

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Ronaldo de Castro Villela e aprovada pela Comissão julgadora em 18/08/88.



METODOLOGIA PRÁTICA VISANDO A OTIMIZAÇÃO
DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM EM CÉLULAS DE
FABRICAÇÃO

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

Tese de Mestrado

Título da Tese : METODOLOGIA PRÁTICA VISANDO A OTIMIZAÇÃO
DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM EM CÉLULAS DE
FABRICAÇÃO

Autor : Ronaldo de Castro Vilella

Orientador : Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini

Aprovado por

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini

Presidente

Prof. Dr. Aureo Campos Ferreira

Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho

Campinas, 18 de Agosto de 1988

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini a orientação e auxílio para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Anselmo e Sérgio pelas discussões.

Ao Miro e ao Ari da UNICAMP pelo auxílio nos trabalhos experimentais e na execução dos desenhos.

Ao Antonio Carlos, Sr. Valter, Jefferson, Harlei e Carlos da CLARK pelo apoio.

A EQUIPAMENTOS CLARK pela utilização das suas instalações.

Ao Centro de Tecnologia da UNICAMP pela utilização do Laboratório de Metrologia.

Aos demais colegas e amigos pelo apoio.

Aos meus pais, a meus irmãos, a minha esposa e a meu filho por existirem.

METODOLOGIA PRÁTICA VISANDO A OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM EM CÉLULAS DE FABRICAÇÃO

RESUMO

Aplicou-se uma metodologia para otimização da velocidade de corte pela máxima produção nas operações de torneamento de uma célula de fabricação. Esta célula de fabricação estava sendo utilizada para usinar peças de uma família de engrenagens classificadas como tal de acordo com os conceitos da Tecnologia de Grupo. A aplicação da metodologia foi implementada num fabricante de transmissões automotivas com o objetivo de avaliar a possibilidade de utilização da mesma em condições práticas.

Verificou-se, também, a variabilidade da vida de ferramentas de corte monocortantes de metal duro não recoberto em condições controladas.

Os resultados obtidos mostraram que a metodologia pode ser aplicada na produção por lotes onde se usa o princípio da tecnologia de grupo, mas que os resultados obtidos devem ser analisados previamente por um analista, antes de serem utilizados.

PRACTICAL METHODOLOGY FOR THE OPTIMIZATION OF MACHINING
CONDITIONS IN MANUFACTURING CELLS

ABSTRACT

It was tested a methodology for the optimization of cutting speed by the maximum production rate in turning operations of a manufacturing cell. In this manufacturing cell were machined parts of a family of gears classified in according to the Group Technology concepts. The methodology was tested in a transmission manufacturer in order to evaluate its aplicability in practical conditions.

It was also verified the tool life variability of uncoated carbide tools in controled conditions.

The results shown that the metodology can be used in batch production where the Group Technology concepts were used, but the results must be analised by a Tool Analyst, before using.

INDICE

1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - PRODUÇÃO POR LOTES EM CÉLULAS DE FABRICAÇÃO.....	5
2.1 - Tipos de Produção.....	5
2.1.1 - Produção em Massa.....	5
2.1.2 - Produção por Lotes.....	8
2.2 - Tecnologia de Grupo.....	9
2.2.1 - Introdução.....	9
2.2.2 - Métodos de Formação de Famílias.....	10
2.3 - Células de Fabricação.....	13
3 - OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM - UMA ABORDAGEM CLASSICA.....	14
3.1 - Introdução.....	14
3.2 - Ciclos, Tempos de Usinagem e Velocidade de Máxima Produção.....	14
3.3 - Custos de Produção.....	21
3.4 - Análise da Relação entre a Velocidade de Mínimo Custo e a Velocidade de Máxima Produção.....	25
3.5 - Conclusões.....	34
4 - MODELOS DETERMINISTAS E PROBABILISTAS DE OTIMIZAÇÃO	35
4.1 - Introdução.....	35

4.2 - Critérios de Vida.....	35
4.3 - Abordagem Determinista.....	40
4.4 - A Natureza Estocástica da Vida de Ferramentas de Corte.....	45
4.5 - Abordagem Probabilista.....	48
 5 - METODOLOGIA.....	 50
5.1 - Introdução.....	50
5.2 - Descrição do Método.....	50
5.3 - Descrição do Sistema.....	53
5.4 - Ensaaios de Laboratório.....	58
5.4.1 - Introdução.....	58
5.4.2 - Metodologia.....	58
 6 - RESULTADOS E DISCUSSOES.....	 61
6.1 - Introdução.....	61
6.2 - Apresentação e Discussão dos Resultados - Caso 1.	62
6.3 - Apresentação e Discussão dos Resultados - Caso 2.	71
6.4 - Apresentação e Discussão dos Resultados - Condições de Laboratório.....	81
6.5 - Comparação entre os Resultados Obtidos com a Aplicação das Metodologias Apresentadas nos Casos 1 e 2.....	88
6.6 - Extrapolação dos Resultados.....	90
6.7 - Vantagens e Limitações da Metodologia.....	91
6.8 - A Automação e a Metodologia.....	93

7 - CONCLUSOES.....	97
8 - SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
9 - REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	100

CAPITULO I - INTRODUÇÃO

A otimização das condições de produção sempre foi um dos objetivos básicos da indústria manufatureira, sendo um fator determinante da evolução das máquinas-ferramenta e das ferramentas de corte.

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.

Na análise da produção diária de uma peça qualquer fica evidente a participação de uma série de etapas. A fig. 1.1 apresenta a distribuição relativa das diversas etapas no tempo total de fabricação [1].

A otimização do tempo dispendido para a fabricação da peça, quando esta permanece na máquina-ferramenta, é importante por ser um dos fatores que determinam o investimento em equipamento e ferramental, que são elementos importantes na formação dos custos industriais. Uma análise da fig. 1.1, mostra também que a atual tendência de redução dos tempos de espera e dos tempos de preparação das máquinas-ferramenta aumentará a participação dos tempos em que a peça permanece dentro da máquina-ferramenta (tempos de troca de ferramenta, tempos passivos e tempos de usinagem) no tempo total de fabricação.

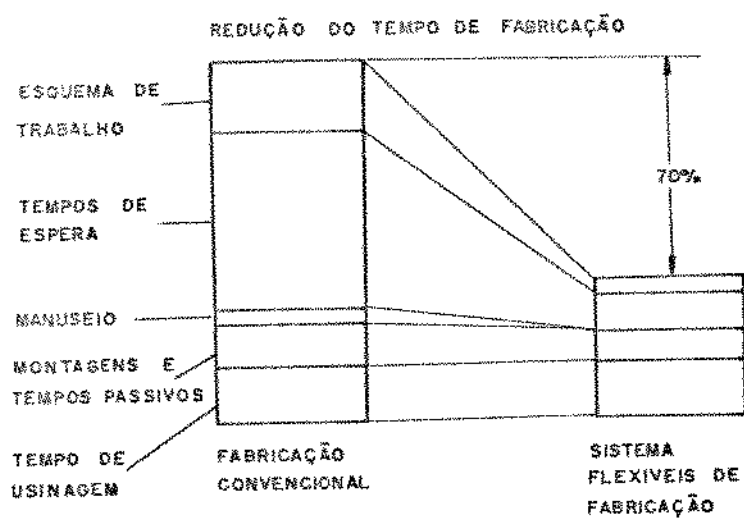


Figura 1.1 - Tempo das diversas etapas da fabricação e tendência futura [1].

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 corte coerentes com a capacidade da máquina-ferramenta, utilização adequada do fluido de corte, etc.

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 frequentes de ferramentas.

A Velocidade de Máxima Produção (V_{mxp}) é a velocidade de corte para a qual a soma dos tempos de troca de ferramentas e de usinagem é mínimo, ou seja, é a velocidade na qual ocorre equilíbrio entre os efeitos positivos (maior taxa de remoção de cavaco) e negativos (maior frequência de troca de ferramentas).

O objetivo deste trabalho é apresentar uma Metodologia Prática para otimização, pela máxima produção, da velocidade de corte. A aplicação foi feita numa Produção por Lotes onde estava sendo utilizado o princípio da Tecnologia de Grupo, avaliando-se a aplicabilidade dessa metodologia em condições de produção.

Este trabalho divide-se em oito capítulos.

- . Capítulo 1 - Introdução
- . Capítulo 2 - Produção por Lotes em Células de Fabricação
- . Capítulo 3 - Otimização das Condições de Usinagem - Uma Abordagem Clássica
- . Capítulo 4 - Modelos Deterministas e Probabilistas de Otimização
- . Capítulo 5 - Metodologia
- . Capítulo 6 - Resultados e Discussões
- . Capítulo 7 - Conclusões
- . Capítulo 8 - Sugestões para Trabalhos Futuros

CAPITULO 2 - PRODUÇÃO POR LOTES EM CÉLULAS DE FABRICAÇÃO

2.1 - Tipos de Produção

Pode-se caracterizar três tipos básicos de produção [2][3]:

a - Produção Individual

Se a quantidade mensal ou anual for constituída por um pequeno número de produtos.

b - Produção por Lotes

Quando a produção é efetuada em séries fixas ou lotes.

c - Produção em Massa

Quando se tem uma grande quantidade de produtos de um tipo ou semelhantes.

2.1.1 - Produção em Massa

No caso da industria metal-mecânica pode-se caracterizar dois tipos bem distintos:

- Um deles é a produção em massa de peças simples, tais como parafusos e porcas.

- O outro é a produção em massa de peças mais complexas em termos de forma e dimensões, tais como eixos e engrenagens, que requerem uma série de operações até a obtenção do produto final.

Normalmente, a produção em grande quantidade de peças complexas está associada com o fluxo de produção, ou seja, as peças fluem dentro do processo produtivo de maneira a se tornar um processo quase-contínuo. Neste caso, o arranjo físico mais utilizado é o Arranjo em Linha.

Por causa da utilização frequente do Arranjo em Linha e do princípio do Fluxo de Produção, a Produção em Massa é associada à Linha de Produção. Pode-se dizer que existem quatro princípios básicos que caracterizam a Linha de Produção contribuindo para a alta produtividade da mesma:

- Princípio do Fluxo de Trabalho
- Princípio da Intercambialidade
- Princípio da Mínima Distância
- Princípio da Divisão de Operações

A Linha de Produção foi a maneira encontrada para se obter alta produtividade na produção em massa de peças complexas. A alta produtividade da Linha de Produção quando

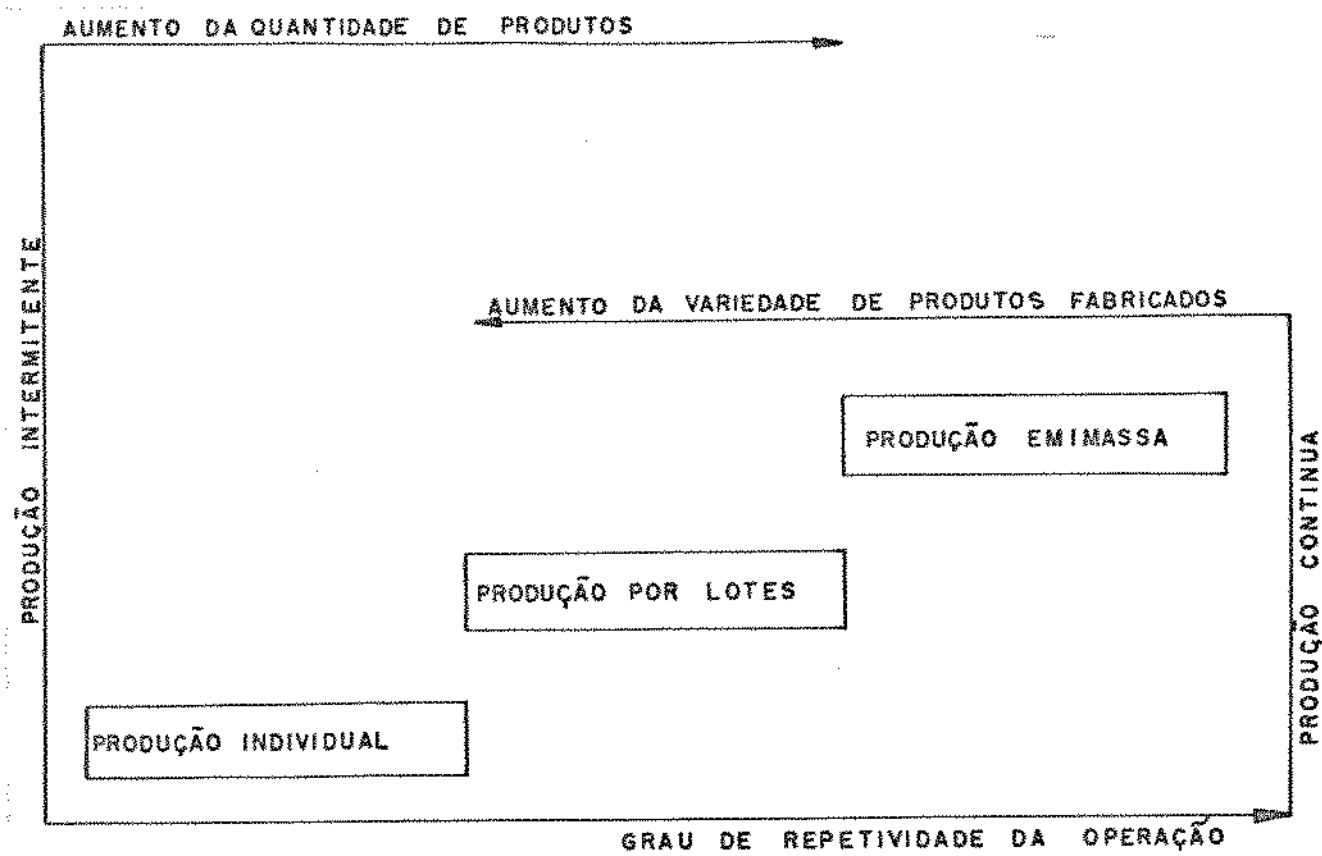


Figura 2.1 - Relação entre os Tipos de Produção, o Tamanho do Lote e a Variedade de Produtos [3]

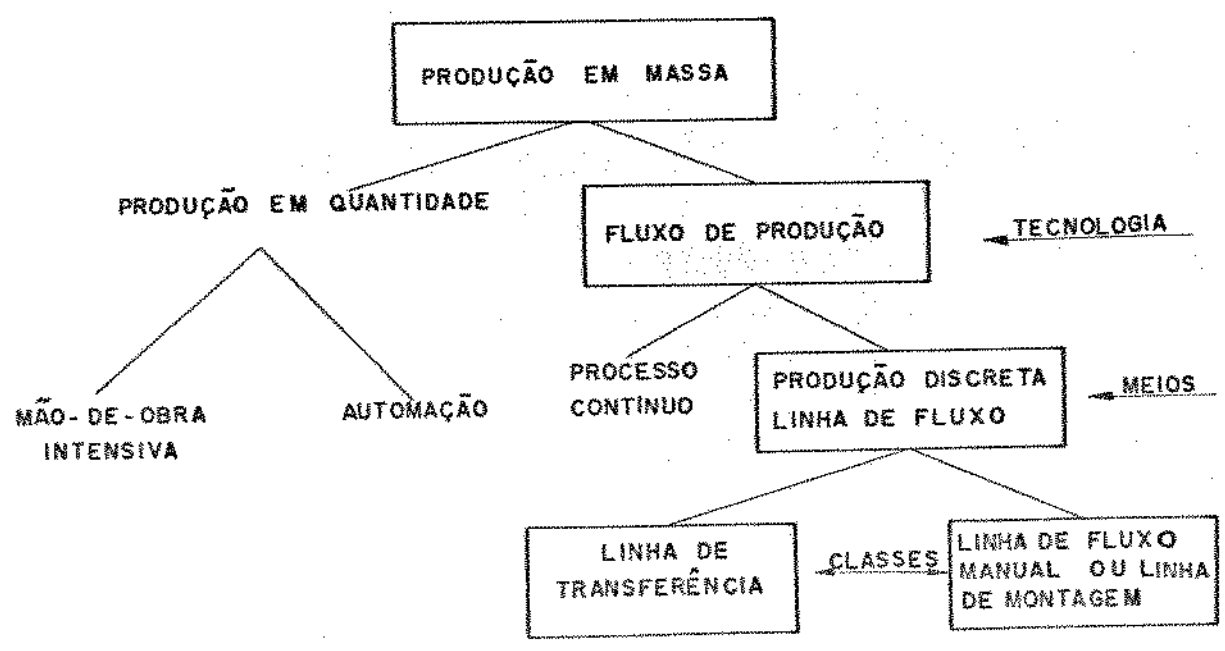


Figura 2.2 - Tipos de Produção em Massa [3]

aplicada a Produção em Massa, é função da possibilidade de divisão de tarefas complexas e da utilização intensiva da automação. Isto é possível, devido à existência de produtos padronizados, característicos da produção em massa.

2.1.2 - Produção por Lotes

A Produção por Lotes é caracterizada pela produção de peças em lotes pequenos que retornam à produção com uma certa frequência. Naturalmente que o Arranjo em Linha com automação intensiva não traz neste caso a produtividade obtida na Produção em Massa, devido à necessidade de se dispendir muito tempo na preparação de máquinas, em geral pouco flexíveis. A solução, neste caso, foi a utilização de máquinas universais num Arranjo Físico Funcional. O arranjo é dito Arranjo Funcional porque os equipamentos são agrupados na fábrica de acordo com sua função ou objetivo [4].

Na Produção por Lotes em Arranjo Funcional, a matéria-prima para produção de um lote, percorre a fábrica de um grupo de máquinas para outro, podendo inclusive, retornar a um mesmo grupo. O número de peças a ser produzido, ou o tamanho do lote, e também a frequência de entrada de um novo lote, dependem da demanda de produtos.

Em resumo, a Produção por Lotes processada num Arranjo Físico Funcional pode ser definida como a fabricação de um grupo de peças idênticas numa série de etapas, de tal

maneira que todas as peças são completadas numa determinada etapa, antes de serem transferidas para a próxima etapa do arranjo.

2.2 - Tecnologia de Grupo

2.2.1 - Introdução

A Linha de Produção é, sem dúvida, um método eficiente de produção. Infelizmente, sabe-se que o uso deste método depende da existência de uma demanda alta e estável para um produto, ou para uma faixa de produtos semelhantes, uma condição que atualmente está presente em comparativamente poucas situações. Muitos fabricantes são obrigados a fabricar produtos em lotes para satisfazer a demanda que é baixa em relação às taxas de produção.

Uma maneira de aumentar-se a produtividade da Produção por Lotes, é minimizar o tempo total de montagens de máquinas. Isto pode ser obtido reduzindo-se o número de montagens através do aumento do tamanho do lote, o que, no entanto tem o efeito de aumentar o nível de inventário. Então, a economia de custo nas montagens deve ser balanceada com o aumento do custo do inventário. Esta é a essência do clássico problema do Tamanho do Lote Econômico.

Uma outra maneira de minimizar-se o tempo de montagem é selecionar-se a sequência de lotes de modo a obter-se o

menor número de ajustes da máquina. Este é conhecido como problema do Sequenciamento dos Lotes.

A Tecnologia de Grupo procura aumentar a eficiência da Produção por Lotes através do agrupamento de peças similares. Tal método permite a diminuição do tempo total de montagem de máquinas, além de possibilitar a utilização de alguns princípios da Linha de Produção na Produção por Lotes e consequentemente, a obtenção de alguns benefícios inerentes à mesma.

A Tecnologia de Grupo pode ser definida como "a técnica para identificar e agrupar componentes similares ou relacionados pelo processo produtivo, de modo a tirar vantagem de suas similaridades fazendo uso, por exemplo, da economia inerente dos métodos do Fluxo de Produção". Isto é obtido pelo agrupamento de diversos tipos de peças em famílias que requerem processos similares de fabricação e, promovendo a otimização das condições de fabricação dessas famílias ou grupos.

2.2.2 - Métodos de Formação de Famílias [6]

a - Método Visual

O método consiste numa inspeção visual dos componentes fabricados e posterior agrupamento em famílias de peças semelhantes tais como famílias de polias, de eixos, de engrenagens, etc.

b - Sistema de Codificação e Classificação

Este método consiste em codificar as peças através de um sistema numérico, composto de diversos dígitos, os quais definirão determinadas características (forma, número de canais, etc.) da peça, que possibilitarão o agrupamento em famílias.

c - Análise do Fluxo de Produção

Este método baseia sua análise em quatro fases:

- . Análise do Fluxo de Fábrica, onde se estudam os caminhos pelos quais os materiais fluem nas diversas unidades de produção, visando uma simplificação do fluxo.

- . Análise do Grupo, onde verifica-se quais máquinas são utilizadas para produção dos componentes dos grupos, consistindo na Análise da Carga de máquinas do grupo, corrigindo distorções que possam ocorrer no rearranjo das operações.

- . Análise da Linha, tendo como base a definição das famílias e dos grupos, passa-se à análise do posicionamento de cada máquina de acordo com a frequência com que é utilizada na produção dos componentes.

- . Análise de Grupo para Ferramental, dentro do agrupamento de máquinas.

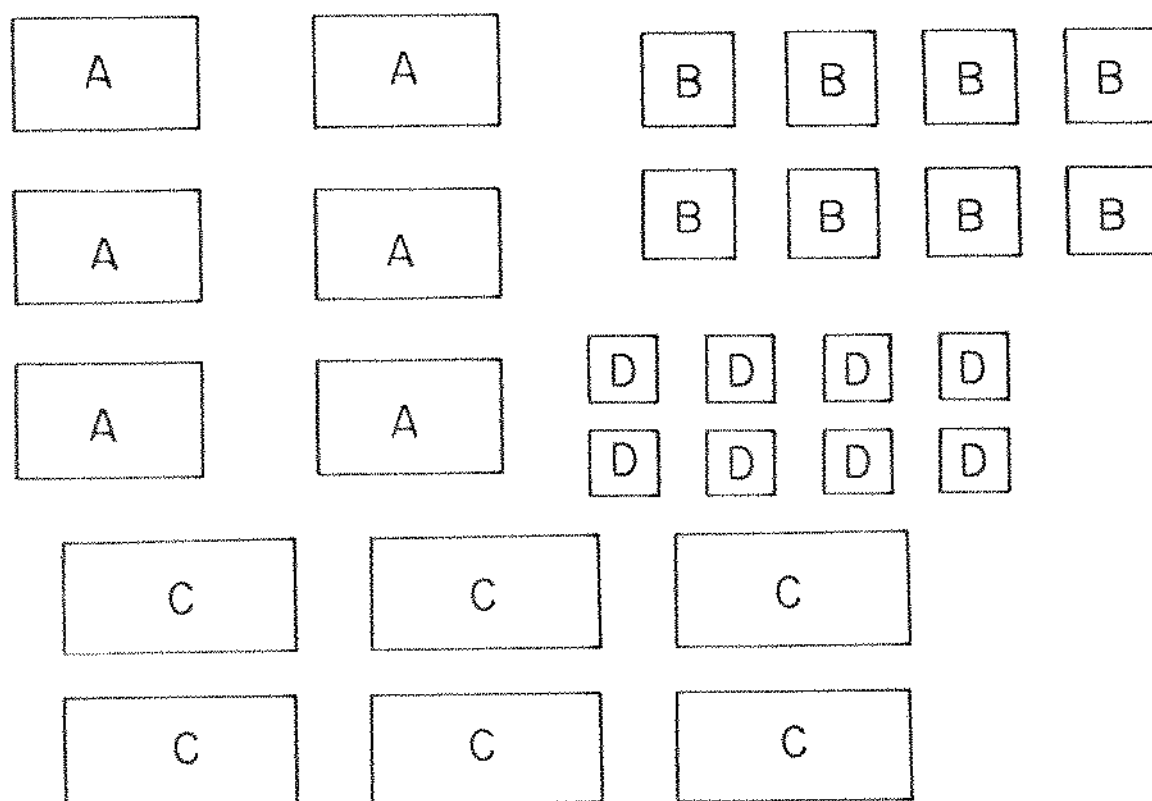


Figura 2.3 - Esquema do Arranjo Físico Funcional [4]

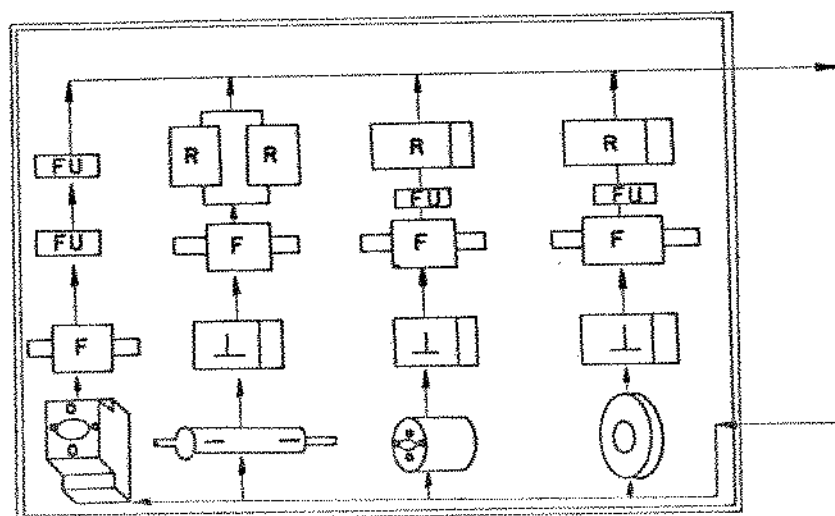


Figura 2.4 - Esquema do Arranjo Físico em Grupo [4]

2.3 - Células de Fabricação

A recente tendência de diversificação e de rapidez com que os produtos tornam-se obsoletos, aumentou a importância da Produção por Lotes. A utilização do Arranjo Físico Funcional e do princípio da Tecnologia de Grupo como forma de aumento da produtividade da Produção por Lotes levou ao aparecimento das Células de Fabricação.

As Células de Fabricação são grupos de máquinas, escolhidas para cada família, situadas num Arranjo Físico de Grupo de tal maneira que os componentes fluem de uma máquina para outra em sequência.

A utilização das Células de Fabricação é, portanto, uma maneira de se incorporar algumas das vantagens da Linha de Produção, na Produção por Lotes.

CAPITULO 3 - OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM - UMA ABORDAGEM CLASSICA

3.1 - Introdução

Para determinar-se as condições de usinagem de uma determinada peça deve-se [7]:

a - Escolher avanço e profundidade de corte baseados em considerações restritivas do sistema (geometria da ferramenta, geometria da peça, tolerâncias, rigidez do sistema máquina-dispositivo-ferramenta-peça, etc.). Obedecidas as restrições, os valores de avanço e profundidade de corte devem ser máximos.

b - Escolher uma velocidade de corte otimizada onde estejam equilibrados custo e produção. Nestes casos costuma-se dizer que a velocidade de corte deve estar dentro do Intervalo de Máxima Eficiência (IME), que é limitado pela Velocidade de Mínimo Custo (v_0) e pela Velocidade de Máxima Produção (v_{mxp}). A fig. 3.1 mostra o Intervalo de Máxima Eficiência [8].

3.2 - Ciclos, Tempos de Usinagem e Velocidade de Máxima Produção

O ciclo de usinagem de uma peça pertencente a um lote de z peças é composto das seguintes etapas [8]:

- a - Colocação e fixação da peça na máquina-ferramenta
- b - Aproximação da ferramenta
- c - Corte
- d - Afastamento da ferramenta
- e - Inspeção e retirada
- f - Preparação da máquina-ferramenta
- g - Retirada da ferramenta
- h - Afiação da ferramenta
- i - Recolocação da ferramenta

Para o cálculo do tempo total que a peça permanece dentro da máquina-ferramenta, no caso de uma máquina com apenas uma ferramenta, temos a expressão:

$$t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{z} + \frac{nt}{z} (t_{ft} + t_{fa}) \quad (3.1)$$

onde, t - tempo em que a peça permanece dentro da máquina-ferramenta

t_c - tempo de corte (etapa c)

t_s - Tempos secundários (etapas a,e)

t_a - tempo de aproximação e afastamento (etapas b,d)

t_p - tempo de preparação (etapa f)

t_{ft} - tempo de troca da ferramenta (etapas g,i)

t_{fa} - tempo de afiação da ferramenta (etapa h)

nt - número de trocas da ferramenta

z - número de peças do lote

A expressão acima , no entanto, pode ser simplificada para:

$$t = t_c + t_s + \frac{t_c}{T} (t_{ft}) \quad (3.2)$$

onde, t_a está incluído nos tempos secundários e T é a vida da ferramenta.

Tal simplificação é válida para lotes médios e grandes, em máquinas-ferramenta que utilizam suportes com pastilhas intercambiáveis ($t_{af}=0$)

O termo T , que expressa a vida da ferramenta , é dada pela Equação de Taylor :

$$T = k v^{-x} \quad [\text{min}] \quad (3.3)$$

onde, v - velocidade de corte [m/min]

x, k - constantes da Equação de Taylor

Para o torneamento cilíndrico, t_c pode ser expresso por:

$$t_c = \frac{l_a \cdot \Pi \cdot d}{1000 \cdot a \cdot v} \quad (3.4)$$

onde, l_a - percurso de avanço [mm]

d - diâmetro usinado [mm]

a - avanço [mm]

Então obtêm-se a equação (3.5) a partir da equação (3.2) :

$$t = \frac{1a.\Pi.d}{1000.a.v} + t_s + \frac{1a.\Pi.d.v^{x-1}}{1000.a.k} .t_{ft} \quad (3.5)$$

t₀ t₁ t₂

Numa análise qualitativa da equação (3.5) pode-se ver que a redução do tempo total (t) pode ser obtida através da redução dos tempos secundários (t_s) e do tempo de troca da ferramenta (t_{ft}), e que o aumento da velocidade de corte nem sempre leva à redução do tempo total (t) devido ao efeito negativo da velocidade de corte na vida (T) da ferramenta.

Desta forma, para obter-se o mínimo tempo de usinagem, deve-se fazer a diferenciação total de (3.5) e igualar-se a zero para obter-se o ponto de mínimo.

$$dt = \frac{\partial t}{\partial v} dv + \frac{\partial t}{\partial a} da + \frac{\partial t}{\partial p} dp \quad (3.6)$$

obtendo para a e p constantes,

$$\frac{dt}{dv} = -\frac{1a.\Pi.d}{1000.a.v} + \frac{(x-1).1a.\Pi.d.v^{x-2}}{1000.a.k} .t_{ft} = 0 \quad (3.7)$$

De (3.7) pode-se obter a Velocidade de Máxima Produção, conforme mostra a fig. 3.2 ,

$$v_{m\dot{x}p} = x \sqrt{\frac{k}{(x-1).tft}} \quad (3.8)$$

Como pode-se observar na equação (3.8), para o cálculo da Velocidade de Máxima Produção é necessário a obtenção de:

- Tempo de troca da ferramenta (tft)
- Expoentes da Equação de Taylor (x,k)

A equação (3.8), apesar de obtida para o caso do torneamento cilíndrico, pode ser utilizada para outros processos desde que sejam aplicados os conceitos de equivalência ou que a máquina-ferramenta possa trabalhar à velocidade de corte constante.

A obtenção dos expoentes x e k da Equação de Taylor em condições de laboratório normalmente induzem a erros quando extrapolados às condições de produção, devido aos seguintes fatores [11]:

- Variação da velocidade de deformação e cisalhamento do metal na região do corte.
- Variação da forma da secção de corte, devido aos valores da profundidade de corte e avanço ao longo do perfil usinado influírem no valor e na localização das áreas onde,

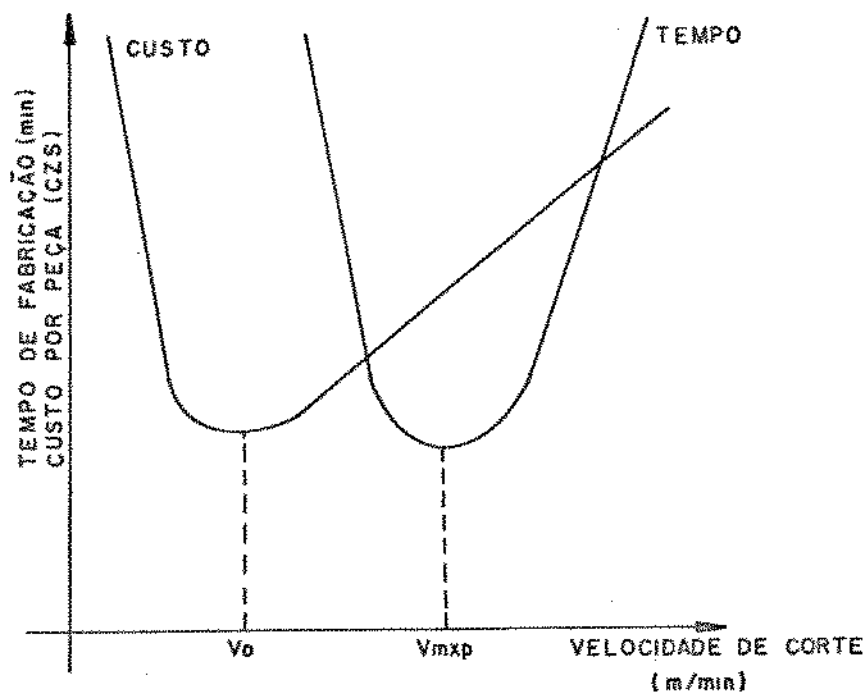


Figura 3.1 - Intervalo de Máxima Eficiência [8]

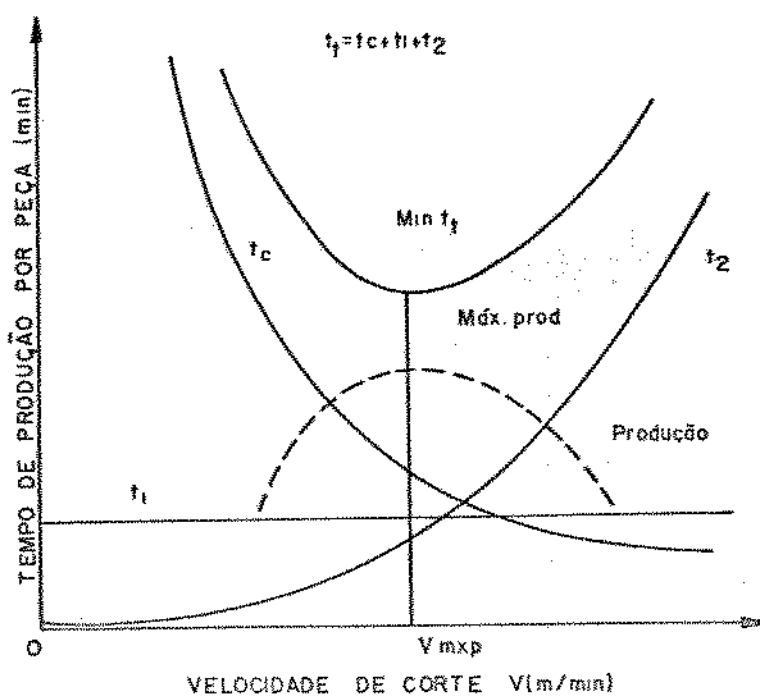


Figura 3.2 - Velocidade de Máxima Produção [8]

instantaneamente, a velocidade de desgaste da ferramenta é maior.

- A ferramenta é afetada pelos sucessivos aquecimentos e resfriamentos, devido à variação das condições de usinagem, fluxo do fluido de corte, ou então pelas periódicas entradas e saídas da ferramenta na peça usinada.

- As vibrações possuem amplitudes e frequências variáveis ao longo do perfil usinado.

Para eliminar a influência de todos estes fatores Pallerosi e Cupini [11] sugeriram uma maneira de obter os coeficientes x e k através da contagem do número de peças produzidas por vida da ferramenta.

Para o caso de usinagem a velocidade de corte e avanço constantes, com a ferramenta trabalhando num único estágio, as equações sugeridas são [9]:

$$x = \frac{\log (z_i/z_{i+1})}{\log (v_{i+1}/v_i)} + 1 \quad (3.9)$$

$$k = z_i \cdot (v_i)^x \cdot t_{ci} \quad (3.10)$$

onde, z_i - número médio de peças usinadas com a ferramenta

até o fim da vida de mesma, na condição i

v_i - velocidade de corte na condição i

t_{ci} - tempo de corte na condição i

3.2 - Custos de Produção

O custo de produção de uma peça pode ser dividido nas seguintes partes [8]:

k_p - custo total de fabricação

k_m - custo da matéria-prima

k_{mi} - custo indireto da matéria-prima

k_u - custo de usinagem

k_{us} - custo da mão-de-obra de usinagem

k_{uf} - custo das ferramentas

k_{um} - custo da máquina

k_{cq} - custo do controle de qualidade

k_{if} - custo indireto de fabricação, independente das condições de usinagem

k_v - custo proporcional às variações de custo

Pode-se dizer, no entanto, que somente k_{us} , k_{um} e k_{uf} dependem das condições de usinagem, ou seja:

$$k_{us} = f(tc) ; k_{um} = g(tc) ; k_{uf} = h(tc)$$

Então:

$$k_p(tc) = C_1 + f(tc) + g(tc) + h(tc) \quad (3.11)$$

onde, C_1 - Constante de custo independente de v [Cz\$/peça]

- Custo da Mão-de-Obra por Peça

$$k_{us} = \frac{t \cdot Sh}{60} \quad [Cz\$] \quad (3.12)$$

onde, Sh - Salário do operador [Cz\$/hora]

- Custo Máquina por Peça

$$k_{um} = \frac{t}{H \cdot 60} [(V_{mi} - V_{mi} \cdot \frac{m}{M}) \cdot j + \frac{V_{mi}}{M} + k_{mc} + E_m \cdot k_e \cdot j] \quad (3.13)$$

ou,

$$k_{um} = \frac{t \cdot S_m}{60} \quad [Cz\$] \quad (3.14)$$

onde, V_{mi} - valor inicial de aquisição da máquina [Cz\$]

m - idade da máquina [anos]

M - vida prevista para a máquina [anos]

j - taxa anual de juros

k_{mc} - custo anual de conservação da máquina [Cz\$]

E_m - espaço ocupado pela máquina [m³]

k_e - custo do espaço ocupado [Cz\$/m³.ano]

S_m - custo total da máquina [Cz\$/hora]

H - horas de trabalho/ano

- Custo da Ferramenta por Peça

$$k_{uf} = \frac{1}{Z_t} \cdot k_{ft} \quad (3.15)$$

onde, Z_t - número de peças usinadas durante a vida T de uma ferramenta

k_{ft} - custo da ferramenta por vida [Cz\$]

$$k_{ft} = \frac{1}{n_{fp}} \cdot V_{si} + \frac{k_s}{n_s}, \text{ para pastilhas intercambiáveis}$$

onde, n_{fp} - vida média do porta-ferramenta

V_{si} - custo de aquisição do porta-ferramenta

k_s - custo de aquisição da pastilha intercambiável

n_s - número de arestas de corte da pastilha

- Velocidade de Mínimo de Custo para uma Máquina Ferramenta com uma única Ferramenta de Corte (a e p constantes)

$$\begin{aligned} k_p &= C_1 + \frac{t_c \cdot C_2}{60} + \frac{t_c \cdot C_3}{T} = \\ &= C_1 + C_2 \left(S_m + S_h \right) \cdot \frac{t_c}{60} + \frac{C_3 \cdot t_c}{T} \quad (3.18) \end{aligned}$$

onde, C_2 - soma das despesas totais de mão-de-obra e salário máquina [Cz\$/peça]

C_3 - constante de custo relativa à ferramenta [Cz\$]

Que para o caso do torneamento cilíndrico,

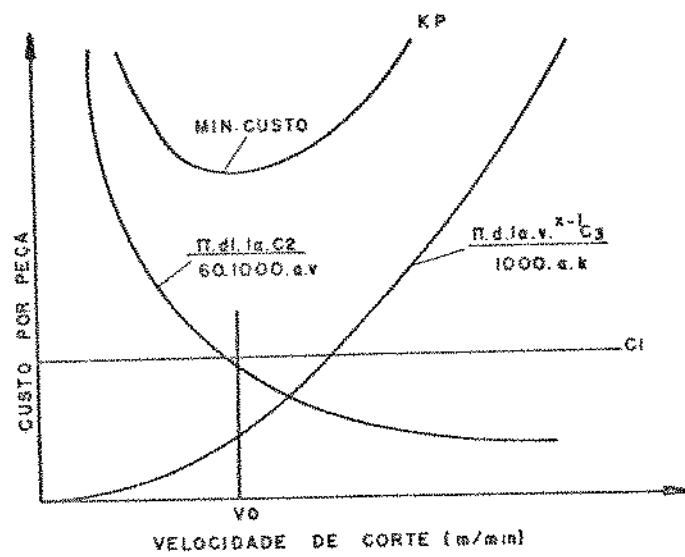


Figura 3.3 - Velocidade de Mínimo Custo [8]

$$k_p = C_1 + \frac{H.d.l.a}{60.1000.a.v} .C_2 + \frac{H.d.l.a.v^{x-1}}{1000.a.k} .C_3 \quad (3.19)$$

Como admite-se a e p constantes, pode-se calcular a Velocidade de Mínimo Custo por (vide fig. 3.3):

$$dk_p = \frac{H.d.l.a.C_2}{60.1000.a.v} + \frac{(x-1).H.d.l.a.v^{x-2}}{1000.a.k} .C_3 = 0 \quad (3.20)$$

logo,

$$v_0 = \sqrt[x]{\frac{C_2.k}{60.(x-1).C_3}} \quad (3.21)$$

onde, $C_2 = S_h + S_m$

$$C_3 = k_{ft} + \frac{t_{ft}.(S_h + S_m)}{60}$$

3.4 - Análise da Relação entre a Velocidade de Mínimo Custo e a Velocidade de Máxima Produção

Como foi mencionado no início deste capítulo, as condições de usinagem devem ser escolhidas de maneira que a velocidade de corte esteja dentro do Intervalo de Máxima Eficiência (intervalo contido entre a Velocidade de Mínimo Custo e a Velocidade de Máxima Produção).

No item 3.2 sugeriu-se uma maneira prática de obter-se a Velocidade de Máxima Produção. A obtenção da Velocidade de Mínimo Custo, no entanto, é problemática, pois a

determinação das constantes C2 e C3 depende de uma série de fatores de difícil obtenção.

Rodrigues, Cupini e Diniz [7], sugeriram que " a Velocidade de Máxima Produção é condição necessária e suficiente para definição dos parâmetros operacionais, principalmente nos gargalos ". Estes autores definiram um índice D, onde:

$$D = \frac{v_{mxp}}{v_0} = \left[\frac{60.kft}{(Sh + Sm).tft} + 1 \right]^{1/x} \quad (3.22)$$

Ainda , segundo os mesmos autores, " a utilização da Velocidade de Mínimo Custo só será aplicável quando houver ociosidade ocasionada por baixa de mercado ou desbalanceamento na sequência de produção. Nestas condições, deve-se considerar que as equações de custo não levam em conta os tempos improdutivos devido à falta de serviço. Este fato leva a valores altos de salário-máquina que tenderiam o índice D para um ".

Analisar-se-á agora a variação do Custo Total de Fabricação (k_p) para dois casos, através do uso das equações com valores hipotéticos próximos dos valores reais de produção. Para esta análise consideraremos apenas os custos variáveis com as condições de usinagem (sem a constante C1) e condições usuais para torneamento em torno CNC (valores válidos para setembro de 1987):

$$Sh = \text{Cz\$ } 160,00 \quad ; \quad Sm = \text{Cz\$ } 1.500,00$$

$$k_{ft} = \text{Cz\$ } 100,00 \quad ; \quad t_{ft} = 0,5 \text{ min}$$

$$l_a = 150 \text{ mm} \quad ; \quad d = 50 \text{ mm}$$

$$a = 0,3 \text{ mm} \quad ; \quad k = 10 \text{ E10}$$

$$x = 3,8$$

Os resultados, apresentados em forma de tabelas, tem os seguintes parâmetros:

$k(v_0)$ - custo para a velocidade de mínimo custo [Cz\$]

$k(v_{mxp})$ - custo para a vel. máxima produção [Cz\$]

v_0 - velocidade de mínimo custo [m/min]

v_{mxp} - velocidade de máxima produção [m/min]

$R_k = k(v_{mxp})/k(v_0)$

CASO 1 - Quando o índice D tende a um.

Neste caso, as seguintes opções podem ocorrer, individualmente ou simultaneamente:

- . O custo da ferramenta (k_{ft}) tende a valores muito baixos
- . O salário-homem (Sh) tende a valores muito altos
- . O salário-máquina (Sm) tende a valores muito altos
- . O tempo de troca (t_{ft}) da ferramenta tende a valores muito altos.

KFT	K(V0)	K(VHXP)	V0	VHXP	RK
100	13.10	21.83	225	392	1.67
90	12.78	20.40	230	392	1.60
80	12.45	18.97	237	392	1.52
70	12.08	17.54	244	392	1.45
60	11.69	16.11	252	392	1.38
50	11.25	14.68	262	392	1.30
40	10.75	13.25	274	392	1.23
30	10.19	11.81	289	392	1.16
20	9.51	10.38	309	392	1.09
10	8.68	8.95	340	392	1.03

Tabela 3.1 - Valores dos Parâmetros quando o Custo da Ferramenta (kft) tende a Valores Altos

TFT	K(V0)	K(VHXP)	V0	VHXP	RK
0.5	13.10	21.83	225	392	1.67
1.0	13.50	17.61	218	327	1.30
1.5	13.87	16.41	212	293	1.18
2.0	14.21	15.97	207	272	1.12
2.5	14.54	15.86	203	257	1.09
3.0	14.84	15.87	199	245	1.07
3.5	15.13	15.96	195	235	1.06
4.0	15.40	16.09	191	227	1.04
4.5	15.66	16.25	188	220	1.04
5.0	15.91	16.41	185	214	1.03

Tabela 3.2 - Valores dos Parâmetros quando o Tempo de Troca da Ferramenta (tft) tende a Valores Altos

SM	K(V0)	K(VHXP)	V0	VHXP	RK
160	13.10	21.83	225	392	1.67
190	13.28	21.97	226	392	1.65
220	13.46	22.10	227	392	1.64
250	13.64	22.24	228	392	1.63
280	13.82	22.37	229	392	1.62
310	14.00	22.51	230	392	1.61
340	14.18	22.65	230	392	1.60
370	14.36	22.78	231	392	1.59
400	14.53	22.92	232	392	1.58
430	14.71	23.05	233	392	1.57

Tabela 3.3 - Valores dos Parâmetros quando o Salário-
Homem tende a Valores Altos

SM	K(V0)	K(VHXP)	V0	VHXP	RK
1500	13.10	21.83	225	392	1.67
2000	16.05	24.10	239	392	1.50
2500	18.89	26.36	250	392	1.40
3000	21.63	28.63	259	392	1.32
3500	24.31	30.89	267	392	1.27
4000	26.94	33.16	274	392	1.23
4500	29.52	35.42	280	392	1.20
5000	32.08	37.69	286	392	1.17
5500	34.60	39.96	290	392	1.15
6000	37.10	42.22	295	392	1.14

Tabela 3.4 - Valores dos Parâmetros quando o Salário-
Máquina tende a Valores Altos

Uma análise das tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 mostra que em qualquer situação para o caso 1, a relação R_k é decrescente. Em outras palavras, pode-se dizer que nestas situações a $vmxp$ é condição necessária e suficiente para definição da velocidade de corte ótima.

CASO 2 - Quando o índice D tende a infinito.

Neste caso, as seguintes opções podem ocorrer, individualmente ou simultaneamente:

- . O custo da ferramenta (kft) tende a valores muito baixos
- . O salário-homem (Sh) tende a valores muito baixos
- . O salário-máquina (Sm) tende a valores muito baixos
- . O tempo de troca da ferramenta (tft) tende a valores muito altos

A situação no CASO 2 não é tão clara como no CASO 1, sendo portanto necessário a análise de cada item individualmente.

- a) - Quando o Tempo de Troca da Ferramenta (tft) tende a valores muito baixos

TFT	K(V0)	K(VHXP)	V0	VHXP	Rk
0.5	13.10	21.83	225	392	1.67
0.46	13.06	22.57	225	401	1.73
0.42	13.03	23.46	226	410	1.80
0.38	13.00	24.51	227	421	1.89
0.34	12.96	25.81	227	434	1.99
0.30	12.93	27.42	228	448	2.12
0.26	12.89	29.50	229	465	2.29
0.22	12.86	32.26	229	486	2.51
0.18	12.82	36.13	230	513	2.82

Tabela 3.5 - Valores dos Parâmetros quando o Tempo de Troca da Ferramenta (tft) tende a Valores Baixos.

SH	K(V0)	K(VHXP)	V0	VHXP	RK
160	13.10	21.83	225	392	1.67
146	13.01	21.77	225	392	1.67
132	12.93	21.70	224	392	1.68
118	12.84	21.64	223	392	1.68
104	12.75	21.58	223	392	1.69
90	12.67	21.51	223	392	1.70
76	12.59	21.45	222	392	1.70
62	12.50	21.39	222	392	1.71
48	12.41	21.32	221	392	1.72
34	12.33	21.26	221	392	1.73

Tabela 3.6 - Valores dos Parâmetros quando o Salário-Homem tende a Valores Baixos

Pode-se concluir, pela análise da tabela 3.5, que a tendência de R_k é crescente, mostrando que, neste caso, deve-se ter cuidado ao afirmar que a obtenção da $vmxp$ é condição suficiente para definição da velocidade de corte mais adequada. Em situações práticas, no entanto, pode-se considerar esta situação pouco comum, porque a redução de tft leva a valores muito altos de $vmxp$, dificilmente utilizados.

b) - Quando o Salário-Homem tende a valores muito baixos

Uma análise da tabela 3.6 mostra que a tendência de crescimento de R_k é muito lenta. Pode-se perceber que todos os outros parâmetros variam muito pouco com a variação de Sh , sendo, portanto, este parâmetro de pouca importância na análise.

c) - Quando o Salário-Máquina tende a valores muito baixos

Pela análise da tabela 3.7, pode-se perceber que a tendência de RK é nitidamente crescente e a de $k(vmxp)$ é decrescente, mostrando que, se em termos relativos a relação R_k é crescente, em termos absolutos ela pode ser de pouca importância.

d) - Quando o Custo da Ferramenta (kft) tende a valores muito altos

SM	K(V0)	K(VHXP)	V0	VHXP	RK
1500	13.10	21.83	225	392	1.67
1360	12.24	21.20	220	392	1.73
1220	11.37	20.56	216	392	1.81
1080	10.48	19.93	210	392	1.90
940	9.57	19.30	204	392	2.02
800	8.63	18.66	197	392	2.16
660	7.66	18.02	190	392	2.35
520	6.65	17.39	181	392	2.61
380	5.60	16.76	171	392	2.99
240	4.47	16.12	159	392	3.60

Tabela 3.7 - Valores dos Parâmetros quando o Salário-Máquina (Sm) tende a Valores Baixos

KFT	K(V0)	K(VHXP)	V0	VHXP	RK
100	13.10	21.83	225	392	1.67
150	14.41	28.99	204	392	2.01
200	15.46	36.14	191	392	2.34
250	16.34	43.29	180	392	2.65
300	17.10	50.45	172	392	2.95
350	17.78	57.60	166	392	3.24
400	18.40	64.76	160	392	3.52
450	18.96	71.91	155	392	3.79
500	19.47	79.07	151	392	4.06

Tabela 3.8 - Valores dos Parâmetros quando o Custo da Ferramenta (kft) tende a Valores Altos

Esta é a situação crítica, pois tanto R_k como $k(v_{mxp})$ tem tendência crescente, como mostra a tabela 3.8. Numa situação deste tipo a escolha da v_{mxp} como velocidade de trabalho pode elevar consideravelmente os custos.

3.5 - Conclusões

Pode-se concluir, que, especialmente em situações onde o custo da ferramenta é muito alto não devemos generalizar a escolha da v_{mxp} como velocidade ótima. O mais adequado seria, nestes casos, fazer uma avaliação individual da situação.

CAPITULO 4 - MODELOS DETERMINISTAS E PROBABILISTAS DE OTIMIZAÇÃO

4.1 - Introdução

Como foi descrito no Capítulo 3, a obtenção de valores ótimos para a velocidade de corte (v_0, v_{mxp} , etc.), segundo a abordagem clássica, pressupõe que:

- a) - A Equação de Taylor é válida para uma gama de velocidades de corte dentro do campo utilizado em produção.
- b) - O critério de vida é bem definido e reflete as necessidades do interessado.

Será discutido agora a validade destas considerações.

4.2 - Critérios de Vida

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.

Pode-se definir a vida da ferramenta como o tempo que a mesma trabalha adequadamente de acordo com algum critério

escolhido. Portanto, a vida da ferramenta é um conceito relativo, relacionado com cada situação específica.

Apresentar-se-á abaixo os critérios mais utilizados [12][13][14].

a - Destruição da Aresta Cortante

Este critério é muito utilizado em situações práticas, principalmente em desbaste, ou seja, onde as exigências de tolerâncias dimensionais e acabamento superficial não são muito severas. A destruição da aresta cortante pode ocorrer por quebra, lascamento, queima (desgaste acelerado) ou por amolecimento.

b - Valores Estabelecidos para o Desgaste de Cratera (KT) ou de Flanco (VB)

São de difícil obtenção por exigirem o monitoramento do desgaste, sendo portanto mais utilizado em ensaios de laboratório. A fig. 4.1 mostra a caracterização dos desgastes de flanco e cratera.

c - Variação das Forças de Corte

É adequada quando se deseja a medição do desgaste durante o processo, mas implica na utilização de instrumentação inadequada para o ambiente de produção.

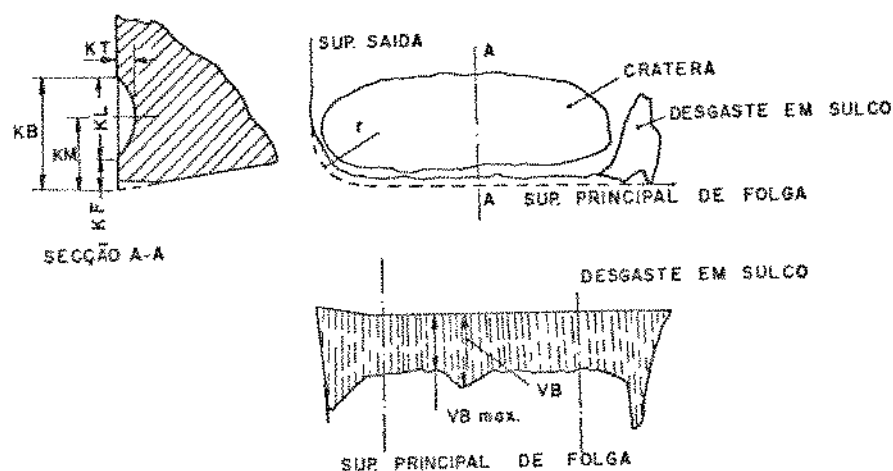


Figura 4.1 - Desgastes de Cratera (KT) e de Flanco (VB) [12]

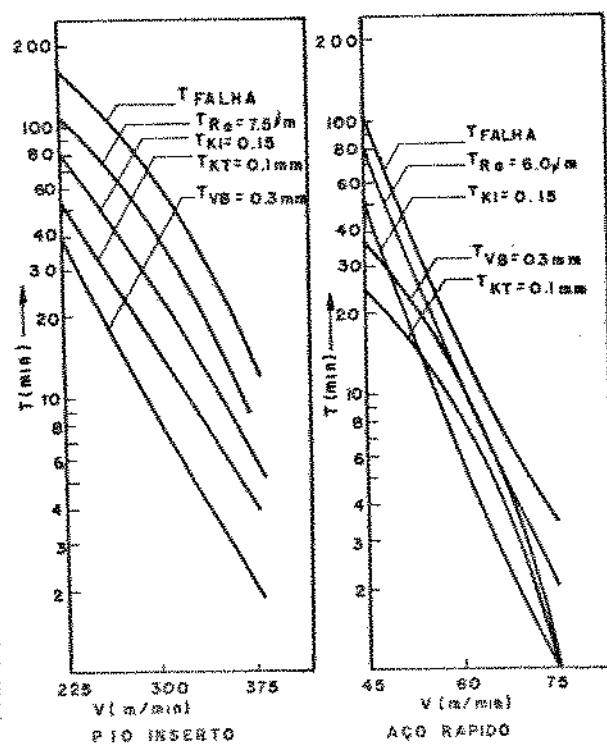


Figura 4.2 - Relação Vida-Velocidade de Corte para Diversos Critérios de Vida [12]

d - Tolerâncias da Peça

é o instante a partir do qual não se consegue mais garantir as tolerâncias previstas para o processo. É muito adequado para situações práticas onde já esteja implantado, por exemplo, acompanhamento de dimensões através de Cartas de Controle. Em operações de acabamento, este pode ser o critério de fim de vida mais adequado. A rugosidade superficial pode ser associada com o desgaste ou com vibrações que normalmente aumentam com o desgaste da ferramenta.

A definição do critério de vida é de fundamental importância por influenciar nas constantes experimentais das equações de vida (p. ex. x e k da Equação de Taylor). 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.

Como neste trabalho tem-se a intenção de elaborar uma metodologia prática para otimização do processo, pode-se descartar os critérios "b" e "c" que são trabalhosos e exigem instrumentação mais sofisticada. Discutir-se-á os

outros três critérios para verificar-se quais deles são os mais adequados.

O critério de Destruição da Aresta Cortante é o mais simples de todos por não exigir a introdução de nenhum instrumento ou operação auxiliar, mas apresenta algumas desvantagens. Nem sempre há disposição de esperar a quebra de uma ferramenta por implicar em retrabalho da peça, além de existir o risco de quebra do suporte da ferramenta. A utilização do critério de queima nem sempre é aceitável por causa da subjetividade no julgamento do fim da vida pelo operador.

Os critérios de Tolerância Dimensional e Acabamento Superficial são mais precisos que os anteriores por estabelecerem como fim da vida, o momento em que a ferramenta não trabalha mais de maneira satisfatória (as peças não tem mais qualidade aceitável). Um dos inconvenientes destes critérios é a necessidade, na maioria dos casos, de operações complementares de inspeção.

Concluiu-se que o seguinte procedimento pode ser utilizado:

a - Em situações onde o retrabalho é aceitável ou onde a quebra da ferramenta não é traumática (quebra do suporte, quebra de duas arestas simultaneamente, etc.), utilizar o critério de quebra da ferramenta ou de qualidade da peça.

b - Em situações onde o retrabalho não é desejado ou onde a quebra da ferramenta é traumática, utilizar o critério de queima da ferramenta ou qualidade da peça. Neste caso deve-se considerar que os resultados são dependentes da sensibilidade do operador.

4.3 - Abordagem Determinista

Como foi visto no item anterior, um dos problemas a ser resolvido quando se deseja otimizar as condições de usinagem é a coleta de dados com respeito à vida das ferramentas.

O segundo passo a ser seguido é o estabelecimento de Equações de Vida utilizando os dados coletados.

F. W. Taylor [16] foi o primeiro pesquisador a apresentar um modelo que relacionasse a vida da ferramenta com os parâmetros de usinagem, estabelecendo a conhecida Equação de Taylor [15][16]:

$$k = T.v^x \quad (4.1)$$

ou sua expandida

$$k = T.v^x . a^y . p^z \quad (4.2)$$

onde, T - vida da ferramenta [min]

v - velocidade de corte [m/min]

a - avanço [mm]

p - profundidade de corte [mm]

x, y, z, k - constantes

Woxen [15] em 1932, apresentou uma expressão que melhor representava os resultados experimentais obtidos, que apresentavam uma relação não linear numa escala di-logarítmica. A expressão de Woxen é mostrada pela equação 4.3.

$$v = \left[\left(\frac{T^*}{T} \right) + c_1.T \right] . C_w . \left[\frac{q + q_0(T)}{1 + c_w.q} \right] \quad (4.3)$$

onde, q - cavaco equivalente

c_1, c_w, C_w - constantes

Kronenberg [15], em 1954, desenvolveu uma nova equação utilizando a relação p/a . A expressão de Kronenberg é mostrada pela equação 4.4.

$$v = \left(\frac{T^*}{T} \right)^{\alpha} . \frac{C_k . (p/a)^{\gamma} (90 - \chi)}{(a.p)^{\beta} (90 - \chi)} \quad (4.4)$$

onde, χ - ângulo de posição

$C_k, \alpha, \beta, \gamma$ - constantes

Finalmente, Colding [15] em 1960 e König-Depiereux [15] em 1969 publicaram, como Woxen, relações não-lineares, que são mostradas nas equações 4.5 e 4.6.

$$k + a.x + b.x^2 + c.y + d.y^2 - z + e.z^2 = 0 \quad (4.5)$$

onde, $x = \ln q$

$y = \ln v$

$z = \ln T$

k, a, b, c, d, e - constantes

$$T = \exp \left(-\frac{k_v.v^m}{m} - \frac{i_s.a^n}{n} + C \right) \quad (4.6)$$

onde, k_v, m, n, i_s, C - constantes

Em verificações experimentais da relação entre a vida da ferramenta e a velocidade de corte, constatou-se que a forma da curva Vida x Velocidade de Corte depende do critério de vida utilizado como mostra a fig. 4.2.

No entanto, percebeu-se que a não linearidade, em escalas di-logaritmicas, das curvas de vida, era comum em todas as experiências mostrando que as relações de Colding e Konig-Depiereux representavam mais fielmente os resultados experimentais.

Isto levou à conclusão de que " embora, para muitos objetivos práticos, a Equação de Taylor ou sua versão generalizada sejam importantes, fica evidente que a mesma deva ser utilizada com cuidado, tanto na prática industrial como na pesquisa ."[15]

As evidências da não-linearidade da curva de vida numa escala di-logarítmica levaram à utilização do Intervalo de Validade da Equação de Taylor, ou seja, a aproximação da Curva de Vida por uma série de retas, como mostra a fig. 4.3 [11].

A terceira e última etapa que se deve seguir no processo de otimização das condições de usinagem é o desenvolvimento de modelos de otimização baseados nas equações de vida propostas anteriormente. No capítulo 3 apresentou-se uma metodologia tradicional para a otimização das condições de usinagem. De acordo com esta metodologia deve-se:

- Escolher avanços e profundidades de corte máximos de acordo com as limitações do sistema.
- Escolher uma velocidade de corte otimizada (mínimo custo, máxima produção, etc.).

Esta metodologia tradicional, baseada nos trabalhos de Taylor (1907) e Gilbert (1950), no entanto, apresenta uma série de limitações:

- a - A Equação de Taylor não representa exatamente a relação vida-velocidade de corte. A aproximação através de intervalos de validade se faz necessária tornando

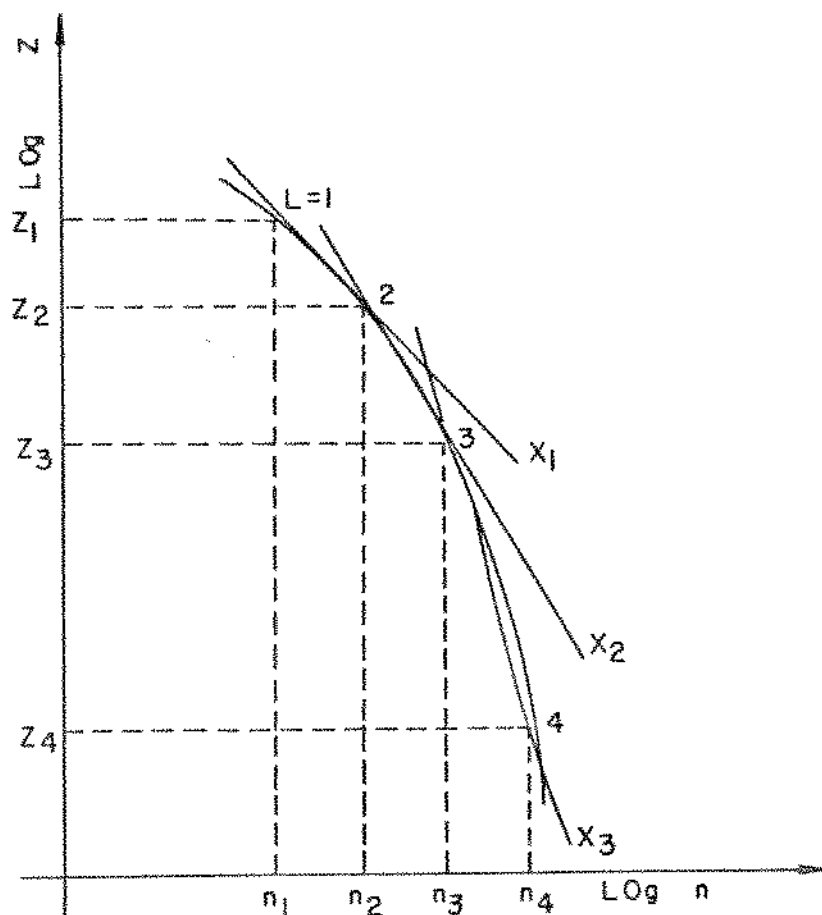


Figura 4.3 - Intervalos Linearizados da Equação de Taylor

[111]

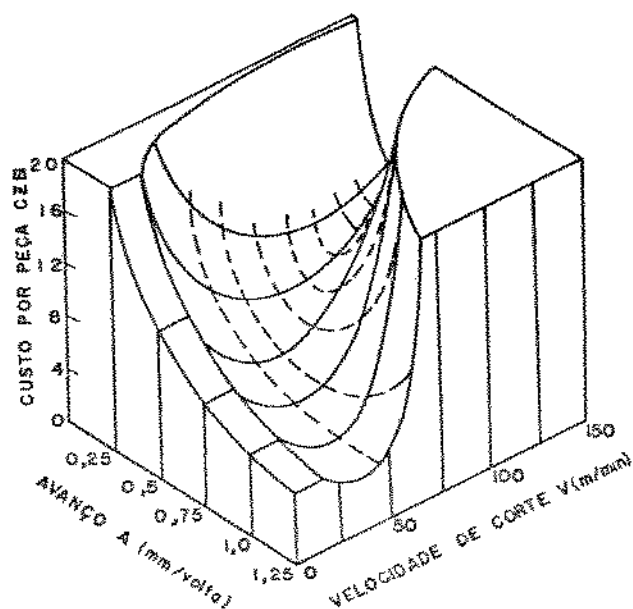


Figura 4.4 - Relação Vida-Velocidade de Corte-Avanço (B)

obrigatório a utilização de processos iterativos para a obtenção de valores ótimos da velocidade de corte [11][15].

b - A metodologia tradicional não permite a otimização de outros parâmetros de usinagem que não a velocidade de corte. A utilização da equação expandida (4.2) leva a expressões matemáticas que não permitem a obtenção de valores ótimos, como mostra a fig. 4.4 [8][15].

c - Os coeficientes x e k de Taylor devem ser obtidos com a maior exatidão possível por causa da sensibilidade das equações de otimização. Pequenas variações nos coeficientes de Taylor provocam grandes variações nas velocidades de corte ótimas obtidas [15].

Alguns pesquisadores, como Colding e König-depiereux, sugeriram outros modelos, mas ainda hoje a metodologia tradicional é muito utilizada na otimização das condições de usinagem, de acordo com a literatura especializada [17][18][14][19][9].

4.4 - A Natureza Estocástica da Vida de Ferramentas de Corte

Até o momento estudou-se o comportamento da ferramenta em relação à sua durabilidade, sob o ponto de vista determinista. Na prática, no entanto, a situação é diferente existindo uma variabilidade na vida da ferramenta para as

mesmas condições de trabalho. Alguns pesquisadores estudaram esta variabilidade, entre eles Wager e Barash [20] estudaram a distribuição da vida em ferramentas de aço rápido. A fig. 4.5 mostra a distribuição de frequência na vida de brocas de aço rápido.

Uma série de fatores podem ser considerados responsáveis pela variabilidade da vida de ferramentas, tais como: dureza da peça [33], inclusões [21], efeito termoelétrico [20], heterogeneidades do material da ferramenta [34] e heterogeneidades do material da peça [34]. Nenhum destes fatores pode, no entanto, ser considerado isoladamente como responsável pelas largas dispersões verificadas nas vidas de ferramentas de corte. Parece claro que a pequena contribuição de vários fatores é responsável pela variabilidade da vida de ferramentas de corte, caracterizando um processo probabilista [20].

A constatação da natureza estocástica da vida de ferramentas de corte levou muitos autores a fazerem algum tipo de análise estatística das equações até então utilizadas. A fig. 4.6 mostra, por exemplo, como se pode fazer uma interpretação probabilista da Equação de Taylor.

Levi e Rosseto [22] desenvolveram estudos em dados de vidas de ferramentas utilizando a técnica de Análise de Regressão, tomando como equação básica a Equação de Taylor. Estes estudos mostraram que o número mínimo de experiências necessárias para a obtenção dos coeficientes da Equação de

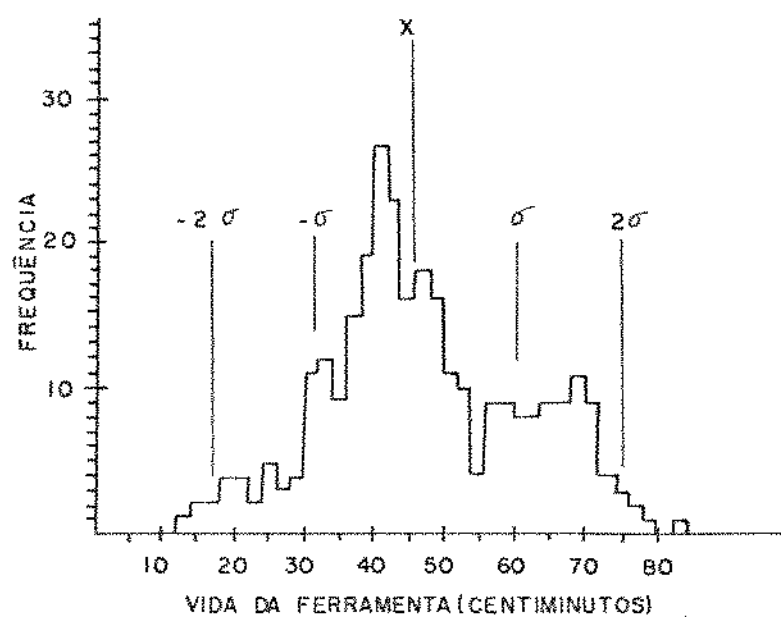


Figura 4.5 - Variabilidade da Vida de Brocas de Aço Rápido

[20]

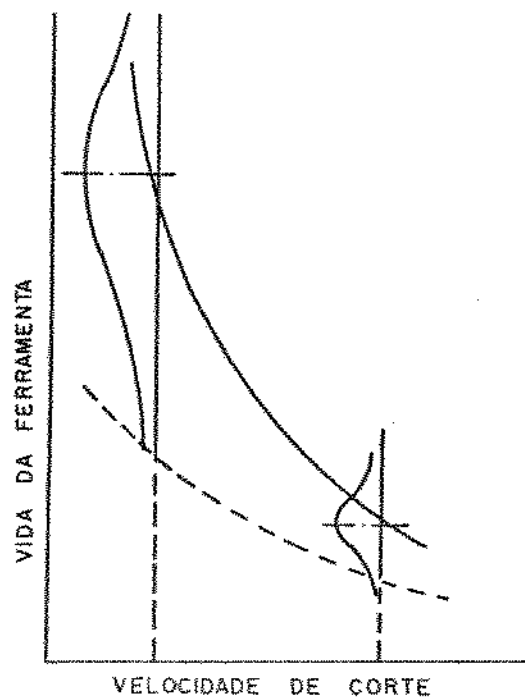


Figura 4.6 - Relação Vida-Velocidade de Corte para uma Definição Probabilista da Vida de Ferramentas de Corte [22]

Taylor com uma confiabilidade razoável é muito grande, sendo um procedimento pouco prático.

Os argumentos acima mostram que uma interpretação determinista das equações de vida leva a resultados pouco confiáveis devido à natureza estocástica da vida das ferramentas de corte.

4.5 - Abordagem Probabilista

O desenvolvimento de modelos probabilistas de otimização foi uma consequência natural da constatação da natureza estocástica da vida das ferramentas. Para o desenvolvimento destes modelos probabilistas tornou-se necessário o estudo da distribuição de frequência da vida das ferramentas de corte.

Uma série de pesquisadores desenvolveram modelos probabilistas, tais como: Rosseto e Levi [24], Ramalingam e Watson [25], Ramalingam [26], Pandit [27], Sheikh; Kendall e Pandit [23], Zdeblick [28], Sekulic [29], Billatos; Bayoumi; Kendall e Saunders [30]. Os modelos citados baseiam-se no princípio de que uma distribuição de frequência qualquer seja estabelecida, além de outras restrições características de cada modelo. A obtenção destas distribuições, no entanto, requer uma quantidade elevada de dados obtidos em condições controladas de laboratório que dificilmente são extrapoláveis para as condições de produção industrial.

Existem algumas considerações que devem ser feitas a respeito dos modelos deterministas e probabilistas:

- A abordagem determinista clássica nos fornece uma aproximação inadequada para as velocidades de mínimo custo e máxima produção, já que os valores obtidos podem superestimar os valores reais por um fator de até dois [31].

- A consideração de que existe uma independência estocástica entre a fratura e o desgaste, normalmente utilizada para o desenvolvimento de modelos probabilistas é questionável sob o ponto de vista estatístico [32].

- Existe a necessidade de desenvolvimento de modelos mais elaborados de maneira a representar mais adequadamente as condições reais da prática [31].

CAPITULO 5 - METODOLOGIA

5.1 - Introdução

Os capítulos anteriores mostraram que existem uma série de abordagens no problema da otimização das condições de usinagem. Todos os modelos apresentados, no entanto, tem restrições de uso em função de limitações específicas de cada um dificultando a escolha do modelo mais adequado.

Neste trabalho optou-se pela metodologia tradicional baseada nos trabalhos de Taylor e Gilbert [8], como descrito no Capítulo 3. Em capítulos posteriores serão analisados os resultados dentro das limitações impostas pela utilização da metodologia tradicional.

Neste capítulo descreve-se o método utilizado para coleta e análise dos dados obtidos numa indústria da região. Descreve-se também a metodologia experimental na análise da rugosidade superficial como critério de fim de vida.

5.2 - Descrição do Método

Primeiro, será descrito a metodologia adaptada do trabalho de Rodrigues, Diniz e Cupini [7] para dois casos distintos:

- CASO 1

a) Utilização das condições de usinagem já estabelecidas pelo processo em uso.

b) Utilização do critério de vida estabelecido pelo operador, baseado em sua experiência.

c) Com as condições acima, inicia-se a operação, contando-se o número de peças usinadas por vida da ferramenta.

d) Mede-se o tempo de corte t_{oi} três vezes, obtendo-se um tempo de corte médio (reduzir erro de reprodutibilidade).

e) Após computação de amostragem estatisticamente significativa para essas condições, aumenta-se a velocidade de corte da ordem de 20%.

f) Repete-se a computação de amostragem também significativa para a nova condição e a medição do tempo de corte. Caracterizando-se as situações aqui mencionadas como (i) e (i+1) pode-se associar às mesmas, velocidades v_i e v_{i+1} , o número médio de peças por vida correspondentes z_i e z_{i+1} e os tempos de corte t_{oi} e t_{oi+1} .

h) Como, na prática, a curva de vida de uma ferramenta não é uma reta no diagrama $\log$ -logarítmico, deve-se associar

intervalos de validade $(i, i+1)$ onde a curva de vida possa ser aproximada por uma reta [11]. essa situação pode-se calcular as constantes da Equação de Taylor pela seguinte formulação:

$$x = \frac{\log(z_i/z_{i+1}) + 1}{\log(v_{i+1}/v_i)} \quad (5.1)$$

$$k = z_i \cdot t_{ci} \cdot v_i^x \quad (5.2)$$

i) Paralelamente a este processo mede-se vinte vezes o tempo de troca t_{ft} obtendo-se um tempo médio de troca (vide Anexo)

j) Calcula-se a velocidade de máxima produção pela expressão:

$$vmxp1 = \left(\frac{k}{(x-1) \cdot t_{ft}} \right)^{1/x} \quad (5.3)$$

k) Compara-se $vmxp1$ com v_i e v_{i+1} . Se:

- . $vmxp1 > v_{i+1}$, repita o procedimento
- . $v_i < vmxp1 < v_{i+1}$, assuma $vmxp1$ como velocidade ótima
- . $vmxp < v_i$, repita o procedimento reduzindo v_i de 20%

- CASO 2

O procedimento é o mesmo com uma diferença apenas no item (b):

b) Critério de fim de vida

- . Desbaste: Quebra ou lascamento da ferramenta
- . Acabamento : Incapacidade do processo em segurar a
dimensão D (Fig. 5.2)
 - : Rugosidade superficial acima de valor
considerado inadequado pelo operador,
através de comparação com uma peça
padrão e utilização da sensibilidade
do mesmo através do tato
 - : Quebra ou lascamento da ferramenta

5.3 - Descrição do Sistema

O método foi aplicado numa célula de fabricação com a seguinte distribuição física de equipamentos (Fig. 5.1).

- Torno CNC
- Cortadora de dentes de engrenagens
- Cortadora de estrias
- Furadeira múltipla
- Chanfradora de estrias
- Acabadora de dentes de engrenagens
- Gravadora de tipos
- Lavadora

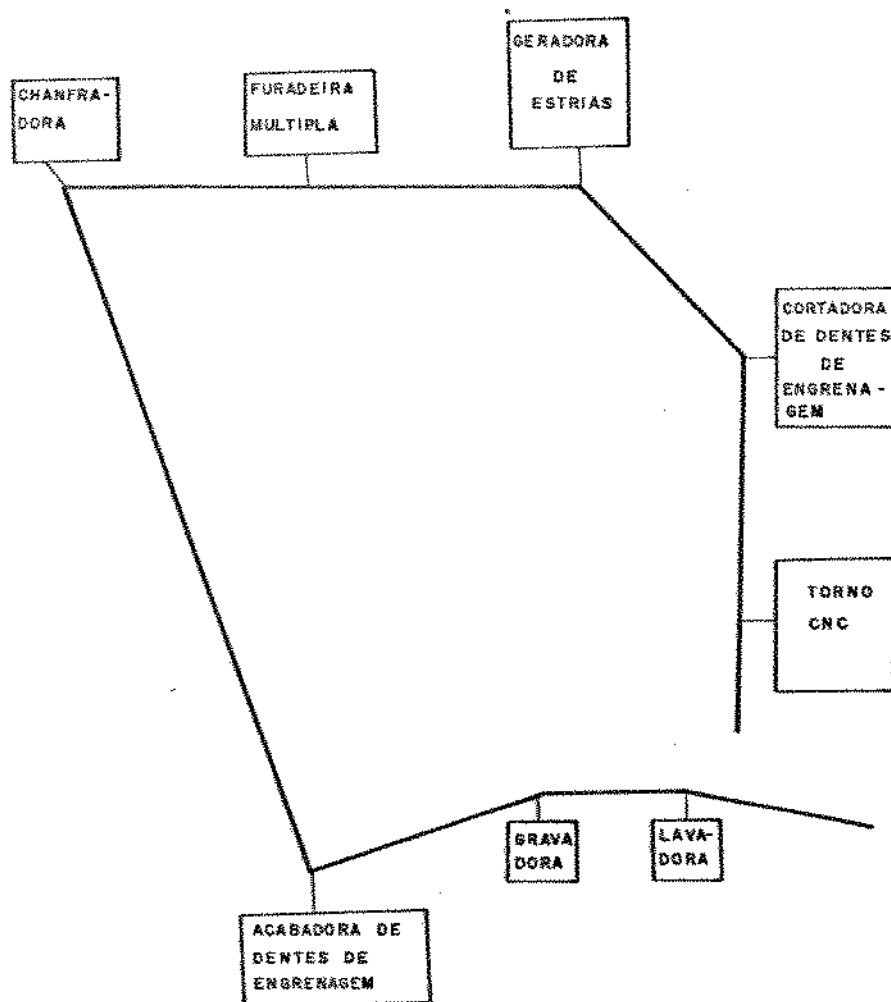


Figura 5.1 - Célula de Fabricação da Família de Engrenagens

Nas peças analisadas (foram consideradas as peças de maior demanda) a diferença entre a menor e a maior cota das diversas peças da família foi:

COTA	DIFERENÇA[mm]
A	19 a 28
B	135 a 261
C	45 a 81
D	97
E	111
F	42 a 49
Canais	0 a 2

Tabela 5.1 - Variação das Principais Dimensões das Peças

O ferramental utilizado para usinagem das peças foi padronizado e tem as seguintes características[38]:

. Ferramenta de Desbaste Externo

- Suporte: PCLNL 2525 M12
- Inserto: CNMG 120412 - GC 415
- Designação : F1P1

. Ferramenta de Desbaste Interno

- Suporte: S32V PCLNL 12
- Inserto: CNMG 120408 - GC 415
- Designação: F2P2

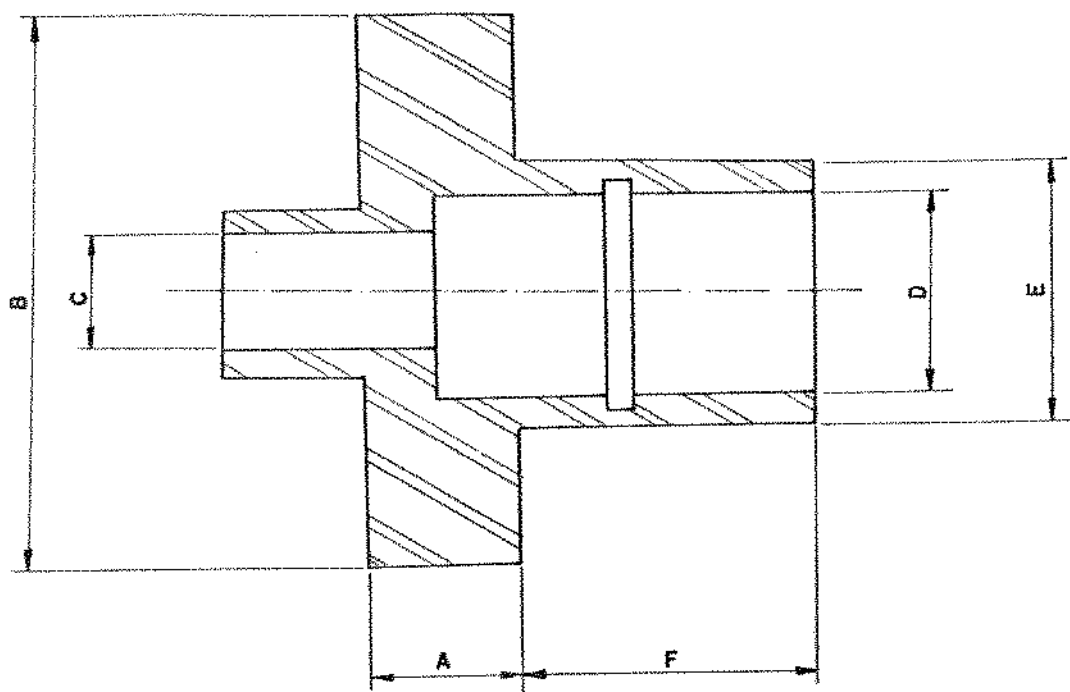


Figura 5.2 - Dimensões Gerais da Peça Usinada

. Ferramenta de Acabamento Interno

- Suporte: 500.171.35 S102
- Inserto: DNMG 150604-15 - GC 1025
- Designação: F3P2

. Ferramenta de Acabamento Externo

- Suporte: 500.171.35 S198
- Inserto: DNMG 150608 - GC 1025
- Designação: F4P1

As condições de usinagem utilizadas inicialmente são as mesmas para todas as peças da família, como descrito na Tab. 5.2.

	v [m/min]	afmm/volta
Acabamento	200	0.25
Desbaste	150	0.30

Tabela 5.2 - Condições de Usinagem Iniciais

As ferramentas do tipo bedame (para usinagem de canais) e outras de utilização mais restritas não foram consideradas no estudo.

Para todas as peças da família o material de partida era composto de forjados de aço ABNT 8620.

5.4 - Ensaio de Laboratório

5.4.1 - Introdução

A verificação dos resultados obtidos em produção industrial mostraram que existe uma variação muito grande na vida das ferramentas analisadas. Tal variabilidade foi constatada tanto nas operações de desbaste, onde o critério de fim de vida era a quebra da ferramenta, quanto nas operações de acabamento, onde o critério era mais flexível já que dependia da capacidade do operador em determinar o momento de troca da ferramenta em função das características de rugosidade superficial, através de comparação com uma peça padrão.

O objetivo das experiências de laboratório foi verificar se a variabilidade nas operações de acabamento existiria mesmo em condições controladas.

5.4.2 - Metodologia

Torneou-se quatro lotes de cinquenta (50) peças de aço ABNT 1045 com as características dimensionais mostradas na fig. 5.3.

O torneamento foi executado em apenas uma passada com as seguintes condições de usinagem:

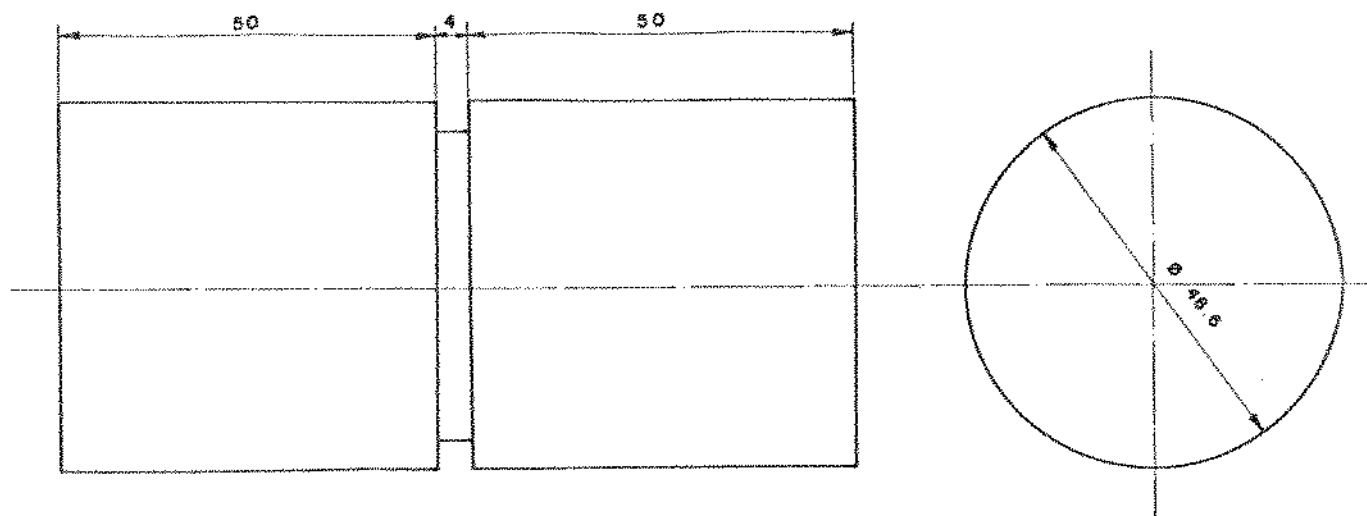


Figura 5.3 - Características da Peça Torneada em Condições de Laboratório

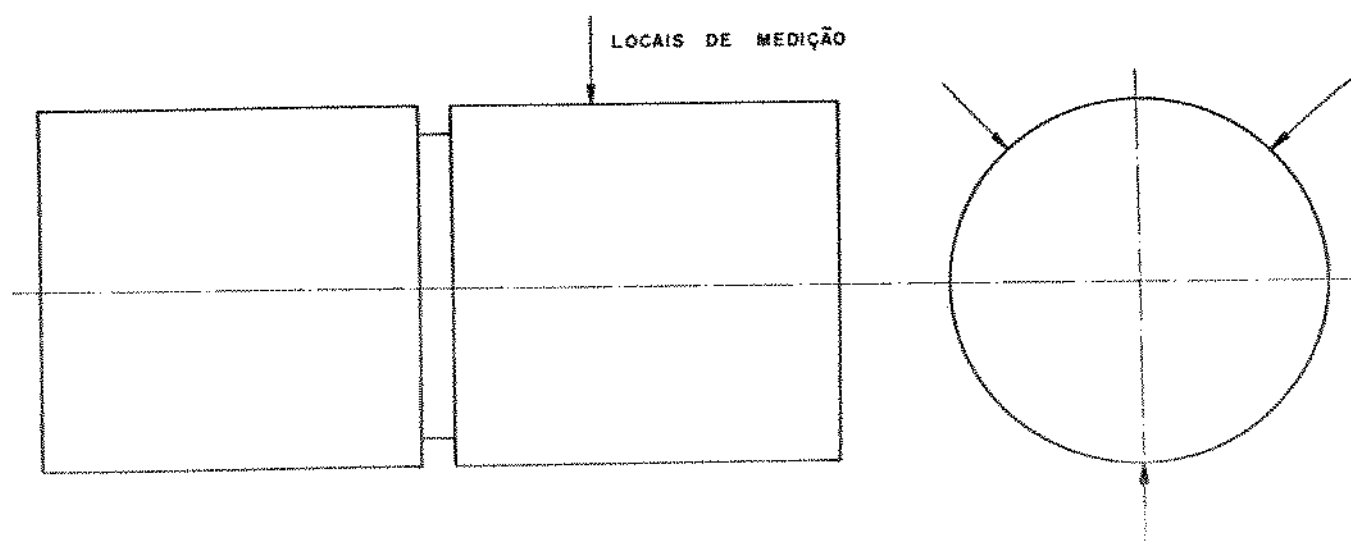


Figura 5.4 - Posições de Medida da Rugosidade

- . Profundidade de Corte (p) = 0,6 mm
- . Avanço (a) = 0,15 mm/volta
- . Velocidade de Corte (v) = 350 m/min

Não foi utilizado fluido de corte.

As características do torno e do ferramental utilizado são:

- . Torno CNC, com 30hp de potência
- . Porta Ferramenta CKJNR2525M16
- . Ferramenta KNUX160410R11 - P10

Foram efetuadas três (3) medidas da rugosidade superficial (R_a) em cada peça, conforme mostra a fig. 5.4, utilizando-se um rugosímetro com as seguintes características:

- . Rugosímetro PERTH-O-METER
- . Comprimento de Amostragem = 5mm

CAPITULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSOES

6.1 - Introdução

Este capítulo divide-se nas seguintes etapas:

- a - Apresentação e discussão dos resultados obtidos para a família de engrenagens, utilizando a metodologia mostrada no caso 1.
- b - Apresentação e discussão dos resultados obtidos para a família de engrenagens, utilizando a metodologia mostrada no caso 2.
- c - Apresentação e discussão dos resultados obtidos em condições controladas de laboratório.
- d - Comparação entre os resultados obtidos nos itens "a" e "b".
- e - Discussão sobre a possibilidade de extrapolação dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia sugerida.
- f - Discussão sobre a melhor maneira de se aplicar a metodologia, mostrando as vantagens e limitações da mesma.

6.2 - Apresentação e Discussão dos Resultados - CASO 1

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150	170	10-9-7-5-9-13 18-16-16	11.4
F1P1	180	132	8-9-7	8,0
F1P1	220	104	8-8-5-9	7,5
F2P2	150	62	10-9-7-5-9-13 18-15-17-8-4 9-9	10.2
F2P2	180	56	8-2-6-3-3	4.4
F3P2	200	24	20-28	24.0
F3P2	240	19	20	20.0
F3P2	290	15	32	32.0
F4P1	200	119	14-7-7-23-27	15.6
F4P1	240	94	10-6-7	7.7
F4P1	290	75	9-8-15	10.7

Tabela 6.1 - Resultados da Peça 1

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150	164	18-6-12-11-11 11-11-11-11 11-11	11.3
F2P2	150	65	18-8-10-11-11 11-11-11-11 11-11	11.3
F3P1	200	25	43-41	42.0
F4P1	200	100	11-11-11-11 11-11-11	11.0

Tabela 6.2 - Resultados da Peça 2

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150		15-10-15-13	13.2
F2P2	150		5-13-8-26	13.0

Tabela 6.3 - Resultados da Peça 3

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150		15-19-12-16 15-9	14.3
F2P2	150		15-19-12-16 15-9	14.3
F3P2	200		31-27-27	

Tabela 6.4 - Resultados da Peça 4

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150	79	14-8-8-19	12.2
F2P2	150	54	14-8-8-19	12.2
F3P2	200	16	46	46.0

Tabela 6.5 - Resultados da Peça 5

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150	102	9-10-6	8.3
F2P2	150	61	9-10-6	8.3
F3P2	200	21	25	25.0
F4P1	200	126	9-10-6	8.3

Tabela 6.6 - Resultados da Peça 7

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150	128	11-6-9	8.7
F2P2	150	79	11-6-9	8.7
F3P2	200	25	20	20.0
F4P1	200	126	13-7-8	9.3

Tabela 6.7 - Resultados da Peça 8

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150	125	12-10-11	11.0
F2P2	150	66	12-11-10	11.0
F3P2	200	25	28	28.0
F4P1	200	109	12-11-15	12.7

Tabela 6.8 - Resultados da Peça 8

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150		5-10-10-11	9.0
F2P2	150		16-10-11-11	12.0
F3P2	200		34	34.0

Tabela 6.9 - Resultados da Peça 10

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Pecas Usinadas	Média
F1P1	150	156	8-8-10-10-10	9.2
F2P2	150	64	17-10-10-10	12.0
F3P2	200	19	23	23.0
F4P1	200	109	7-9-10-10-10	9.2

Tabela 6.10 - Resultados da Peça 11

Com os dados obtidos construiu-se os gráficos mostrados nas figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4.

Para a peça 1, aplicou-se a metodologia para a obtenção da Velocidade de Máxima Produção obtendo-se:

	150-180/200-240	180-220/220-290
F1P1	247	368
F2P2	983	
F3P2	156	
F4P1	506	

obs: Tempo de troca $t_{ft}=1,5\text{min}$

Analisando-se os gráficos obtidos para a peça 1, pode-se perceber que não há necessidade no cálculo da $vmxp$ para as ferramentas F3P2 e F4P1, na segunda condição (180-220/220-290). No caso da ferramenta F2P2 não se obteve a vida para a segunda condição porque, já na velocidade $v=220m/min$ o processo se tornou inconveniente, com a quebra de duas arestas de corte simultaneamente e deslocamento do suporte da pista do torno.

Numa análise dos resultados obtidos pela metodologia apresentada no Caso 1, para todas as peças da família analisada, pode-se fazer as seguintes observações:

1 - O critério de vida utilizado apresentou alguns aspectos indesejáveis, quais sejam:

- Não houve concordância entre os resultados obtidos e o que se espera da relação vida-velocidade de corte. Em alguns casos (F3 e F4), houve aumento da vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte. Tal situação impossibilita a aplicação da metodologia sugerida [8].

- Houve, por parte do operador, uma tendência em efetuar a troca de ferramentas diferentes simultaneamente. Numa análise da peça 1 pode-se perceber que as ferramentas F1 e F2 foram trocadas, quase sempre, simultaneamente. Tal

situação pode ser verificada em outras peças (4,5,7,8,9,10).

2 - A variabilidade da vida das ferramentas foi muito grande, mesmo para peças do mesmo lote, podendo ser causa disto os seguintes fatores:

- . Critério de vida utilizado [12]
- . Heterogeneidade do material das peças [21][33][34]
- . Heterogeneidade do material das ferramentas [34]
- . Heterogeneidade dos sobremetais

3 - A aplicação da metodologia para obtenção da v_{mxp} não se mostrou adequada pela pouca concordância entre os resultados e as equações de vida tradicionais.

4 - Com base nestas considerações optou-se pela mudança do critério de vida das ferramentas de modo a tornar aplicável a metodologia.

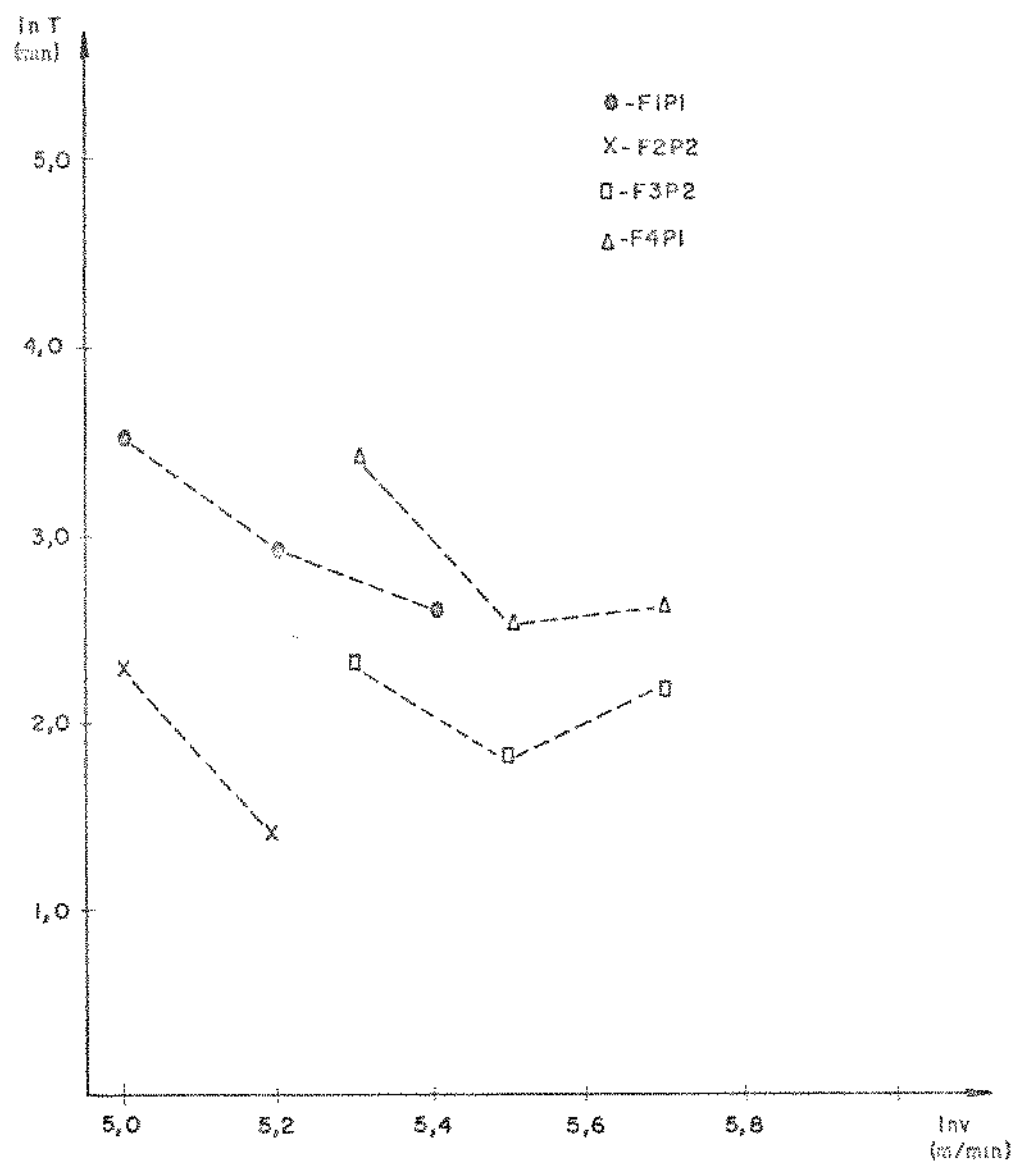


Figura 6.1 - Resultados da Aplicação da Metodologia
Apresentada no Caso 1

6.3 - Apresentação e Discussão dos Resultados - CASO 2

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150	170	35-12-24-26-23	24.0
F1P1	180	132	15-15-11-19	15.0
F1P1	220	104	7-7-6	6.7
F2P2	150	62	35-13-22-18-30	23.6
F2P2	180	56	9-11-13-11	11.0
F3P2	200	24	49-52-45	48.7
F3P2	240	19	36-37	36.5
F3P2	290	15	18-22	20.0
F4P1	200	119	49-40-57-59	51.2
F4P1	240	94	24-20-27	23.7
F4P1	290	75	9-8-15	10.7

Tabela 4.11 - Resultados da Peça 1

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150	164	23-15	19.0
F1P1	180	130	20-12	16.0
F1P1	220	105	7-6-11-12-5	8.2
F2P2	150	65	16-36	26.0
F2P2	180	57	22-18	20.0
F3P2	200	25	40	40.0
F3P2	240	19	40-30	35.0
F3P2	290	15	22	22.0
F4P1	200	100	36	36.0
F4P1	240	80	29-27	28.0
F4P1	290	65	16-12	14.0

Tabela 6.12 - Resultados da Peça 2

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150		35-45	40.0
F2P2	150		32-45	38.5

Tabela 6.13 - Resultados da Peça 3

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150		43	43.0
F2P2	150		42	42.0
F3P2	200		41	41.0

Tabela 6.14 - Resultados da Peça 4

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150	79	15-37-22-14-27	23.0
F2P2	150	54	34-76-50	55.0
F3P2	200	16	50-76-50	58.7

Tabela 6.15 - Resultados da Peça 5

Ferr.	Vel.Corte	Tempo Corte	Peças Usinadas	Média
F1P1	150	215	24-26	25.0
F2P2	150	84	40	40.0
F3P2	200	21	40	40.0
F4P1	200	96	12-28	20.0

Tabela 6.16 - Resultados da Peça 6

Com os dados obtidos construiu-se os gráficos mostrados nas figuras 6.2 e 6.3.

Para a peça 1, aplicou-se a metodologia para a obtenção da Velocidade de Máxima Produção obtendo-se:

	150-180/200-240	180-220/240-290
F1P1	331	253
F2P2	194	
F3P2	411	280
F4P1	290	295

Os valores de x e k da Equação de Taylor obtidos são mostrados abaixo:

	150-180/200-240	180-220/220-290
F1P1	$x=3,6$ $k=4,6.10E9$	$x=5,0$ $k=6,2.10E12$
F2P2	$x=5,2$ $k=5,0.10E12$	
F3P2	$x=2,6$ $k=1,9.10E7$	$x=4,2$ $k=1,1.10E11$
F4P1	$x=5,2$ $k=9,4.10E13$	$x=5,2$ $k=8,8.10E13$

Algumas observações devem ser feitas em relação aos dados obtidos para a peça 1:

1 - Em duas das quatro pastilhas analisadas para F2P2 houve falha traumática (deslocamento do suporte), quando da utilização de $v=180m/min$.

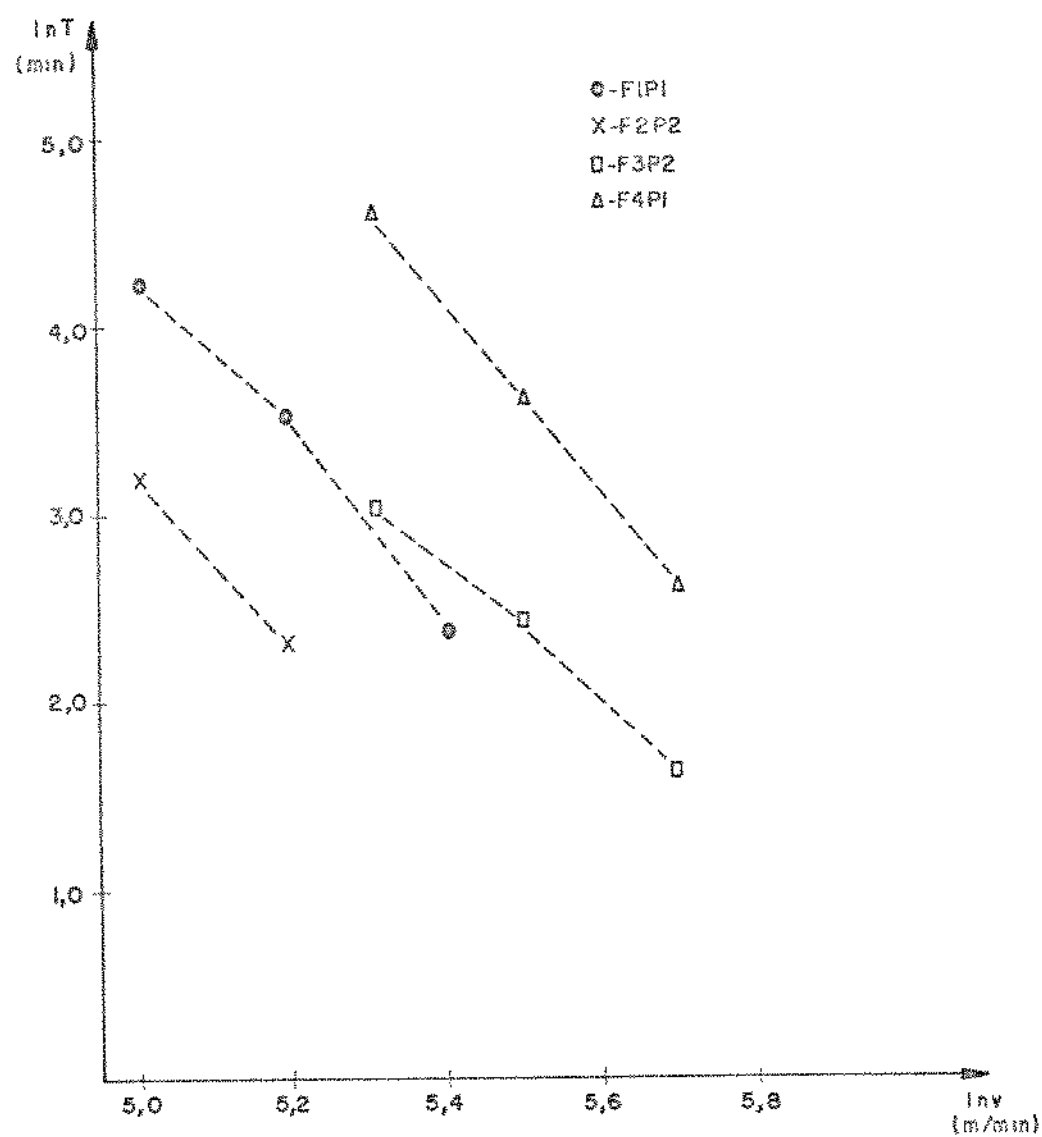


Figura 6.2 - Resultados da Aplicação da Metodologia
Apresentada no Caso 2 - Peça 1

2 - Para a ferramenta F3P2 foram considerados os seguintes tempos de troca - $t_{ft1}=1,9\text{min}$ e $t_{ft2}=1,8\text{min}$ - já que existe necessidade de retrabalho das peças.

3 - Para a ferramenta F4P1 foram considerados os seguintes tempos de troca - $t_{ft1}=3,5\text{min}$ e $t_{ft2}=3,0\text{min}$ - já que existe necessidade de retrabalho das peças.

Para a peça 2, aplicou-se a metodologia para obtenção da Velocidade de Máxima Produção obtendo-se:

	150-180/200-240	180-220/240-290
F1P1	56.543	235
F2P2	7.866	
F3P2	900	323
F4P1	590	315

Os valores de x e k da Equação de Taylor são mostrados abaixo.

	150-180/200-240	180-220/240-290
F1P1	$x=1,8$ $k=4,3.10E8$	$x=5,9$ $k=7,2.E14$
F2P2	$x=2,4$ $k=4,7.10E9$	
F3P2	$x=1,7$ $k=1,4.10E5$	$x=3,3$ $k=7,9.10E8$
F4P1	$x=2,4$ $k=2,0.10E7$	$x=4,7$ $k=5,7.10E12$

Algumas observações devem ser feitas em relação aos dados obtidos para a peça 2:

1 - Nas duas ferramentas testadas para F2P2 houve quebra simultânea das duas arestas de corte.

2 - Os tempos de troca considerados para F3P2 foram $t_{ft1}=1,9\text{min}$ e $t_{ft2}=1,8\text{min}$ já que houve necessidade de retrabalho da peça.

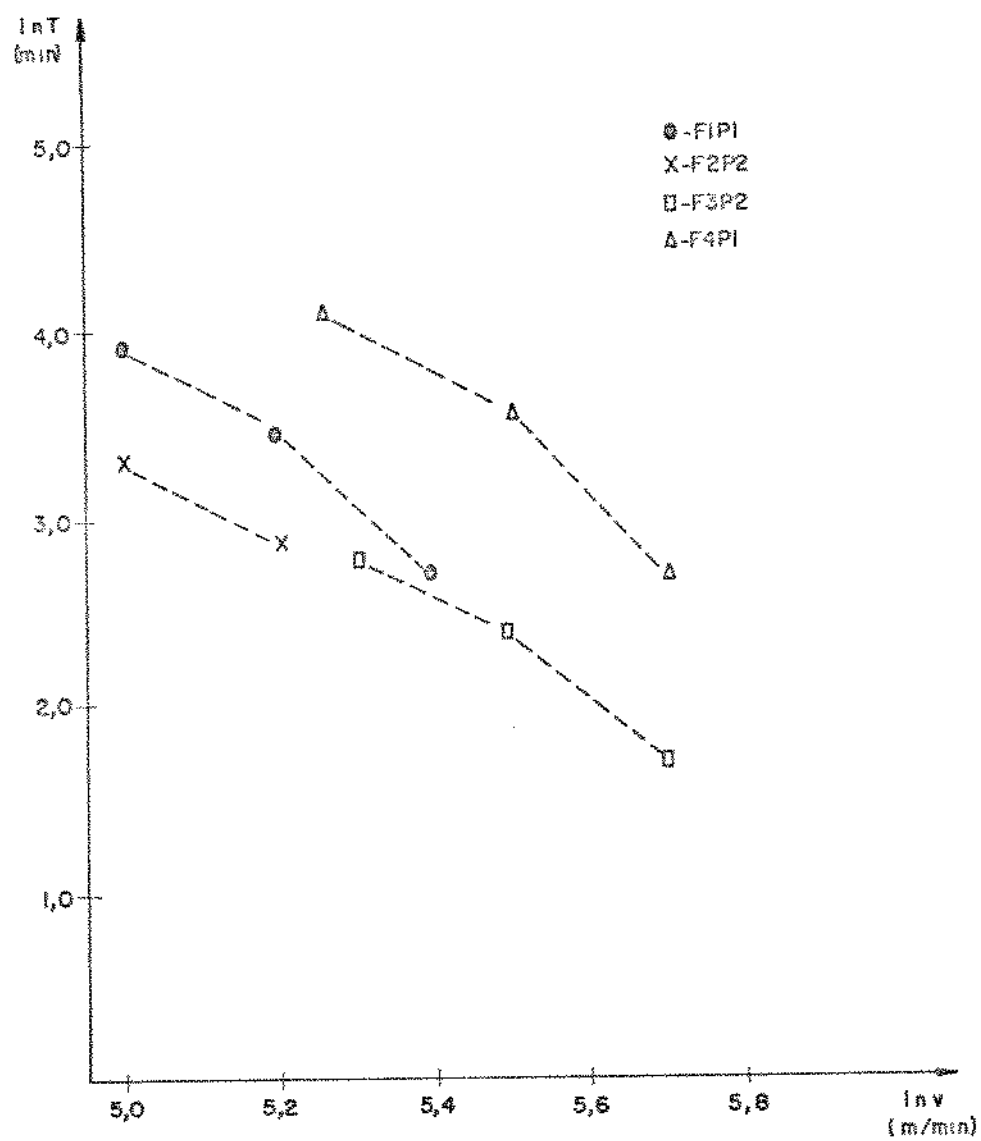


Figura 6.3 - Resultados da Aplicação da Metodologia
Apresentada no Caso 2 - Peça 2

3 - Os tempos de troca considerados para F4P1 foram $t_{ft1}=3,2\text{min}$ e $t_{ft2}=2,8\text{min}$ já que houve necessidade de retrabalho da peça.

Analisando-se os resultados obtidos com a aplicação da metodologia apresentada no caso 2, pode-se fazer as seguintes considerações:

1 - Diferentemente do caso 1, o caso 2 mostrou uma relação adequada entre os resultados obtidos e o que se espera, teoricamente, da relação vida-velocidade de corte, para o sistema analisado.

2 - A variabilidade da vida das ferramentas de corte continuou muito elevada nas operações de desbaste. Nas operações de acabamento a variabilidade foi sensivelmente menor.

3 - Os resultados obtidos para a $vmxp$ mostraram-se razoáveis (valores dentro do campo normal de utilização em tornos), especialmente nas operações de acabamento.

4 - A ocorrência frequente de falhas traumáticas nas operações de desbaste mostrou que a metodologia apresentada no caso 2 deve ser aplicada com restrições em tais operações.

6.4 - Apresentação e Discussão dos Resultados - Condições Controladas de Laboratório

Os resultados obtidos em laboratório são mostrados nas tabelas 6.17, 6.18, 6.19, 6.20 e na figura 6.4.

Uma análise destas tabelas e gráficos mostra que a variabilidade na vida de ferramentas de corte, considerando como critério de fim de vida a rugosidade superficial, é significativa, mesmo quando se trabalha em condições controladas de laboratório. Esta constatação leva a conclusão de que a variabilidade da vida das ferramentas de corte verificada em condições de produção, quando o critério de fim de vida era a sensibilidade do operador, não pode ser creditada apenas a erros de percepção do operador. Outros fatores podem, também, ser considerados responsáveis pela variabilidade verificada, tais como:

- . Heterogeneidade do material das peças (dureza, inclusões)
[21][33][34]
- . Heterogeneidade do material das ferramentas [34]

Na tentativa de mostrar mais claramente a existência de variabilidade em condições de laboratório estabeleceu-se um critério para o fim da vida das ferramentas.

Abaixo descreve-se o critério utilizado:

Peça	:	Rugosidade Ra	Peça	:	Rugosidade Ra
1	:	1,46 1,53 1,55	2	:	1,34 1,30 1,30
3	:	1,25 1,30 1,42	4	:	1,31 1,43 1,32
5	:	1,30 1,31 1,18	6	:	1,02 1,02 1,18
7	:	1,47 1,44 1,48	8	:	1,32 1,17 1,48
9	:	1,12 1,19 0,93	10	:	1,82 1,68 1,76
11	:	1,39 1,43 1,41	12	:	1,11 1,25 1,00
13	:	0,92 1,08 1,16	14	:	1,32 1,20 1,15
15	:	1,20 1,00 1,30	16	:	1,10 1,38 1,25
17	:	1,51 1,45 1,31	18	:	1,23 1,30 1,39
19	:	1,35 1,61 1,29	20	:	1,66 1,70 1,55
21	:	1,49 1,51 1,33	22	:	1,31 1,46 1,65
23	:	1,67 1,59 1,55	24	:	1,50 1,53 1,48
25	:	1,76 1,88 1,80	26	:	1,82 1,99 1,61
27	:	1,86 1,85 1,52	28	:	2,10 1,70 1,68
29	:	1,57 1,51 1,81	30	:	1,64 1,84 1,82
31	:	2,04 1,99 1,88	32	:	1,90 2,01 2,13
33	:	1,85 1,68 1,91	34	:	1,90 2,04 2,04
35	:	1,78 1,90 2,07	36	:	2,12 1,98 1,88
37	:	1,80 1,91 2,01	38	:	2,26 2,05 2,19
39	:	2,09 1,88 1,82	40	:	2,22 1,99 1,94
41	:	2,01 2,04 2,22	42	:	2,05 2,18 2,12
43	:	2,12 2,04 2,00	44	:	2,12 2,30 2,10
45	:	2,10 2,06 2,24	46	:	2,05 2,32 2,11
47	:	2,12 2,30 2,41	48	:	2,10 2,16 2,22
49	:	2,37 2,32 2,34	50	:	2,45 2,47 2,41

Tabela 6.17 - Resultados para o Ensaio No.1

1	Peça	:	Rugosidade Ra	Peça	:	Rugosidade Ra
	1	:	1,51 1,48 1,60	2	:	1,49 1,44 1,18
	3	:	1,70 1,46 1,44	4	:	1,65 1,41 1,34
	5	:	1,10 1,44 1,63	6	:	1,72 1,64 1,45
	7	:	1,67 1,78 1,90	8	:	1,30 1,43 1,69
	9	:	1,57 1,22 1,56	10	:	1,87 1,95 1,81
	11	:	1,82 1,76 1,48	12	:	1,67 1,42 1,71
	13	:	1,99 1,82 1,83	14	:	1,80 1,98 1,74
	15	:	1,72 1,46 1,50	16	:	2,05 2,06 2,07
	17	:	2,02 1,93 2,10	18	:	1,97 1,67 1,79
	19	:	1,90 2,10 2,18	20	:	2,30 2,25 2,15
	21	:	1,92 1,88 2,12	22	:	2,25 2,08 1,96
	23	:	2,08 2,11 2,20	24	:	2,25 1,98 2,15
	25	:	2,10 2,15 2,15	26	:	2,26 2,20 2,24
	27	:	2,20 2,28 2,18	28	:	2,35 2,12 1,98
	29	:	2,34 2,32 2,41	30	:	2,21 2,27 2,40
	31	:	2,30 2,32 2,34	32	:	2,59 2,50 2,43
	33	:	2,40 2,41 2,40	34	:	2,20 2,30 2,21
	35	:	2,53 2,55 2,60	36	:	2,60 2,35 2,30
	37	:	2,33 2,43 2,40	38	:	2,58 2,38 2,52
	39	:	2,45 2,50 2,50	40	:	2,53 2,45 2,38
	41	:	2,42 2,43 2,43	42	:	2,42 2,40 2,52
	43	:	2,32 2,50 2,35	44	:	2,43 2,43 2,35
	45	:	2,40 2,50 2,50	46	:	2,50 2,50 2,50
	47	:	2,43 2,60 2,50	48	:	2,50 2,58 2,46
	49	:	2,65 2,65 2,79	50	:	2,55 2,63 2,62

Tabela 6.18 - Resultados do Ensaio No.2

Peça :	Rugosidade Ra			Peça :	Rugosidade Ra		
1	: 1,40	1,75	1,42	2	: 1,81	1,63	1,53
3	: 1,80	1,60	1,77	4	: 1,60	1,88	1,62
5	: 1,81	1,55	1,58	6	: 1,52	1,75	1,81
7	: 1,69	1,53	1,85	8	: 1,93	1,47	1,85
9	: 1,76	1,66	1,63	10	: 1,94	1,85	1,56
11	: 2,10	2,08	1,78	12	: 1,64	1,76	1,81
13	: 1,70	1,91	1,87	14	: 1,68	1,75	1,66
15	: 2,10	1,98	1,95	16	: 1,90	1,85	2,00
17	: 1,97	1,88	1,58	18	: 1,82	1,90	1,60
19	: 1,92	2,12	2,25	20	: 2,00	2,05	1,76
21	: 2,24	2,24	2,22	22	: 2,38	2,42	2,40
23	: 2,02	1,88	1,70	24	: 2,38	2,19	2,00
25	: 2,40	2,19	2,00	26	: 2,00	2,02	2,07
27	: 2,10	2,10	1,88	28	: 2,42	2,39	2,55
29	: 2,25	1,90	2,10	30	: 2,02	1,98	1,82
31	: 2,36	2,30	2,40	32	: 2,08	2,18	2,18
33	: 1,97	2,15	2,27	34	: 2,48	2,40	2,15
35	: 2,08	2,23	2,42	36	: 2,23	2,02	2,08
37	: 2,15	2,40	2,17	38	: 2,06	2,12	2,30
39	: 2,10	2,20	2,00	40	: 2,13	2,26	2,43
41	: 1,93	1,90	2,20	42	: 2,13	2,10	2,15
43	: 2,32	2,13	2,05	44	: 2,00	2,35	2,30
45	: 2,65	2,15	2,25	46	: 2,35	2,35	2,40
47	: 2,40	2,30	2,27	48	: 2,30	2,55	2,50
49	: 2,40	2,35	2,50	50	: 2,33	2,45	2,28

Tabela 6.19 - Resultados do Ensaio No. 3

Peça	:	Rugosidade	Ra	Peça	:	Rugosidade	Ra
1	:	1,12	1,44	1,32	2	:	1,64 1,51 1,45
3	:	1,25	1,50	1,46	4	:	1,37 1,32 1,50
5	:	1,40	1,38	1,62	6	:	1,60 1,18 1,40
7	:	1,65	1,40	1,20	8	:	1,45 1,52 1,58
9	:	1,69	1,59	1,57	10	:	1,21 1,38 1,40
11	:	1,49	1,54	1,26	12	:	1,40 1,58 1,57
13	:	1,40	1,32	1,48	14	:	1,61 1,27 1,36
15	:	1,69	1,81	1,50	16	:	1,65 1,25 1,65
17	:	1,42	1,63	1,60	18	:	1,50 1,38 1,50
19	:	1,80	1,52	1,72	20	:	1,42 1,61 1,67
21	:	1,99	2,30	2,52	22	:	2,40 2,25 2,39
23	:	2,28	2,60	2,42	24	:	2,25 2,50 2,60
25	:	2,48	2,20	2,60	26	:	2,46 2,51 2,55
27	:	2,30	2,47	2,42	28	:	2,85 2,60 2,65
29	:	2,80	2,52	2,81	30	:	2,60 2,62 2,82
31	:				32	:	2,58 2,85 2,82
33	:	2,85	2,59	2,78	34	:	3,00 2,95 2,95
35	:	2,60	2,71	2,90	36	:	2,95 2,90 2,83
37	:	2,84	2,88	3,05	38	:	3,12 2,89 2,96
39	:	2,90	3,15	3,35	40	:	3,28 3,02 2,92
41	:	3,20	3,23	2,94	42	:	3,25 3,02 3,05
43	:	3,15	3,30	3,51	44	:	3,22 3,35 3,40
45	:	3,65	3,38	3,30	46	:	3,40 3,31 3,13
47	:	3,20	3,15	3,08	48	:	3,10 3,10 3,11
49	:	3,11	3,30	3,27	50	:	

Tabela 6.20 - Resultados do Ensaio No.4

. Estabelece-se uma curva através dos pontos obtidos para cada um dos ensaios. Esta curva é obtida através de Análise de Regressão.

. Estabelece-se um valor de rugosidade superficial para o qual se considera terminada a vida da ferramenta.

. Através das Equações de Regressão e dos valores de rugosidade estabelecidos obtém-se o número de peças para a vida de cada ferramenta.

A Análise de Regressão forneceu, para os dados analisados, as seguintes equações:

- Ensaio No.1

$$Ra = 1.09 + 0,0239z \quad (6.1)$$

- Ensaio No.2

$$Ra = 1,48 + 0,0246z \quad (6.2)$$

- Ensaio No.3

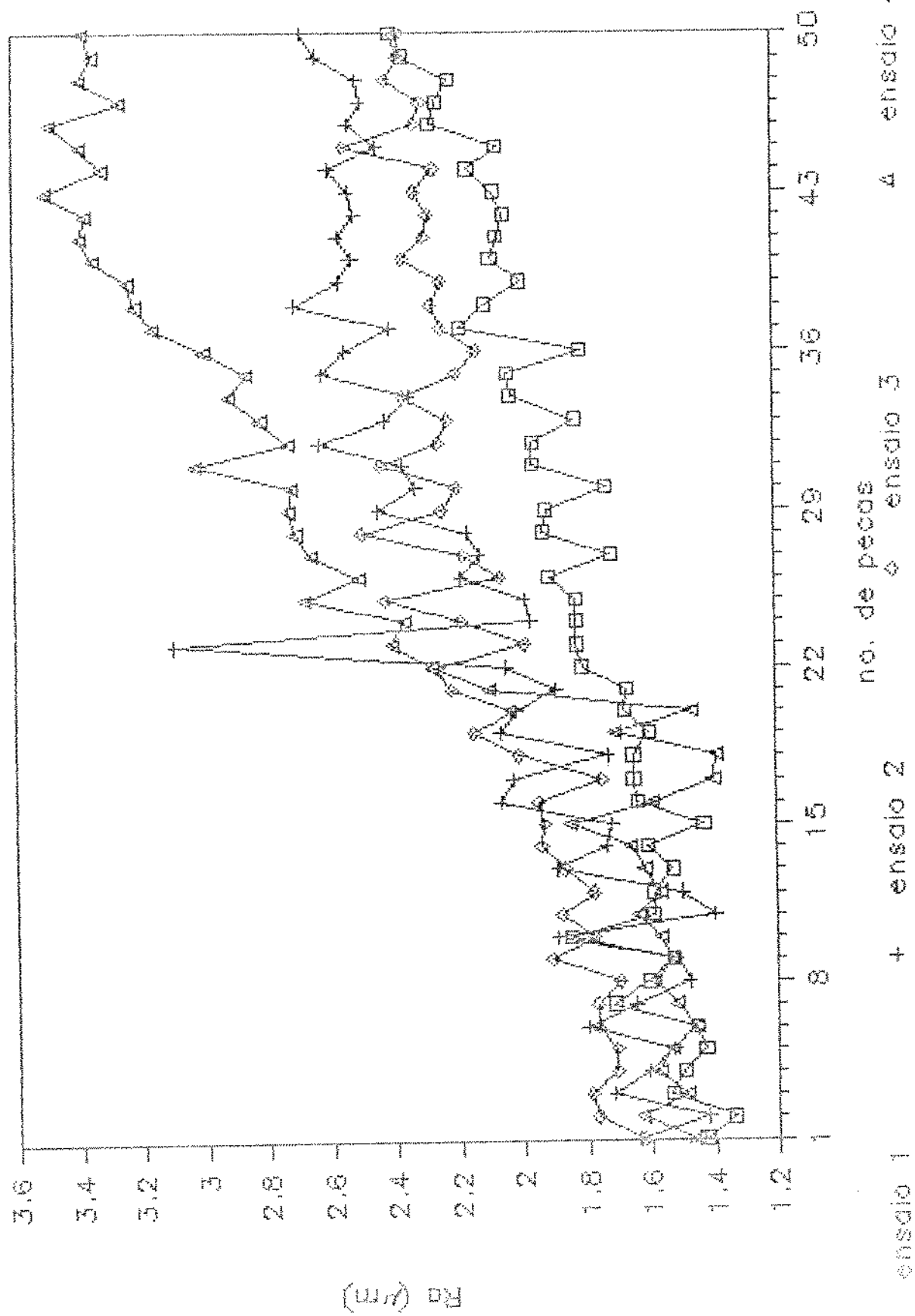
$$Ra = 1,66 + 0,0149z \quad (6.3)$$

- Ensaio No.4

$$Ra = 1,06 + 0,0492z \quad (6.4)$$

Abaixo, mostra-se a vida das ferramentas de corte analisadas nos quatro ensaios para diferentes valores de rugosidade.

Figura 6.4 - Ra x no. de peças



	Ra = 1,5 ; Ra = 2,0 ; Ra = 2,5		
Ensaio No.1	17	38	59
Ensaio No.2	1	21	41
Ensaio No.3	-	23	56
Ensaio No.4	9	19	29

6.5 - Comparação Entre os Resultados Obtidos com a Aplicação das Metodologias Apresentadas nos Casos 1 e 2

Como pode-se ver pelos resultados apresentados pela aplicação da Metodologia à família de engrenagens, a vida das ferramentas de corte mostrou-se bastante dependente do critério utilizado para troca das mesmas. Tal situação influenciou, como era de se esperar, nas características das curvas vida-velocidade de corte obtidas em cada caso. A forma das curvas de vida e os valores de x e k da Equação de Taylor são de fundamental importância por mostrarem a possibilidade ou não da utilização da metodologia apresentada para o cálculo da $vmxp$.

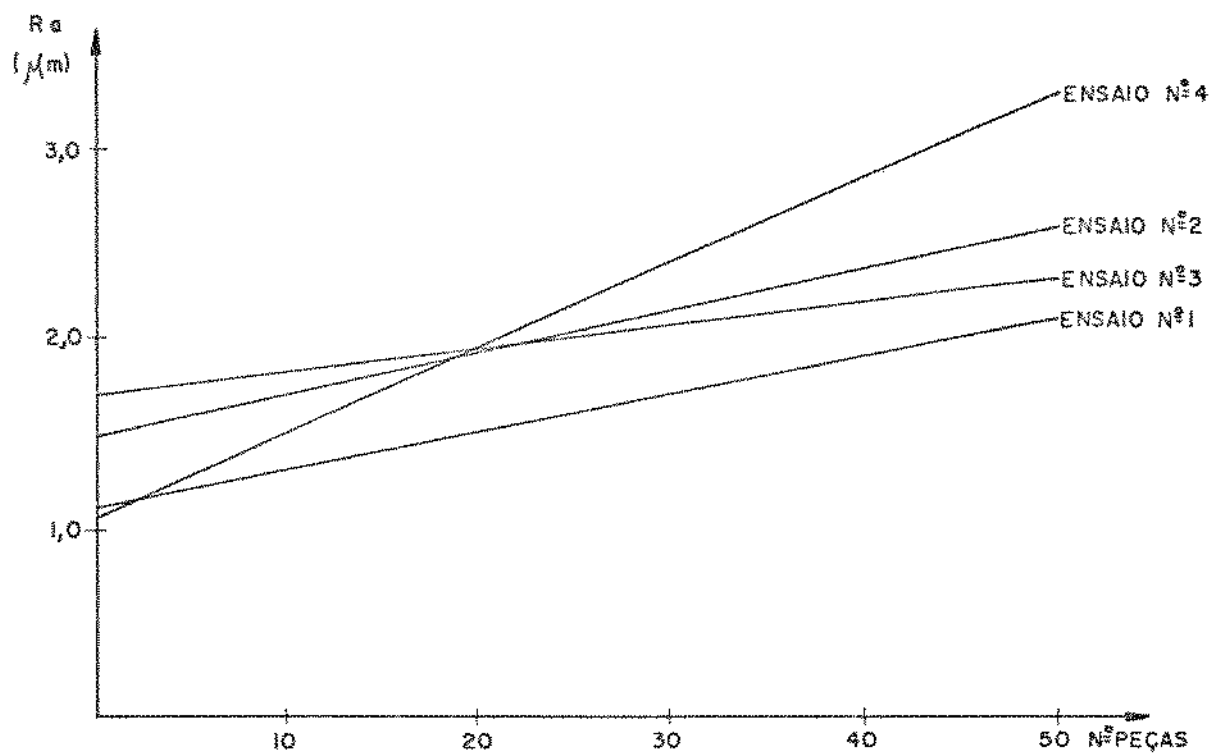


Figura 6.4 - Resultados da Aplicação da Análise de Regressão aos Resultados obtidos em Laboratório

As seguintes observações foram feitas quando comparados os resultados dos Casos 1 e 2, aplicados à família de engrenagens:

1 - A aplicação da Metodologia apresentada no Caso 2 permitiu um aumento substancial na vida média das ferramentas de corte em comparação à Metodologia apresentada no Caso 1. Apesar dessa vantagem, a aplicação do Caso 2 em operações de desbaste provocou a falha traumática de algumas ferramentas o que é indesejável.

2 - A aplicação da Metodologia apresentada no Caso 2 permitiu a adequação dos resultados às características da curva de vida-velocidade de corte esperadas pela Equação de Taylor. Tal situação não ocorreu na Aplicação da Metodologia apresentada no Caso 1., mostrando que o mesmo não é adequado para a obtenção da $vmxp$.

6.6 - Extrapolação dos Resultados

Os resultados obtidos com a aplicação da Metodologia apresentada no Caso 2 nas peças 1 e 2 foram utilizados para se observar a possibilidade de extrapolação dos resultados obtidos numa determinada peça para outra peça da mesma família.

Os resultados mostraram o seguinte:

1 - Os valores de x e k da Equação de Taylor apresentaram diferenças significativas entre as peças 1 e 2.

2 - Os valores de $vmxp$ obtidos para as diferentes ferramentas das peças 1 e 2 apresentaram poucas diferenças entre si.

Apesar da pequena diferença entre os valores de $vmxp$ para as diferentes peças não considerou-se que os resultados obtidos para uma determinada peça possam ser extrapolados para as demais peças do lote. A própria variabilidade entre lotes da mesma peça dificulta a utilização pura e simples dos valores de $vmxp$ obtidos. Considerou-se, no entanto, que a utilização dos valores obtidos para uma determinada peça possam ser utilizados como condição inicial para as demais peças da família desde que seja feito um monitoramento inicial da operação.

6.7 - Vantagens e Limitações da Metodologia

Os resultados mostrados nos itens anteriores apresentaram que a variabilidade na vida das ferramentas de corte é um fato conhecido e demonstrado na prática. Tal variabilidade torna difícil a utilização de valores de velocidades de corte obtidos através de métodos

deterministas. Portanto, os métodos utilizados normalmente na prática industrial para a obtenção de valores otimizados da velocidade de corte só têm sentido quando uma análise simultânea dos resultados for efetuada.

A metodologia aqui mostrada não foge a esta regra, sendo útil, portanto, quando acompanhada da análise sistemática dos resultados de maneira a tornar realista a sua aplicação. A figura de um Analista de Ferramentas passa a ter uma importância fundamental na aplicação da metodologia. O Analista de Ferramentas teria a função de acompanhar toda a coleta de dados e realizar os cálculos necessários para a obtenção da $vmxp$, de posse desses resultados o Analista de Ferramentas deveria decidir, utilizando sua própria experiência, quais velocidades de corte deveriam ser empregadas.

A existência do Analista de Ferramentas, associada a uma metodologia de coleta sistemática de dados, permite não só a obtenção de velocidades de corte mais adequadas, mas também permite a ligação entre a produção e o processo levando a uma realimentação simultânea. Esta realimentação permite, por exemplo, uma redução considerável de problemas de processo tais como correções de programas CN devido a variações dimensionais nas peças de um determinado lote e correções no percurso de ferramentas de maneira a otimizá-los.

A aplicação da metodologia apresentada neste trabalho pressupõe a existência de uma fábrica organizada de maneira

a tornar mais eficiente tal aplicação. Ferramental padronizado e aplicação do conceito de Tecnologia de Grupo, quando a produção é conduzida por lotes, passam a ser elementos importantes na análise dos benefícios obtidos pela metodologia.

A metodologia pode ser facilmente aplicada na Produção em Massa. Sua aplicação na Produção por Lotes onde se aplicam os conceitos de Tecnologia de Grupo se mostrou possível conforme indicam os resultados apresentados. Outra vantagem que se pode obter da aplicação da mesma em famílias é o maior conhecimento do processo envolvido na elaboração das peças.

Como última observação, pode-se dizer que a aplicação adequada da metodologia permite também uma economia de ferramentas pela utilização de um método sistemático de estabilização do critério de vida que deixa de depender exclusivamente da sensibilidade do operador passando, em alguns casos, a ser definido em função de parâmetros físicos mais objetivos.

6.8 - A Automação e a Metodologia

Uma das análises importantes que deve ser feita em relação à metodologia sugerida é relacioná-la com a Automação da Fábrica. Deve-se mostrar que tal metodologia pode ser aplicada no estado atual de automação e que pode

vir a ser utilizada num futuro próximo, quando o nível de automação das fábricas for mais elevado.

Um dos problemas atuais na automação de máquinas-ferramenta que trabalham em usinagem, é a capacidade de determinar com precisão o momento em que a ferramenta de corte deva ser trocada. Considerando-se uma fábrica totalmente automatizada pode-se considerar as seguintes opções:

1 - A utilização de materiais e ferramentas ideais, isto é, materiais e ferramentas homogêneos e com características dimensionais uniformes, Esta condição aproximaria a vida das ferramentas de corte de um processo determinista permitindo, portanto, a utilização de qualquer método de otimização aplicado à modelos deterministas de vida [34].

2 - A eliminação dos processos convencionais de usinagem e a substituição dos mesmos por processos onde o desgaste da ferramenta seja desprezível sendo de pouca importância a determinação do ponto de troca da mesma (Usinagem por LASER) [34].

3 - A utilização de estimativas modestas da vida de ferramentas de corte de modo a trabalhar com uma confiabilidade próxima a 100% de que a ferramenta não irá falhar. Neste caso, não haverá nenhum trabalho de otimização, mas apenas um trabalho de análise estatística da

vida de ferramentas de maneira a se determinar a vida esperada para uma determinada confiabilidade [27].

4 - A utilização de máquinas-ferramenta totalmente automatizadas (Sensores de visão, força, temperatura, etc.) e de um sistema inteligente acoplado a esta máquina. Tal sistema faria uma análise constante dos dados obtidos pelos sensores de modo a operar dentro do campo mais adequado de trabalho [35][36].

Das opções acima citadas pode-se dizer que a (1) e a (2) são consideradas utópicas, dentro do horizonte atual das pesquisas. A opção (3) é a utilizada atualmente nas fábricas automatizadas, mas é indesejável por impossibilitar a otimização do processo. A opção (4) é a atual tendência de desenvolvimento [34].

Dentro desta perspectiva, a metodologia sugerida se adequa a esta tendência já que na situação atual a função de percepção (sensores) é cumprida pelo operador e a função de análise (sistema inteligente, que no futuro poderá ser substituído por sistemas especialistas) é cumprida pelo Analista de Ferramentas.

Shaw [37] sugeriu a utilização de uma metodologia dita "Controle Adaptativo Manual". Nesta metodologia um Engenheiro seria responsável pela programação de uma calculadora manual com um método de otimização qualquer. O

operador de posse desta calculadora poderia efetuar a otimização do processo.

A metodologia aqui sugerida, diferentemente, sugere a utilização de um sistema inteligente (Analista de Ferramentas) acoplado a sensores (operador) de modo a resolver satisfatoriamente o problema da otimização em usinagem, já antevendo as futuras máquinas inteligentes que irão povoar as fábricas do século XXI [34].

CAPITULO 7 - CONCLUSOES

- A determinação do Intervalo de Máxima Eficiência não é necessária para a otimização da Velocidade de Corte, sendo a determinação da Velocidade de Máxima Produção condição suficiente para tal. Operações onde o custo da ferramenta é muito elevado podem ser exceção a esta regra.

- Foi constatada a existência de variabilidade na vida de ferramentas de metal-duro recoberto no torneamento de aço ABNT 8620, quando utilizada a quebra da ferramenta como critério de fim de vida. A variabilidade apresentada foi de até 12 para 35 peças usinadas.

- Os valores obtidos de Velocidade de Corte se apresentaram refinados em relação aos valores retirados do banco de dados da empresa, sendo, de certa forma, possíveis de serem utilizados em peças da mesma família desde que seja feito um acompanhamento inicial do processo.

- A aplicação da metodologia sugerida se mostrou adequada à Produção por Lotes (com utilização de Tecnologia de Grupo) desde que acompanhada por análises realizadas por um auditor técnico chamado de Analista de Ferramentas.

- Foi constatada a existência de variabilidade na vida de ferramentas de metal-duro sem cobertura no torneamento de aço ABNT 1045 quando utilizado a rugosidade superficial (R_a), medida em rugosímetro, como critério de fim de vida. A variabilidade observada foi de até 29 para 59 peças usinadas quando a rugosidade estabelecida foi de $R_a = 2,5 \text{ m}$.

- A metodologia sugerida poderá ser aplicada em fábricas mais automatizadas onde as funções de obtenção dos dados ficariam a cargo de sensores da máquina-ferramenta e as funções de análise ficariam a cargo de um sistema especialista.

CAPITULO 8 - SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar a possibilidade de aplicação da metodologia sugerida, com as adaptações que se fizerem necessárias, em outras operações de usinagem que tradicionalmente são gargalos de produção (por exemplo, o corte de dentes de engrenagens).

- Desenvolver sistemas especialistas que possam desempenhar a função do Analista de Ferramentas na análise dos valores de velocidade de corte obtidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] BLOMBERG, S. A usinagem dos metais em industrias automatizadas. 7o. Seminário de Controle Numérico do Brasil. São Paulo, 1987.

[2] AGOSTINHO, O.L. Estudo da flexibilidade dos sistemas produtivos. Tese de Doutorado EESC-USP. São Carlos, 1985.

[3] WILD, R. Mass production management. 1.ed. New York, J. Wiley, 1972.

[4] GALLAGHER, C.C. The history of batch production and functional factory layout. CME. 1980.

[5] GALLAGHER, C.C. et alli. Group technology. 1.ed. Londres, Butterworths, 1973.

[6] BATUCHIO, A. Codificação iterativa de peças usando computador e tecnologia de grupo. Tese de Mestrado, EESC-USP. São Carlos, 1986.

[7] RODRIGUES, A.C.S. et alli. Análise das condições operacionais visando a obtenção das condições de usinagem otimizadas. 7o. Seminário de Comando Numérico do Brasil. São Paulo, 1987.

[8] FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. 1.ed. São Paulo, Edgard Blucher, 1970. 751p.

[9] KALS, H.J.J. et alli. A computer aid in the optimization of turning conditions in multi-cut operations. Annals of the CIRP. 465-469, 1978.

[10] PALLEROSI, C.A. Formulação de um método geral de análise das condições de usinagem. Tese de Doutorado, UNICAMP. Campinas, 1973.

[11] PALLEROSI, C.A et alli. Durabilidade de ferramentas de corte na usinagem dos metais. XXX Congresso Anual da ABM. 645-649, 1975.

[12] VENKATESH, V.C. et alli. A discussion on tool life criteria and total failure causes. Annals of the CIRP. 19-22, 1980.

[13] COOK, N.H. Tool wear and tool life. Journal of Engineering for Industry of the ASME. 931-938, 1973.

[14] MICHELETTI, G.F. Mecanizado por arranque de viruta. 1.ed. Barcelona, Editorial Blume, 1980. 426p.

[15] COLDING, B. et alli. Validity of the Taylor equation in metal cutting. Annals of the CIRP. 793-812, 1971.

[16] TAYLOR, F.W. On the art of cutting metals. Transactions of the ASME. 31-279, 1907.

[17] KULJANIC, E. A method for optimization of hobbing. Annals of the CIRP. 75-78, 1985.

[18] SHAW, M.C. Metal cutting principles. 1.ed. New York, Oxford University Press. 1984.

[19] BOOTHROYD, G. Fundamentos del corte de metales y de las maquinas-herramientas. 1.ed. Bogota, Mc Graw-Hill. 1978.

[20] WAGER, J.G. et alli. Study of the life of HSS tools. Journal of Engineering for Industry of the ASME. 1044-1050, 1971.

[21] RAHALINGAM, S. et alli. Tool life distributions - part 4: minor phases in work material and multiple-injure tool failure. Journal of Engineering for Industry of the ASME. 201-209, 1978.

[22] LEVI, R. et alli. Some considerations on tool life scatter and its implications. Journal of engineering for Industry of the ASME. 945-950, 1975.

[23] SHEIKH, A.K. et alli. Probabilistic optimization of multitool machining operations. Journal of Engineering for Industry of the ASME. 239-246, 1980.

[24] ROSSETO, S. et alli. Fracture and wear as factor affecting stochastic tool life models and machining economics. Journal of Engineering for Industry of the ASME. 281-286, 1977.

[25] RAHALINGAN S. et alli. Tool life distributions - part 1: single-injury tool life model. Journal of Engineering for Industry of the ASME. 519-522, 1977.

[26] RAHALINGAN, S. et alli. Tool life distributions - part 2: multiple-injury tool life model. Journal of Engineering for Industry of the ASME. 523-531, 1977.

[27] PANDIT, S.M. Data dependent system approach to stochastic tool life and reliability. Journal of Engineering for Industry of the ASME. 1978.

[28] ZDEBLICK, W.J. et alli. A comprehensive machining cost model and optimization technique. Annals of the CIRP. 405-408, 1981.

[129] SEKULIC, S.S. Cost of cutting tools and total machining costs as a function of the cutting tool reliability in automatic flow lines. International Journal of Production Research. 187-200, 1982.

[130] BILLATOS, S.A. et alli. A statistical wear model for certain tool materials with applications to machining. Wear. 257-271, 1986.

[131] ZOMPI, A. Tool life distributions in process optimization; parameter identification and applications. Annals of the CIRP. 371-375, 1979.

[132] ALBERTI, N. et alli. Interdependence between tool fracture and wear. Annals of the CIRP. 61-63, 1985.

[133] ARMAREGO, E.J.A. et alli. The machining of metals. 1.ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1969.

[134] WRIGHT, P.. et alli. Manufacturing intelligence. 1.ed. Addison-Wesley, 1988. 352p.

[135] VILLA, A. et alli. An expert control system for tool life management in FMC. Annals of the CIRP. 87-89, 1985.

[136] GIUSTI, F. et alli. A flexible tool wear sensor for NC lathes. Annals of the CIRP. 229-232, 1984.

[37] SHAW, M.C. et alli. Manual adaptative control. American Machinist. 1977.

[38] Manual Sandvvik HV-1000: 1-POR

ANEXO

Para encontrar o tamanho mínimo de amostra de modo a obter um valor médio confiável é necessário obter primeiramente uma amostra inicial de tamanho n_0 , julgada conveniente para estimar a dispersão da população. Em seguida calcula-se o valor do tamanho mínimo de amostra n . Se n_0 for maior que n a amostra inicial já é representativa da população; caso contrário, é necessário tomar uma amostra maior $n_0 > n$ que garanta a representatividade exigida.

Para populações contínuas o tamanho mínimo da amostra é definido por:

$$n = \left(\frac{S \cdot t}{d} \right)^2$$

onde, S - Estimativa do desvio padrão da população ou desvio padrão da amostra inicial.

d - Erro tolerável

t - Valor obtido da tabela de distribuição "t" Student para graus de liberdade ($\alpha = n_0 - 1$) e confiança P
($P = 1 - \alpha$)

Na situação mostrada neste trabalho foram obtidos os seguintes valores para o tempo de troca - tft.

Medição	tft	Medição	tft
1	96	11	82
2	92	12	94
3	102	13	80
4	105	14	85
5	87	15	96
6	98	16	112
7	106	17	82
8	100	18	105
9	67	19	76
10	102	20	82

Com estes valores obteve-se:

Média = 92,45s (1,5 min)

Desvio Padrão = 11,84s

Considerando-se uma confiança de 95% (t = 2,093 para 19 graus de liberdade) e um erro tolerável d = 6s, obteve-se o seguinte tamanho mínimo de amostra:

$$n = \left(\frac{11,84 \cdot 2,093}{6} \right)^2 = 17,06$$

Como foram tomadas vinte (20) medidas para a amostragem inicial e como o valor obtido é menor do que vinte pode-se considerar que o resultado é adequado de acordo com as condições de contorno estabelecidas.