O modelo compreende quatro estágios básicos:

- medição *on-line* das variações dos parâmetros de processo. As saídas do processo como potência utilizada, acabamento superficial, forças de corte e temperatura na zona de corte são monitoradas;
- sistema de tomada de decisão *on-line* para a seleção do ponto operacional atual;
- modificação e implementação do ponto operacional atual baseado na decisão acima; e
- atualização *on-line* do banco de dados de usinabilidade se a condição operacional atual é consistente, após estágio anterior.

O modelamento matemático da vida da ferramenta apresentado por Chua et al. (1993), modelos de força de corte e potência consumida para um trabalho em particular e o material de ferramenta envolvem muitos outros fatores, tais como maneira de prender a peça, a geometria da ferramenta, etc. Porém, para facilitar a coleção de dados experimentais, somente três fatores dominantes foram considerados no planejamento do experimento. O programa experimental foi planejado usando um projeto completo  $3^3$  fatorial. Os fatores considerados foram velocidade,

avanço e profundidade de usinagem. A faixa de valores para cada fator foi fixada em três níveis: baixo, médio e alto.

O objetivo do trabalho de Schweitzer e Seidmann (1991) foi determinar as mínimas taxas de custo de processamento a partir de um dado objetivo do FMS, além do nível do trabalho em processo, rotas da peça, espera de transporte e a função de capacidade de custo variável para cada máquina. Uma metodologia de otimização de análise de valor médio não linear para redes de filas foi desenvolvido para controlar gargalos e comprimentos de fila, já que as taxas de processamento são variadas. Esta metodologia pode providenciar custos de produção médios e marginais com confiabilidade necessária e suficiente para o FMS alcançar seus objetivos.

Como expresso anteriormente, no planejamento de processo de operações de corte, é desejável se operar sob condições ótimas de usinagem para satisfazer condições econômicas, tecnológicas e de projeto estabelecidas. Tenta-se conseguir isto via modelos de otimização desenvolvidos para as operações de usinagem. Segundo Duffuaa et al. (1993), os modelos consistem de uma função objetivo tal como mínimo custo de produção, mínimo tempo de produção, máximo lucro, ou máxima taxa de remoção de metal, as quais são função dos parâmetros de corte. As condições de corte são obtidas pela otimização da função objetivo que está sujeita a um conjunto de restrições ditadas pelas especificações da máquina, a dinâmica da máquina e especificações do projeto dos componentes por exemplo. Os modelos de usinagem resultantes são usualmente de natureza complexa, devido em parte à natureza das operações de usinagem e das várias restrições atuantes no processo.

Portanto, segundo Hitomi (1990), os seguintes três critérios são reconhecidos como critérios básicos para a fabricação:

- *critério do mínimo tempo ou da máxima taxa de produção*: este maximiza o número de produtos produzidos em uma unidade de intervalo de tempo. Assim sendo, ele minimiza o tempo de produção por peça. Este critério é para ser adotado quando um aumento na

produtividade física ou da eficiência produtiva é desejada, negligenciando os custos de produção necessários e/ou lucro obtido.

- *critério do mínimo custo*: este critério se refere à produção de uma unidade do produto no menor custo, e coincide com o critério de máximo lucro, se a renda unitária é constante. Este é o critério adotado quando há um grande tempo para produção.
- *critério de máxima taxa de lucro*: este maximiza o lucro em um dado intervalo de tempo. Este é o critério a ser recomendado quando existe uma capacidade insuficiente para um intervalo de tempo específico.

Tradicionalmente na usinagem dos metais, o custo tem sido o principal critério para a seleção de parâmetros de usinagem tais como a velocidade e o avanço (Malakooti 1991). No problema de usinagem de multi-objetivos, porém, muitos critérios são considerados. Os critérios geralmente estão em conflito; por exemplo, a maximização da taxa de produção (ou seja a taxa de remoção de material) pode aumentar o custo total pelo aumento da taxa de desgaste da ferramenta. Isto é, a seleção de variáveis de decisão diferentes tais como avanços e velocidades tem conseqüências diferentes em termos de custos, produtividade e qualidade da usinagem (ou seja acabamento superficial).

A essência do problema com respeito à velocidade de corte, segundo Cowton e Wirth (1993), é que o custo do trabalho associado com a produção de uma simples unidade de produção é inversamente proporcional à velocidade de corte, mas este benefício de uma alta velocidade de corte tende a ser compensado pelo aumento dos custos associados com o desgaste e quebra da própria ferramenta. Estes custos são considerados exponencialmente crescentes com a velocidade de corte.

Segundo Agapiou (1992.a), uma função-objetivo mais efetiva se faz necessária já que uma função-objetivo baseada no critério de custo de produção não considera a interação do tempo de produção e vice-versa. O critério de máxima taxa de lucro, ou máxima eficiência, foi desenvolvido no sentido de incluir, e eventualmente alcançar um equilíbrio na contribuição tanto do mínimo custo de produção quanto do critério de tempo total, dentro de uma função-objetivo de um

processo de usinagem. Porém, este critério não pode adequadamente prognosticar as condições de corte ótimas, já que elas foram assim obtidas, a menos que esses lucros marginais sejam muito altos. As condições de otimização prognosticadas pelo critério da taxa de máximo lucro consistem em manter as condições de custo de produção no mínimo. Uma função-objetivo mais adequada seria aquela que inclui uma combinação dos custos de produção e critérios de otimização do tempo total de produção.

Os problemas de economia em usinagem, com vida de ferramenta determinística, têm atraído grande atenção independente do fato de fazer uso de restrições ou não. A função-objetivo é normalmente a minimização do custo unitário ou maximização da taxa de produção e as restrições (se existem) restringem a faixa de valores permitida para as variáveis, ou seja a velocidade de corte e o avanço (Koulamas 1991). Técnicas analíticas têm sido aplicadas para a determinação dos valores ótimos das variáveis de corte. Porém, é bem reconhecido que uma análise mais exata do problema de economia de usinagem pode ser obtida se a natureza estocástica da vida da ferramenta for levada em conta. Se a causa predominante da falha da ferramenta é um mecanismo de quebra súbita, então a probabilidade da ferramenta falhar não depende do tempo de corte, a falha da ferramenta é o efeito de um processo Markoviano. Se a falha de ferramenta é principalmente devido a um processo convencional de desgaste de ferramenta acelerado, então a probabilidade de falha da ferramenta geralmente aumenta com o tempo de corte e é o efeito de um processo não-Markoviano de falha de ferramenta. Em ambos os casos a natureza estocástica da vida da ferramenta aumenta a possibilidade de se ter políticas de trocas preventivas de ferramentas.

#### 2.4.3 A manufatura e a otimização

Muitos projetos de planejamento e controle da produção para Sistemas Flexíveis de Manufatura tratam as taxas de processamento como dadas, no entanto na prática estas são variáveis de decisão significativas. Segundo Schweitzer e Seidmann (1991), no sentido de se obter as metas de produção desejadas, com os mínimos custos operacionais, gerentes normalmente variam a capacidade da fábrica em conjunto pela modificação das entradas do sistema como os

níveis de horas direta trabalhadas e outros recursos produtivos; similarmente, os processistas são instruídos a simultaneamente variar outros parâmetros chaves da fabricação (tais como avanço e velocidade de corte) para alcançar os mesmos objetivos.

Atualmente, muitas máquinas-ferramenta têm potência e rotação suficientes para trabalhar em condições de usinagem ótimas, porém é frustrante constatar que os departamentos de engenharia ainda não confiam nestes dados otimizados, quando desenvolvem novos processos de manufatura (Colding 1992). Muitos confiam apenas nos dados de usinagem dos fabricantes de ferramentas, ou nos manuais ou em experiências anteriores. Porém, algumas razões são comumente dadas para explicar o porquê de não se atualizar a manufatura no que diz respeito à otimização:

- o custo de ferramental é de aproximadamente 1-2% do custo total de fabricação assim a usinagem é de menor importância;
- variações no comportamento quanto à usinabilidade, podem destruir as ferramentas em velocidades e avanços maiores e;
- a subjetividade da melhor seleção de ferramenta e de dados de usinagem otimizados é extremamente complicada e muito poucos engenheiros têm este conhecimento.

Aparentemente, a última razão é a chave para desempenhos pobres da usinagem.

Ainda segundo Colding (1992), os gerentes e os altos executivos têm pouco conhecimento da economia obtida quando se faz uso de dados de usinagem otimizados, comparados a outros meios de redução de custo ou de aumento de produtividade. Além disso, muitos engenheiros e contadores não podem estimar facilmente estas economias, principalmente devido ao fato de que os atuais métodos de contabilidade de custos não são desenvolvidos para se contabilizar os efeitos das mudanças nos parâmetros de fabricação.

Modelos para a dedução de condições ótimas de usinagem e troca de ferramentas têm sido estudados extensivamente. Porém, suas aplicações na indústria têm sido limitada. Segundo Zhou e Wysk (1992) isto é devido a várias razões:

- uma delas é que os parâmetros para a equação da vida da ferramenta não estão prontamente disponíveis, já que testes devem ser conduzidos para se encontrar estes parâmetros, os quais dizem respeito ao processo de usinagem a ser desenvolvido;
- a segunda razão é que estas informações são obrigatórias para a implementação. Pode não ser dada a devida importância ao esforço para se obter e entrar com todos os dados necessários e obrigatórios para a otimização; e
- a terceira razão é que a falha inesperada da ferramenta devido à natureza aleatória da vida da ferramenta não é normalmente avaliada por um modelo determinista.

De acordo com Neipp (1990), os principais fatores que afetam os resultados das operações de usinagem são a máquina-ferramenta, a montagem da ferramenta, a ferramenta de corte e dados de usinagem. Para cada um destes fatores é necessário selecionar os parâmetros corretos para a operação de usinagem em particular. As empresas de engenharia de ferramentas portanto têm dado considerável importância ao desenvolvimento de materiais de corte aperfeiçoados. As ferramentas têm sido otimizadas pelo projeto da geometria da pastilha feitas para o material de corte e as tensões envolvidas.

A maioria dos métodos propostos para seleção de ferramentas e especificação de condições de corte nas diferentes publicações, são baseadas em uma grande quantidade de dados derivados experimental ou teoricamente, e que são caracterizados pela precisão do laboratório (Maropoulos 1992). É devido a este fato que a implementação destes métodos em ambientes reais de produção podem ser dificultadas, visto que alguns dos dados necessários podem não estar facilmente disponíveis. Pode também ser argumentado que para o propósito de fornecer condições de corte para um grande número de ferramentas, deve-se considerar o desenvolvimento de muitos sistemas aplicados, os quais usam técnicas simplificadas e ao mesmo tempo fortes de modelagem para o processo de usinagem junto com técnicas de sistemas baseados em conhecimento.

O aumento da importância da seleção de dados de corte e ferramentas e a percepção das limitações correspondentes dos sistemas de planejamento de processo e métodos de otimização de corte têm resultado em pesquisas fundamentais nesta área.

## 2.5 Seleção de Ferramentas

A usinagem de metais é um processo complexo, e a complexidade é além disso composta pela variedade de operações e materiais envolvidos. Hoje, a usinagem é frequentemente realizada em máquinas-ferramenta de comando numérico, com ferramentas múltiplas constituídas de pastilhas, suportes e fixações. Segundo Zhou e Wysk (1992), as decisões para a seleção de ferramentas, determinação de parâmetros de usinagem e tempos de troca de ferramenta são feitas pelos planejadores de processo, programadores e operadores de máquina em diferentes estágios da fabricação. Devido a esta partilha de responsabilidades e à escassez de interação com o processo, tem se tornado muito difícil realizar boas decisões de ferramental.

Torneamento em desbaste é uma operação de usinagem desempenhada em quase todo componente torneado. Já que a maior parte do material é removida durante esta operação, consideráveis economias são possíveis pelo aumento da eficiência desta operação (Maropoulos e Hinduja 1991, Chua et al. 1993). A seleção da máquina-ferramenta com características apropriadas de velocidade e torque, e o método de fixação são os primeiros passos na direção do aumento da eficiência da operação. Frequentemente, existem muitas ferramentas disponíveis, as quais afetam o desempenho da operação, e não é surpresa que a ferramenta selecionada pelo operador não seja a ótima. Usualmente, as ferramentas que estão à mão e são conhecidas, são capazes de desempenhar uma operação em particular, e são usadas por conveniência apesar de suas desvantagens.

As ferramentas mais comumente utilizadas para operações de torneamento, particularmente em tornos CNC, são as pastilhas de carbetto de Tungstênio do tipo intercambiável. Muitas ferramentas são escolhidas à partir da experiência do usuário, mantendo em mente os vários

parâmetros os quais influenciam no processo de usinagem. A ferramenta escolhida frequentemente está longe de ser a ótima e este fato juntamente com o aumento do uso de sistemas de fabricação integrados por computador têm resultado na necessidade de métodos automáticos de seleção de ferramentas (Chen et al. 1989).

### 2.5.1 Planos de processo

O planejamento do processo, que é o maior determinante dos custos de fabricação, contribui para o êxito da indústria de manufatura por fornecer a ligação necessária entre projeto e fabricação, de acordo com Yeo et al. (1991). As saídas obtidas dos sistemas CAPP são essenciais para a programação do processo, programação CNC, controle de chão de fábrica, e outras tarefas da manufatura. Um sub-domínio do planejamento do processo é o planejamento de operações.

O plano de processo descreve como uma peça é feita, conseqüentemente é um dos mais críticos de todos os documentos de fabricação. A união de todas as informações necessárias no plano de processo é um trabalho intensivo e requer um alto nível de perícia e experiência de fabricação. Segundo Lawler (1990), os processistas devem entender de capacidades e limitações das máquinas-ferramenta. Eles devem conhecer tolerâncias, alcances de percurso e velocidades operacionais. O processista também determina avanços e velocidades específicas para ferramentas, configurações de fixação, seqüências de fabricação e tempos de processamento. Outras variáveis consideradas pelos processistas incluem a dureza do material, o desgaste da ferramenta, a rigidez da ferramenta e da fixação, temperaturas de corte e tipos de fluido de corte.

Ainda segundo Lawler (1990), historicamente os planos de processo eram feitos uma vez que o desenho do produto era fixado. Hoje, porém, os processistas muitas vezes têm que revisar os processos para diminuir o *lead time* dos produtos, reduzir custos de fabricação e melhorar a qualidade do produto.

Portanto, nas atividades do dia-a-dia de uma oficina o processista deve controlar os custos de produção e os tempos de produção envolvidos na fabricação de peças. Muitos parâmetros

influenciam a economia da usinagem. Entre estes estão: o material da ferramenta, o material da peça, as características da máquina-ferramenta e os requisitos de usinagem (Fenton e Gagnon 1993).

### 2.5.2 Características da seleção de ferramentas

Em um ambiente tradicional de usinagem é a perícia do operador o fator determinante na garantia de que as ferramentas corretas foram usadas para cada operação. Este modelo de trabalho não é mais aceitável numa moderna oficina de usinagem equipada com máquinas CNC pelas seguintes razões (Zhang e Hinduja 1995):

- uma grande variedade e um grande número de ferramentas são usadas para usinar componentes em máquinas CNC e a tarefa de determinar o conjunto de ferramentas correto torna-se muito complicado para ser deixado para o operador da máquina;
- se a seleção de ferramentas é deixada para o operador, paradas de máquina devido ao uso incorreto ou indisponibilidade de ferramentas, tornam-se inevitáveis;
- devido ao alto custo das ferramentas, não é nada econômico permitir que ferramentas sejam guardadas individualmente em máquinas ferramentas quando não estão em uso.

Ainda segundo Zhang e Hinduja (1995), a tarefa de seleção de ferramentas não deve somente funcionar corretamente mais também otimizadamente, e isso é algo complexo. Ela requer o desenvolvimento de sofisticados programas que devem suportar bancos de dados que contêm informações sobre os recursos de usinagem e as práticas de usinagem específicas da companhia.

Por outro lado, a seleção de ferramentas pode ser claramente subdividida em três estágios. No primeiro, de acordo com Hinduja e Barrow (1993), a base de dados é pesquisada e é determinada uma lista de ferramentas que são praticáveis para a dada operação. No segundo estágio, o custo de usinagem de cada uma das ferramentas praticáveis é determinado. No terceiro estágio, o usuário seleciona uma ferramenta com a inteligente recomendação do sistema.

Uma típica função freqüentemente presente na estrutura de um sistema CAPP é a seleção de ferramentas para cada operação de corte programada. Cada escolha é particularmente importante porque a ferramenta afeta a qualidade da superfície e o custo da operação. Segundo Guisti et al. (1986), este tópico não parece ter sido desenvolvido assim profundamente para ter uma seleção detalhada e otimizada de todas as características da ferramenta. De fato, aqueles sistemas programados para esta seleção, levam em conta somente o problema da compatibilidade geométrica com a peça-obra e diferenças entre ferramentas de desbaste e acabamento. Sistemas computacionais podem ser úteis para seleção de ferramentas principalmente pelas seguintes razões:

- fabricantes de ferramentas colocam no mercado muitos tipos de suportes e pastilhas, de modo que a escolha da melhor combinação de suporte/pastilha não é uma tarefa fácil e rápida;
- a produção de novas ferramentas (materiais e/ou geometrias) é praticamente contínua, de modo que o sistema para seleção automática de ferramenta deve ser capaz de ser freqüentemente atualizado sem um especialista de *software*; e
- a seleção de ferramenta depende principalmente da experiência prática e normalmente o critério de escolha não pode ser obtido pelo conhecimento exato.

Passados poucos anos, a especificação das estruturas e objetivo da seleção de ferramentas e procedimentos de gerenciamento têm se tornado uma importante consideração nos ambientes de usinagem modernos. De acordo com Maropoulos (1995) a área geral de ferramentas abrange uma grande amplitude de tópicos especializados tais como otimização da usinagem, considerações de vida de ferramenta/desgaste, algoritmos para as técnicas de seleção de ferramenta para torneamento e fresamento, planejamento de processo e programação do fluxo de ferramentas/trabalho. Pesquisas têm se concentrado em todos estes aspectos da tecnologia de ferramentas, assim como uma estratégia para sua integração é normalmente requerida. O fato de que a tecnologia de ferramentas é particularmente complexa tem então restringido muito qualquer séria tentativa para integrar os vários subsistemas especialistas.

Se todas as informações necessárias para a seleção de ferramenta e otimização de processo forem introduzidas manualmente, a otimização será prolongada e tediosa. Esta é uma das razões, segundo Zhou e Wysk (1992), para a implementação limitada de técnicas de otimização nas operações atuais de usinagem. É, no entanto, praticamente impossível se estabelecer uma base de dados altamente confiável que apoie a otimização de todos os processos de usinagem. Assim, é necessário estabelecer um esquema de base de dados para coleção de dados pertinentes ao processo em um dado sistema. É também necessário ter um procedimento estatístico apropriado, que pode ser usado para estabelecer uma base de dados de usinabilidade digna de confiança para um dado sistema.

### 2.5.3 Alguns sistemas para seleção de ferramentas

Se a geometria a ser usinada foi dada e a operação especificada, a otimização de qualquer dado de corte depende da ferramenta de corte e da máquina. Conseqüentemente, para uma dada máquina-ferramenta faz pouco sentido otimizar os dados de corte a não ser que a ferramenta mais eficiente seja utilizada (Maropoulos e Hínduja 1990). Um sem número de módulos de seleção de ferramentas assistidos por computador têm sido desenvolvidos no sentido de melhorar a velocidade, a precisão e a eficiência da busca pela melhor ferramenta.

Alguns sistemas tratam geralmente de problemas geométricos que ocorrem durante o torneamento (Mizugaki et al. 1994), enquanto outros incorporam a tecnologia de corte (Rho et al. 1992, Carpenter e Maropoulos 1994, Domazet 1990). Outros sistemas de seleção de ferramentas podem incluir alguma tecnologia de corte e ainda oferecer uma moderada capacidade geométrica (Eversheim et al. 1994, Hínduja e Barrow 1993, Maropoulos e Gill 1995) em situações onde são necessárias mais de uma ferramenta para se usinar um perfil.

O módulo especialista de Guisti et al. (1986) inclui uma certa quantidade de tecnologia de corte já que ele prevê o comportamento das ferramentas usando pesos, os quais são avaliados com base nos parâmetros de ferramentas. Porém, o sistema depende grandemente da experiência do pesquisador/usuário para uma eficiente estruturação do procedimento baseado em regras.

Finalmente, Chen et al. (1989) desenvolveram um modelo determinista com heurísticas o qual considera diversos parâmetros de ferramenta, mas ele só está disponível para a seleção de ferramentas de desbaste. Para as operações de acabamento, um sistema relatado é o de Maropoulos e Hinduja (1990).

Segundo Eversheim et al. (1994) as funções de um sistema de seleção de ferramentas, podem ser padronizadas em termos de suas estruturas funcionais e integradas em uma arquitetura de dados uniforme. Esta abordagem elimina tanto a acumulação redundante de funções idênticas em diferentes seqüências de planejamento, quanto armazenamento redundante de funções idênticas em diferentes sistemas.

Para o setor de planejamento de processo, isto significa que, por exemplo, a função seleção de ferramentas, é realizada como parte ou da operação de planejamento, ou da programação CNC (*on line* ou não), a adaptação do programa CNC relacionado à máquina, tem de ser providenciado somente uma vez na concepção do sistema. Independente do tempo no qual a seleção da ferramenta é desempenhada, o mesmo módulo de planejamento uniforme seria usado dentro de cada uma das várias seqüências de planejamento. Os dados de entrada necessários para o planejamento são fornecidos pelos vários modelos de informação. Usando este conceito de sistema, as modificações podem ser transferidas às seqüências de planejamento subseqüentes em virtude da consistência do modelo comum de dados.

Além da seleção da ferramenta outros aspectos, como a seqüência de operações são também importantes e foram contemplados no sistema relatado por Rho et al. (1992). O sistema possui um módulo de seleção de ferramentas, cuja função é selecionar as ferramentas de corte ótimas (alternativas podem ser geradas) para cada operação no método selecionado. A tarefa do módulo de seqüência de operações é simultaneamente selecionar uma única ferramenta para cada operação e minimizar o número total de trocas de ferramenta embora deixe certo que nenhuma das restrições precedentes são violadas.

A seguir, o número total de ferramentas usadas e o número de trocas de ferramentas podem ser determinados. Entre as alternativas existentes, tem que ser designada uma única ferramenta para cada operação, assim, o sistema assume as seguintes funções quanto às ferramentas alternativas:

- escolhe qual ferramenta é usada por mais operações sucessivas;
- se existem alternativas, então escolhe a ferramenta que é usada para uma das operações anteriores;
- se ainda existem alternativas, então se escolhe qual ferramenta aparece mais frequentemente na matriz  $T$  do algoritmo (pode ser usado para isso um número maior de operações).

Depois da determinação da seqüência de operação ótima com respeito ao número mínimo de trocas de ferramenta, a seqüência é otimizada mais adiante, com respeito às distâncias percorridas e a direção de usinagem para cada ferramenta de corte. Durante essa segunda seção de otimização as seguintes regras são importantes:

- não se permite violar as restrições precedentes. Assim antes da mudança de uma operação os movimentos à esquerda e à direita devem ser verificados;
- o número de trocas de ferramenta deve ser o mesmo (ou seja o mínimo).

Uma outra abordagem sugerida por Carpenter e Maropoulos (1994) é ilustrada por um sistema projetado para fornecer inicialmente dados de corte mais *agressivos*, em certos casos. Pode-se então reduzir sistematicamente os dados sugeridos, e arquivar as condições de corte mais satisfatórias. Ferramentas selecionadas e dados de corte são alimentados para chão-de-fábrica onde eles são testados e um relatório é gerado detalhando os dados de corte finais usados e quaisquer problemas que ocorreram, tais como vibração excessiva.

Ainda segundo Carpenter e Maropoulos (1994), o principal auxílio do algoritmo é gerar dados de corte *agressivos* que resultarão com segurança, em taxas de remoção de metal mais altas do que com dados de corte padrão. O dado de corte inicial é otimizado num *loop* pela verificação

da obediência para com as restrições de fixação e de limite de potência da máquina selecionada. Se qualquer destas verificações falhar, os dados de corte são recalculados muitas vezes, através da redução independente de cada um dos parâmetros de corte. A mudança de parâmetro que produz a menor redução na taxa de remoção de metal, é retornada então para o topo do *loop* para ser novamente verificada contra as restrições de fixação e potência.

## **Capítulo 3**

### **Bancos de dados em usinagem**

A coleção de dados é comumente referenciada como banco de dados ou base de dados, que contém informações de um particular empreendimento. Ela pode ser melhor definida como um conjunto de dados logicamente relacionados e armazenados numa série de arquivos com o objetivo de fornecer informações significativas.

Para que esse objetivo possa ser cumprido, os dados precisam ser organizados de forma a permitir sua manutenção e atualização e, principalmente, o acesso (busca, consulta). O problema do acesso aos dados é determinante na definição do modelo de armazenamento. Este modelo depende do tipo de aplicação à qual o sistema se destina.

Para que se tenha uma idéia, se os dados fossem organizados numa lista convencional, seria preciso percorrê-la todas as vezes que se fizesse necessária uma informação. Dependendo da complexidade do arquivo e da quantidade de dados, percebe-se que este método é bastante ineficiente. O acesso a um dado deve ser claro e rápido, não importando sua localização.

Um sistema gerenciador de banco de dados é uma coleção de programas e procedimentos voltados para o auxílio no controle e organização dos dados armazenados, e para promover um acesso contínuo, seguro e fácil, através de interfaces adequadas. O seu principal objetivo é

proporcionar um ambiente, conveniente e eficiente, para retirar e armazenar informação no banco de dados .

A seguir são apresentadas algumas definições de conceitos básicos acerca de sistemas de banco de dados (Ribeiro 1994):

- *Banco de dados* é constituído de um conjunto de arquivos relacionados entre si de forma que a organização destes e os relacionamentos sejam feitos adequadamente, a fim de atender com maior eficiência todas as aplicações da empresa.
- *Arquivo* é uma coleção de registros de um mesmo tipo;
- *Registro* consiste de um conjunto de campos, reunidos de forma a caracterizar a ocorrência de um conjunto de atributos, de uma determinada entidade;
- *Campo* constitui uma entidade básica representativa de informação, identificável e possível de definir quanto ao tamanho e formato; descreve um determinado atributo referente a uma entidade específica; e
- *Sistema gerenciador de banco de dados* corresponde a um conjunto de programas para administrar o banco de dados. Assim os programas de aplicação não têm acesso aos dados do banco de dados diretamente, todas as chamadas passam através do gerenciador.

### 3.1 Usinagem e Banco de Dados

Atualmente as palavras de ordem são qualidade, produtividade e competitividade, mas não se pode esquecer que estas metas só são alcançadas mediante o cumprimento de um pré-requisito comum: a organização. Sem ela, por mais que os *softwares* e *hardwares* utilizados sejam de última geração e por mais automatizadas que sejam as máquinas, estes não irão apresentar os resultados esperados e muitas vezes nem chegam a justificar sua implantação, devido à melhoria nos índices do sistema ser mínima ou inexistente (Ribeiro 1994).

Logo, é de vital importância a organização na empresa, principalmente no que se refere às informações e dados disponíveis relativos aos processos de fabricação, pois todos estes sistemas,

independente da sua sofisticação ou complexidade, têm uma extrema dependência destes dados, pois são alimentados por estes. A precisão e atualização destes dados permitirá que o resultado de saída destes sistemas possa ser mais confiável.

Segundo Evans et al. (1994), no cenário de manufatura dos dias de hoje nós podemos notar que os fluxos de materiais e de informações entre companhias, e o tempo levado para trabalhá-las dentro da companhia são de interesse primordial e isso mostra que a redução do *lead time* é de fundamental importância.

Não é surpreendente que melhorias no *lead time* no futuro serão através do uso inteligente das informações do sistema. Onde reside o coração do problema: a obtenção de informações de confiança em primeiro lugar. O acesso a dados confiáveis na cadeia de fornecimento é limitado devido a um certo número de problemas, ainda segundo Evans et al. (1994):

- informações confidenciais, de fato ou não;
- ignorância da necessidade destas informações, apesar desta se tornar cada vez mais evidente;
- processos projetados de maneira pobre dentro de estruturas organizacionais tradicionais criando atrasos e distorções no percursos das informações.

Nas empresas é cada vez mais comum a presença de máquinas CNC, que são sem dúvida muito mais flexíveis. Como consequência, aumenta o número de possíveis montagens de ferramentas, que aliado ao desenvolvimento de novos materiais e geometrias para as ferramentas, fazem com que aumente a quantidade de informações a ser manipulada pelo planejamento de processo.

As empresas que produzem peças a partir da usinagem, os fabricantes de ferramentas que desenvolvem processos de usinagem para seus clientes e as empresas que fornecem peças usinadas sob encomenda, todas têm em comum o fato de serem grandes geradoras de informações e dados acerca do processo de usinagem. Mas, segundo Ribeiro e Coppini (1996), na grande maioria dos casos essa memória ao invés de se transformar em uma vantagem estratégica é simplesmente

esquecida ou subtilizada, devido à inexistência de sistemas dedicados ao armazenamento e a manipulação destas coleções de dados e informações.

Muitos arquivos que tradicionalmente guardam estes registros sob a forma de papel poderiam fazê-lo de uma forma muito mais conveniente, com maior economia de espaço e segurança, através de um banco de dados. Estes, segundo Ribeiro e Coppini (1997.c), também podem ser utilizados no sentido de auxiliar o planejamento do processo e proporcionar meios para a otimização das condições de corte.

Um sistema de banco de dados é composto por uma base de dados, onde as informações são armazenadas, e um sistema gerenciador, que é um conjunto de programas que têm como função a administração dos dados armazenados, permitindo assim o seu acesso e possibilitando a execução das operações de manipulação quais sejam o cadastro, a consulta, a atualização e a eliminação dos dados. Devido à importância da informação na maioria das organizações, o banco de dados é um recurso valioso, pois se constitui numa ferramenta computacional poderosa para armazenar e administrar informações.

Através de alguns índices é possível se avaliar o desempenho de empresas metal/mecânicas: alguns itens como tempo médio de entrega, índice de rejeição e *set-up* de fábrica são de fundamental importância, pois influenciam diretamente os níveis de produtividade da empresas, podendo invariavelmente comprometer o seu desempenho junto à concorrência.

O banco de dados em usinagem, ao proporcionar operações mais eficientes, devido à uma utilização mais racional das informações disponíveis, contribui quanto a redução do tempo de entrega de pedidos e ao atuar como gerenciador de ferramentas, auxilia no controle do almoxarifado da ferramentaria e proporciona uma redução do inventário de ferramentas com otimização de seu uso (Cupini et al. 1993).

Quanto aos índices de rejeição e *set-up*, que estão mais diretamente ligados à máquina, e também quanto ao índice de tempo de entrega de pedidos, estes poderiam ser melhorados com

uma maior utilização de máquinas comandadas numericamente por computador (CNC), conforme esquematizado na figura 3.3. As máquinas CNC tiveram como objetivo inicial solucionar usinagem de peças de grande complexidade e que vieram posteriormente auxiliar na redução de tempos improdutivos, ou seja no posicionamento e retirada da ferramenta de corte.

Contudo, a utilização destas máquinas só se torna economicamente viável quando for garantido o emprego eficiente destas máquinas e ferramentas durante o processo de usinagem, ou seja, é necessário extrair das mesmas o máximo rendimento possível para garantir o retorno dos investimentos efetuados. A eficiência do processo de usinagem depende da utilização de dados de corte otimizados, atualizados e adequados às condições reais de trabalho.

Isso, somado à variedade cada vez maior de materiais desenvolvidos para ferramentas, como os carbets revestidos e as cerâmicas, e também à diversidade crescente de geometrias de pastilhas e formas de quebra-cavaco disponíveis no mercado, gera maior interesse pelo tema Gerenciamento de Ferramentas (Cupini et al. 1993).

Bancos de dados funcionando como armazenadores de informações referentes aos processos de usinagem, em última análise podem ser considerados até como armazenadores de conhecimento, de acordo com Ribeiro e Coppini (1997.c). Evidencia-se que tão importante quanto possuir as informações, é prover meios para que as mesmas possam ser recuperadas com facilidade e simplicidade quando da sua utilização (Ribeiro e Coppini 1995).

### **3.2 Banco de Ddos e o Planejamento do Processo**

Sistemas de banco de dados de usinabilidade são essenciais para a seleção de condições ótimas de corte durante o planejamento do processo. Conforme Choudhury e El-Baradie (1996) os sistemas existentes podem ser classificados como:

- de armazenamento e recuperação de dados;
- empíricos generalizados; e

- com modelos matemáticos.

Nos sistemas de armazenamento e recuperação de dados; uma série de informações relacionadas ao processo é armazenada em arquivos de computador, os quais podem ser recuperados através do uso de um programa de interface amigável. Estas informações vêm da experiência do chão-de-fábrica, experiências de laboratório e manuais de dados de usinagem.

Sistemas com equações empíricas generalizadas utilizam as equações expandidas da vida da ferramenta de Taylor para calcular os parâmetros de corte.

Os sistemas com modelos matemáticos esforçam-se em prever as condições ótimas de corte para uma operação específica usando um algoritmo de usinabilidade de entradas e saídas, onde os dados de entrada podem ser as variáveis de usinagem ou as características da peça ou da ferramenta, e os dados de saída são os dados de resposta da usinagem.

Segundo Fenton e Gagnon (1993) os parâmetros que formam a base para um processo de seleção de material de ferramenta para operações de corte podem ser classificados como:

- *parâmetros de produção* são o tempo de produção total por peça, o custo total de produção por peça e a taxa de lucro;
- *parâmetros de vida da ferramenta* são a vida para o mínimo tempo de produção, para a produção de mínimo custo e para a máxima taxa de lucro; e
- *parâmetros de processo* são a velocidade de corte e avanço para o mínimo tempo de produção, mínimo custo e máxima taxa de lucro.

Sistemas de banco de dados de usinabilidade são úteis por providenciar recomendações gerais sobre velocidades e avanços para usinagem (Arsecularatne et al. 1992). Para um trabalho em particular, aí se tem um grande potencial para o aperfeiçoamento significativo das condições recomendadas. É necessário se realizar esses aperfeiçoamentos potenciais com o aumento do uso de máquinas CNC. Além disso, por causa do alto custo das máquinas CNC comparadas com suas

similares, existe uma necessidade econômica em operar as máquinas CNC tão eficiente quanto possível, no sentido de obter o retorno obrigatório. Já que o custo do torneamento nestas máquinas é sensível às condições de corte, valores ótimos devem ser determinados antes da peça ser posta em produção. As condições ótimas, neste contexto, são aquelas que não violam nenhuma restrição que pode ser aplicada ao processo, fazendo uso da potência disponível e satisfazendo os critérios-objetivos.

Segundo Eversheim et al. (1991.b), devido à posição central entre os processos de usinagem e as máquinas-ferramenta, as condições básicas relacionadas ao uso de ferramentas têm mudado também. As ferramentas de corte estão diretamente envolvidas no processo de usinagem e são os primeiros elementos que necessitam de modificações quando a tecnologia a seu respeito for modificada. Ao mesmo tempo, a ferramenta certa tem que ser selecionada no sentido de garantir que seja feito o pleno uso das capacidades da máquina, e que os níveis potenciais de produtividade e qualidade sejam desta maneira atingidos. Ferramentas portanto, representam interfaces cuja tarefa é satisfazer as demandas de um processo de usinagem de forma otimizada por meio do pleno uso das capacidades das máquinas-ferramenta.

Segundo Boehs e Morais (1988), grande parte do tempo de planejamento e programação de uma determinada peça é gasta na definição de ferramentas e dos respectivos componentes de fixação (cones, pinças, buchas, mandris, etc.), adicionando-lhe ainda, a parcela correspondente à elaboração dos desenhos dos conjuntos selecionados. O processista, muitas vezes desconhece a existência de determinadas ferramentas, assim como todas as possibilidades de montagem, acarretando perda de tempo e consultas à catálogos ou ao almoxarifado, além de compras desnecessárias. Portanto, o excessivo tempo gasto com a escolha de ferramentas deve-se à falta de informações ou à dificuldade de obtê-las.

### **3.3 Gerenciamento de Ferramentas**

Informação e inovação estão intimamente ligadas. O processo inventivo conforme Neipp (1990), anteriormente visto exclusivamente como um ato de gênio criativo, toma inteiramente uma

nova dimensão pela força do suporte de *mídia* eletrônica. O acesso ao conhecimento armazenado em bancos de dados externos, por exemplo, torna isso possível para pesquisa de soluções em uma varredura de amplo alcance e pesquisa realizadas dentro de um curto período de tempo. Muitas operações de projeto são atualmente capazes de serem amplamente automatizadas.

À introdução sistemática de tais sistemas, uma importância considerável se junta, como parte de uma estratégia competitiva bem definida, pois são as funções de fabricação e projeto que exercem na indústria mecânica uma maior influência na sua competitividade. Ambas têm um impacto direto no valor do produto, usinabilidade, materiais e consumo de energia, custos de capital e mão de obra necessários.

Ainda segundo Neipp (1990), vários parâmetros no fluxo integrado de informações estão interrelacionados e, tanto técnica quanto economicamente, exercem uma influência sobre as variantes de soluções a serem otimizadas (figura 3.1). Particularmente no desenvolvimento de produto em engenharia mecânica, preços de materiais, custos de projeto e fabricação, tamanho dos lotes e peças repetidas têm um comportamento decisivo na falta de competitividade. Particularmente importantes são as rápidas mudanças tecnológicas advindas dos novos materiais de engenharia, novos processos ou soluções de usinagem assim como novas oportunidades computacionais no fluxo integrado de informações, as quais podem levar a soluções inteiramente novas no projeto e fabricação de produtos.

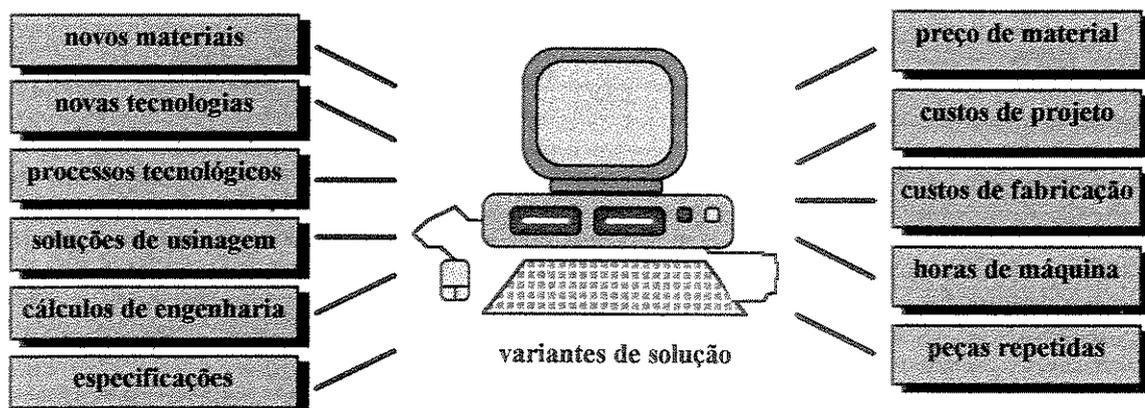


Figura 3.1 - Fatores que influenciam em um ambiente integrado por computador (Neipp 1990)

Existe hoje um enorme sortimento de ferramentas e insertos disponíveis para os operadores. Frequentes adições são feitas aos catálogos dos fornecedores, com o objetivo de acirrar a disputa entre os mesmos, pois cada um deseja se firmar como o fornecedor do melhor produto, para este ou aquele conjunto de condições de corte.

Como resultado, muitos inventários de ferramentaria têm crescido enormemente nos últimos anos. Custos implicados diretos devem ser considerados, pois existe um custo oculto, substancial, associado ao cuidado e administração de um tão grande número de itens.

Em um esforço para alcançar um melhor controle de suas ferramentas, muitas empresas estão agora trabalhando com sistemas de gerenciamento de ferramenta computadorizados. De acordo com Eversheim et al. (1991.b), o uso de tais sistemas permite que se localize certas falhas relativas ao estoque de ferramentas, favorecendo a eliminação de certos custos referentes:

- ao valor do excesso de inventário necessário de ferramenta, por causa de duplicações acumuladas e desnecessárias;
- ao valor do inventário obsoleto;
- ao inventário anual de ferramentas perdidas/reduzidas;
- ao custo excessivo de compras de emergência, por causa da falta de inventário necessário de ferramentas;
- às despesas inadequadas na compra de ferramentas incorretas; e
- à perda de mercado devido a atrasos nas entregas por causa de ferramentas perdidas.

Gerenciamento de ferramenta é um processo resultante da interação do planejamento, execução e funções de controle no fluxo de informações relativas às ferramentas. O objetivo principal do gerenciamento de ferramenta é assegurar a melhor disposição da ferramenta correta no local correto e no tempo certo (Eversheim et al. 1991.b; Aver'yanov e Margul 1989). Além disso os Sistemas Computadorizados de Gerenciamento de Ferramentas devem assegurar a

flexibilidade, a segurança e a alta qualidade do ferramental do sistema de manufatura, e podem desempenhar as seguintes funções segundo Grechishnikov (1989):

- fornecer desenhos de ferramentas com dimensões específicas, nas quantidades específicas;
- fornecer ferramental auxiliar para adaptar o sortimento de ferramentas e máquinas em uso;
- armazenar ferramentas dentro ou próximo às máquinas, em estoques de reserva;
- transporte das ferramentas do estoque, do armário da máquina ou do estoque de reserva para a estação de trabalho;
- monitorar a localização das ferramentas, bem como o seu estado, durante a usinagem e fora da zona de trabalho;
- assegurar que as ferramentas estão ajustadas à dimensão, gerando quando necessário ordens de reafiação;
- renovar as ferramentas usadas;
- escolher novas ferramentas (quando da mudanças no processo de usinagem) em modo interativo, que necessita do uso de um amplo Banco de Dados atualizado, gerando ordens de cancelamento e aquisição de ferramentas; e
- permitir a existência de ferramentas de uso especial a serem projetadas e fabricadas, ou gerar ordens para a sua compra.

Todas estas funções do sistema são ligadas pelo *software* do sistema de gerenciamento de informação, que é essencialmente um banco de dados de ferramentas organizado conforme o sistema de manufatura podendo inclusive interagir com os demais bancos do sistema.

Ferramentas, dispositivos e fixações podem somar pouco dinheiro. Conforme Picozzi, (1990), falhas em manter um firme controle sobre eles, porém podem custar muito mais, especialmente quando existir em almoxarifado, algo em torno de 100.000 ferramentas, por exemplo.

A falta de um planejamento de ferramentas apropriado impede o fluxo contínuo da produção, podendo haver um aumento de filas e, também, problemas na programação da

produção. Ferramentas erradas e duplicações desnecessárias representam grandes desperdícios (Chung 1991).

Nota-se, em estudos sobre ferramentas, que a necessidade de um bom planejamento das necessidades de ferramentas vem sendo negligenciada. Num sistema FMS o planejamento das necessidades de materiais deve ser cuidadosamente observado para que se possa obter os benefícios da flexibilidade propiciados pela troca rápida de ferramentas.

De acordo com Boehs e Jaimes (1995), os trabalhos das ferramentas no chão de fábrica precisam ser planejados, controlados e monitorados, para o qual o gerenciamento de ferramentas requer, primeiramente, uma estratégia de planejamento que garanta a disponibilidade das ferramentas apropriadas nas quantidades certas. Em segundo lugar uma estratégia de controle que coordene a transferência das ferramentas entre as máquinas e a ferramentaria. Em terceiro lugar, uma estratégia de monitoramento não só para identificar perturbações, mas também para monitorar o desempenho da ferramenta.

Segundo Eversheim et al. (1991.b), uma ótima aplicação do gerenciamento de ferramenta deve alcançar altos níveis de utilização da máquina através da redução dos tempos ociosos e de montagens relativos à ferramenta. Como se pode observar, a eficiência na produção depende em grande parte de como o ferramental é gerenciado.

FMS atuais, cada vez mais são equipados com algum tipo de gerenciador de ferramenta. Além disso, simulações são desenvolvidas sobre o fluxo de ferramental antes do projeto de um sistema ser finalizado. Automação do gerenciamento de ferramenta em FMS é caro, mas sua justificativa corresponde à mesma que a do FMS no geral: redução no tempo de *set-up*, alta utilização do fuso e aumento da flexibilidade para lotes de tamanhos menores.

Somente se a instalação básica de produção recebe o ferramental especificado de qualidade necessária no tempo estabelecido, pode-se funcionar sem paradas. Além do que um ótimo sistema

de controle de inventário é essencial para qualquer companhia que trabalhe com um grande número de ferramentas (Aver'yanov e Margul 1989; Picozzi 1990).

A eficiência destes programas é evidente. Como por exemplo, no sistema citado por Picozzi (1990), de gerenciamento de inventário de ferramenta - TIMS (*Tool Inventory Management System*) - o computador não somente conhece todas as ferramentas e suas localizações, ele também conhece, pela confirmação do número da peça, qual e quantas delas podem ser enviadas para cada operação de usinagem individual. Por exemplo, se um operador requisita seis dispositivos quando três fariam o trabalho, o computador autorizará o envio de apenas três.

Um aumento da diversidade de variantes, redução na vida efetiva do produto e um nível crescente de complexidade nos produtos em conjunção com a necessidade de tempo curto de entrega, tudo representa fatores de mercado. Segundo Eversheim et al. (1991.b), as companhias têm que reagir a estes fatores no campo da engenharia de fabricação via métodos e medidas inovadoras. As estratégias da engenharia de fabricação continuam a se concentrar nos processos de fabricação. Em resposta às necessidades de mercado, esforços têm se enfocado atualmente sobre a melhoria da qualidade da fabricação e aumento da produtividade.

Para se garantir um gerenciamento efetivo em FMS e conseguir uma solução integrada para o problema de organização de ferramental desde o período de distribuição para a instalação até o cancelamento final, assim como coordenar o funcionamento do Sistema de Gerenciamento de Ferramentas com os Sistemas de Planejamento Automático da Produção e Sistemas de Controle Automático da Produção, segundo Aver'yanov e Margul (1989), é necessário criar um Sistema de Gerenciamento Automático de Ferramenta. Com respeito à área de controle de manufatura, de acordo com Eversheim et al. (1991.b) é necessário este gerenciamento para planejar corretamente e coordenar a quantidade de ferramentas a ser fornecida e os tempos programados para remoção dos estoques, pré montagem e abastecimento da máquina-ferramenta.

Sendo assim, o emprego de um sistema computacional especialista para o gerenciamento de ferramentas e congêneres deve assegurar que toda a informação relativa à atividade de fabricação,

através de processos de usinagem, encontra-se disponível na forma de banco de dados como meio facilitador da busca e identificação da informação necessária. Esse sistema segundo Boehs et al. (1997), deve prover além do armazenamento das informações, interações entre os diferentes tipos de dados, de forma a possibilitar a obtenção de informações destinadas ao ambiente fabril, permitindo orientar e dinamizar a fabricação de produtos.

Ainda segundo Boehs et al. (1997), a influência que um sistema especializado no gerenciamento de ferramentas exerce sobre a produção está fundamentada não somente na disponibilidade de informações centralizadas e rapidez nas consultas, mas também na confiabilidade que é proporcionada. A partir do momento em que se estabelece como padrão que somente dados fornecidos pelo sistema serão válidos, assegura-se a confiabilidade das informações.

De acordo também com Eversheim et al. (1991.a), o uso economicamente eficiente das ferramentas como um fator de produção pode ser possível, garantindo ao mesmo tempo um alto nível de confiança e segurança no processo. O principal requisito é a utilização melhorada da tecnologia de ferramenta. Para esse fim, é necessário que a informação de corte atual esteja disponível no estágio de pré produção. Isso permite melhorar o cálculo dos parâmetros de corte e melhorar a seleção da ferramenta segundo um ponto de vista tecnológico.

O custo pode também ser reduzido pela diminuição do volume e da variedade de ferramentas utilizadas na companhia. Isso permite uma ótima avaliação das quantidades usadas efetivamente e as solicitadas.

### **3.4 Exemplos de gerenciadores de ferramentas**

Um FMS com um Sistema de Gerenciamento Automático de Ferramenta instalado pela Kericu Seic Company (Japão), citado por Aver'yanov e Margul (1989), contém três subsistemas básicos: armazenamento, inspeção preliminar e distribuição para o Módulo de Manufatura Flexível. As ferramentas são armazenadas em prateleiras. Os números da ferramenta e seu

endereço na prateleira são armazenados na memória do computador. Para evocar uma ferramenta de uma prateleira, o operador encontra o número da ferramenta num catálogo de consulta e entra no terminal. Este então exhibe e imprime as informações básicas a respeito da ferramenta (endereço, dimensões, condições operacionais, etc.). Usando a listagem, o operador retira a ferramenta da prateleira e a coloca em um *container*. As ferramentas são transportadas das prateleiras para uma estação de inspeção preliminar e dali para os módulos em carrinhos de mão.

Em um outro FMS, também citado por Aver'yanov e Margul (1989), instalado em uma instalação da Toshiba (Japão), o operador retira as ferramentas necessárias para cada módulo e as coloca em *pallets* de acordo com a programação de operação do FMS. Os números das ferramentas para carregamento em cada módulo são mostrados na tela do monitor. Um AGV transfere os *pallets* com ferramentas para as mesas dos respectivos módulos. As ferramentas usadas são colocadas em *pallets* e transportadas desde a estação de preparação de ferramentas para a Seção de Preparação de Ferramentas, onde os operadores as inspecionam e as remetem para afiação ou para as prateleiras de armazenamento. As ferramentas são substituídas quando seu tempo de operação total alcançar um período de vida preestabelecido.

Um Sistema de Gerenciamento Automático de Ferramenta russo foi desenvolvido para uso em um FMS de manufatura de multi-produtos e pequenos volumes (Aver'yanov e Margul 1989). Isso compreende: uma seção de usinagem contendo oito módulos de manufatura flexível, um sistema de armazenamento e transporte compreendendo um depósito e carros de transporte, uma unidade de controle por computador, uma seção de preparação de Ferramentas e outra para montagens de dispositivos.

No diagrama da figura 3.2 (Aver'yanov e Margul 1989) é mostrado o fluxo das ferramentas no FMS. Todo o fluxo passa através do depósito automático, que também serve como um centro para coleta de informações a respeito de todo o fluxo de material do FMS (blanques, peças, ferramentas, dispositivos, etc.).

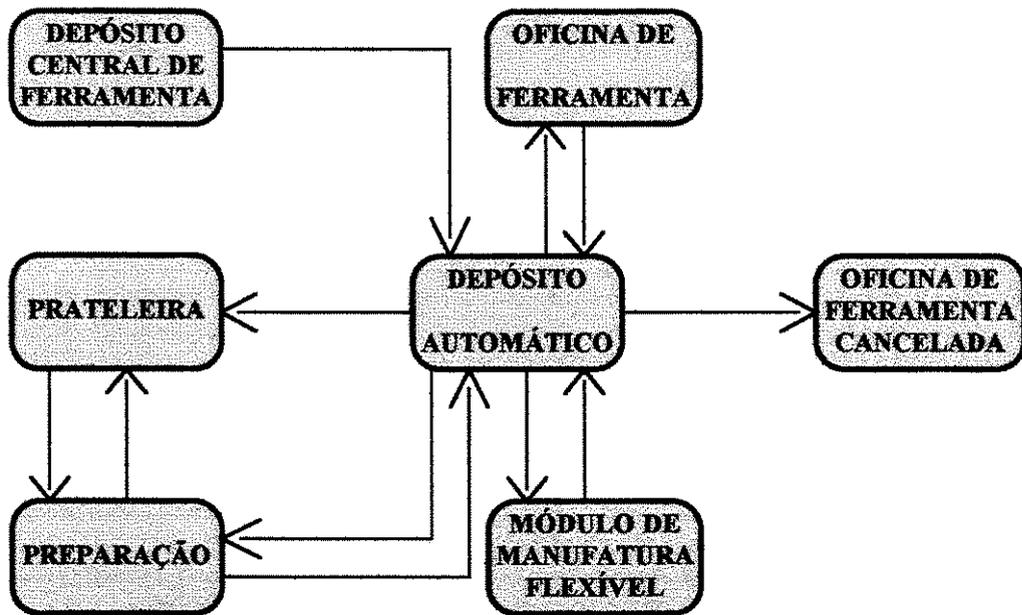


Figura 3.2- Diagrama do fluxo de ferramentas e dispositivos no FMS (Aver'yanov e Margul 1989)

As ferramentas passam desde o depósito central de ferramentas para o automático e então para a Preparação. O preparador coloca as ferramentas no endereço apropriado de acordo com o programa de desmontagem de conjunto e passa a informação completa de trabalho para a memória do computador. O *software* de gerenciamento armazena informações a respeito de todas as ferramentas do depósito automático e todas as alterações relativas a elas (despacho e retorno das ferramentas, mudanças nos valores residuais de vida, número de afiações, etc.)

O preparador também faz a montagem do ferramental de acordo com o cartão de montagem gerado pelo computador. Este cartão mostra todas as informações necessárias (nome da ferramenta, número do endereço no qual as ferramentas estão localizadas, números de série das ferramentas e dimensões de montagem). A seqüência na qual os blocos são feitos é determinada pela programação de turno de trabalho da preparação gerada pelo computador. Depois de fazer a montagem do ferramental o preparador monta as ferramentas fora da máquina em instalações designadas para tal, introduz correções (se necessário) no cartão de montagem, instala os blocos

de ferramentas em *cassetes* de ferramentas e os envia para fora do depósito automático. Ele então introduz a informação completa de trabalho na memória do computador (via terminal).

De acordo com a programação do turno de trabalho de usinagem, o *kit* de ferramenta é transferido do depósito automático ao receber o sinal do computador por um carro de transporte, que o distribui para a região de trabalho do módulo. Nesta região as ferramentas são automaticamente transferidas do *kit* de ferramenta para o magazine de ferramentas do módulo.

Depois que a usinagem é completada, as ferramentas são devolvidas para a preparação pelo mesmo trajeto. Na preparação um preparador desmonta os blocos de ferramenta e inspeciona visualmente as ferramentas: ferramentas boas são colocadas nos endereços apropriados de prateleira, enquanto ferramentas que requeiram afiação ou reparo e ferramentas que não podem ser usadas tão logo são enviadas para as posições de retenção. O preparador insere a informação completa de trabalho para a memória do computador via terminal, e informação a respeito de ferramentas necessitando de reafiação ou uma requisição de cancelamento é armazenada no *software*.

Ao receber um sinal do computador as ferramentas são enviadas para a oficina de afiação de ferramentas do FMS, que faz parte da oficina de ferramentas. Ferramentas para cancelamento são enviadas ao depósito automático por meio de uma requisição de cancelamento, e então para a oficina de ferramentas canceladas.

Tendo em vista apoiar a indústria nacional no sentido de suprir as carências observadas nos Sistemas de Planejamento da Produção, no tocante a informações de usinagem, iniciou-se em 1983, a criação de um Centro de Informações de Usinagem e seu respectivo Banco de Dados, denominados CINFUS, desenvolvido no computador IBM 3090 (Boehs 1988). As iniciativas para a criação do CINFUS partiram do Grupo de Pesquisa e Treinamento em Comando Numérico (GRUCON) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), além de armazenar as informações ele realiza os cálculos dos valores de corte correspondentes ao processo de usinagem

O sistema foi montado em uma estrutura modular, composta por sub-rotinas, buscando com isso a simplificação na programação, redução do tempo de execução e facilidades na manutenção dos programas, bem como do sistema. No módulo principal, são definidas e lidas todas as variáveis de entrada correspondentes a um determinado processo de usinagem. No módulo seguinte tem-se toda a formulação matemática usada para calcular os valores de corte correspondentes ao processo de usinagem.

Juntamente com o CINFUS, foi desenvolvido pelo GRUCON, um Gerenciador de Ferramentas o GEFER, que é um *software* através do qual se faz o gerenciamento de informações sobre ferramentas, dispositivos de fixação e dados de usinagem em Micro computadores tipo IBM-PC.

O sistema é composto por dois módulos interdependentes. Um, banco de dados, e outro, de montagem, encarrega-se da aquisição e do processamento dos dados baseados em uma sistemática que define o conjunto ferramentas-dispositivos de fixação. O módulo de banco de dados atua como uma base para a seleção do conjunto ferramentas-dispositivos e aquisição de dados referentes ao mesmo. Como resultado final de todas as atividades do sistema, obtém-se o desenho do conjunto ferramenta-dispositivos de fixação, com discriminação de seus componentes, bem como das condições de usinagem adequadas à ferramenta escolhida e ao material da peça (Boehs e Miranda 1988).

## Capítulo 4

### Aspectos da usinagem dos metais

A determinação correta das condições de usinagem e a escolha da ferramenta adequada para uma determinada operação representam um papel importante no trabalho com os metais, sendo um fator determinante da evolução das máquinas-ferramenta e das ferramentas de corte. Tal fato se acentua na produção seriada, onde divergências na escolha da velocidade de corte e ferramenta podem acarretar variações notáveis nos custos de fabricação (Vilella 1988, Ferraresi 1989).

No caso específico da indústria metal-mecânica, otimizar as condições de produção significa reduzir os tempos de fabricação de peças e os tempos de montagem dos sistemas como um todo. Neste aspecto, de acordo com Vilella (1988), cabe ressaltar que há atualmente uma tendência na redução dos tempos de espera e dos tempos de preparação das máquinas-ferramenta, aumentando assim a participação dos tempos em que a peça permanece dentro da máquina (tempos de troca da ferramenta, tempos passivos e tempos de usinagem) no tempo total de fabricação. Segundo Groover (1980) existem três métodos que permitem obter uma combinação ótima de parâmetros de usinagem:

- experiência do planejador de processo, supervisor ou operador da máquina;
- manuais de usinagem; e
- sistema computacional de dados de usinagem.

Confiar na experiência individual do planejador de processo acarreta um grande risco. O risco encontra-se na perda potencial do indivíduo com a sua experiência acumulada durante muitos anos de chão-de-fábrica.

As recomendações dos manuais são obtidos a partir da experiência de várias pessoas e são geralmente desenvolvidas depois de uma análise sistemática de uma grande quantidade de dados. Apesar de que esses manuais oferecem uma informação aperfeiçoada da experiência de várias pessoas, não são recomendados para serem aplicados num ambiente fabril.

Pesquisas realizadas na EMBRAER com materiais próprios da indústria aeronáutica como alumínio aeronáutico e suas ligas, aços especiais e ligas de titânio, mostram que 84 % dos avanços e rotações utilizados nos programas CNC liberados eram diferentes daqueles calculados através dos parâmetros recomendados por manuais de usinagem (Nishizawa e Sakakibara 1989). Groover (1980), ainda assinala as seguintes desvantagens dos manuais:

- suas recomendações tendem a ser conservadoras porque são obtidas para condições críticas;
- devem ser considerados como um guia geral e podem não coincidir com uma particular linha de produção e máquinas-ferramenta numa determinada empresa; e
- os manuais não são compatíveis com a automação do planejamento do processo auxiliado por uma base de dados computacional.

Para evitar as dificuldades acima mencionadas todos os esforços devem se dirigir à obtenção de um sistema computacional de dados de usinagem. Alguns desses sistemas foram desenvolvidos por empresas particulares com necessidades específicas e a importância deles tem crescido muito o incremento das máquinas-ferramenta CNC e a necessidade de operar essas máquinas eficientemente (Santa 1989).

A confiabilidade dos dados num sistema deste tipo depende da fonte de procedência. Estabelecendo-se uma ordem hierárquica decrescente em confiabilidade dos dados, tem-se:

- dados obtidos na própria empresa;
- dados obtidos em laboratórios (da empresa ou externos);
- dados fornecidos por Centros de Dados e analisados por especialistas; e
- dados extraídos da literatura sem qualquer análise.

Em muitos casos porém, segundo Ferraresi (1989), tem-se constatado que a tarefa de selecionar ferramentas e determinar condições de corte fica a cargo de operadores não qualificados, resultando em velocidades de trabalho abaixo da indicada ou o emprego inadequado da ferramenta. Por outro lado, a grande diversidade de fornecedores de ferramentas e materiais das peças, diferenças de tratamento térmico, diferenças na geometria das ferramentas, características e idade das máquinas-ferramenta, originam diferenças relevantes sobre as condições de usinagem adotadas e as que deveriam ser indicadas para o caso em questão.

#### **4.1 Vida da Ferramenta de Corte**

Uma das maneiras de se otimizar a produção diária de peças é a diminuição dos tempos de usinagem. Uma análise do processo permite a redução destes tempos através da escolha correta da ferramenta, utilização de parâmetros de corte (velocidades, avanços e profundidades de corte) coerentes com a capacidade da máquina-ferramenta, utilização adequada do fluido de corte, etc. (Vilella 1988).

Quando se deseja trabalhar com modelos de otimização das condições de usinagem, deve-se primeiro exprimir a vida em função da velocidade de corte. Tal procedimento implica na definição do que é *vida* e de que maneira pode-se quantificá-la.

Denomina-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. A perda da capacidade de corte é avaliada geralmente através de um determinado grau de desgaste. Os fatores que determinam a fixação de um determinado desgaste e, conseqüentemente, a vida da ferramenta, são vários. Assim, a ferramenta deve ser retirada da máquina segundo Ferraresi (1977) quando:

- desgaste da superfície de saída da ferramenta atinge proporções tão elevadas, que se receia uma quebra da aresta cortante;
- os desgastes chegam a valores, tais que a temperatura da aresta cortante (proveniente em grande parte do atrito da ferramenta com o cavaco e com a peça) se aproxima da temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte;
- devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta, não é mais possível manter as tolerâncias exigidas na peça; e
- o aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina, ou o acabamento superficial da peça usinada não é mais satisfatório

O aumento da velocidade de corte também permite obter uma maior taxa de remoção de cavaco e, conseqüentemente, reduzir o tempo de usinagem. Entretanto, na maioria das vezes, o aumento da velocidade de corte tem um efeito negativo sobre a vida da ferramenta o que pode provocar o aumento do tempo de fabricação devido à necessidade de trocas mais freqüentes de ferramentas.

Portanto, o critério para a determinação do fim de vida da ferramenta está relacionado com cada situação específica. Serão apresentados abaixo os critérios mais utilizados (Micheletti 1980):

- destruição da aresta cortante;
- valores estabelecidos para o desgaste de cratera ou de flanco;
- variação das forças de corte;
- tolerâncias da peça.

A definição do critério de vida é de fundamental importância por influenciar nas constantes experimentais das equações de vida ( $x$  e  $K$  da Equação de Taylor por exemplo). De acordo com Vilella (1988), a mudança do critério ou a utilização de um critério inadequado para uma situação específica pode alterar significativamente os valores ótimos obtidos por qualquer modelo.

Segundo Zhou e Wysk (1992), uma das mais importantes relações do processo de usinagem é a vida da ferramenta e sua conexão com os parâmetros de processo. O desgaste da ferramenta é um fenômeno complicado. Desgaste, como é percebido comumente, é um sinônimo para abrasão. Na realidade, o desgaste da ferramenta pode tomar outras formas tais como a difusão, a deformação, fadiga e atrito. A forma predominante do desgaste depende do material da ferramenta, do material da peça e das condições de usinagem.

#### 4.2 Desgastes Convencionais

A perda da capacidade de corte de uma ferramenta é devida a um determinado grau de dano, ocorrida durante o processo de usinagem. Dependendo do material da ferramenta, da peça de trabalho, do tipo de operação e das condições de usinagem, os danos originados na ferramenta são diferentes. Por outro lado, dependendo das exigências de operação (acabamento ou desbaste), o valor limite a ser estabelecido ao dano, acima do qual o trabalho com a ferramenta não é mais satisfatório, também é diferente (Ferraresi 1989).

Quando prevalece o desgaste da ferramenta, e este se processa de forma gradual e contínua, torna-se mais fácil o estabelecimento de grandezas mensuráveis para definir o dano. Assim, por exemplo, pode-se estabelecer valores limites dos desgastes acima dos quais a rugosidade superficial da peça não é mais satisfatória, ou as tolerâncias dimensionais não podem ser mantidas. Em operações de desbaste, os valores limites dos desgastes são maiores, os quais são determinados pela quebra da aresta cortante, aumento da força de usinagem, vibrações do conjunto máquina-ferramenta-peça, ou ainda uma sobrecarga do sistema de acionamento.

Durante a usinagem ocorre um desgaste nas superfícies de saída e de folga da ferramenta. Para facilitar o estudo da usinagem, costuma-se padronizar os desgastes da ferramenta com a chamadas formas de *desgastes convencionais* (figura 4.1). Assim, distinguem-se os desgastes originados na superfície de saída (profundidade da cratera KT) e na superfície de folga ou incidência (desgaste de flanco médio  $VB_B$  e máximo  $VB_{Bmax}$ ).

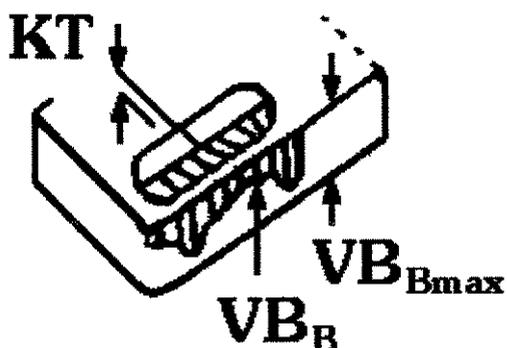


Figura 4.1 - Representação dos desgastes convencionais: de flanco ( $VB_B$  e  $VB_{Bmax}$ ) e cratera (KT)

A separação quantitativa das componentes do desgaste é praticamente impossível, porém o quadro qualitativo visualiza a importância de cada componente nas diversas velocidades de corte. Assim, em velocidades de corte baixas, o desgaste é relativamente elevado por causa do cisalhamento da aresta postiça de corte (*APC*) e do acúmulo de fluxo de camadas sucessivas. Em velocidades de corte maiores, o desgaste é causado principalmente pelos fatores cuja intensidade depende da temperatura de corte, tais como a abrasão mecânica, a difusão e a oxidação. A difusão não ocorre normalmente nas ferramentas de aço rápido e na maioria das de material cerâmico (Ferrarezi 1977).

Muitas vezes na usinagem pode-se formar, na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, por causa do atrito, uma camada de cavaco (*APC*) que, permanece aderente à aresta de corte, modificando seu comportamento, seja em relação à força de corte, seja sobre o acabamento superficial, seja sobre o desgaste da ferramenta. A *APC* tende a crescer gradualmente, até que, em um certo momento, rompe-se bruscamente causando uma perturbação dinâmica. Por outro lado, porque uma parte da *APC* é carregada com o cavaco e outra parte fica ligada à superfície trabalhada da peça, formam-se irregularidades sobre a superfície da peça. A formação da *APC* está relacionada com a espessura do cavaco, com as condições de refrigeração da zona de corte e principalmente com a velocidade de corte; ela também incentiva o desgaste de flanco ( $VB_B$ ).

Deve-se distinguir o procedimento do desgaste das ferramentas de metal duro do das ferramentas de aço rápido. Nas primeiras o desgaste é progressivo e chega a valores que causam finalmente a quebra da aresta cortante; nas ferramentas de aço rápido, porém, antes do desgaste chegar a estes valores, tem-se a destruição da aresta de corte devido à diminuição da dureza da aresta com o aumento da temperatura de corte.

Nas ferramentas cerâmicas verifica-se geralmente além da difusão o microlascamento da aresta cortante, antes que os desgastes da superfície de folga (de flanco) e o da superfície de saída (de cratera) atinjam valores acentuados.

Na figura 4.2 é apresentada a influência da velocidade de corte e do avanço sobre o desgaste da ferramenta, para um volume de cavaco constante usinado por minuto. Nesta figura verifica-se que aumentando-se o avanço e diminuindo-se a velocidade de corte, os desgastes da ferramenta decrescem consideravelmente. Os referidos ensaios foram feitos com uma ferramenta de metal duro P30 usinando um aço St 90, profundidade de usinagem de 2 mm.

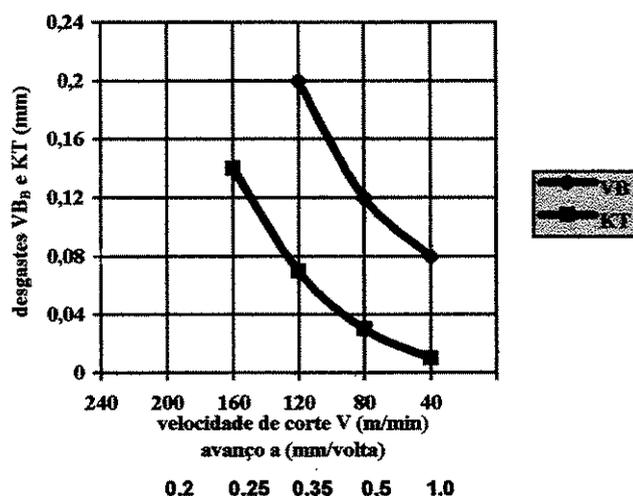


Figura 4.2 - Gráfico do comportamento dos desgastes ( $VB_B$  e  $KT$ ) em relação à velocidade de corte e ao avanço (Ferraresi 1977)

A elevação da força de corte ( $P_c$ ) com a diminuição da velocidade ( $v_c$ ) é relativamente pequena; desta maneira pode-se afirmar que para remover a mesma quantidade de cavaco na unidade de tempo, é preferível aumentar o avanço e reduzir a velocidade de corte. Existem porém, limitações com relação ao aumento do avanço e conseqüente diminuição da velocidade corte. O aumento da área da seção de corte acarreta forças de corte maiores, as quais poderão originar trepidação. Cada par ferramenta-peça apresenta uma velocidade de corte mínima, na qual trabalhando-se com valores inferiores a este mínimo, aparecerão outros fenômenos indesejáveis, tais como a formação da aresta postiça de corte ( $APC$ ) e conseqüentemente um desgaste maior na ferramenta. O acabamento da superfície da peça é também prejudicado com velocidades de corte baixas.

### 4.3 Equivalência nas Operações de Usinagem

Entende-se por *operação de corte equivalente* a operação hipotética, realizada a diâmetro e velocidade de corte constantes, cuja vida da ferramenta e tempo por peça sejam iguais aos da operação a velocidade de corte e diâmetros variáveis.

A igualdade dos tempos de corte obviamente implica na igualdade dos percursos principais de avanço, na operação real e na equivalente. Esta propriedade só pode ser satisfeita, quando o percurso de avanço da ferramenta, na operação de corte equivalente ( $l_e$ ), for igual ao do carro ou mesa móvel na operação real ( $l_a$ ). Como por definição a *operação equivalente* é realizada à diâmetro constante, decorre daí a existência do *perfil retilíneo-equivalente*, como mostrado nas figuras 4.3 e 4.4.

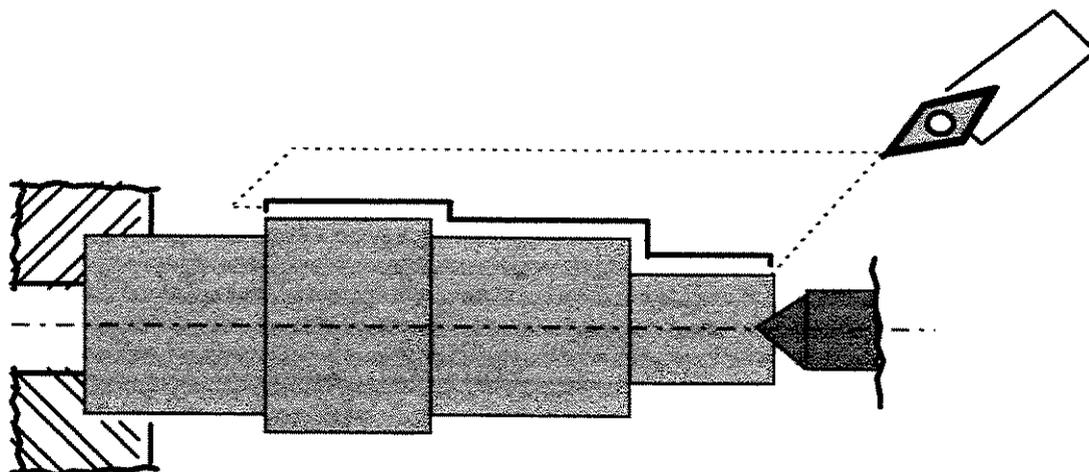


Figura 4.3 - Esquema de uma operação de torneamento com velocidade de corte variável

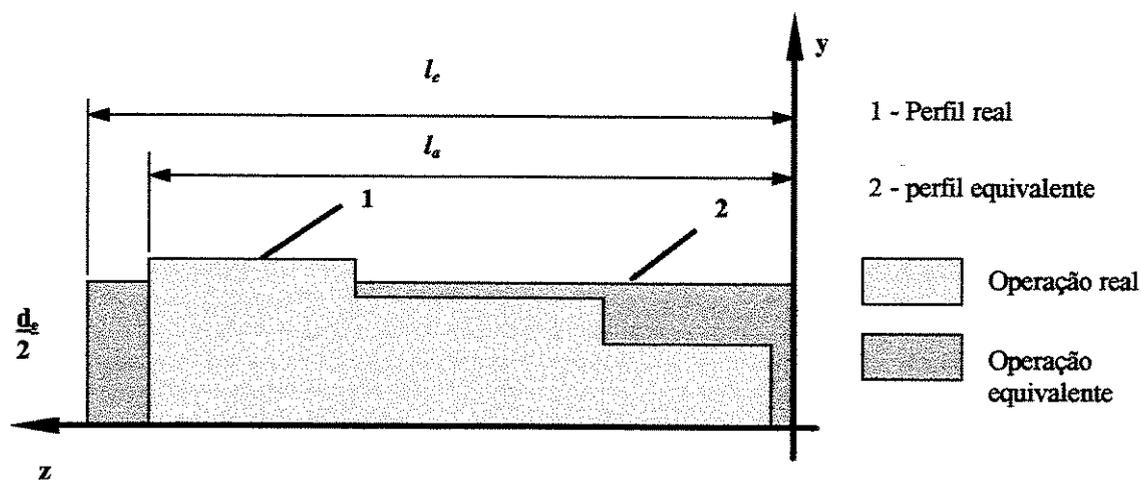


Figura 4.4 - Esquema de uma operação a velocidade de corte constante equivalente à anterior

Como demonstrado por Ferraresi e citado por Pallerosi (1973), baseado na correspondência biunívoca entre o desgaste convencional e o valor da constante  $K$ , tem-se:

$$v_e^x = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} v_c^x \cdot dt_c \quad (4.1)$$

onde:

$v_e$  = *velocidade de corte equivalente*, para usinagem a diâmetro constante, em m/min.

$x$  = expoente da Equação de Taylor Simplificada.

$v_c$  = velocidade de corte da ferramenta, na usinagem a diâmetro variável, em m/min.

Ainda segundo Pallerosi (1973) analisando-se a equação (4.1) verifica-se que ela representa a igualdade da parcela da vida da ferramenta consumida por peça usinada, na operação real e na equivalente.

Para a operação de corte equivalente, realizada a uma rotação *constante*, resulta um *diâmetro constante* dado por:

$$d_e = \frac{1000 \cdot v_e}{\pi \cdot n} \quad (4.2)$$

onde:

$v_e$  = velocidade equivalente, em m/min.

$n$  = rotação constante do eixo-árvore, em mm/volta.

Como será demonstrado mais adiante, o *diâmetro-equivalente* assume particular importância na formulação da *operação de corte equivalente* a uma dada operação de usinagem.

Quando a velocidade de corte é mantida constante por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore, para a operação de corte equivalente resulta num *diâmetro -equivalente* dado por:

$$d_e = \frac{1000 \cdot \hat{v}_c}{\pi \cdot n_e} \quad (4.3)$$

onde:

$\hat{V}$  = velocidade de corte constante, em m/min.

$n_e$  = rotação-equivalente do eixo-árvore, mm/volta.

#### 4.3.1 Equação de Taylor Equivalente

Nos tratados referentes à usinagem dos metais, defini-se a *Equação de Taylor Simplificada* como sendo a equação:

$$T = \frac{K}{v_c^x} \quad (4.4)$$

onde:

T = vida da ferramenta, ou seja, o espaço de tempo em que a ferramenta efetivamente trabalha, removendo cavacos da peça, em min.

$v_c$  = velocidade de corte da ferramenta (admitida como constante), em m/min.

$x$ , K = constantes, para um dado par ferramenta-peça e um desgaste convencional adotado.

De acordo com Pallerosi (1973), quando uma ferramenta monocortante executa uma operação de corte em vários diâmetros, os desgastes que determinam a vida da ferramenta serão influenciados pelas particulares variações das velocidades, avanços e profundidades de usinagem. Nestes casos, a equação de Taylor Simplificada (4.4) não poderá ser aplicada se os parâmetros  $x$  e  $K$  foram determinados em uma operação à velocidade, avanço e profundidade de corte constantes. Isto implica na necessidade da determinação experimental dos parâmetros  $x$  e  $K$  da Equação de Taylor, a partir do número de peças usinadas por vida da ferramenta e do tempo de corte por peça usinada, para as particulares condições de usinagem da operação em análise. Esta condição justifica-se devido principalmente aos seguintes fatores:

- durante a operação de corte de uma peça, a variação da velocidade de corte, devido à variação dos diâmetros da peça, origina desgastes variáveis;
- a vida da ferramenta é afetada pelo número de vezes em que a ferramenta penetra e sai da peça;
- a ferramenta é submetida a periódicos aquecimentos e resfriamentos;
- a geometria da cunha e da ponta da ferramenta, bem como a variação da profundidade de corte e do avanço, influem na localização das áreas onde instantaneamente a taxa de desgaste é maior; e
- nas operações onde são utilizados fluidos de corte, podem ocorrer variações bruscas de temperatura (choques térmicos).

Da definição de vida da ferramenta, tem-se que:

$$T_i = z_{T,i} \cdot t_{c,i} \quad (4.5)$$

onde:

$T_i$  = vida da ferramenta correspondente à  $i$ -ésima condição de corte, em min.

$z_{T,i}$  = número médio de peças usinadas por vida da ferramenta.

$t_{c,i}$  = tempo de corte por peça, em min/pç.

É interessante notar-se que o número médio de peças usinadas por vida da ferramenta  $z_{T,i}$  nem sempre corresponde a um número inteiro. No caso de peças usinadas de grande porte, por exemplo torneamento de grandes cilindros onde às vezes são necessárias várias ferramentas em um único passe, pode-se ter até  $z_T < 1$ .

Como a qualquer operação de usinagem (torneamento, mandrilamento, furação, alargamento, fresamento, roscamento, etc.) pode-se associar uma *velocidade de corte equivalente* e um *diâmetro-equivalente*, a equação 4.4 pode ser colocada na forma:

$$T \cdot v_e^x = K_e \quad (4.6)$$

ou então,

$$T' \cdot (v_e')^x = T'' \cdot (v_e'')^x = K \quad (4.7)$$

Expressão denominada *Equação de Taylor Equivalente*, representada num gráfico dilogarítmico por uma reta, pelo menos no intervalo  $(v_e', v_e'')$ , no qual tem-se as grandezas  $x$  e  $K$ , como mostrado na figura 4.5. Mesmo quando o produto  $T' \cdot (v_e')^x$  não é constante, ou seja quando  $x$  e  $K$  não são constantes, pode-se sempre tomar um intervalo onde a equação (4.7) é satisfeita dentro de uma razoável aproximação, segundo Pallerosi (1973).

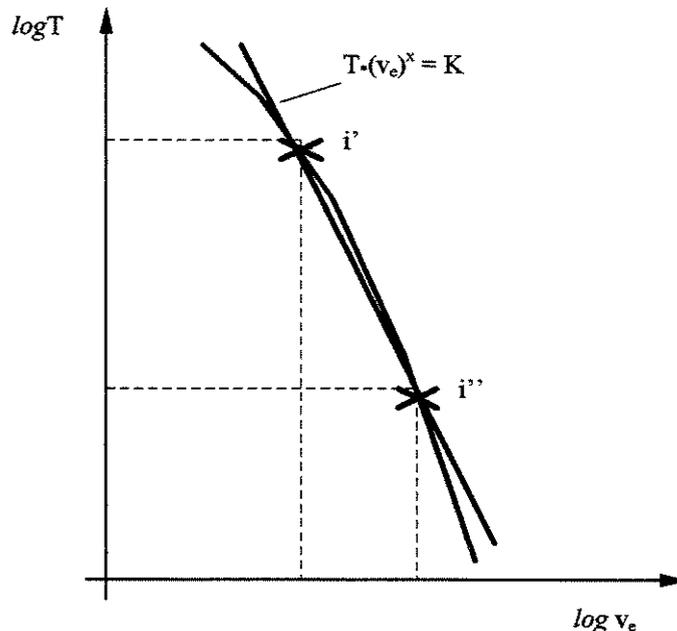


Figura 4.5 - Representação da *Equação de Taylor Equivalente* em gráfico dilogarítmico, e correspondente ao intervalo de validade  $[i', i'']$  (Pallerosi 1973)

#### 4.3.2 Diâmetro-equivalente

Considerando-se uma operação de usinagem com velocidade de corte variável e se a peça for usinada com *velocidade de corte equivalente* ( $v_e$ ) determinada para a operação considerada,

originária no mesmo tempo de corte, o mesmo valor do desgaste da ferramenta. O *diâmetro-equivalente* correspondente à esta velocidade é definido pela equação abaixo, segundo Novaski (1991):

$$d_e = \frac{1000}{\pi \cdot n} \cdot x \sqrt{\frac{1}{t_c} \cdot \int_0^{t_c} v_c^x \cdot d_t} \quad (4.8)$$

onde:

$n$  = rotação do eixo-árvore, em mm/volta.

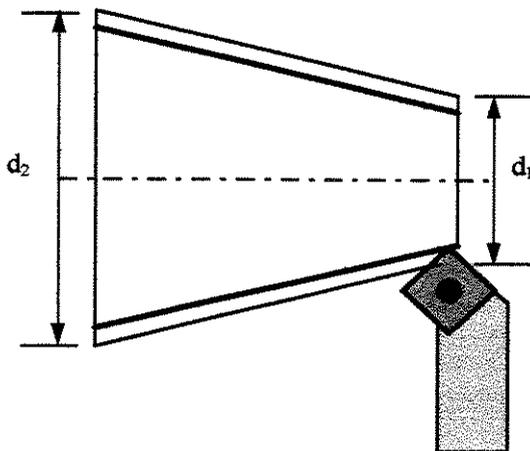
$t_c$  = tempo de corte, em min/pç.

$v_c$  = velocidade de corte, em m/min.

$x$  = coeficiente da equação de vida de Taylor.

De acordo com as formulações realizadas por Ferraresi e citadas por Novaski (1991), tem-se o *diâmetro-equivalente* ( $d_e$ ) para diferentes operações de corte quais sejam:

- Torneamento cônico:



$$d_e = d_2 \cdot x \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{x+1}}{(x+1) \cdot \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)}} \quad (4.9)$$

Figura 4.6 - Torneamento cônico de uma peça

onde:

$l$  = comprimento do trecho cônico, em mm.

$d_1$  = diâmetro menor, em mm.

$d_2$  = diâmetro maior, em mm.

$x$  = coeficiente da equação de vida de Taylor.

- Torneamento cilíndrico em diferentes diâmetros:

$$d_e = \sqrt[x]{\frac{1}{l_a} \sum_{i=1}^m d_i^x \cdot l_i} \quad (4.10)$$

onde:

$l_a$  = comprimento total da peça, em mm.

$l_i$  = comprimento de cada trecho cilíndrico, em mm.

$d_i$  = diâmetro de cada trecho cilíndrico, em mm.

$x$  = coeficiente da equação de vida de Taylor.

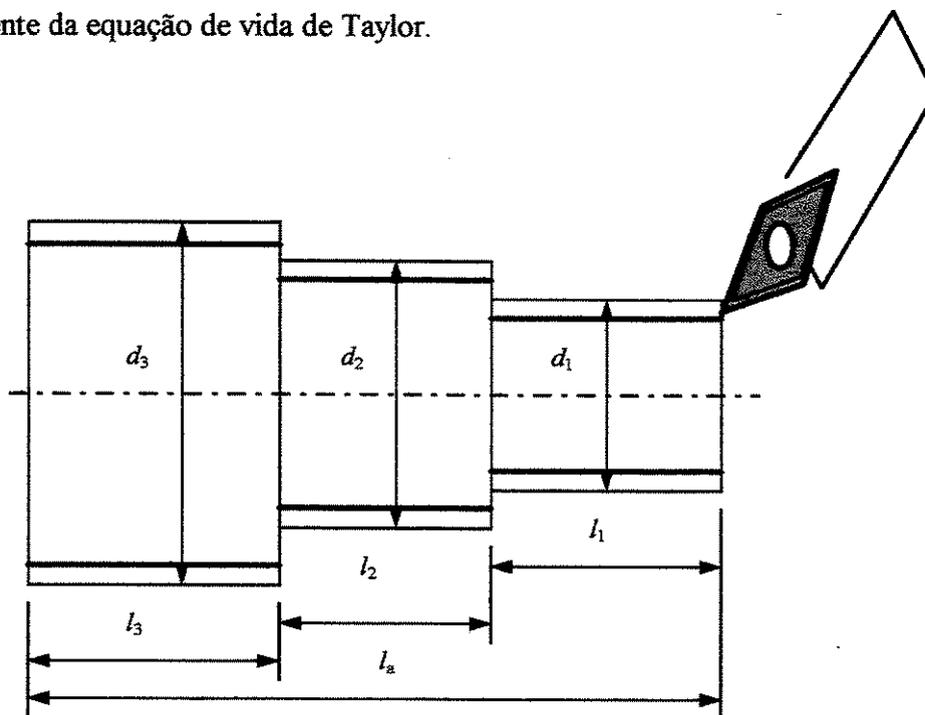


Figura 4.7 - Torneamento cilíndrico de uma peça com vários diâmetros

Segundo Pallerosi (1973), quando a velocidade de corte é mantida constante, o *diâmetro-equivalente* ( $d_e$ ) corresponderá ao valor assumido pela *rotação-equivalente* ( $n_e$ ), como foi visto anteriormente (equação 4.3). Nestes casos, para cada perfil usinado, com um avanço constante tem-se:

$$d_e = \frac{1000 \cdot \hat{v}_c \cdot f \cdot t_c}{\pi \cdot l_e} \quad (4.11)$$

onde:

$\hat{v}_c$  = velocidade de corte constante, em m/min.

$f$  = avanço da ferramenta, em mm/volta.

$t_c$  = tempo de corte, em min/pç.

$l_e$  = comprimento-equivalente para cada perfil, em mm.

É interessante notar-se que o diâmetro-equivalente, na condição de velocidade de corte constante, independe do expoente  $x$  da Equação de Taylor Equivalente. Assim sendo a expressão para as operações de torneamento cônico passa a ser:

$$d_e = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4.12)$$

onde:

$d_1$  = diâmetro menor, em mm.

$d_2$  = diâmetro maior, em mm.

Já a expressão para o torneamento cilíndrico será:

$$d_e = \frac{1}{l_a} \cdot \sum_{i=1}^m d_i \cdot l_i \quad (4.13)$$

onde:

$l_a$  = comprimento total da peça, em mm.

$l_i$  = comprimento de cada trecho cilíndrico, em mm.

$d_i$  = diâmetro de cada trecho cilíndrico, em mm.

## Capítulo 5

### O Modelo de Otimização e Seleção

O modelo proposto de cálculo da relação custo/benefício de usinagem para aplicações em planta fabril, se apresenta como desenvolvimento dos conceitos apresentados nos seguintes trabalhos:

- desenvolvimento de aplicativos de sistemas gerenciadores de banco de dados em apoio à tecnologia de usinagem (Cupini et al. 1993, Ribeiro 1994 e Coppini e Ribeiro 1995);
- desenvolvimento de metodologia prática visando a otimização das condições de usinagem (Vilella 1988 e Diniz et al. 1989); e
- desenvolvimento de sistemas de banco de dados de usinagem visando a otimização das condições operacionais em planta fabril (Ribeiro e Coppini 1996, Ribeiro e Coppini 1997.b).

Os trabalhos acima mencionados resultaram em um sistema informatizado de apoio à usinagem, o qual considera a condição de máxima produção, como condição suficiente para seleção da velocidade de corte. Isto significa que foi considerada não necessária a determinação do Intervalo de Máxima Eficiência e por consequência da velocidade de mínimo custo.

O modelo proposto mantém esta mesma conceituação. Isto significa que a relação custo/benefício será determinada calculando-se o custo de fabricação por peça para a

velocidade de corte selecionada com base na velocidade de máxima produção, determinada em planta fabril, durante o desenvolvimento do processo de uma peça específica.

### 5.1 Modelo de Custo Corrente

O modelo de custo normalmente utilizado pelas indústrias, sejam elas fabricantes de peças por usinagem, fabricantes de ferramentas de corte ou fornecedores de peças usinadas, doravante denominado *custo corrente* (Coppini e Ribeiro 1995) pode ser representado pela equação (5.1) a seguir:

$$C_{TP} = C_{um} \cdot t_{um} + \frac{C_{sup} + C_{ins} + C_{Tf}}{Z_T} \quad (5.1)$$

Onde  $z_T$  representa a vida da ferramenta, em peças, já as demais parcelas correspondem a:

- Custo Máquina:

Calcula-se inicialmente o tempo total em que a máquina será utilizada ( $t_{um}$ ), em min/pç:

$$t_{um} = t_c + t_m + t_i \quad (5.2)$$

onde:

$t_c$  = tempo de corte efetivo, em min/pç.

$t_m$  = tempo de manuseio, ou seja, aquele utilizado para a colocação, fixação e retirada da peça na máquina assim como para a inspeção, em min/pç.

$t_i$  = tempos improdutivos, consumido nas operações de aproximação e afastamento da ferramenta, em min/pç.

O custo de utilização da máquina ( $C_{um}$ ), em \$/min, refere se aos valores do custo da máquina ( $C_m$ ) e do salário do operador ( $S_h$ ).

$$C_{um} = C_m + S_h \quad (5.3)$$

- Custo do suporte:

O custo referente ao suporte ou porta-ferramenta sem o inserto ( $C_{sup}$ ), em \$/aresta, é dado pela relação entre o preço do suporte ( $P_{sup}$ ) e a sua vida ( $T_{sup}$ ) em termos do número de arestas:

$$C_{sup} = \frac{P_{sup}}{T_{sup}} \quad (5.4)$$

- Custo do inserto:

O custo referente ao inserto ( $C_{ins}$ ), em \$/aresta, também é dado por uma relação só que entre o preço do inserto ( $P_{ins}$ ) e o número de arestas que o inserto possui ( $N_{ins}$ ):

$$C_{ins} = \frac{P_{ins}}{N_{ins}} \quad (5.5)$$

- Custo da troca de ferramenta:

O cálculo do custo com a troca de ferramentas ( $C_{Tf}$ ), em \$/aresta, será obtido relacionando o tempo de troca da ferramenta ( $t_{Tf}$ ), em min/aresta com o custo de utilização da máquina ( $C_{um}$ ), em \$/min, pois ela permanecerá à disposição da operação de troca do inserto:

$$C_{Tf} = C_{um} \cdot t_{Tf} \quad (5.6)$$

O modelo corrente tem a limitação de, apesar de realizado em planta fabril, não garantir que o número de peças usinadas por vida da ferramenta ( $z_T$ ), seja aquele que garanta a máxima produção, ou mesmo que garanta que as condições operacionais utilizadas, sejam baseadas em condições de máxima produção (Coppini e Ribeiro 1995).

## 5.2 A Função Objetivo

A função objetivo estabelece uma relação matemática entre o critério de otimização e as variáveis que caracterizam o processo a ser otimizado. Na seleção do critério de otimização deve-se estabelecer um objetivo econômico a atingir, dando-se preferência ao compromisso entre custos e tempo de usinagem (Santa 1989).

Uma das maneiras de se otimizar a produção diária de peças é a diminuição dos tempos de usinagem. Uma análise do processo permite a redução destes tempos através da escolha correta da ferramenta, utilização de avanços e profundidades de usinagem coerentes com a capacidade da máquina-ferramenta, utilização adequada do fluido de corte, etc.

De acordo com Santa (1989), em condições de produção em série e pequenas séries somente dois critérios de otimização atingem uma importância fundamental: mínimo custo e máxima produção. Qualquer que seja o critério de otimização selecionado a função objetivo deve ser uma função dos elementos do regime de corte: avanço ( $f$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ) e velocidade ( $v_c$ ).

O aumento da velocidade de corte também permite obter uma maior taxa de remoção de cavaco e, conseqüentemente, reduzir o tempo de usinagem. Entretanto, o aumento da velocidade de corte tem um efeito negativo sobre a vida da ferramenta, o que pode provocar o aumento do tempo de fabricação devido à necessidade de trocas mais freqüentes de ferramentas.

O critério de fim de vida da ferramenta sempre pode ser usado, mas em algumas situações é necessário utilizar um critério indireto, relacionado com a vida da ferramenta, como quebra da ferramenta por desgaste exagerado (fratura súbita), qualidade da superfície (rugosidade), tolerância dimensional, nível de acréscimo da força ou momento torsor de corte ocasionado pela evolução do desgaste, etc.

Como já foi exposto anteriormente, alguns modelos de otimização que aparecem na literatura utilizam como função objetivo o critério de mínimo custo. De acordo com Ferraresi (1977), o critério de mínimo custo pode ser representado pela equação (5.7) da velocidade de mínimo custo ( $v_o$ ), a qual apresenta uma certa limitação para a sua aplicação prática, devido à dificuldade, em muitos casos, de se obter uma detalhada análise de custos.

$$v_o = x \sqrt{\frac{C_{um} \cdot K}{(x-1) \cdot C_A}} \quad (5.7)$$

Onde:

$x$  e  $K$  = coeficientes da equação de vida de Taylor.

$C_{um}$  = custo de utilização da máquina, em \$/min (5.3).

$C_A$  = custo total da ferramenta, em \$/aresta dado por:

$$C_A = C_{ins} + C_{sup} + C_{Tf} \quad (5.8)$$

Onde:

$C_{ins}$  = custo do inserto, (5.5).

$C_{sup}$  = custo do porta-ferramenta, (5.4).

$C_{Tf}$  = custo para a troca de ferramenta, (5.6).

Segundo Santa (1989), a utilização da velocidade de mínimo custo só teria aplicação quando se tivesse ociosidade ocasionada por baixa de mercado ou desbalanceamento na seqüência de produção. Nestas condições deve-se considerar que as equações de custo não levam em consideração os tempos improdutivos devido à falta de serviço.

Em vista desta consideração, ainda segundo Santa (1989), o conhecimento preciso das condições de mínimo custo é bastante inócuo para otimizar as condições de operação da fábrica como um todo. Evidencia-se, assim, que o conhecimento preciso da velocidade de máxima produção ( $v_{max}$ ), aliado ao fato de que a velocidade de mínimo custo é sempre inferior a esta, é uma ferramenta mais útil para a definição dos parâmetros operacionais, principalmente nos gargalos, não enumerados aqui como parâmetros operacionais, mas sim adequados para aplicações práticas.

A  $v_{max}$  se baseia no fato de que, com o aumento da velocidade de corte, diminuem o tempo de corte, os custos relativos à máquina e ao operador. Porém, diminui simultaneamente a vida da ferramenta, ocasionando um aumento do tempo relativo às suas trocas e um aumento relativo à parte de custo da ferramenta. Dessa forma, existem condições nas quais o tempo total de fabricação é mínimo, o que corresponde à máxima produção (Ferraresi, 1989).

Segundo Diniz et al. (1989), a  $v_{max}$  é a velocidade de corte para a qual a soma dos tempos de troca da ferramenta e de usinagem é mínimo, ou seja, é a velocidade na qual ocorre um equilíbrio entre os efeitos positivos e negativos associados à utilização de altas velocidades de corte, quais sejam a maior taxa de remoção de material e a maior freqüência de trocas de ferramenta, respectivamente.

Para se obter este valor, segundo Ferraresi (1977), através da equação (5.9), deve-se calcular os expoentes da equação de Taylor ( $x$  e  $K$ ) e o tempo de troca da ferramenta. ( $t_{Tf}$ ), em min.

$$v_{mxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_{Tf}}} \quad (5.9)$$

### 5.3 A Metodologia Proposta

No sentido de se possibilitar comparações mais precisas, procurando-se avaliar o desempenho das ferramentas em igualdade de condições, sugere-se que as mesmas sejam testadas na sua melhor faixa de operação, ou seja, não necessariamente as ferramentas têm que atuar nas mesmas condições de corte. Para tornar isso mais efetivo indica-se o uso da velocidade de máxima produção ( $v_{mxp}$ ) real obtida na prática para cada caso, obtendo assim o melhor do desempenho de cada uma.

A relação custo/benefício pode ser determinada calculando-se o custo de fabricação por peça para a velocidade de corte selecionada com base na ( $v_{mxp}$ ), determinada em planta fabril, durante o desenvolvimento do processo de uma peça específica.

Os testes consistem em usinar uma determinada peça, utilizando para tanto diferentes ferramentas e fazendo a verificação do comportamento de cada uma delas, no que diz respeito à vida de cada ferramenta em relação à variação das condições de corte. Os dados gerados são então armazenados no sistema.

É necessário também, definir um critério de fim de vida de ferramenta adequado, para poder se avaliar o comportamento de cada ferramenta da melhor forma possível, além de se tratar estatisticamente os dados quanto à vida da ferramenta, o que é previsto pelo modelo.

### 5.3.1 Determinação dos parâmetros

Para se obter o valor da  $v_{msp}$  o modelo aplica um procedimento baseado naquele adotado por Vilella (1988), para determinação dos valores de  $(x)$  e  $(K)$  da equação de vida de Taylor em ambiente fabril. Após feitos os ensaios, anota-se para a condição testada:

- o valor da velocidade de corte ( $v_c$ ) ou da rotação do eixo árvore ( $n$ );
- o número de peças usinadas por aresta ( $z$ ); e
- o tempo de corte da peça ( $t_c$ ).

Cabe mencionar que a velocidade de corte ( $v_c$ ), será o único parâmetro de corte a variar de um ensaio para outro, já que os demais parâmetros são muitas vezes definidos por imposição do próprio processo. Além do que, a influência da variação de  $v_c$  no comportamento da vida da ferramenta acaba sendo muito maior, que a dos demais parâmetros.

A definição da profundidade de corte ( $a_p$ ), é normalmente advinda de aspectos mais relacionados com a geometria da peça e em termos de sobremetal a ser retirado: usinagem da peça a partir de um tarugo laminado, ou a partir de um forjado com dimensões próximas da final. Já o avanço ( $f$ ), é determinado mais com base no tipo de operação a ser realizada em termos de: desbaste pesado, desbaste, desbaste leve, semi-acabamento, acabamento e superacabamento.

Ainda segundo Vilella (1988), serão necessárias no mínimo, duas condições ( $i'$  e  $i''$ ) para se calcular os coeficientes da equação de Taylor, pela metodologia adotada recomenda-se inicialmente uma diferença de 20 % entre as velocidades testadas, ( $v' < v''$ ) assim como ( $n' < n''$ ).

Basicamente as operações de torneamento podem se desenvolver de três maneiras, operações  $v_c$  constante,  $n$  constante ou com  $v_c$  e  $n$  constantes. Assim sendo, três estratégias distintas devem ser implementadas para se obter a  $v_{msp}$  e promover a otimização, as quais são detalhadas a seguir.

- Velocidade de corte constante.

Caso a operação seja definida como de velocidade constante inicialmente se faz uma verificação desta afirmação através das equações abaixo:

$$n_{E_{max}} = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d_{min}} \quad (5.10)$$

$$n_{E_{min}} = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d_{max}} \quad (5.11)$$

onde:

$n_{E_{max}}$  = rotação máxima alcançada no teste, em rpm.

$n_{max}$  = rotação máxima da máquina, em rpm.

$n_{E_{min}}$  = rotação mínima alcançada no teste, em rpm.

$n_{min}$  = rotação mínima da máquina, em rpm.

$v_c$  = velocidade de corte do teste, em m/min

$d_{min}$  = diâmetro mínimo da peça, em mm.

$d_{max}$  = diâmetro máximo da peça, em mm.

Se  $n_{E_{max}} \leq n_{max}$  e  $n_{E_{min}} \geq n_{min}$ , logo o teste realmente foi realizado à velocidade constante, pois as rotações máxima e mínima foram suficientes para garantir a operação de corte. Assim sendo, para se obter o valor da  $v_{mcp}$  através da expressão (5.9) deve-se inicialmente calcular o expoente da equação de Taylor pela equação abaixo:

$$x = 1 + \left[ \frac{\log(z'/z'')}{\log(v_c''/v_c')} \right] \quad (5.12)$$

onde:

$z'$  = vida da aresta para a primeira condição, em pç.

$z''$  = vida da aresta para a segunda condição, em pç.

$v_c'$  = velocidade de corte da primeira condição, em m/min.

$v_c''$  = velocidade de corte da segunda condição, em m/min.

Para o cálculo do valor do coeficiente  $K$  da equação de vida de Taylor aplica-se a equação (5.13):

$$K = z \cdot v_c^x \cdot t_c \quad (5.13)$$

onde:

$z$  = número de peças usinadas por aresta.

$v_c$  = velocidade de corte utilizada, em m/min.

$t_c$  = tempo de corte para uma peça, em min/pc.

Caso contrário, ou seja  $n_{E\max} > n_{\max}$  ou  $n_{E\min} < n_{\min}$ , isto significa que a velocidade não pôde se manter constante o tempo todo, pois devido à variação do diâmetro da peça as rotações limites da máquina podem ter sido alcançadas. Portanto, a velocidade sofreu uma variação para que a operação de corte prosseguisse.

- Rotação do eixo-árvore constante.

Caso a operação seja definida como de rotação constante, logo os testes serão realizados com valores de rotação entre os de rotação máxima e mínima da máquina os quais devem ser suficientes para garantir a operação de corte. Assim sendo, pode-se calcular o expoente da equação de Taylor pelas expressão abaixo:

$$x = 1 + \left[ \frac{\log(z'/z'')}{\log(n''/n')} \right] \quad (5.14)$$

onde:

$z'$  = vida da aresta para a primeira condição, em pç.

$z''$  = vida da aresta para a segunda condição, em pç.

$n'$  = rotação para a primeira condição, em rpm.

$n''$  = rotação para a segunda condição, em rpm.

Para o cálculo do coeficiente K da equação de Taylor através da expressão (5.13) é necessário se calcular o valor da velocidade equivalente ( $v_e$ ) pela expressão:

$$v_e = \frac{\pi \cdot d_e \cdot n}{1000} \quad (5.15)$$

onde:

$d_e$  = diâmetro equivalente, em mm (4.9) e (4.10).

$n$  = rotação do eixo-árvore, em rpm.

Em seguida é possível se calcular o valor da velocidade de máxima produção também pela expressão (5.9).

- Velocidade e rotação constantes.

Quando para se realizar a operação de corte se tornou necessária ora a variação da velocidade e ora a da rotação, inicialmente se calcula a rotação efetiva do eixo-árvore ( $n_E$ ), conforme a expressão (5.16) para as condições testadas

$$n_E = \frac{l_e}{t_c \cdot f} \quad (5.16)$$

onde:

$l_e$  = comprimento de corte equivalente, em mm.

$t_c$  = tempo de corte, em min.

$f$  = avanço da ferramenta, em mm/volta.

Em seguida se pode calcular o expoente  $x$  da equação de Taylor pela expressão (5.14). Já para o cálculo do coeficiente  $K$  é necessário se calcular a velocidade de corte equivalente pela expressão:

$$v_e = \frac{\pi \cdot d_e \cdot n_E}{1000} \quad (5.17)$$

onde:

$d_e$  = diâmetro equivalente da peça, em mm (4.9) e (4.10).

$n_E$  = rotação efetiva do eixo-árvore, em mm/volta.

Neste caso o que normalmente acontece é que uma velocidade inicialmente é imposta à máquina ( $v_{CI}$ ), porém devido à variação do diâmetro da peça as rotações limites (máxima e/ou mínima) podem ser atingidas. Neste caso, uma operação que era à velocidade constante passa a ser à rotação constante. Pode-se determinar o ponto a partir do qual há a mudança de *comportamento* da operação, pelas expressões:

$$d_{C1} = \frac{1000 \cdot v_{CI}}{\pi \cdot n_{max}} \quad (5.18)$$

$$d_{C2} = \frac{1000 \cdot v_{CI}}{\pi \cdot n_{min}} \quad (5.19)$$

onde:

$d_{C1}$  = menor diâmetro crítico, em mm.

$d_{C2}$  = maior diâmetro crítico, em mm.

$n_{max}$  = rotação máxima da máquina, em rpm.

$n_{min}$  = rotação mínima da máquina, em rpm.

$v_{CI}$  = velocidade inicial de corte, em m/min.

No caso da peça testada não possuir nenhum escalonamento e sim diâmetro constante, este será o valor do ( $d_e$ ) das equações (5.15) e (5.17). O mesmo vale para o comprimento de corte ( $l$ ), caso contrário será necessário se determinar o *diâmetro e comprimento de corte equivalentes* para cada escalonamento e assim chegar ao valor do ( $d_e$ ) e ( $l_e$ ) da peça como um todo (conforme item 4.3).

O procedimento consiste em se dividir a peça em diversas seções, correspondentes aos diversos escalonamentos que em geral podem possuir três formas: cilíndricas, cônicas ou de concordâncias. Com o objetivo de melhorar a aproximação do perfil equivalente com a real, o *comprimento de corte equivalente* ( $l_e$ ) para dois dos perfis em questão: cônico e de concordância, foi deduzido através das seguintes expressões (figuras 5.1 e 5.2):

- perfil cônico:

$$l_e = \sqrt{l^2 + \left(\frac{d_1 - d_2}{2}\right)^2} \quad (5.20)$$

ou

$$l_e = l \cdot \cos \alpha \quad (5.21)$$

ou

$$l_e = \left(\frac{d_1 - d_2}{2}\right) \cdot \sen \alpha \quad (5.22)$$

onde:

$l$  = comprimento do trecho cônico, em mm.

$d_1$  = diâmetro menor, em mm.

$d_2$  = diâmetro maior, em mm.

$\alpha$  = ângulo de conicidade, em graus.

Graficamente:

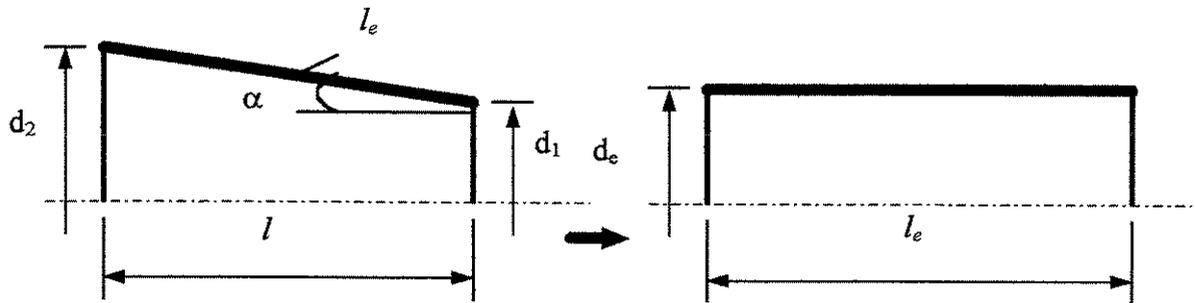


Figura 5.1 - Representação gráfica da obtenção do diâmetro e do comprimento de corte equivalentes ( $d_e$  e  $l_e$ ) para um trecho com conicidade

Quanto ao *diâmetro equivalente* ( $d_e$ ), ele pode ser calculado pela expressão (4.9), que relaciona os diâmetros ( $d_1$  e  $d_2$ ) com o coeficiente  $x$  da equação de vida de Taylor (Novaski 1991).

- perfil de concordância:

$$l_e = r \cdot 2 \cdot \text{arc. sen} \left( \frac{\sqrt{l^2 + \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^2}}{2 \cdot r} \right) \quad (5.23)$$

onde:

$r$  = raio da concordância, em mm.

$l$  = comprimento do trecho de concordância, em mm.

$d_1$  = diâmetro menor, em mm.

$d_2$  = diâmetro maior, em mm.

Graficamente:

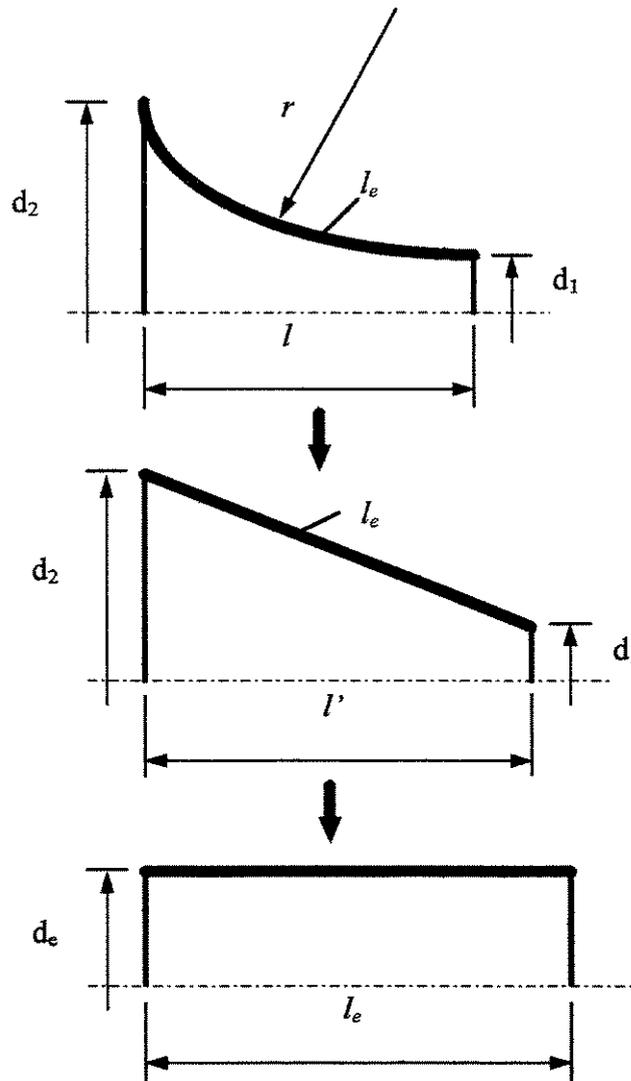


Figura 5.2 - Representação gráfica da obtenção do diâmetro e do comprimento de corte equivalentes ( $d_e$  e  $l_e$ ) para um trecho de concordância

Como observado na figura 5.2, o perfil de concordância foi aproximado para um cone, logo seu *diâmetro equivalente* ( $d_e$ ) também pode ser calculado pela equação (4.9).

Depois de se obter para cada escalonamento o seu respectivo *diâmetro e comprimento de corte equivalentes* ( $d_e$  e  $l_e$ ), é possível então se estabelecer o perfil equivalente da peça como um todo (figura 5.3) através da equação (4.10), a qual relaciona o diâmetro ( $d_i$ ), o comprimento de corte ( $l_i$ ) com o coeficiente  $x$  da equação de vida de Taylor (Novaski 1991):

Graficamente:

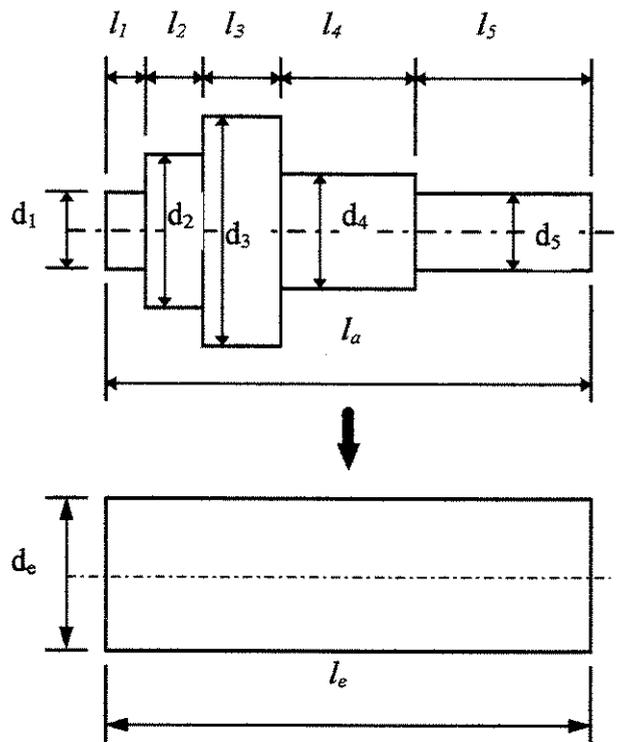


Figura 5.3 - Representação gráfica da obtenção do diâmetro e do comprimento de corte equivalentes ( $d_e$  e  $l_e$ ) para uma série de cilindros escalonados

### 5.3.2 Seleção da velocidade

Pode-se agora proceder o cálculo da  $v_{mxp}$  através da equação (5.9). Após o cálculo da  $v_{mxp}$  é necessário confirmar a sua localização dentro do intervalo entre  $(v_c')$  e  $(v_c'')$ , caso isso não ocorra deve-se proceder um novo ensaio e a seguir o cálculo da nova  $v_{mxp}$ , até que o valor encontrado da velocidade se encontre no intervalo.

Como o campo de velocidades não é ilimitado, deve-se respeitar certos valores definidos como limite ( $v_{lim}$ ):

- em relação à rotação do eixo-árvore:

$$v_{lim1} = \frac{\pi \cdot d_{max} \cdot n_{min}}{1000} \quad (5.24)$$

$$v_{lim2} = \frac{\pi \cdot d_{min} \cdot n_{max}}{1000} \quad (5.25)$$

onde:

$d_{min}$  = diâmetro mínimo da peça testada, em mm.

$d_{max}$  = diâmetro máximo da peça testada, em mm.

$n_{max}$  = rotação máxima do eixo-árvore, em mm/volta.

$n_{min}$  = rotação mínima do eixo-árvore, em mm/volta.

- em relação à potência do motor :

$$v_{lim3} = \frac{N_m \cdot \eta \cdot 60 \cdot 75}{K_{s1} \cdot a^{1-z} \cdot p} \quad (5.26)$$

onde:

$N_m$  = potência do motor elétrico principal de acionamento, em CV.

$\eta$  = rendimento do motor elétrico.

$K_{s1}$  e  $z$  = constantes específicas do metal, em relação à pressão específica de corte.

$a$  = avanço da ferramenta, em mm/volta.

$p$  = profundidade de corte, em mm.

Valores de  $K_{s1}$  e  $z$ , foram tabelados por Ferraresi (1980) para diversos materiais metálicos para engenharia, os quais foram armazenados no sistema.

A menor dentre as velocidades limite das equações, (5.25 e 5.26) será considerada a *velocidade limite* ( $v_{lim}$ ) máxima para o ensaio, já a da equação (5.24) será definida como a *velocidade mínima limite* ( $v_{mim}$ ).

Para cada situação abaixo, o modelo sugere adotar certos procedimentos:

a) Se a  $(v_{mxp}) > (v^{''})$  e  $> (v_{lim})$ :

- $(v^{''''}) = 1,2 (v^{''})$ , ou
- $(v^{''''}) = 0,9 (v_{lim})$ .

b) Se a  $(v_{mxp}) > (v^{''})$  e  $< (v_{lim})$ :

- $(v^{''''}) = 1,2 (v^{''})$ , ou
- $(v^{''}) = 0,9 (v_{mxp})$  e  $(v^{''''}) = 1,1 (v_{mxp})$ .

c) Se a  $(v_{mxp}) < (v^{''})$  e  $> (v_{mlim})$ :

- $(v^{''''}) = 0,8 (v^{''})$ , ou
- $(v^{''}) = 0,9 (v_{mxp})$  e  $(v^{''''}) = 1,1 (v_{mxp})$ , ou
- $(v^{''''}) = (v_o)$ .

d) Se a  $(v_{mxp}) < (v^{''})$  e  $< (v_{mlim})$  o modelo sugere que se adote novos parâmetros de corte, pois a máquina está sendo subutilizada desta forma.

### 5.3.3 Relação custo/benefício

Depois de encontrada a  $v_{mxp}$  que satisfaça as condições acima, esta passa a ser denominada *velocidade de corte selecionada* ( $v_{CSEL}$ ). A seguir de posse dos dados já colhidos até então, é possível efetuar o cálculo do custo de usinagem por peça ( $C_{tp}$ ), para as diversas ferramentas testadas, quando atuam em suas respectivas velocidades selecionadas ( $v_{CSEL}$ ), utilizando-se a expressão (5.27), segundo Coppini e Ribeiro (1997), expressão esta desenvolvida a partir das equações de custo de Ferraresi (1977).

$$C_{tp} = C_{iv} + \left( \frac{k_g \cdot C_{um}}{v_{cse}} \right) + \left( \frac{k_g \cdot v_{cse}^{(x-1)}}{K} \right) C_A \quad (5.27)$$

Onde:

$C_{iv}$  = valores dos custos diretos e indiretos da matéria-prima, em \$/pç.

$C_{um}$  = custo utilização da máquina, em \$/min - (5.3).

$C_A$  = custo total da ferramenta, em \$/aresta - (5.8).

$v_{CSEL}$  = velocidade de corte selecionada, em m/min.

$x$  e  $K$  = coeficientes da equação de vida de Taylor.

$k_g$  = constante independente da velocidade dada por:

$$k_g = \frac{\pi \cdot d_e \cdot l_e}{1000 \cdot a} \quad (5.28)$$

Onde:

$d_e$  = diâmetro equivalente da peça, em mm.

$l_e$  = comprimento de corte equivalente, em mm.

$a$  = avanço, em mm/volta.

Após realizar o cálculo do custo e comparar os custos das diferentes ferramentas utilizadas no ensaio, o sistema indica qual ferramenta apresenta a melhor relação custo/benefício para a operação em questão, além dos parâmetros de usinagem utilizados para tanto.

O valor da relação custo/benefício do emprego de uma determinada ferramenta pode ser calculado pela relação abaixo (5.29). Nesta se utiliza o custo da ferramenta  $(C_{tp})_{ref}$ , dita de referência, que na verdade é a condição atual do processo; e o custo *otimizado* das demais ferramentas testadas  $(C_{tp})$ . Portanto, a ferramenta com a melhor relação custo/benefício deverá ser a adotada.

$$R_{CB} = \frac{(C_{tp})_{ref} - C_{tp}}{(C_{tp})_{ref}} \times 100\% \quad (5.29)$$

#### 5.3.4 Relação de similaridade de peças

O método de pesquisa de peças similares foi baseado na definição de grupo, da teoria dos conjuntos em álgebra. Em princípio, uma peça para ser similar a outra deverá possuir a mesma geometria (ex.: eixo, pino, haste, etc.), ser confeccionada com o mesmo material e mesmo tratamento térmico. O sistema verificará estes itens e, se confirmados, irá aplicar a definição a seguir:

Partindo da definição abaixo segundo Lipschutz (1980):

Diz-se que um conjunto  $G$  de elementos, não vazio, forma um grupo se em  $G$  está definida a operação binária, denominada multiplicação e indicada por  $(.)$  (ponto) tal que :

(1) Elemento neutro:

$$a \in G, \exists e \in G | a \cdot e = e \cdot a = a \quad (5.30)$$

(2) Existe um inverso de  $a$  :

$$a \in G, \exists a^{-1} \in G | a \cdot a^{-1} = a^{-1} \cdot a = e \quad (5.31)$$

Foram utilizadas as operações desta definição para desenvolver um método eficiente que possibilite a localização de uma peça entre outras peças dadas, similares em suas dimensões. Para isso, adotou-se o critério  $L/D$ . Onde  $L$  é o comprimento de usinagem e  $D$  é o diâmetro de usinagem. Fez-se então:  $a = L/D$ ,  $e = 1$ , e  $a^{-1} = D/L$

então:

$$a.a^{-1} = e = 1 \quad (5.32)$$

Se as dimensões de uma peça desejada forem  $L$  e  $D$ , e as dimensões das peças a serem pesquisadas forem  $L_i$  e  $D_i$ , e que uma destas dimensões ( $L$  ou  $D$ ) forem muito próximos entre si ( $L_i$  ou  $D_i$ ), então obtém-se o produto:

$$a^{-1}.a \rightarrow e \rightarrow 1 \quad (5.33)$$

Conclui-se que quanto mais próximo  $e$  estiver de 1 (um) mais similares as dimensões  $L$  e  $D$  e  $L_i$  e  $D_i$  serão entre si.

Além disso é necessário que pelo menos uma das dimensões ( $L$  ou  $D$ ) da peça, seja próxima à da peça similar ( $L_i$  ou  $D_i$ ), evitando assim que erroneamente peças que tenham estas dimensões múltiplas entre si, sejam consideradas similares pelo uso da relação 5.33.

## **Capítulo 6**

### **Uma Visão do Sistema ATAC**

O sistema ATAC (Assistência Técnica Assistida por Computador) é um banco de dados de usinagem, desenvolvido em CLIPPER (ambiente DOS), para uso em chão-de-fábrica, com o objetivo de acompanhar a realização de ensaios comparativos de usinagem e com o intuito de otimizar as condições de corte utilizadas ou desenvolver o processo de uma nova peça.

Assim sendo, ele é um banco de dados que tem a finalidade de armazenar informações sobre usinagem, principalmente quanto ao ajuste dos parâmetros de corte para situações típicas de desenvolvimento do processo ou de sua otimização. Foi especialmente idealizado para seleção da melhor relação custo/benefício entre ferramentas, no momento do desenvolvimento do processo de uma dada peça. Tem também o objetivo de permitir a rápida recuperação de dados quando consultado.

O sistema foi estruturado de maneira a armazenar sistematicamente as informações disponíveis dos ensaios de usinagem bem como os resultados obtidos com estes mesmos ensaios, inclusive com a otimização das condições de corte; mais precisamente da velocidade de corte ou a rotação, já que os demais parâmetros são muitas vezes definidos por imposição do próprio processo.

Conforme a figura 6.1, o sistema ATAC foi estruturado de forma a registrar e armazenar as informações a respeito das **ferramentas** utilizadas nos testes (suportes e pastilhas); dos **fornecedores** dos diversos itens utilizados nos testes, dos **materiais** dos quais as peças a serem ensaiadas são constituídas, das **peças** utilizadas nos testes; das **máquinas** nas quais os testes foram realizados e dos **clientes** onde houve a realização dos testes. Além disso, arquivar os **dados** principais de um ensaio, e que são fixos (por exemplo: peça, máquina, operação, etc.); as **condições** que irão variar no decorrer de um ensaio (por exemplo: velocidade de corte, rotação, ferramenta, etc.); os **resultados** obtidos para cada situação (por exemplo: peças produzidas, tempo de corte, rugosidade, etc.); e também as informações sobre os **custos** das máquinas, das ferramentas e os cálculos do valor economizado utilizando-se a melhor condição de cada ensaio, do ponto de vista econômico.

O gerenciador de banco de dados do sistema proporciona além do armazenamento e a recuperação de todas as informações referentes aos ensaios realizados, as demais operações de manipulação: atualização, eliminação e impressão de relatórios. Conforme será ilustrado a seguir.

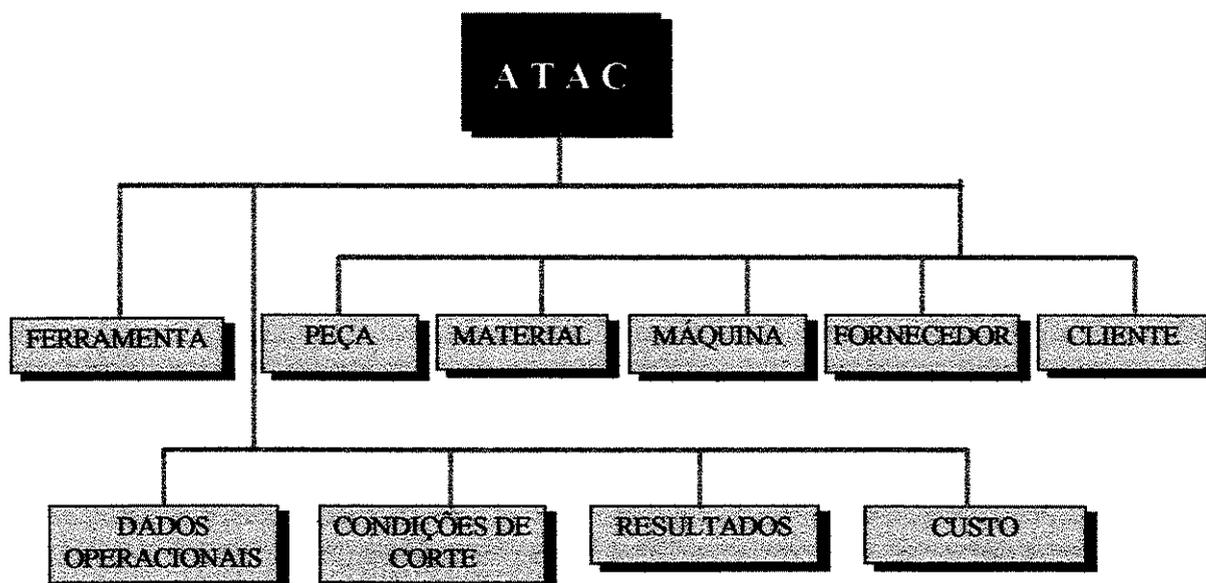


Figura 6.1 - Módulos de informação do sistema ATAC

Como relatado anteriormente a metodologia aplicada é baseada na determinação da velocidade de máxima produção ( $v_{mxp}$ ), a partir da definição dos coeficientes da equação de vida de Taylor em ambiente fabril (item 5.3). Toda a seqüência dos ensaios é fornecida pelo sistema que sugere velocidades para o teste além de definir as restrições, ou seja o valor máximo e mínimo de velocidades permitido para o referido ensaio. Estas restrições levam em conta a potência da máquina, suas rotações limites e as características do material a ser usinado.

Após a definição da  $v_{mxp}$  para cada ferramenta envolvida no teste, o sistema contabiliza o custo por peça produzida para cada uma das ferramentas operando na sua velocidade selecionada. Neste ponto o sistema realiza comparações em termos econômicos da atuação de cada ferramenta e define qual apresentará o melhor custo benefício. Este benefício é calculado em termos percentuais e se trata de uma relação de custos entre os custos apurados e uma situação (ferramenta/velocidade) definida como de referência, a qual normalmente se refere à situação atual daquele processo.

O sistema está capacitado também a realizar a contabilização do custo de qualquer um dos ensaios realizados, mesmo que ele não possua resultados otimizados. Este cálculo de custo é feito com base no modelo de custo corrente, o qual é utilizado pela maioria das empresas.

As informações geradas com a *otimização*, ou seja, determinação das velocidades propostas para os testes, são automaticamente gravadas pelo sistema tornando-se disponíveis para consultas futuras, fechando-se o ciclo da informação.

O objetivo principal do sistema é o de se apresentar como uma alternativa ao modelo corrente de cálculo da relação custo/benefício de usinagem utilizado nas indústrias, o qual normalmente é realizado sem levar em consideração a utilização das ferramentas na sua melhor faixa (velocidade de máxima produção, por exemplo).

O cenário definido para a utilização do sistema é aquele de produção de lotes relativamente grandes, o que permite que se possa testar as ferramentas adequadamente. Ou seja, consegue-se

obter dados estatisticamente válidos para se determinar o comportamento das ferramentas envolvidas no teste. Esta é uma situação muito comum, ainda hoje no parque industrial metal/mecânico do Brasil.

### 6.1 Operações de Manipulação de Dados

Para que se possa fazer uso das informações armazenadas num sistema de banco de dados e até mesmo para armazená-las lá, é necessária a utilização de uma série de programas que têm por finalidade permitir que se possa inserir um registro, modificá-lo, consultá-lo, emitir relatórios sobre ele ou mesmo eliminá-lo. Estes programas, possibilitam a realização das operações básicas de manipulação que são: cadastro, consulta, atualização, eliminação e relatórios. Na tabela 6.1 estão relacionadas as operações de manipulação de dados com os módulos do sistema ATAC.

Tabela 6.1 - Os módulos de informação e as operações de manipulação disponíveis

Módulos	Cadastro	Consulta	Atualização	Eliminação	Relatório
Fornecedor	X	X	X	X	X
Ferramenta	X	X	X	X	X
Material	X	X	X	X	X
Peça		X		X	X
Máquina	X	X	X	X	X
Cliente	X	X	X	X	X
Dados	X	X		X	X
Condições de corte	X	X		X	X
Resultados	X	X			X
Custos		X			X

- **Cadastro**

Esta é a operação que irá fornecer ao sistema os registros para que possam ser armazenados. Os códigos dos registros são normalmente gerados pelo próprio sistema, de forma automática e seqüencial. A geração dos códigos só não é automática para o módulo **Condições**, onde o código é informado manualmente. Neste caso, inicialmente o sistema solicita o código para o registro, em seguida ele confirma se este código não está sendo usado por outro registro, se o for ele informará a não disponibilidade do código, solicitando um novo. Os módulos **Custos** e **Peça**, não comportam a operação de cadastro, pois seus dados são cadastrados em outros módulos: **Custos** em **Máquina**, **Ferramenta** e em **Resultados**, e **Peça** em **Dados**.

- **Consulta**

Esta operação é destinada à recuperação, por parte do usuário, dos dados de um ou mais registros de um certo arquivo. A consulta normalmente é inicializada entrando-se com o código do registro e/ou o conteúdo de um dos outros campos do registro, conforme a solicitação do sistema. Em seguida, serão apresentados um a um os registros que satisfaçam a condição de busca, ou seja apresentem o código do registro escolhido, ou então todos os registros que possuam para o(s) campo(s) selecionado(s), o mesmo conteúdo apresentado quando da solicitação da busca.

- **Atualização**

Destina-se a modificar os dados do registro de um arquivo, seja por motivo de atualização de dados, ou pelo simples motivo de se corrigir algum erro quando do cadastro. A operação, inicia-se com a solicitação do código do registro, em seguida ele é apresentado na tela com os dados do registro permanecendo à disposição do usuário para as modificações. Após as modificações, os dados do registro são novamente gravados pelo sistema e devidamente armazenados. Os módulos de informação do ensaio, ou sejam, **Dados**, **Condições**, **Resultados** e **Custos** além do **Peça** não permitem atualização de seus registros, pois qualquer modificação posterior à realização dos ensaios descaracterizaria os resultados obtidos.

- **Eliminação**

Operação utilizada quando se deseja eliminar do banco de dados um ou mais registros de um arquivo. A operação é iniciada com a solicitação do código do registro a ser eliminado, sua visualização, e só é completada após a confirmação requerida pelo sistema, do desejo de se eliminar o registro. Como anteriormente alguns módulos (**Resultados e Custos**), não comportam a operação de eliminação, pois como os seus registros estão sendo utilizados por outros módulos, a eliminação dos mesmos implicaria em erros na manipulação dos demais módulos.

- **Relatórios**

Oferece ao usuário a opção de listar os registros de um arquivo por seqüência de código ou então agrupados em função do conteúdo de um dos seus campos ter sido selecionado. O modo de saída é através da impressora, pois através da tela seria a operação *consulta*.

## 6.2 Aspectos Gerais do Sistema

Para melhor visualização do funcionamento do sistema serão apresentadas a seguir algumas telas do sistema, divididas em blocos de maneira a sintetizar ao máximo a sua apresentação sem contudo ocultar o seu potencial. Os dados apresentados na maioria dos casos são fictícios, não servindo para fazer uma validação do sistema, eles simplesmente têm o caráter ilustrativo.

Para se inicializar o sistema se digita ATAC, a tela de apresentação é mostrada (figura 6.2) ao se apertar qualquer tecla é apresentada a primeira tela, onde são mostrados os diversos módulos de informação disponíveis, bem como as funções especiais.

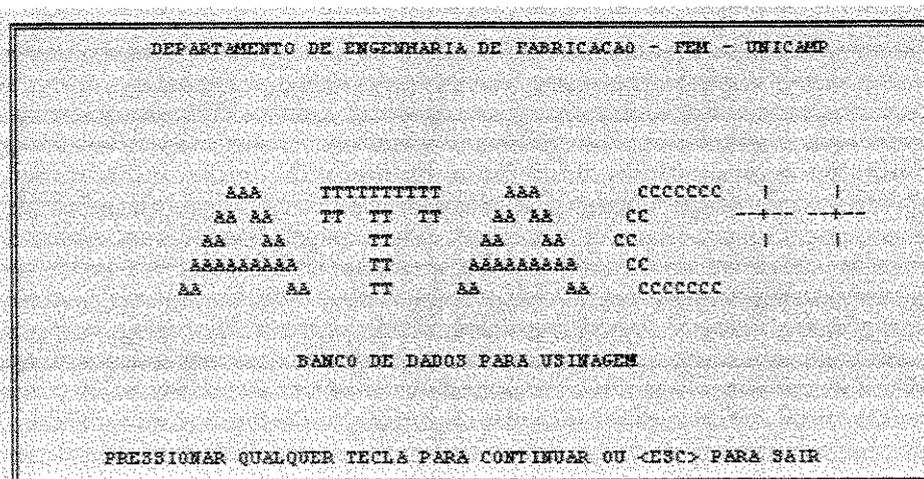


Figura 6.2 - Tela de apresentação do sistema ATAC

### 6.2.1 Módulos primários de informação

São os módulos que correspondem às informações dos diversos itens envolvidos nos testes tais como: fornecedor, ferramenta, material, peça, máquina e cliente. Sua principal função é conter as informações do sistema, tendo uma menor participação do que diz respeito à otimização do processo. As opções para a operação de consulta destes módulos constam da tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Opções disponíveis para a operação de consulta

	Código	Lista	Nome	Nome Genérico	Tratamento Térmico	Geometria da pastilha	Classe da pastilha
Fornecedor	X	X					
Ferramenta		X				X	X
Material	X	X					
Peça			X	X	X		
Máquina	X	X					
Cliente	X	X					

Fazendo a opção por um dos módulos (fornecedor por ex.) na tela da figura 6.3, aparece a janela na qual se dispõem as opções de operações de manipulação e a opção de saída (FIM), a

seleção da operação se faz via teclado (←, →). Se a opção for pela operação *consulta* uma nova janela contendo as opções é aberta, conforme a mesma tela da figura 6.3.

Se houver necessidade de se consultar inicialmente de uma forma rápida todos os registros cadastrados, pode-se optar pela *lista* na janela ativada, assim sendo uma lista contendo os itens armazenados será mostrada conforme a tela da figura 6.4. Após selecionar um dos registros, seus campos serão apresentados na tela conforme a figura 6.5.

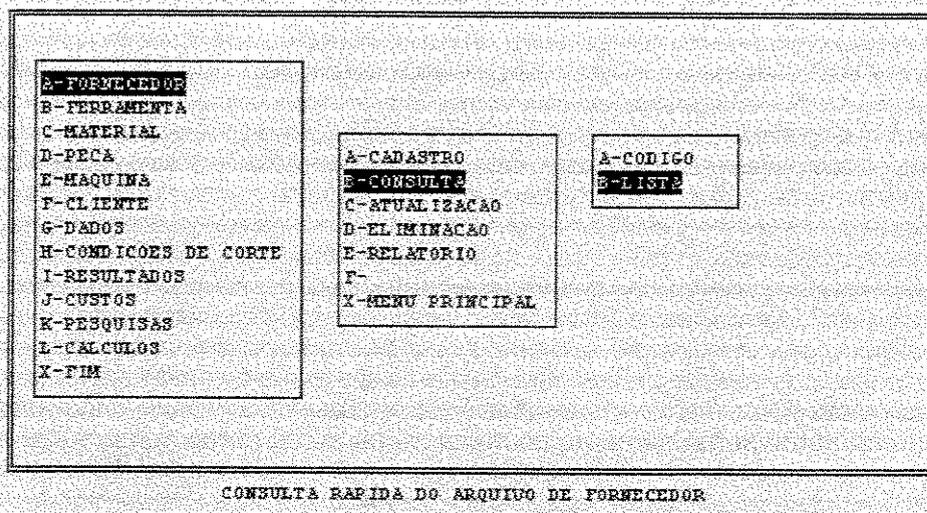


Figura 6.3 - Tela das opções para o módulo *fornecedor*

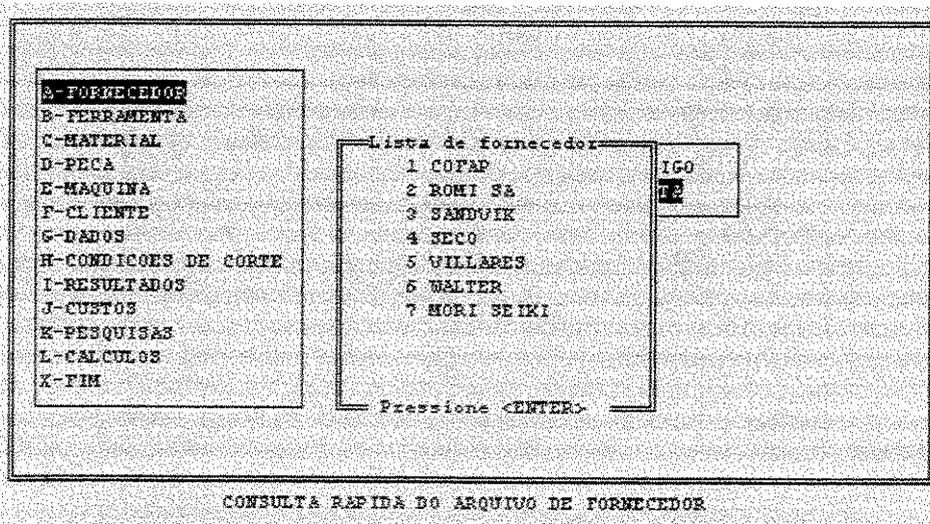


Figura 6.4 - Tela da lista de fornecedores cadastrados

CONSULTA DE FORNECEDORES:

CODIGO DO FORNECEDOR: [ 3 ]

NOME: SANDVIK                      RAMO DE ATIVIDADE: FERRAMENTA

TELEFONE: 112223344              ENDereco: R. SUECIA 3/M

BAIRRO: STO AMARO              CAIXA POSTAL: 21261

C E P :            4698              CIDADE: SAO PAULO              ESTADO: SP

CONTATO: FRANCISCO

SECAO: VENDAS

Tecla <Esc> para abandonar operacao.

Figura 6.5 - Tela de *consulta* de um registro do módulo *fornecedor*

A operação de *consulta* para os demais módulos é feita de maneira similar, a partir dos campos informados na tabela 6.2 para cada módulo. Exemplos de telas de consulta para os módulos *ferramenta* (figura 6.6), *material* (figura 6.7), *máquina* (figura 6.8) e *cliente* (figura 6.9) serão apresentados a seguir.

CONSULTA DE FERRAMENTA:

GEOMETRIA DA PASTILHA: [ TMM6160406 -MT ]

CODIGO DO SUPORTE: MTJML2525M15M1

QUEBRA-CAVACO (S/W) : 3

MATERIAL DA PASTILHA: [ 2015 ]

RAIO DA PONTA (mm): 1

CODIGO DO FORNECEDOR: 3 - SANDVIK

SUPORTE -> UIDA (ARESTAS): 2000              ; PRECO (US\$): 93.20

PASTILHA-> No. ARESTAS : 5                      ; PRECO (US\$): 8.00

Tecla <Esc> para abandonar operacao.

Figura 6.6 - Tela de *consulta* de um registro do módulo *ferramenta*

## CONSULTA DE MATERIAL.

CODIGO DO MATERIAL: [██████]

NOME COMERCIAL: NIMONIC80A

NOME GENEIRICO: LIGA-NIQUEL

CLASSE ABNT: SAE J422

FORNECEDOR: 5 - VILLARES

TRATAMENTO TERMICO: NENHUM

DUREZA(HB): 30HRC

Tecla &lt;Esc&gt; para abandonar operacao.

Figura 6.7 - Tela de *consulta* de um registro do módulo *material*

## CONSULTA DE MAQUINAS.

CODIGO DA MAQUINA: [██████]

TIPO DE MAQUINA: TORNO

MODELO: 3L15

POTENCIA NOMINAL (CV): 10

RENDIMENTO (%): 80

NUMERO DA MAQUINA: 300530

C.N.C (S/N): 3

ROTACAO MINIMA (RPM): 20

ROTACAO MAXIMA (RPM): 5000

FORNECEDOR: 7 - MORI SEIKI

CUSTO DE UTILIZACAO (US\$/h): 90.00

Tecla &lt;Esc&gt; para abandonar operacao.

Figura 6.8 - Tela de *consulta* de um registro do módulo *máquina*

CONSULTA DE CLIENTES:

CODIGO DO CLIENTE: [REDACTED]

NOME: EATON                      RAMO DE ATIVIDADE: AUTOPECAS

TELEFONE: 123322444            ENDERECO: ROB. PRES. DUTRA KM 120

BAIRRO: INDUSTRIAL            CAIXA POSTAL: 2

C E P : 12000000                CIDADE: S.J. CAMPOS                ESTADO: SP

CONTATO: JOSE ANTONIO

SECAO: USINAGEM

Tecla <Esc> para abandonar operacao...

Figura 6.9 - Tela de *consulta* de um registro do módulo *cliente*

A operação de *consulta* de peças pode ser feita através dos campos da tabela 6.2 (figura 6.10), ou então por intermédio simplesmente da sua denominação comum, ou seja do nome que o cliente dá a peça (figura 6.11).

CONSULTA E/OU EXCLUSÃO DE PEÇAS:

CODIGO DA PEÇA:

NOME DA PEÇA: [REDACTED]

NOME GENEERICO DO MATERIAL: [REDACTED]

TRATAMENTO TERMICO: [REDACTED]

ROSCA (S/N):            FURO (S/N):            RASGO (S/N):            ESCALONADA (S/N):

COMPRIMENTO DE USINAGEM (mm):

DIAMETRO MINIMO (mm) :

DIAMETRO MAXIMO (mm) :

DIAMETRO USINAGEM (mm) :

CUSTO DO MATERIAL US\$/pc :

Tecla qualquer tecla ou <Esc> para abandonar operacao.

Figura 6.10 - Tela de *consulta* de um registro do módulo *peça*

CONSULTA E/OU EXCLUSÃO DE PEÇAS:

CODIGO DA PEÇA: 130701000000300011

NOME DA PEÇA: VALVULA                      DENOMINACAO: [04961                      ]

NOME GENERICO DO MATERIAL: LIGA-NIQUEL

TRATAMENTO TERMICO: NENHUM

ROSCA (S/N):N      FURO (S/N):N      RABO (S/N):N      ESCALONADA (S/N):S

COMPRIMENTO DE USINAGEM (mm): 35.5

DIAMETRO MINIMO (mm) : 7.5

DIAMETRO MAXIMO (mm) : 25.5

DIAMETRO USINAGEM (mm) : 11.5

CUSTO DO MATERIAL US\$/pc : 1.30

Tecla <Esc> para abandonar operacao.

Figura 6.11 - Tela de *consulta* de um registro do módulo *peça* através da sua *denominação*

## 6.2.2 Módulos de informação dos ensaios

Estes módulos contêm as informações relativas aos testes diretamente tais como: dados operacionais, condições de corte, resultados e custos. Sua principal função é fornecer as principais informações para os algoritmos de otimização do processo. As opções para a operação de consulta destes módulos constam da tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Opções para a operação de consulta dos ensaios

Módulos	Código	Lista	Código do Dado	Geometria da pastilha	Classe da pastilha
Dados	X	X			
Condições de corte	X	X	X	X	X
Resultados	X	X	X	X	X

Quando se opta pelo cadastro de dados a primeira tela apresentada (figura 6.12), permite que se faça o cadastro da peça ensaiada caso ela ainda não tenha sido cadastrada. As características da peça são então requeridas, para que o sistema possa fornecer o código da peça, código esse que inclui:

- nome da peça (2 dígitos);
- nome genérico do material de confecção (2 dígitos);
- tipos de tratamentos térmicos (2 dígitos);
- características como: furos, rasgos, roscas e escalonamentos, (4 dígitos);
- comprimento equivalente de usinagem (4 dígitos) e diâmetro equivalente (4 dígitos)

CADASTRO DE DADOS OPERACIONAIS:

CODIGO DA PEÇA:	130701000000000000	CODIGO DO DADO:	19
NOME DA PEÇA:	[REDACTED]	DENOMINACAO:	[REDACTED]
NOME COMERCIAL DO MATERIAL:	[REDACTED]		
NOME GENERICO:	LIGA-NIQUEL	TRATAMENTO TERMICO:	NENHUM
ROSCA (S/N):	[REDACTED]	FURO (S/N):	[REDACTED]
		RASGO (S/N):	[REDACTED]
		ESCALONADA (S/N):	[REDACTED]
NUMERO SECOES:	[REDACTED]	SECAO NUMERO:	1
TIPO SECAO CILI, CONE, CONC:	[REDACTED]	COMPRIMENTO SECAO (mm):	[REDACTED]
DIAMETRO MAIOR (mm):	[REDACTED]		

Figura 6.12 - Tela de *cadastro* de uma peça através do módulo *dados operacionais*

Em seguida, o sistema apresenta os campos das informações sobre o ensaio (figura 6.13) e também questiona sobre a estratégia do ensaio (figura 6.14): velocidade constante, rotação, etc. A partir deste ponto novos campos, a respeito do ensaio, se apresentam (figura 6.15).

CADASTRO DE DADOS OPERACIONAIS.

```

CODIGO DA PEÇA: 13070100000000000000          CODIGO DO DADO: 19
NOME DA PEÇA: [VALVULA] DENOMINACAO: [04961]
NOME COMERCIAL DO MATERIAL: [NIMONIC80A]
NOME GENERICO: LIGA-NIQUEL          TRATAMENTO TERMICO: NENHUM
ROSCA (S/M): [N] FURO (S/M): [N] RASGO (S/M): [N] ESCALONADA (S/M): [S]
NUMERO SECOES: [3] SECAO NUMERO: 3
TIPO SECAO CILI.COME.COMC: [CIL] COMPRIMENTO SECAO (mm): [4.5]
DIAMETRO MAIOR (mm): [7.6]
CUSTO DO MATERIAL (U$/pc): [1.30]
NOME DO OPERADOR: [WALTER]
CODIGO DO CLIENTE: [ ] EATON
COLHIDO POR: [ALEXIO] DATA: [21/09/98] TIPO DE USINAGEM: [EXT]
CODIGO MAQUINA: [ ] TORNO          SL15

```

Figura 6.13 - Tela inicial de *cadastro* do módulo *dados operacionais*

CADASTRO DE DADOS OPERACIONAIS.

```

CODIGO DA PEÇA: 13070100000000000000          CODIGO DO DADO: 19
NOME DA PEÇA: [VALVULA] DENOMINACAO: [04961]
NOME COMERCIAL DO MATERIAL: [NIMONIC80A]
NOME GENERICO: LIGA-NIQUEL          TRATAMENTO TERMICO: NENHUM
ROSCA (S/M): [N] FURO (S/M): [N] RASGO (S/M): [N] ESCALONADA (S/M): [S]
NUMERO SECOES: [3] SECAO NUMERO: 3
TIPO SECAO CILI.COME.COMC: [CIL] COMPRIMENTO SECAO (mm): [4.5]
DIAMETRO MAIOR (mm): [7.6]
CUSTO DO MATERIAL (U$/pc): [1.30]
NOME DO OPERADOR: [WALTER]
CODIGO DO CLIENTE: [ ] EATON

```

[EXT]

V= m/min constante      N= rpm constante      **W= V e N constantes**

Figura 6.14 - Tela de opção do tipo de ensaio a ser cadastrado no módulo *dados operacionais*

CADASTRO DE DADOS OPERACIONAIS:

```

CODIGO DA PEÇA: 130701000103010101          CODIGO DO DADO: 19
NOME DA PEÇA: [SOLUPLA]                     DENOMINACAO: [04951]
NOME COMERCIAL DO MATERIAL: [NIMONIC80A]
NOME GENERICO : LIGA-NIQUEL                  TRATAMENTO TERMICO: NENHUM
ROSCA (S/N): [N] FURO (S/N): [N] RASGO (S/N): [N] ESCALONADA (S/N): [N]
NUMERO SECOES: [ 3] SECAO NUMERO: 3
TIPO SECAO CILI.COME.COMC: [CIL]             COMPRIMENTO SECAO (mm): [ 4.5]
DIMETRO MAIOR (mm): [ 7.6]
CUSTO DO MATERIAL (US$/pc) : [ 1.20]
NOME DO OPERADOR: [WALTER]                   SALARIO/HORA (US$): [ 8.00]
CODIGO DO CLIENTE: [ 2] EASTON
COLHIDO POR: [WALTER]                        DATA: [21/09/98] TIPO DE USINAGEM: [END]
RPM EFETIVA (rpm): [2500] ROTACAO MAXIMA: 5000 rpm N= CONSTANTE
PROFUNDIDADE DE CORTE (mm): [ 0.400] AVANCO (mm/volta): [ 0.130]
TIPO DE OPERACAO: [OPEN CYLINDER]           FINALIDADE: [SEMI ACABAMENTO]
CORTE INTERROMPIDO ? (S/N): [N] REFRIGERACAO: [OLEO SOLUVEL]
GRAU ESTABILIDADE: [50A] MOTIVO INSTABILIDADE: [NENHUM]
OS DADOS ESTAO CORRETOS (S/N) ?

```

Figura 6.15 - Tela completa dos dados de *cadastro* de um ensaio no módulo *dados operacionais*

Depois de terminado o cadastro das informações referentes aos dados operacionais, o usuário pode optar por já cadastrar as demais informações dos ensaios, ou então cadastrá-las posteriormente. Se for escolhida a primeira opção, a tela da figura 6.16 se apresentará para que sejam armazenadas as informações do módulo *condições de corte*. Em seguida a tela dos *resultados* também estará disponível para o *cadastro* (figura 6.17), apresentando inclusive uma sugestão para um novo teste.

CADASTRO DE CONDIÇÕES DE CORTE :

```

CODIGO DO DADO          : [ 19]
GEOMETRIA DA PASTILHA  : [TRMCL60400 -MF]
MATERIAL PASTILHA      : [2015]
CODIGO DO FORNECEDOR   : [ 3] - SANDVIK
CODIGO DA CONDICAO     : [ 11]

ROTACAO LIMITE (rpm):
MINIMA : 20  MAXIMA : 2500
ROTACAO          (rpm) : [2500]
AVANCO           (mm/volta) : 0.130
PROFUNDIDADE DE CORTE (mm) : 0.40
COMPRIMENTO DE USINAGEM (mm/peca) : 35.4

OS DADOS ESTAO CORRETOS (S/N) ?

```

Figura 6.16 - Tela de *cadastro* do módulo *condições de corte*

CADASTRO DE RESULTADOS

```

CODIGO DO DADO : 19 CODIGO CONDIÇÃO CORTE : 1
CODIGO DA FERRAMENTA : INMG150408 -MT MATERIAL PASTILHA : 2015
CODIGO DO FORNECEDOR : 2
RUGOSIDADE (um) : [0.3] CRITERIO DE TROCA : [SUCESSIVAMENTE]
PEÇAS PRODUZIDAS POR ARESTA : [102]
TEMPO CORTE (min/aresta) : 17.34 TEMPO CORTE (min/peça) : [0.17]
TEMPO TROCA (min/peça) : 0.81 TEMPO TROCA (min/aresta) : [1.56]
TEMPO DE MANUSEIO (min/peça) : [0.95]
TEMPO IMPRODOTIVO (min/peça) : [0.83]

FORMA DO CAVACO : [HELICOIDAL]
DESCASTE (mm)
KT : [0.0] KM : [0.0] KL : [0.0] KE : [0.0]
UB MAXIMO : [0.0] UB MEDIO : [0.0]

OCORRENCIA DE QUEBRA (S/N) : [0]
Sugiro uma rotacao de 1821 rpm para a proxima condicao

```

Figura 6.17 - Tela de *cadastro* do módulo *resultados*

- Otimização

A operação de otimização das condições de corte pode ser realizada em dois momentos da operação do sistema: quando do cadastro dos resultados ou então quando da consulta de um ensaio não otimizado ainda. Optando pela segunda forma, a operação se faz a partir da tela da figura 6.18, na qual figuram as informações referentes a um ensaio mais precisamente dos seus *resultados*.

Ao responder ao sistema que deseja *otimizar*, ele automaticamente faz o cálculo da condição de máxima produção para cada um dos intervalos de teste, conforme a estratégia adotada (figura 6.19). Efetuando assim, o cálculo da velocidade ou da rotação de máxima produção conforme o caso, se for encontrada uma situação de velocidade ou rotação dentro do intervalo, ela será informada, caso contrário a mensagem da tela da figura 6.20, será apresentada. Neste ponto é possível a seleção de uma velocidade ou rotação, mesmo que não seja a calculada, tornando o ensaio *otimizado* (figura 6.21), possibilitando assim, o cálculo do *custo otimizado* e também que os dados do ensaio possam estar disponíveis para a função *pesquisa*.

## CONSULTA DE RESULTADOS

```

CODIGO DO DADO : [ 2 ] CODIGO CONDICAO CORTE : [ 3 ]
GEOMETRIA DA PASTILHA : [ CNMG120408 -QM ] MATERIAL PASTILHA : [ GC215/M10 ]
CODIGO DO FORNECEDOR : [ 3 ] - SANDVIK
RUGOSIDADE (um) : 1.0 CRITERIO DE TROCA : RUGOSIDADE
PECAS PRODUZIDAS POR ARESTA : 15
TEMPO CORTE (min/aresta) : 8.20 TEMPO CORTE (min/peca) : 0.52
TEMPO TROCA (min/aresta) : 7.83 TEMPO TROCA (min/peca) : 0.50
TEMPO DE MANUSEIO (min/peca) : 1.00
TEMPO IMPRODUATIVO (min/peca) : 1.00

FORMA DO CAVACO : LASCAS
DESCASTE (mm)
KF : 1.0 KM : 1.0 KL : 1.0 KB : 1.0
VB MAXIMO : 1.0 VB MEDIO : 1.0

OCORRENCIA DE QUEBRA (S/N) : N
DESEJA OTIMIZAR ESTE RESULTADO AGORA (S/N) ?

```

Figura 6.18 - Tela de *consulta de resultados*

## Otimizacao

```

Codigo do Dado : 2 Geometria da Pastilha : CNMG120408 -QM
Material da Pastilha : GC215/M10
Fornecedor da ferramenta : SANDVIK
Diametro da peca : 30.0

Condicao A : 1 Condicao B : 2
Veloc. corte : 200 Veloc. corte : 240

Qda. de pecas : 27 Qda. de pecas : 24

Velocidade maxima limite : 503 m/min
Veloc. de Maxima Producao : 2476 m/min
Producao maxima de pecas : 5 unidades
X = 1.65
K = 1.24803E 5

```

Figura 6.19 - Tela de cálculo da condição de máxima produção

Otimização

O intervalo do último ensaio foi 240 m/min e 288 m/min .  
 A  $U_{max}$  calculada para esse intervalo foi 503 m/min e seus coeficientes  
 $X= 3.22$  e  $K= 7.11122E 8$   
 Segue abaixo algumas sugestões para os próximos ensaios, se desejar :

a) Você pode usar a velocidade máxima de 503 m/min .  
 verificar se a vida está próximo de 5 .

b) Você pode usar, no próximo teste, uma velocidade entre 288 m/min  
 e 503 m/min .

c) Você pode realizar mais (um) teste utilizando 345 m/min e  
 verificar se a vida está próximo de 11 .

Obs.: MESMO QUE A VIDA NÃO SE CONFIRME, CADASTRE O ENSAIO NORMALMENTE .  
 Deseja assumir uma velocidade associada ao X e K calculados (S/N)?  
 VELOCIDADE SELECIONADA [m/min] : [ 500] No. DE PECAS : 5  
 Estes valores estão corretos (S/N) ?

Figura 6.20 - Tela de sugestões de novos testes para a *otimização*

Utilizando a ferramenta com uma pastilha de  
 geometria CNMG120408 -QM e com material GC215/H10  
 do fabricante 3 nas condições abaixo :

- velocidade de corte = 500 m/min
- avanço = 0.500 mm/volta
- profundidade de corte = 0.250 mm

O custo por peça obtido foi de US\$ 1.03 .  
 A produção máxima por aresta desta ferramenta é de 5 unidades e  
 o custo total deste lote é US\$ 5.13 .

Deseja este resultado impresso em papel (S/N) ?

Figura 6.21 - Tela final da *otimização* de uma *condição*

- Custos

Ao optar pelo módulo **custo** na tela inicial do sistema (figura 6.3), uma nova janela é apresentada com as operações disponíveis, caso seja escolhida a de *consulta*, o sistema informa as duas maneiras de se consultar os custos (figura 6.22): o tradicional e o otimizado. Selecionada a opção do *tradicional* a tela resultante da consulta para cada condição do ensaio consultado será como a da figura 6.23. Já na tela da figura 6.24 é apresentada a condição com a melhor relação custo/benefício para o ensaio em questão.

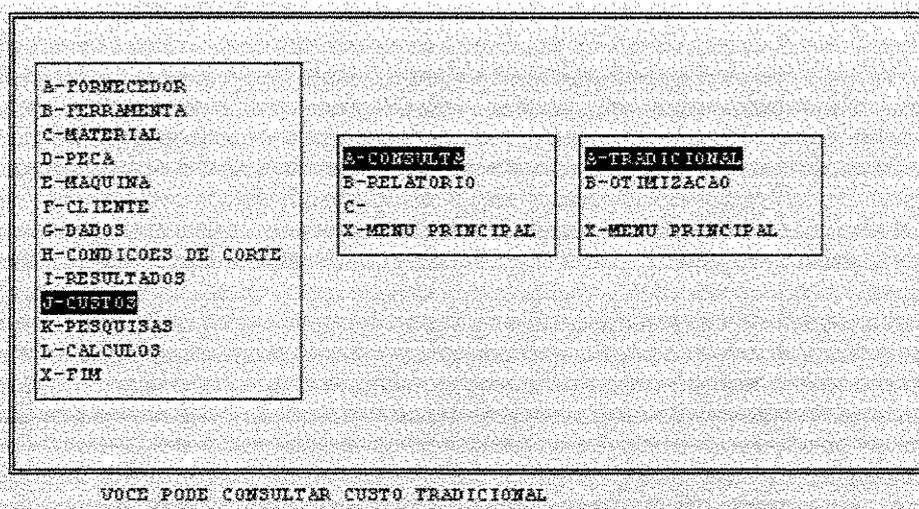


Figura 6.22 - Tela de opções de *consulta* do módulo *custo*

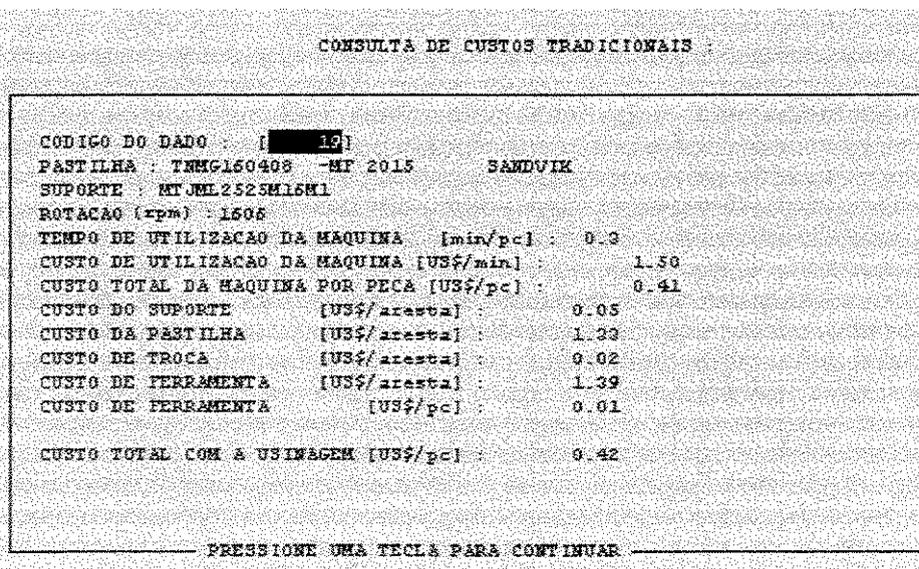


Figura 6.23 - Tela de *consulta* do módulo *custo tradicional*

CONSULTA DE CUSTOS TRADICIONAIS :

CODIGO DO DADO : [REDACTED]  
 CODIGO DA PEÇA : 130701000103010101  
 MATERIAL : LIGA-NIQUEL                      TRATAMENTO TERMICO : NENHUM  
 OPERAÇÃO : TORN.CILINDR EXTERNO SEMI ACABAMENTO  
 AVANÇO [mm/rev] : 0.130                      PROFUNDIDADE DE CORTE [mm] : 0.400  
  
 O MELHOR DESEMPENHO FOI DA FERRAMENTA :  
 PASTILHA : INMG160408 -M2 2015                      SANDVIK  
 SUPORTE : MTJML2525M15M1  
 ROTAÇÃO (rpm): 2500  
  
 CUSTO TOTAL DE USINAGEM (US\$/pc) :                      0.34  
 O CUSTO/BENEFICIO FOI DE 19.05 %

— PRESSIONE UMA TECLA PARA CONTINUAR —

Figura 6.24 - Tela final de *consulta* do módulo *custo tradicional*

Quando a opção de consulta de custos for a do *otimizado*, a tela resultante da consulta para cada condição do ensaio já otimizado será como a da figura 6.25. Na tela da figura 6.26, como anteriormente, é apresentada a condição com a melhor relação custo/benefício.

CONSULTA DE CUSTOS OTIMIZADOS :

CODIGO DO DADO : [REDACTED]  
 CODIGO DA PEÇA : 040402000001500030  
 MATERIAL : AÇO-LIGA                      TRATAMENTO TERMICO : TEMPERADO  
 OPERAÇÃO : TORN.CILINDR EXTERNO DEBASTE  
 AVANÇO [mm/rev] : 0.500                      PROFUNDIDADE DE CORTE [mm] : 0.250  
  
 PASTILHA : CNMG120408 -QM GC425                      SECO  
 SUPORTE : 5889  
  
 VELOCIDADE OTIMIZADA [m/min] : 170  
  
 CUSTO TOTAL POR PEÇA (US\$/pc) :                      1.68

— PRESSIONE UMA TECLA PARA CONTINUAR —

Figura 6.25 - Tela de *consulta* do módulo *custo otimizado*

```

CONSULTA DE CUSTOS OTIMIZADOS

CÓDIGO DO DADO : [REDACTED]
CÓDIGO DA PEÇA : 040402000001500030
MATERIAL : AÇO-LIGA          TRATAMENTO TÉRMICO : TEMPERADO
OPERAÇÃO : TORN. CILINDR. EXTERNO DESBASTE
AVANÇO [mm/rot] : 0.500      PROFUNDIDADE DE CORTE [mm] : 0.250

PASTILHA: CNMG120408 -QM GC215/M10 SANDVIK BRASIL
SUPORTE : 1

VELOCIDADE DE CORTE DE MENOR CUSTO [m/min] : 180

MENOR CUSTO POR PEÇA [US$/pç] :      1.44
O CUSTO/BENEFÍCIO FOI DE 14.29 *

PRESSIONE UMA TECLA PARA CONTINUAR

```

Figura 6.26 - Tela final de *consulta* do módulo *custo otimizado*

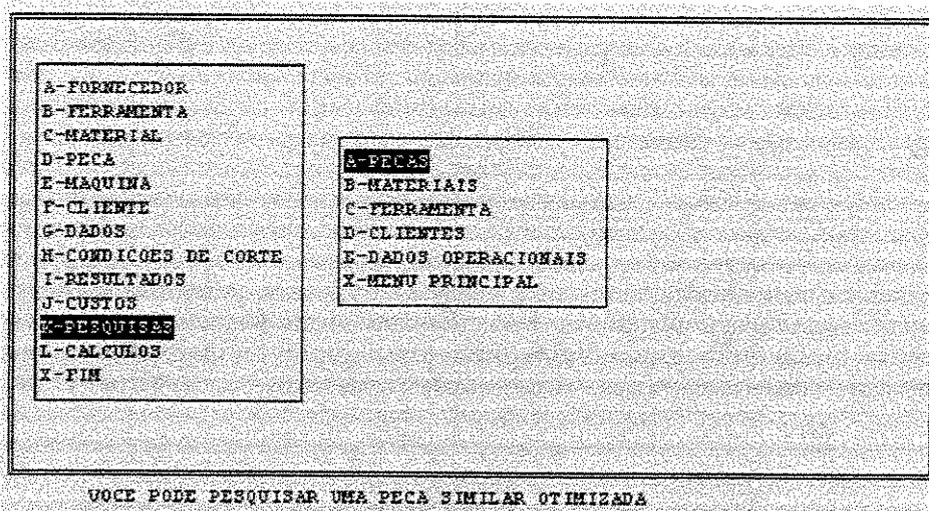
### 6.3.3 A função Pesquisa

Através desta função é que efetivamente se pode dinamizar o manuseio das informações anteriormente armazenadas no sistema de banco de dados. Assim sendo, se impede que testes desnecessários sejam realizados, devido a inexistência de dados que possibilitem uma primeira aproximação tanto para a otimização do processo como para a resolução de algum problema muitas vezes já resolvido anteriormente. Todas as opções disponíveis para a função pesquisa estão apresentadas na tabela 6.4.

A entrada para se inicializar a função **Pesquisa**, pode ser feita a partir de várias opções (figura 6.27), entre elas a que se destaca é aquela por intermédio do código da peça ensaiada, código este definido por um sistema de classificação e codificação. Este caminho parece ser o mais natural, pois a peça é a primeira informação disponível para se iniciar o planejamento do processo. Este código é fornecido pelo próprio sistema quando a peça é cadastrada, como ilustrado anteriormente.

Tabela 6.4 - Opções do Pesquisa para cada *módulo*

Opções	Peça	Material	Ferramenta	Cliente	Dados
Código				X	X
Nome	X				
Nome Genérico	X	X			
Tratamento Térmico	X	X			
Geometria da Pastilha			X		
Classe da Pastilha			X		
Comprimento	X				
Diâmetro	X				
Lista		X	X	X	X

Figura 6.27 - Tela de opções da função *pesquisa*

Para se proceder a busca o sistema inicialmente solicita as informações necessárias para que ele possa percorrer os arquivos e encontrar uma peça idêntica ou similar à desejada. Estas informações são o nome da peça, o nome genérico do material, tratamento térmico do mesmo, comprimento e diâmetro de usinagem, conforme a tela da figura 6.28. Após a confirmação do desejo de recuperar as informações do ensaio encontrado, inicialmente algumas informações

relativas ao ensaio são apresentadas (figura 6.29), em seguida as demais informações sobre a operação *otimizada* são mostradas na tela da figura 6.30.

Caso a resposta do sistema seja composta por diversos registros em condição de satisfazer o código informado, todos os registros possíveis serão apresentados, um a um. As informações apresentadas fazem parte dos registros dos módulos **Dados**, **Resultados** e **Custos**, conforme será ilustrado posteriormente.

PESQUISA DE PECAS SIMILARES:

```

CODIGO DA PECA: 130701000000350012
NOME DA PECA: [VALVULA]
NOME GENEICO DO MATERIAL: [LIGA-NIQUEL]
TRATAMENTO TERMICO: [MEMRUM]

COMPRIMENTO TOTAL (mm): [ 35.0]
DIAMETRO USINAGEM (mm): [ 11.5]

CODIGO DA PECA ENCONTRADA: 130701000000300011
COMPRIMENTO TOTAL : 0030 mm
DIAMETROS USINAGEM : 0011 mm
Li/Di * D/L : 0.935

DESEJA VER TODAS AS INFORMACOES DESTA PECA (S/N) ?

```

Figura 6.28 - Tela de busca de peça similar

INFORMACOES DA PECA SIMILAR ENCONTRADA :

```

CODIGO DA PECA: 130701000000300011
NOME DA PECA: VALVULA
NOME GENEICO DO MATERIAL: LIGA-NIQUEL
TRATAMENTO TERMICO: MEMRUM
COMPRIMENTO TOTAL (mm): 35.5          DIAMETRO USINAGEM (mm): 11.5
GEOMETRIA DA PASTILHA : TCM15T300 -UF
MATERIAL DA PASTILHA : W&K10

CODIGO DOS DADOS OPERACIONAIS:      7

CODIGO DO CLIENTE:      2      ESTON
CODIGO DA MAQUINA:      3      TORNO      3L15

```

Figura 6.29 - Tela inicial dos dados para a função *pesquisa*

INFORMACOES DA PEÇA SIMILAR ENCONTRADA :

```

CODIGO DA PEÇA: 130701000000300011
NOME DA PEÇA: VALVULA
NOME GEMERICO DO MATERIAL: LIGA-NIQUEL
TRATAMENTO TERMICO: NENHUM
COMPRIMENTO TOTAL (mm): 38.5          DIAMETRO USINAGEM (mm): 11.5
GEOMETRIA DA PASTILHA : TCM15T308 -UF
MATERIAL DA PASTILHA : WAK10

CODIGO DOS DADOS OPERACIONAIS: 7

CODIGO DO CLIENTE: 2      EATON

          ROTACÃO MÁXIMA: 5000 rpm U= CONSTANTE
VELOCIDADE DE CORTE (m/min): 173      AVANÇO (mm/rot): 0.120
PROFUNDIDADE DE CORTE (mm): 0.40      PEÇAS PRODUZIDAS: 65
COEFICIENTES: X=1.50      K=7.40100E 3
TEMPO CORTE (min/pc): 0.08      CUSTO DA PEÇA: US$ 0.02
  Pressione uma tecla para continuar ou <ESC> para sair

```

Figura 6.30 - Tela completa dos dados para a função *pesquisa*

## **Capítulo 7**

### **Validação do sistema**

Para validar o sistema ATAC, procurou-se alimentá-lo com dados reais obtidos a partir de um ensaio, em condições de chão-de-fábrica. Para tanto se viabilizou a realização inicialmente do acompanhamento da produção de uma empresa metalúrgica do ramo de autopeças, mais precisamente a usinagem de uma válvula para motor de combustão em um torno CNC. Em seguida se efetuou variações nos valores de velocidade de corte e se observou sua influência na duração da vida da ferramenta. Os dados foram analisados estatisticamente pelo sistema e armazenados, e serão apresentados no decorrer deste capítulo.

A peça em questão se apresenta como um desafio à empresa, no sentido de se otimizar a sua produção, pois é constituída de um material excepcionalmente resistente ao desgaste, devido ao fato da peça estar sujeita à condições de trabalho muito severas. Neste aspecto, há por outro lado uma dificuldade igualmente grande em usiná-la, devido à sua resistência. Assim sendo, qualquer melhoria no sentido de se otimizar o processo seria bem vinda.

Como poderá ser observado para se validar o sistema com este ensaio, foi necessário adotar uma estratégia de otimização capaz de contemplar uma operação, que devido às suas características leva a uma situação de se ter velocidade e rotações variando durante o processo, situação essa mais complexa, porém muito comum de ocorrer na prática.

## 7.1 Montagem Experimental

### 7.1.1 O teste

O teste consistiu no acompanhamento da operação de torneamento de semi-acabamento de uma válvula de admissão para o motor de uma caminhonete (figura 7.1). A válvula foi anteriormente forjada, e é composta de dois materiais diferentes: a haste é de aço e a base de uma liga de níquel, ambas as partes são soldadas. A usinagem em questão, se limitou somente à região da liga de níquel.

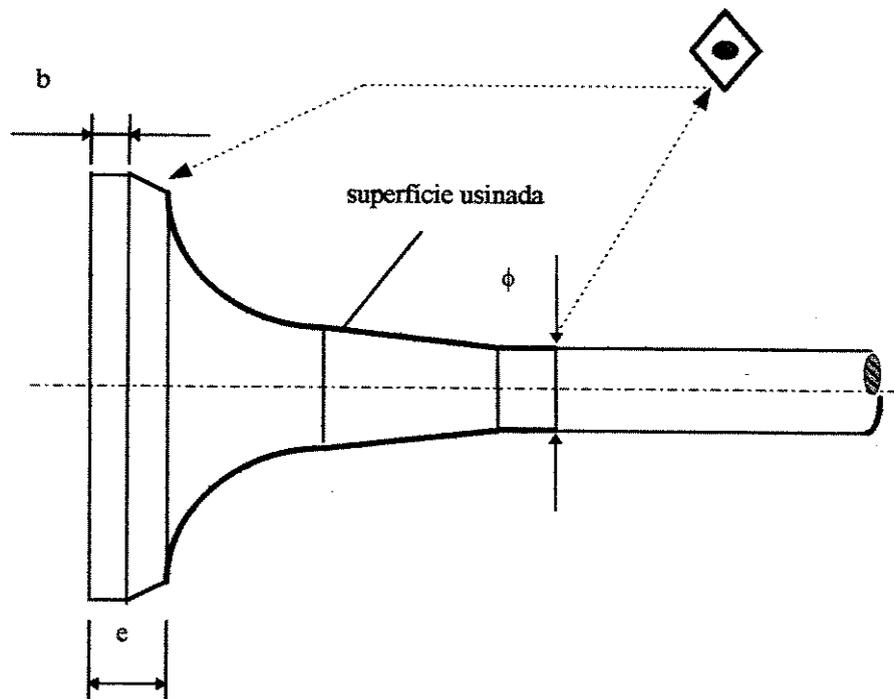


Figura 7.1 - Válvula de admissão V4961

Devido às peculiaridades da peça em questão, pequeno diâmetro na haste ( $\phi = 7,63$  mm) e pequena espessura na base para sua fixação na placa do torno ( $b = 2,08$  mm), houve necessidade em se fixar um valor máximo de rotação durante o processo de usinagem, que foi de 2.500 rpm.

Assim sendo, não foi possível se manter uma velocidade de corte constante, pois a operação se iniciava com um diâmetro de 26,6 mm para terminar em 7,63 mm. Em grande parte do tempo a

rotação acabou sendo a máxima, o que levou a trabalhar com velocidades menores que a anteriormente estabelecida. Assim sendo definimos o que chamamos de *velocidade de corte inicial* ( $v_{CI}$ ), que é a velocidade com a qual se iniciou a operação de corte, assumiu-se então o valor da rotação efetiva do eixo-árvore ( $n_E$ ) conforme a expressão (5.16).

Quanto ao critério de fim de vida da ferramenta, foi utilizada a rugosidade superficial, porém sua determinação dependia da avaliação subjetiva do operador, pois não havia um rugosímetro disponível para se realizar o controle da rugosidade das peças trabalhadas.

A qualidade dimensional das peças era verificada freqüentemente em relação à *espessura* ( $e$ ) da base da válvula e ao diâmetro da haste ( $\phi$ ) conforme a figura 7.1. Isto era realizado através de relógios comparadores e permitia ainda que se fizesse as correções no processo, no sentido de compensar os desgastes sofridos pela ferramenta de corte.

#### 7.1.2 Materiais e equipamentos utilizados

Os testes foram realizados na linha de produção de semi-acabamento de uma indústria de autopeças. Para se realizar os testes, os seguintes equipamentos e materiais foram utilizados:

- Material da peça

Nome comercial do material: NIMOMIC 80A.

Composição química conforme a tabela 7.1.

Fornecedor: Villares.

Dureza: 30 HRc.

Preço: US\$ 1.30 por peça.

Normas: ANSI B46.1, ISO 683/15, SAE J775, JIS G 4901, UNS N07080, DIN NiCr20TiAl, ASTM E-6, ASTM E-44 e ASTM E-7.

Tabela 7.1 - Composição química do NIMONIC 80A

Elemento	Máximo (% em peso)	Mínimo (% em peso)	Elemento	Máximo (% em peso)	Mínimo (% em peso)
C	0,08	0,04	Co	2,00	-
Mn	0,50	-	Fe	2,00	-
P	0,015	-	Mo	0,50	-
S	0,015	-	W	0,50	-
Si	0,50	-	Nb	0,30	-
Cr	21,00	18,00	Cu	0,20	-
Ti	2,70	1,80	V	0,15	-
Al	1,80	1,00	Sn	0,025	-
Zr	0,10	0,04	Pb	0,0025	-
B	0,006	0,0015	Ni	o restante	-

- Máquina

Tipo: torno de comando numérico (CNC).

Fabricante: MORI SEIKI.

Modelo SL-15.

Procedência: Japão.

Potência: 10 C.V.

Rotação máxima: 5.000 rpm.

Número: 300630.

Custo/máquina: US\$ 90.00 por hora.

- Ferramentas

**Pastilha:** TNMG 160408-MF.

Classe: 2015.

Fabricante: *Sandvik-Coromant.*

Preço: US\$ 8.00.

**Suporte:** MTJML2525 M16 M1.

Fabricante: *Sandvik-Coromant*.

Preço: US\$ 93.20.

Vida: 2.000 arestas.

- Relógio comparador

Marca: *Federal*.

Resolução: 0,02 mm.

- Suporte de informática

Lap-top: AT 486DX2.

Software: Clipper 5.0.

## 7.2 Resultados

Os testes foram divididos em duas etapas: na primeira etapa (pré-teste), basicamente se realizou um acompanhamento do processo produtivo, ou seja houve uma variação proposital das condições de corte e observou-se a consistência dos resultados obtidos quanto à vida da ferramenta; a seguir novos testes foram feitos juntamente com uma certa interferência, no sentido de conscientizar o operador quanto à necessidade de se ter uma maior regularidade na definição do fim de vida da ferramenta. Os resultados foram anotados e utilizados para alimentar o sistema.

### 7.2.1 Pré teste

Uma primeira bateria de testes foi feita, utilizando-se 4 *velocidades iniciais de corte* diferentes (110, 130, 150 e 180 m/min) para um comprimento de corte de 39,4 mm e mantendo-se

constantes o avanço (0,13 mm/volta) e a profundidade de usinagem (0,4 mm). O sistema foi alimentado, os resultados foram verificados estatisticamente e os dados apresentados na tabela 7.2. A seguir também são apresentadas a curva de vida da ferramenta no pré-teste (figura 7.2) e a dispersão dos resultados encontrados (figura 7.3).

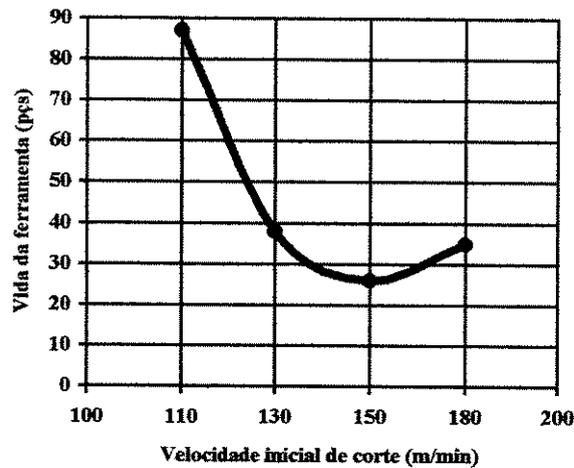


Figura 7.2 - Curva de vida da ferramenta usada no pré-teste

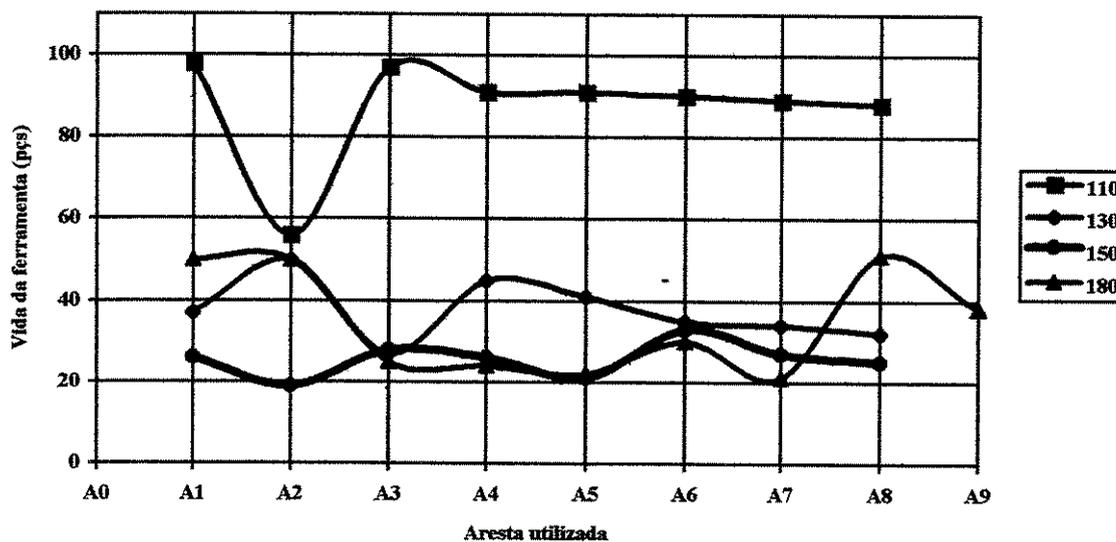


Figura 7.3 - Dispersão dos valores de vida da ferramenta usada no pré-teste

Tabela 7.2 - Valores de vida da ferramenta no pré-teste

<b>VIDA (PÇS) para: <math>v_{CI} = 110</math> m/min e <math>n_E = 1517</math> rpm</b>			
98	56	97	91
91	90	89	88
$\bar{Z} = 87$		$S = 13,2$	$N = 8$
<b>VIDA (PÇS) para: <math>v_{CI} = 130</math> m/min e <math>n_E = 1606</math> rpm</b>			
37	50	27	45
41	35	34	32
$\bar{Z} = 38$		$S = 34$	$N = 14$
<b>VIDA (PÇS) para: <math>v_{CI} = 150</math> m/min e <math>n_E = 1706</math> rpm</b>			
26	19	28	26
21	33	27	25
$\bar{Z} = 26$		$S = 4,3$	$N = 10$
<b>VIDA (PÇS) para: <math>v_{CI} = 180</math> m/min e <math>n_E = 1821</math> rpm</b>			
50	50	25	24
22	30	21	51
38			
$\bar{Z} = 35$		$S = 12,9$	$N = 48$

Na tabela 7.3 constam os valores cronometrados para os tempos do ciclo de usinagem quais sejam: o tempo de corte, o de manuseio e o improdutivo. Todos quantificados em minutos.

Tabela 7.3 - Valores de tempo do pré-teste

Velocidade inicial de corte (m/min)	Tempo do Ciclo (min)	Tempo de Corte (min)	Tempos improdutivos e de manuseio (min)
110	0,27	0,18	0,09
130	0,26	0,17	0,09
150	0,25	0,16	0,09
180	0,24	0,15	0,09

Com base na formulação do custo corrente (item 5.2) o sistema calcula os custos referentes à cada condição testada. Na tabela 7.4 são apresentados os valores encontrados para o custo de máquina, o de ferramenta e o custo total.

Tabela 7.4 - Valores de custos do pré-teste

Velocidade inicial de corte (m/min)	Custo-máquina US\$/pç	Custo-ferramenta US\$/pç	Custo total US\$/pç
110	0.41	0.04	0.45
130	0.39	0.10	0.49
150	0.38	0.14	0.52
180	0.36	0.10	0.46

### 7.2.2 Testes

Os testes propriamente foram realizados a partir de três *velocidades iniciais de corte* (110, 130 e 150 m/min), e mantendo-se novamente constantes o avanço (0,13 mm/volta) e a profundidade de usinagem (0,4 mm). Após os testes os dados foram armazenados no sistema, depois de feita a verificação estatística os resultados puderam ser apresentados a seguir. Na tabela 7.5 são apresentados os valores cronometrados para os tempos do ciclo de usinagem quais sejam: o tempo de corte, o de manuseio e o improdutivo. Todos quantificados em minutos. Foram incluídos valores para uma *velocidade inicial* de 209 m/min, os quais são teóricos e foram extrapolados a partir dos valores obtidos nos testes.

Tabela 7.5 - Valores de tempo do teste

Velocidade inicial de corte (m/min)	Tempo do Ciclo (min)	Tempo de Corte (min)	Tempos improdutivos e de manuseio (min)
110	0,27	0,17	0,10
130	0,25	0,15	0,10
150	0,24	0,14	0,10
209	0,21	0,11	0,10

Na tabela 7.6, abaixo estão assinalados os valores de vida da ferramenta em número de peças produzidas, durante o teste.

Tabela 7.6 - Valores de vida da ferramenta no teste

<b>VIDA (PÇS) para: <math>v_{ci} = 110</math> m/min e <math>n_E = 1606</math> rpm</b>			
103	102	101	
$\bar{Z} = 102$		$S = 1$	$N = 0,08$
<b>VIDA (PÇS) para: <math>v_{ci} = 130</math> m/min e <math>n_E = 1821</math> rpm</b>			
81	75	74	82
$\bar{Z} = 78$		$S = 4$	$N = 1,5$
<b>VIDA (PÇS) para: <math>v_{ci} = 150</math> m/min e <math>n_E = 1951</math> rpm</b>			
71	71	71	
$\bar{Z} = 71$		$S = 0$	$N = 0$

Nas figuras (7.4) e (7.5) estão representadas a curva de vida da ferramenta durante o teste e a dispersão dos valores encontrados, respectivamente.

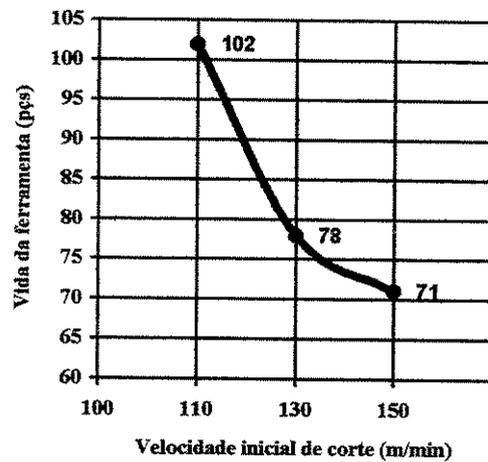


Figura 7.4 - Curva de vida da ferramenta no teste

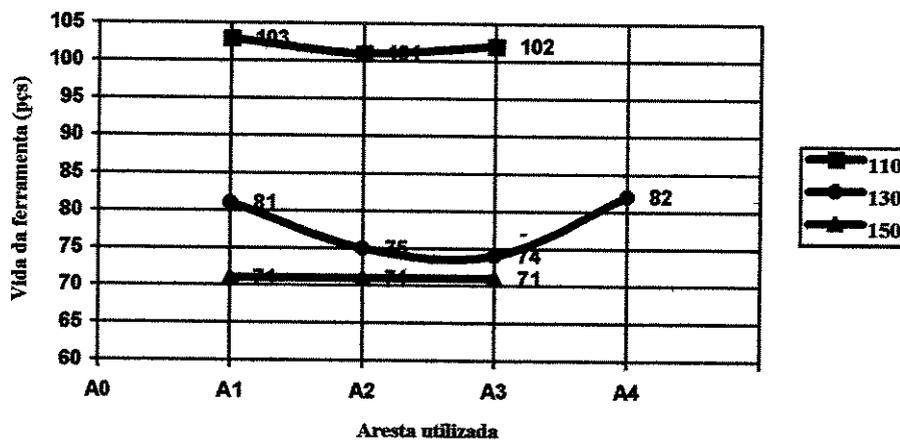


Figura 7.5- Dispersão dos valores de vida da ferramenta usada no teste

Os valores obtidos para a otimização das condições de corte constam das tabelas 7.7 e 7.8. Eles são resultado da aplicação da metodologia apresentada no item 5.4. A peça foi dividida em três seções conforme a figura 7.6, para a aplicação da metodologia. Assim sendo, distinguem-se três regiões distintas: uma de concordância (A), uma cônica (B) e outra cilíndrica (C), que corresponde à região na qual se efetuou a operação de corte.

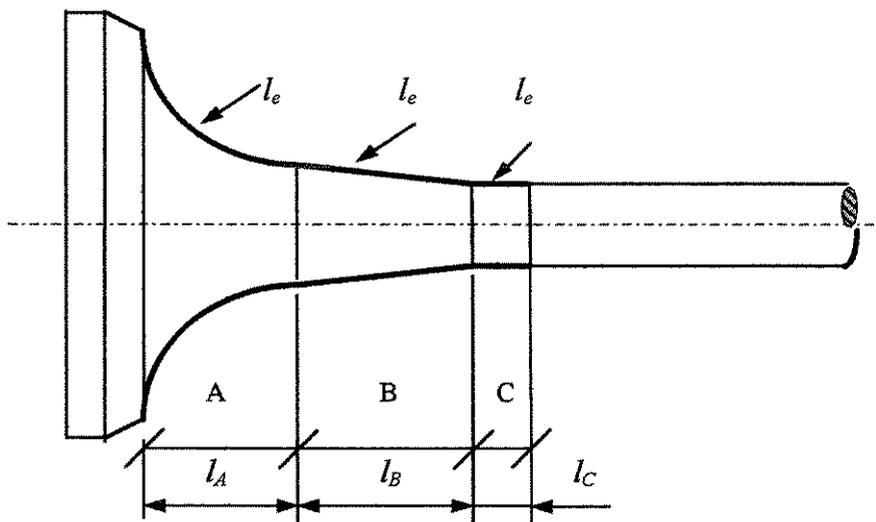


Figura 7.6 - Separação da peça em seções

Tabela 7.7 - Informações sobre a peça

SEÇÃO	A	B	C
TIPO	Concordância	Cônica	Cilíndrica
$l$ (mm)	8,5	17,6	4,5
$l_e$ (mm)	13,4	17,6	4,5
$d_{max}$ (mm)	26,6	9,6	7,6
$d_{min}$ (mm)	9,6	7,6	-
$d_e$ (mm) - $x = 3,14$	19,4	8,6	7,6
$d_e$ (mm) - $x = 2,36$	19,0	8,6	7,6

Tabela 7.8 - Resultados da otimização

	<b>1° INTERVALO (110-130)</b>	<b>2° INTERVALO (130-150)</b>
<b>x de Taylor</b>	3,14	2,36
<b>K<sub>e</sub> de Taylor</b>	1,3x10 <sup>7</sup>	3,5x10 <sup>5</sup>
<b>d<sub>e</sub> (mm)</b>	14,7	13,8
<b>v<sub>mxpe</sub> (m/min)</b>	127	166
<b>n<sub>mxpe</sub> (rpm)</b>	2.750	3.829

Como se pode observar não foi possível encontrar um valor de  $v_{mxpe}$  dentro do campo de rotações permitidas pela máquina. Como nas duas situações o valor da  $n_{mxpe}$  foi maior que o limite, o modelo sugere que se utilize o limite como valor otimizado. Assim sendo a *velocidade de corte selecionada inicial* ( $v_{SI}$ ) será:

$$v_{SI} = \frac{\pi \cdot d_{max} \cdot n_{max}}{1000} \quad (7.1)$$

onde:

$d_{max}$  = diâmetro máximo da peça: 26,6 mm.

$n_{max}$  = rotação máxima limite da máquina: 2500 rpm.

O valor encontrado para a velocidade foi de **209 m/min**, o que passou a ser considerado como velocidade selecionada inicial. O perfil de variação da velocidade para estas condições está representado na figura 7.7.

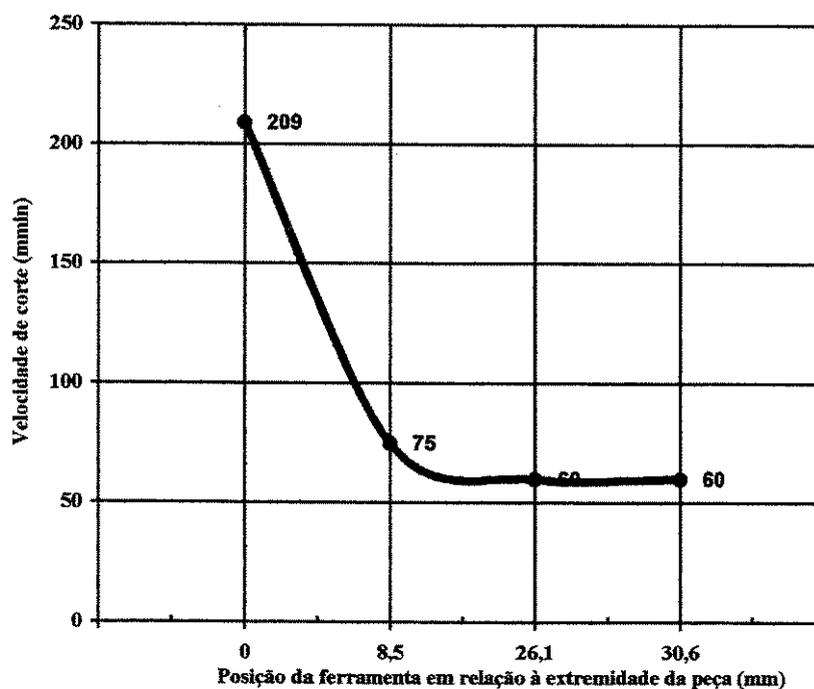


Figura 7.7 - Perfil da variação da velocidade para o teste

Com base na formulação do custo corrente (item 5.1) o sistema calcula os custos referentes à cada condição testada. Na tabela 7.9 são então apresentados os valores de custo para cada situação do teste, além da relação custo/benefício ( $R_{CB}$ ) conforme a equação (5.24).

Tabela 7.9 - Valores de custos do teste

Velocidade inicial de corte (m/min)	Custo da máquina/pç	Custo de ferramenta/pç	Custo total US\$/pç	$R_{CB}$ (%)
110	0.41	0.03	0.44	-
130	0.38	0.04	0.42	4,5
150	0.36	0.05	0.41	6,8
<b>209</b>	<b>0.32</b>	<b>0.05</b>	<b>0.37</b>	<b>15,9</b>

A respeito da quantificação da produção obtida nos ensaios e mostrados na tabela 7.10, cabe introduzir algumas expressões:

- Vida de uma aresta da ferramenta ( $T$ ), em min:

$$T = Z \cdot t_c \quad (7.2)$$

onde:

$Z$  = vida da aresta, em número de peças.

$t_c$  = tempo de corte, em min/pç.

- Vida *total* da aresta ( $T_T$ ), em min:

$$T_T = Z \cdot t_{um} \quad (7.3)$$

onde:

$t_{um}$  = tempo de utilização da máquina, em min/pç. - (5.2).

- Quantidade de arestas consumidas por turno ( $A_t$ ):

$$A_t = \frac{t_t}{T + t_{Tf}} \quad (7.4)$$

onde:

$t_t$  = duração do turno de trabalho, em min.

$t_{Tf}$  = tempo de troca de uma aresta da ferramenta, em min.

- Tamanho do lote produzido por turno ( $Z_t$ ), em pç.:

$$Z_t = Z \cdot A_t \quad (7.5)$$

- Custo de usinagem para o lote de um turno ( $C_l$ ), em US\$:

$$C_l = Z_t \cdot C_{TP} \quad (7.6)$$

onde:

$C_{TP}$  = custo de usinagem, em US\$/pç. - (5.1)

Tabela 7.10 - Valores de produção do teste

$V_{CT}$ (m/min)	$Z$ (pçs)	$T$ (min)	$T_T$ (min)	Arestas p/ turno ( $A_t$ )	Peças p/ turno ( $Z_t$ )	Custo do lote (US\$)
110	102	17,34	27,5	16,5	1683	740.52
130	78	11,7	18,0	23	1794	753.48
150	71	9,94	17,0	26	1846	756.86
209	51	5,6	10,7	39	1989	736.93

Os dados da tabela 7.11 foram obtidos pelas expressões:

- Tempo de corte total ( $t_{CT}$ ), em min.:

$$t_{CT} = Z_t \cdot t_{um} \quad (7.7)$$

onde:

$t_{um}$  = tempo de utilização da máquina, em min/pç. - (5.2)

- Fração do tempo com a máquina usinando ( $f_c$ ), em %:

$$f_c = \frac{t_{CT}}{t_t} \cdot 100\% \quad (7.8)$$

- Tempo total de troca de ferramenta ( $t_{TT}$ ), em min.

$$t_{TT} = A_t \cdot t_{TF} \quad (7.9)$$

onde:

$t_{TF}$  = tempo de troca de uma aresta, em min.

- Fração do tempo com a máquina parada para troca de ferramenta ( $f_T$ ), em %.

$$f_T = \frac{t_{TT}}{t_t} \cdot 100\% \quad (7.10)$$

Número de pastilhas utilizadas por turno ( $N_t$ ):

$$N_t = \frac{A_t}{N_{ms}} \quad (7.11)$$

onde:

$N_{ms}$  = número de arestas da pastilha.

Tabela 7.11 - Valores do consumo de pastilhas no teste

$V_{cI}$ (m/min)	Tempo de corte		Tempo de troca		$N_t$ (pastilhas)
	$t_{cT}$ (min)	$f_c$ (%)	$t_{TT}$ (min)	$f_T$ (%)	
110	454	95	24	5	2 p + 4 arestas
130	448	93	34	7	3 p + 5 arestas
150	443	92	39	8	4 p + 2 arestas
209	418	88	58	12	6 p + 3 arestas

Para ilustrar melhor as vantagens do uso da novas condições de corte em relação à *condição de referência*, ou seja a utilizada normalmente ( $v_{CI} = 110$  m/min), foi montada a tabela 7.12, na qual constam os números obtidos com a substituição da condição de referência pelas demais, levando-se em conta um lote de peças com 10.000 unidades/mês.

Tabela 7.12 - Valores com a substituição da velocidade de corte

Substituição	Bônus p/ 10.000 (US\$)	Bônus em pastilhas	Pastilhas p/ 10.000 pçs	Bônus (meses)
110-130	200	25	21,3	1
110-150	300	37,5	23,5	1,5
110-209	700	87,5	32,6	3

### 7.3 Análise e Comentários

A metodologia adotada se mostrou bastante prática, pois os resultados foram obtidos sem que se causasse o menor transtorno ao processo produtivo, ou seja a atuação do sistema foi a menos intrusiva possível, chegando ao ponto de ao contrário, aumentar a produção da máquina naquele turno, pois variou-se a velocidade de corte. Os dados do teste foram colhidos dentro de um turno de trabalho (8 horas).

Ao se comparar os dados colhidos no pré-teste com os do teste se verifica que a qualidade deles do ponto de vista estatístico, muda bastante, deixando evidente a influência do comportamento do operador nos resultados. Isso ocorre devido a uma certa subjetividade embutida na definição do fim de vida da ferramenta para o procedimento adotado na operação de usinagem em questão.

Pode-se notar também que o operador parece se *acomodar* com um certo padrão de vida de ferramenta, quando os parâmetros permanecem fixos. Porém quando eles são alterados, e

conseqüentemente modificam o comportamento da vida da ferramenta, há uma aleatoriedade muito grande nas primeiras arestas até o operador se *acostumar* com a nova situação. Ou seja, há naturalmente um comportamento tendencioso na definição da vida da ferramenta.

Para se contornar estes pontos, é necessária uma conscientização do operador no sentido de se manter uma coerência própria, na definição do final de vida da ferramenta, ou seja adotar certos padrões e segui-los, mantendo uma postura crítica em relação às mudanças no comportamento da vida da ferramenta quando houver alguma modificação nos parâmetros de corte para aquela operação.

Infelizmente, não foi possível realizar o teste com a velocidade selecionada encontrada teoricamente. Pois a bateria de testes feita só pôde contemplar três velocidades iniciais (110, 130 e 150) dentro do lote programado para aquele mês, levando-se em conta que o teste só poderia ser feito com o mesmo operador da máquina para podermos comparar resultados, pois há subjetividade na definição do fim de vida da ferramenta. Na programação do mês seguinte a peça em questão passou a ser usinada não mais por torneamento e sim por retificação em uma retificadora recém-adquirida pela empresa.

Pelas projeções feitas para a velocidade selecionada, pode-se verificar que é possível obter uma certa economia, quando a condição selecionada é utilizada, pois mesmo consumindo uma quantidade maior de arestas, parando mais vezes para realizar a troca de arestas, se diminui o tempo de utilização da máquina, que neste caso tem uma influência muito grande no custo total. Nos tempos de grande competitividade em que vivemos, qualquer redução de custos passa a ser salutar.

## **Capítulo 8**

### **Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos**

#### **8.1 Conclusões**

A utilização sistemática do modelo aqui proposto, permite alcançar melhorias que vão além daquelas conseguidas pelo modelo corrente, pois permite a seleção das ferramentas com base na condição de máxima produção e também a determinação dos coeficientes de Taylor em planta fabril. Isto traduz, de certa forma, a realidade do desempenho das configurações máquina-ferramenta-peça utilizadas, evitando assim ficar restrito somente aos valores de catálogos e manuais, que muitas vezes espelham uma realidade diferente daquela encontrada no chão-de-fábrica.

Pode-se esperar que através do procedimento de otimização proposto, obtenha-se uma avaliação mais criteriosa do desempenho das ferramentas testadas, pois as mesmas irão trabalhar em suas melhores faixas de utilização (máxima produção), permitindo assim uma comparação mais eficiente das mesmas. Isto possibilita certamente, uma utilização muito mais racional dos recursos envolvidos, quais sejam: as ferramentas, as máquinas como também as informações a respeito das operações de usinagem.

Como pode ser observado através dos resultados dos testes de validação do sistema, um bom nível de economia pode ser alcançado através da aplicação da metodologia de otimização

proposta, sem necessidade da utilização de grandes recursos para isso. Assim sendo, o sistema acena com ganhos que o parque industrial metal/mecânico poderia usufruir utilizando esta metodologia ou outras similares, o que permitiria elevar os níveis de competitividade das indústrias do país.

O sistema apresentado permite a extrapolação dos resultados obtidos com a otimização para sua utilização em peças ou situações similares, pois as informações geradas com a otimização, ou seja, determinação das condições de máxima produção dos testes, são automaticamente gravadas pelo sistema, tornando-se disponíveis para consultas futuras. Assim sendo, o sistema possui em seus arquivos informações que podem ser utilizadas como valores iniciais para se promover o desenvolvimento do processo de outras peças, além de funções próprias para a pesquisa destes valores. Isto facilita a realização de otimizações quando o cenário de manufatura tender para pequenos lotes, próprios de sistemas flexíveis de manufatura.

Este sistema tanto pode ser utilizado por um fabricante de ferramentas para armazenar as informações colhidas durante visitas técnicas com o objetivo de se otimizar processos, bem como pelos clientes destes, que podem aproveitar estas informações geradas e carregar seu sistema, com seu próprios dados otimizados ou não.

Convém ressaltar porém, que o sistema proposto não visa de forma nenhuma substituir o processista, mas sim, auxiliá-lo nas suas funções. Isto é possível, pois ele disponibiliza de forma amigável, uma grande quantidade de informações úteis para o desenvolvimento das atividades relativas ao planejamento do processo de usinagem, além de propiciar uma metodologia prática para se otimizar as condições de corte visando a máxima produção.

Pode-se observar também que a eficiência com a qual o sistema pode auxiliar, no tocante a fornecer dados iniciais para o desenvolvimento de processos, depende da extensão dos seus arquivos, ou seja, quanto mais registros, maior a possibilidade de se encontrar uma situação similar já cadastrada dentro do sistema, impedindo que testes desnecessários sejam feitos. Além disso a metodologia adotada se mostrou extremamente prática, pois trabalha a partir da definição

de vida de ferramentas em termos de número de peças, que é a maneira mais usual de quantificá-la no chão-de-fábrica.

## 8.2 Sugestões

- Implementação de outros algoritmos de otimização do processo de usinagem no sistema ATAC.
- Implementação de outras metodologias no sistema ATAC que contemplem outros cenários de produção como o de pequenos lotes.
- Expansão do sistema ATAC, no sentido de abranger os demais processos de usinagem (fresamento, furação, retificação, etc.).
- Implementação de uma interface do ATAC com *software* gráfico, que permita exibir o desenho das peças, ferramentas e suas montagens em dispositivos; além da seleção e especificação de ferramental.
- Implementação de Sistema especialista em CAPP apoiado no sistema ATAC.
- Implementação de um sistema Gerenciador de ferramentas apoiado no sistema ATAC.

## Referências Bibliográficas

Agapiou, J. S. Optimization of Machining Operations Based on a Combined Criterion, Part 1: The Use of Combined Objectives in Single-Pass Operations. *Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry*, v.114, n.4, p.500-507, November 1992.a.

Agapiou, J. S. Optimization of Multistage Machining Systems, Part 1: Mathematical Solution. *Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry*, v.114, n.4, p.524-531, November 1992.b.

Agapiou, J. S. Optimization of Multistage Machining Systems, Part 2: The Algorithm and Applications. *Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry*, v.114, n.4, p.532-538, November 1992.c.

Agostinho, O. L. et al. *Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões*. 1ª ed.; São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1977, 295 p.

Arsecularatne, J. A., Hinduja, S., Barrow, G. Optimum cutting conditions for turned components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v.206, n.B1, p.15-31, 1992.

Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro. NBR-6023; referências bibliográficas. Rio de Janeiro, 1989. 19p.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. NBR 6405/88, rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro, 1988. 15p.
- Aver'yanov, O. I., Margul, M. L. On line tool management system for flexible manufacture. *Soviet Engineering Research*, v.9, n.10, p.98-101, October 1989.
- Billatos, S. B., Kendall, L. A. A General Optimization Model for Multi Tool Manufacturing Systems. *Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry*, v.113, n.1, p.10-15, February 1991.
- Boehs, L., Jaimes, I. G. Uma Proposta Para um Modelo de Referência do Gerenciamento de Ferramentas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 13, 1995, Belo Horizonte/MG. *Anais do XIII COBEM*: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1995.
- Boehs, L., Morais, L. H. A. Ferramentas de usinagem - uma nova técnica de gerenciamento. *Mundo Mecânico*, v. 108, p.20-26, março 1988.
- Boehs, L., Stevan, M. S., Schmidt, M. A. Gerenciamento de Ferramentas e seus reflexos sobre a implantação de um Sistema da Qualidade baseado nas Normas ISO 9000. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 14, 1997, Bauru/SP. *Anais do XIV COBEM*: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1997.
- Boehs, Lourival. *Projeto e implantação de um sistema computadorizado de banco de dados de usinagem (CINFUS)*. Florianópolis: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina: UFSC, 1988. 167p. Tese (Doutorado).
- Burgess, A. G., Morgan, I., Vollmann, T. E. Cellular manufacturing: its impact on the total factory. *International Journal of Production Research*, v.31, n.9, p.2059-2077, September 1993.

- Carpenter, I. D.; Maropoulos, P. G. Milling Decisions. *Manufacturing Engineer*, v.73, n.2, p.82-83, April 1994.
- Chen, S. J., Hinduja, S., Barrow, G. Automatic tool selection for rough turning operations. *International Journal of Machine-Tools & Manufacture*, v.29, n.4, p.535-553, April 1989.
- Cho, K. -K, Lee, S. -H, Ahn, J.-H. Development of Integrated Process Planning and Monitoring System for Turning Operation. *Annals of the CIRP*, v.40, n.1, p.423-427, 1991.
- Choudhury, I. A., El-Baradie, M. A. Analysis of model building techniques for the development of machinability database systems. *International Journal of Production Research*, v. 34, n. 5, p.1261-1277, may 1996.
- Chua, M. S. et al. Determination of optimal cutting conditions using design of experiments and optimization techniques. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.33, n. 2, p.297-305, February 1993.
- Chung, C. -H. Planning tool requirements for flexible manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, v.10, n.6, p.476-483, June 1991.
- Colding, B. N. Intelligent selection of machining parameters for metal cutting operations: the least expensive way to increase productivity. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, v.9. n.4/5, p.407-412, august/October 1992.
- Coleman, P., Ozbayrak, M., Bell, R. Tool management and job allocation in flexible machining cells - Part 1: work-oriented strategies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v.210, n.B5, p.405-415, 1996.a.

- Coleman, P., Ozbayrak, M., Bell, R. Tool management and job allocation in flexible machining cells - Part 2: tool-oriented strategies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v.210, n.B5, p.417-427, 1996.b.
- Coppini, N. L., Costa, D. D. da. Módulo Especialista para Escolha Automática de Parâmetros de Usinagem. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 13, 1995, Belo Horizonte/MG. *Anais do XIII COBEM*. Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1995.
- Coppini, N. L., Ribeiro, M. V. Assistência técnica assistida por computador aplicada na seleção de ferramentas e parâmetros de usinagem. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 13, 1995, Belo Horizonte/MG. *Anais do XIII COBEM*. Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1995.
- Coppini, N. L., Ribeiro, M. V. CATA System and Optimization of Cutting Conditions. In: Canadian Congress of Applied Mechanics, 16, 1997, Quebec/Canada, *Proceedings of the XVI CANCAM*. v.1, p.549-550. 1997.
- Cowton, C. J., Wirth, A. On the economics of cutting tools. *International Journal of Production Research*, v.31, n. 10, p.2441-2446, October 1993.
- Cupini, N. L., Ribeiro, M. V., Marcondes, F. C. Banco de Dados em Usinagem - Uma Ferramenta de Apoio ao Planejamento da Produção. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 13, 1993, Florianópolis/SC. *Anais do XIII ENEGEP*. Associação Brasileira de Engenharia de Produção. 1993, v.1, p.226-231.
- Diniz, A. E., et al. Otimização das condições de usinagem em células, *Máquinas e Metais*, n. 281, p.48-54, junho 1989.
- Domazet, D. The Automatic Tool Selection with Production Rules Matrix Method. *Annals of the CIRP*, v.39, n. 1, p.497-500, 1990.

- Duffuaa, S. O. et al. Evaluation of optimization methods for machining economics models. *Computers Operational Research*, v.20, n. 2, p.227-237, February 1993.
- Evans, G., Towill, D., Naim, M. Data Flow. *Manufacturing Engineer*, v. 73, n.3, p.122-125, June 1994.
- Eversheim, W. et al. Tool management: the present and the future. *Annals of the CIRP*, v.40, n.2, p.631-639, 1991.b
- Eversheim, W., Lenhart, M., Katzy, B. Information Modeling for Technology-Oriented Tool Selection. *Annals of the CIRP*, v.43, n. 1, p.429-432, 1994.
- Eversheim, W., Marczinski, G., Cremer, R. Structured modeling of manufacturing process as NC-data preparation. *Annals of the CIRP*, v.1, n.40, p.429-432, 1991.a
- Fenton, R. G., Gagnon, M. F. J. Computer-Aided Tool Material Selection for Metal-Cutting Operations. *Annals of the CIRP*, v. 42, n.1, p. 565-568 1993.
- Ferraresi, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. 1ª ed.; São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1977, 751 p.
- Ferraresi, D. Otimização das condições de usinagem em produção seriada. *Máquinas e Metais*, n. 286, p.24-37, novembro 1989.
- Ferraresi, D. *Valores das características de corte de diferentes materiais, tabelados para a operação de torneamento*. 1ª ed.; São Paulo: ABM, 1980, 107p.

- Giusti, F., Santochi, M., Dini, G. COATS: an Expert Module for Optimal Tool Selection. *Annals of the CIRP*, v.35, n.1, p.337-340, 1986.
- Gray, A. E., Seidmann, A., Stecke, K. E. A Synthesis of Decision Models for Tool Management in Automated Manufacturing. *Management Science*, v.39, n.5, p.549-567, may 1993.
- Grechishnikov, V. A. Tool management in computer-integrated manufacture. *Soviet Engineering Research*, v.9, n.7, p.84-87, July 1989.
- Groover, P. M. *Automation, Production Systems and Computer Aided Manufacturing*. New Jersey: Prentice Hall, 1980. 401 p.
- Gyampah, K. A-, Meredith, J. R., Raturi, A. A comparison of tool management strategies and part selection rules for a flexible manufacturing system. *International Journal of Production Research*, v.30, n.4, p.733-748, April 1992.
- Hinduja, S., Barrow, G. SITS - a semi-intelligent tool selection system for turned components. *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, p.535-539, 1993.
- Hitomi, K. Analysis of optimal machining condition for flow-type automated manufacturing systems: maximum efficiency for multi-product production. *International Journal of Production Research*, v.28, n.6, p.1153-1162, June 1990.
- Jang, D. Y. A unified optimization model of a machining process for specified conditions of machined surface and process performance. *International Journal of Production Research*, v.30, n.3, p. 647-663, march 1992.
- Jang, H. S., Bagchi, A. Tool selection in machining by integration of a data base and a rule system. *Journal of Mechanical Working Technology*, v.20, p. 25-34, September 1989.

- Kastelic, S., Kopac, J., Peklenik, J. Conceptual design of a relational data base for manufacturing processes. *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, p.493-496, 1993.
- Koulamas, C. P. Simultaneous determination of optimal machining conditions and tool replacement policies in constrained machining economics problems by geometric programming. *International Journal of Production Research*, v.29, n.12, p.2407-2421, December 1991.
- Kusiak, A. Process Planning: A Knowledge-Based and Optimization Perspective. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 7, n.3, p. 257-266, June 1991.
- Lawler, B. D. Understanding generative process planning. *Machine Design*, v.62, n.9, p.50-54, may 10, 1990.
- Lipschutz, S. *Álgebra Linear*. São Paulo, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1980. 449 p.
- Lukic, Lj., Polajnar, D., Šolaja, V. A Yugoslav Approach to Decision Support for Optimization of FMS Technologies. *Annals of the CIRP*, v.40, n.1, p.99-102, 1991.
- Maccarini G. C., Zavanella, L., Bugini, A. Production Cost and Tool Reliabilities: the Machining Cycle Influence in Flexible Plants. *International Journal of Machine-Tool & Manufacture*, v.31, n.3, p. 415-424, march 1991.
- Malakooti, B. An interactive on-line multi-objective optimization approach with application to metal cutting turning operation. *International Journal of Production Research*, v.29, n.3, p.575-598, march 1991.
- Maropoulos, P. G. Cutting tool selection: an intelligent methodology and its interfaces with technical and planning functions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v.206, n.B1, p.49-59, 1992

- Maropoulos, P. G., Alamin, B. Intelligent tool selection for machining cylindrical components - Part 2: results from the testing of the knowledge-based module. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v.209, n.B3, p.183-192, 1995.
- Maropoulos, P. G., Gill, P. A. T. Intelligent tool selection for machining cylindrical components - Part 1: logic of the knowledge-based module. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v.209, p.173-182, 1995.
- Maropoulos, P. G., Hinduja, S. Automatic tool selection for finish turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v.204, n.B1, p.43-51, 1990.
- Maropoulos, P. G., Hinduja, S. Automatic tool selection for rough turning. *International Journal of Production Research*, v.29, n.6, p.1185-1204, June 1991.
- Micheletti, G. F. *Mecanizado por Arranque de Viruta*. Barcelona: Editorial Blume, 1980. 334 p.
- Mizugaki, Y. et al. Optimal Tool Selection Based on Genetic Algorithm in a Geometric Cutting Simulation. *Annals of the CIRP*, v.43, n. 1, p.433-436, 1994.
- Neipp, G. Computer-integrated mechanical engineering (CIME). *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, v.7, n.1/2, p 89-101, February 1990.
- Newnes, L. B., Bell, R. A framework for modeling the coincident flow of workpieces and cutting tools. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v.210, n.B2, p.167-176, 1996.

- Nishizawa H., Sakakibara, J. Métodos para selecionar os parâmetros de corte. In: Simpósio Brasileiro sobre Tecnologia da Usinagem, 1, 1989, São Paulo/SP: Sociedade Brasileira de Comando Numérico, 1989.
- Novaski, O. *Custos de Usinagem*. 1ª ed.; Campinas: Editora da Unicamp, 1991, 149 p.
- Pallerosi, Carlos Amadeo. *Formulação de um método geral de análise das condições econômicas de usinagem*. Campinas: Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 1973. 264 p. Tese (Doutorado).
- Pande, S. S., Prabhu, B. S. An expert system for automatic extraction of machining features and tooling selection for automats. *Computer-Aided Engineering Journal*, v.7, n.4, p.99-103, august 1990.
- Picozzi, D. A. Computerized tool management. *Tooling & Production*, v.56, n.6, p.79-82, September 1990.
- Rho, H. M. et al. An integrated Cutting Tool Selection and Operation Sequencing Method. *Annals of the CIRP*, v.41, n. 1, p.517-520, 1992.
- Ribeiro, M. V., Coppini, N. L. Applied Database System in Optimization of Cutting Conditions and Tool Selection. In: Advances in Materials Processing and Technologies, 1997, Guimarães/Portugal. *Proceedings of the AMPT'97*. v. 2, p.465-469, 1997.b.
- Ribeiro, M. V., Coppini, N. L. Assistência técnica assistida por computador: uma contribuição. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 16, 1996, Piracicaba/SP: *Anais do XVI ENEGEP*. Piracicaba: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 1996.
- Ribeiro, M. V., Coppini, N. L. ATAC - um banco de dados aplicado à usinagem. *Revista de Ciência e Tecnologia*, UNIMEP - Piracicaba, v.4/1, n.7, p.65-74, junho 1995.

- Ribeiro, M. V., Coppini, N. L. O Gerenciamento das Informações de Usinagem como uma Vantagem Competitiva. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 17, 1997, Gramado/RS. *Anais do XVI ENEGEP*: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 1997.c.
- Ribeiro, Marcos Valério. *Aplicação de conceitos de banco de dados em tecnologia da usinagem*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 1994. 136 p. Tese (Mestrado).
- Santa, Waldo Duque. *Estudo da modelagem matemática para a otimização das condições de usinagem*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 1989. 146 p. Tese (Doutorado).
- Schweitzer, P. J., Seidmann, A. Optimizing Processing Rates for Flexible Manufacturing Systems. *Management Science*, v.37, n.4, p.454-466, April 1991.
- Sharit, J., Elhence, S. Computerization of tool-replacement decision making in flexible manufacturing systems: a human-systems perspective. *International Journal of Production Research*, v.27, n.12, p.2027-2039, December 1989.
- Spur, G., Specht, D. Knowledge Engineering in Manufacturing. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, v.9, n.4/5, p.303-309, august/October 1992.
- Ssemakula, M. E. Process planning system in the CIM environment. *Computers & Industrial Engineering*, v.19, n.1-4, p.452-456, April 1990.
- Vilella, Ronaldo de Castro. *Metodologia prática visando a otimização das condições de usinagem em células de fabricação*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 1988. 105 p. Tese (Mestrado).

- Yeo, S. H. et al. Integrated knowledge-based machining system for rotational parts. *International Journal of Production Research*, v.29, n.7, p.1325-1337, July 1991.
- Zavanella, L., Maccarini, G. C., Bugini, A. FMS. tool supply in a stochastic environment: strategies and related reliabilities. *International Journal of Machine-Tools & Manufacture*, v.30, n.3, p.389-402, march 1990.
- Zhang, J. H., Hinduja, S. Determination of the Optimum Tool Set for a Given Bath of Turned Components. *Annals of the CIRP*, v. 44, n. 1, p. 445-450, 1995.
- Zhou, C., Wysk, R. A. An integrated system for selecting optimum cutting speeds and tool replacement times. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, v.32, n.5, p.695-707, may 1992.