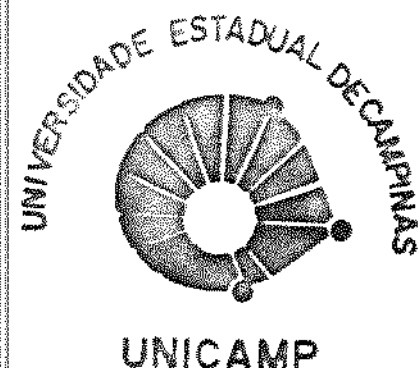




Governo do Estado de São Paulo

Universidade Estadual de Campinas

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERÍSTICAS DE USINAGEM SOB O PONTO DE VISTA ECONÔMICO

ROBERVAL RYMER DA SILVA CARVALHO

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR Roberval Rymer da
Silva Carvalho E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 19 07 1991

PUBLICAÇÃO

FEM

09/91

Frederico Porto
ORIENTADOR

13061 - CAMPINAS - S.P.

BRASIL

BC19409458

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA

CARACTERISTICAS DE USINAGEM SOB O
PONTO DE VISTA ECONOMICO

MSc. ENG- ROGERVAL RYDER DA SILVA CARVALHO

Trabalho apresentado como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, pela Faculdade
de Engenharia de Campinas da Universidade Estadual de Campinas.

CAMPINAS

1991

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA

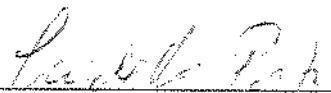
Tese de: Doutorado

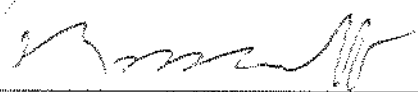
Titulo da Tese: CARACTERISTICAS DE USINAGEM VISTAS SOB O PONTO DE
VISTA ECONOMICO

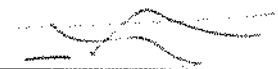
Autor: MSc. Eng^o Roberval Rymer da Silva Carvalho

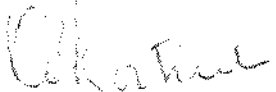
Orientador: Prof. Dr. Dino Ferraresi *o.c.c.*

Aprovado por:


Prof. Dr. Antonio Arlindo Guidetti Porto


Prof. Dr. Rosalvo Tiago Ruffino


Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira


Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho


Prof. Dr. Geraldo Nonato Telles

Campinas, 19 de Julho de 1991.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho (in memoriam) ao Prof. Dr. Jaroslav Kozel que deixando seu torrão pátrio (Checoslováquia) veio para o Brasil dedicar-se ao Ensino e Pesquisa na Universidade Federal de Santa Catarina. Neste País deixou seu legado; sua própria vida.

DEDICATÓRIA ESPECIAL

Aos meus pais

Sinônimo de dedicação e trabalho

À minha esposa

fiel companheira de trabalho

Aos meus filhos

dedico este modesto exemplar.

AGRADECIMENTOS:

A Diretoria do Instituto de Engenharia Mecânica, professores Edson de Oliveira Pamplona e Eli Silva, e aos chefes do Departamento de Produção da EFEI, professores Eduardo Assis Alvarenga e José Arnaldo Barra Montevechi.

A UNICAMP por ter me oferecido o curso de pós-graduação na área de materiais e processos

Ao P.I.C.D. por conceder-me a bolsa de estudos

Ao Prof. Dr. Dino Ferraresi, na qualidade de orientador deste trabalho, pela paciência, assistência e incentivo sem o qual este trabalho não seria possível.

Ao Prof. Dr. Rosalvo Tiago Ruffino pela correção do texto do trabalho

Ao Prof. Dr. Olivio Novaski pelo suporte emprestado, através de suas teses de mestrado e doutorado, nas quais meu trabalho pautou.

Ao Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho pela sua orientação como coordenador de programa

A Prof^a Maria Aparecida Sanches Coelho pela elaboração do resumo em francês deste trabalho

Aos colegas do Departamento de Produção, em especial os que atuam na área de Engenharia Econômica pela análise crítica feita ao capítulo II.

A secretária Helena, aos desenhistas Sebastião e Messias, ao datilógrafo Luiz Plínio pela composição da tese

Aos funcionários do Instituto de Engenharia Mecânica que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho

Aos meus sogros, irmãos e cunhados pela preocupação deste trabalho.

As empresas TRAUB, ROMI, TWILL e NARDINI, que me proporcionaram a parte prática deste trabalho.

A DEUS por ter-me dado inteligência, saúde e disposição para vencer mais esta etapa de minha vida.

Que os nossos esforços desafiem as impossibilidades.
Lembraí-vos de que os grandes proezas da história
foram conquistas do que parecia impossível.

CHARLIE CHAPLIN

SUMÁRIO

O presente trabalho fornece as expressões das velocidades de corte de mínimo custo (V_o) e de máxima produção (V_{mxp}), bem como as expressões da vida de mínimo custo (T_o) e máxima produção (T_{mxp}) para os processos mecânicos de usinagem. Estas expressões foram obtidas com o uso das fórmulas expandida e simplificada de Taylor. Expressões dos tempos e custos de fabricação e de suas derivadas em relação à velocidade de corte (V_c) para os processos mecânicos de usinagem, obtidas por intermédio de um micro - computador e com o uso de um software - aplicativo são apresentadas. Elas permitem que se obtenha de maneira iterativa, a velocidade de corte de máximo lucro (V_{mxl}), à partir da equação geral deduzida e com o emprego do programa computacional apresentado. O tratamento matemático dado à velocidade de corte de máximo lucro, contempla as empresas em suas diferentes estruturas de mercado, como as de regime de mercado de concorrência perfeita, monopolista, oligopolista e de concorrência monopolista. Uma aplicação na determinação da velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) é feita para o torneamento. Os dados foram obtidos, numa indústria nacional de grande porte, e em regime de mercado de concorrência perfeita. São apresentadas Tabelas com valores da velocidade de corte de máximo lucro (V_{mxl}) para receita (R_t) constante e variáveis.

ABSTRACT

In this research-work, expressions for the minimum cost (V_0) and maximum production (V_{mxp}) cutting speed, as well as minimum cost (T_0) and maximum production (T_{mxp}) lifetime, for machining processes are obtained. Expanded and simplified Taylor formulae are used in the derivation of such expressions. Lifetimes, costs and their derivatives with respect to cutting speed are computed using an existing applied software package. The maximum profit cutting speed (V_{mxl}) is iteratively derived from the general equation. The formal approach adopted for the maximum speed is suitable for applications in the following contexts enterprises with perfect marked competition, monopoly, oligopoly and monopolistic competition. Illustrating the procedure, the maximum profit speed (V_{mxl}) is determined for turning. The experimental data were obtained at a national industry with perfect marked competition. Tables are presented summarizing the maximum profit speed (V_{mxl}) for constant and variable income (R_t).

RESUME

Ce travail présente les expressions des vitesses de coupe de coût minimum (V_o) et de production maximale (V_{mxp}), aussi que les expressions de la vie de coût minimum (T_o) et de production maximale (T_{mxp}) pour des processus d'usinage. Ces expressions ont été obtenues par l'emploi des formules étendue et simplifiée de Taylor.

Des expressions des temps et des coûts de fabrication et de leurs dérivées par rapport à la vitesse de coupe (V_c) pour des processus mécaniques d'usinage, obtenues par moyen d'un micro-ordinateur et par l'emploi d'un software applicatif, sont présentées. Elles permettent d'obtenir de façon itérative, la vitesse de coupe de gain maximal (V_{mxl}), à partir de l'équation générale déduite et par l'emploi du programme de l'ordinateur présenté.

Le traitement mathématique donné à la vitesse de coupe de gain maximal, contemple les entreprises dans leurs différentes structures de marché, comme celles à régime de marché de concurrence parfaite, monopoliste, oligopoliste et de concurrence monopoliste.

Une application de la détermination de la vitesse de gain maximal est faite pour le tournage.

Les données ont été obtenus dans une grande industrie nationale, à régime de marché de concurrence parfaite.

Sont présentées aussi des Tables de valeurs de la vitesse de coupe de gain maximal (V_{mxl}) pour recette (R_t) constante et variables.

ÍNDICEPÁGCAPÍTULO I - TEMPOS DE FABRICAÇÃO

1.1 - INTRODUÇÃO	1
1.2 - CICLO DE USINAGEM	2
1.3 - FASES DE USINAGEM	2
1.4 - TEMPO TOTAL DE FABRICAÇÃO POR PEÇA	3
1.5 - TEMPO DE CORTE	3
1.5.1 - Cada Ferramenta atua, Isoladamente	5
1.5.2 - As Ferramentas atuam Simultaneamente	5
1.6 - TEMPOS SECUNDARIOS	6
1.7 - TEMPO DE PREPARAÇÃO	6
1.8 - TEMPO DE REPOSIÇÃO	7
1.8.1 - Determinação do Tempo de Reposição	10
1.8.1.1 - Tempo total de reposição (t_r) com trocas de m ferramentas não pré-determinada	10
1.8.1.2 - Tempo total de reposição (t_r) com trocas de m ferramentas pré-determinadas e em grupo	10
1.8.1.3 - Tempo total de reposição (t_r) com trocas de m ferramentas pré-determinadas e em grupos selecionados	11

CAPÍTULO II - PROCURA, OFERTA, RECEITA, CUSTOS E MAXIMIZAÇÃO DO LUCRO

2.1 - INTRODUÇÃO	12
2.2 - DESCRIÇÃO SUMÁRIA DAS ESTRUTURAS DE MERCADO	13
2.3 - AS QUATRO ESTRUTURAS DIFERENCIADAS	14
2.3.1 - Concorrência Perfeita	14
2.3.2 - Monopólio	14
2.3.3 - Oligopólio	14
2.3.4 - Concorrência Monopolística	14

2.4 - A CURVA DA PROCURA SEGUNDO AS QUATRO ESTRUTURAS DIFERENCIADAS	18
2.4.1 - A Curva da Procura da Empresa Perfeitamente Competitiva	18
2.4.2 - A Curva do Procura da Empresa Monopolística ...	20
2.4.3 - A Curva da Procura da Empresa Oligopolista	21
2.4.4 - A Curva da Procura da Empresa Sob Concorrência monopolista	24
2.5 - COMPORTAMENTO DOS CUSTOS	25
2.5.1 - Custos Médios	29
2.5.2 - Custo Marginal	31
2.6 - A MAXIMIZAÇÃO DO LUCRO	33
2.6.1 - O Modelo da Concorrência Perfeita	34
2.6.2 - O Modelo do Monopólio	40
2.6.3 - O Modelo do Oligopólio	45
2.6.4 - O Modelo da Concorrência Monopolística	48

CAPÍTULO III - CURVAS DE VIDA E DESGASTE

3.1 - INTRODUÇÃO	51
3.2 - FORMA DOS DESGASTES	51
3.3 - TIPOS DE DESGASTES QUE OCORREM NOS MATERIAIS DAS FERRAMENTAS DE CORTE	52
3.4 - CURVAS DE DESGASTE	57
3.5 - CURVAS DE VIDA	57
3.5.1 - Considerações sobre Equações da Vida da Ferramenta	62
3.5.1.1 - Equações de TAYLOR	62
3.5.1.2 - Equações de GILBERT	63
3.5.1.3 - Equação de WOXEN	65
3.5.1.4 - Equação de DEPIEREUX	68
3.6 - CURVAS DE VIDA E DESGASTE PARA PASTILHAS DE METAL DURO COM COBERTURA, OBTIDAS EM LABORATÓRIO	70
3.6.1 - Introdução	70
3.6.2 - Curvas de Desgaste	71
3.6.3 - Curvas de Vida	77

3.7 - CURVAS DE VIDA PARA PASTILHAS DE METAL DURO COM COBERTURA, OBTIDAS NA EMPRESA	79
3.7.1 - Introdução	80
3.7.2 - Procedimento Adotado	80
3.7.3 - Curvas de Vida Obtidas na Empresa	82

CAPÍTULO IV - EQUIVALÊNCIA NAS OPERAÇÕES DE USINAGEM

4.1 - INTRODUÇÃO	87
4.2 - DIÂMETRO EQUIVALENTE	87
4.3 - CONSIDERAÇÕES EM TORNOS COPIADORES	90
4.3.1 - Relação entre o Percorso de Avanço do Carro e o da Ferramenta	90
4.3.2 - Relação entre a Velocidade de Avanço do Carro e a Velocidade de Avanço da Ferramenta	91
4.3.3 - Relações entre os Avanços da Ferramenta e do Carro	91
4.4 - AVANÇO EQUIVALENTE	91
4.5 - EMPREGO DA TEORIA DE EQUIVALÊNCIA DE USINAGEM	92

CAPÍTULO V - VELOCIDADE DE CORTE (V_0) E DE MÁXIMA PRODUÇÃO (V_{mxp}) PARA OS PROCESSOS MECÂNICOS DE USINAGEM

5.1 - INTRODUÇÃO	93
5.2 - DEDUÇÃO DAS EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA O TORNEAMENTO	93
5.2.1 - Velocidade de Máxima Produção	94
5.2.2 - Velocidade de Mínimo Custo	97
5.3 - FATORES RESTRITIVOS A SELEÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CORTE ..	103
5.3.1 - Máximo Avanço da Máquina	103
5.3.2 - Máxima Velocidade de Corte	103
5.3.3 - Potência da Máquina	103
5.3.4 - Acabamento Superficial	105
5.4 - INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA	105
5.5 - EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA O APLANAMENTO	107

5.5.1 - Velocidade de Máxima Produção	108
5.5.2 - Velocidade de Mínimo Custo	109
5.6 - EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA A FURAÇÃO EM CHEIO	110
5.6.1 - Furação Passante	110
5.6.1.1 - Velocidade de máxima produção	110
5.6.1.2 - Velocidade de mínimo custo	111
5.6.2 - Furação Não Passante	112
5.6.2.1 - Velocidade de máxima produção	113
5.6.2.2 - Velocidade de mínimo custo	114
5.6.3 - Furação com Pré-Furação	115
5.6.4 - Furação Escalonada	116
5.6.4.1 - Velocidade de Máxima Produção	116
5.6.4.2 - Velocidade de Mínimo Custo	117
5.7 - EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA O ALARGAMENTO CILÍNDRICO	118
5.7.1 - Velocidade de Máxima Produção	119
5.7.2 - Velocidade de Mínimo Custo	120
5.8 - EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA O ROSCAMENTO CILÍNDRICO	121
5.9 - EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA O FRESAMENTO FRONTAL	123
5.9.1 - Velocidade de Máxima Produção	124
5.9.2 - Velocidade de Mínimo Custo	125
5.10 - EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA O FRESAMENTO TANGENCIAL	126
5.11 - EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA O BROCHAMEN- TO	126
5.11.1 - Velocidade de Máxima Produção	127
5.11.2 - Velocidade de Mínimo Custo	128

CAPÍTULO VI - VIDA DE MÍNIMO CUSTO (T_0) E DE MÁXIMA PRODUÇÃO (T_{mxp}) PARA OS

6.1 - INTRODUÇÃO	129
6.2 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O TORNEAMENTO	129

6.2.1 - Vida para a Máxima Produção	129
6.2.2 - Vida para Mínimo Custo	129
6.3 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O APLAINAMENTO	130
6.3.1 - Vida para a Máxima Produção	130
6.3.2 - Vida para o Mínimo Custo	130
6.4 - EXPRESSÕES DE VIDA PARA FURAÇÃO	132
6.4.1 - Furação em Cheio Passante	132
6.4.1.1 - Vida para a máxima produção	132
6.4.1.2 - Vida para o mínimo custo	132
6.4.2 - Furação em Cheio não Passante	133
6.4.2.1 - Vida para a máxima produção	133
6.4.2.2 - Vida para o mínimo custo	134
6.4.3 - Furação com Pré-Furação	135
6.4.4 - Furação Escalonada	135
6.4.4.1 - Vida para a máxima produção	135
6.4.4.2 - Vida para o mínimo custo	136
6.5 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O ALARGAMENTO CILÍNDRICO	137
6.5.1 - Vida para a Máxima Produção	137
6.5.2 - Vida para o Mínimo Custo	137
6.6 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O ROSCAMENTO CILÍNDRICO	139
6.6.1 - Vida para a Máxima Produção	139
6.6.2 - Vida para o Mínimo Custo	139
6.7 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O FRESAMENTO FRONTAL	140
6.7.1 - Vida para a Máxima Produção	140
6.7.2 - Vida para o Mínimo Custo	141
6.8 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O FRESAMENTO TANGENCIAL	142
6.9 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O BROCHAMENTO	142
6.9.1 - Vida para a Máxima Produção	142
6.9.2 - Vida para o mínimo Custo	143

CAPÍTULO VII - VELOCIDADE DE MÁXIMO LUCRO ($V_{mx\ell}$) PARA OS PROCESSOS MECÂNICOS DE USINAGEM

7.1 - INTRODUÇÃO	145
7.2 - PROCEDIMENTO PARA SE OBTER A EXPRESSÃO DA VELOCIDADE DE CORTE DE MÁXIMO LUCRO ($V_{mx\ell}$)	145
7.2.1 - Condição de Máxima Razão de Lucro	145

7.2.2 - Expressão que permite obter a velocidade de Máximo Lucro (V_{mxl}) para Empresas em Regime de Mercado de Concorrência Perfeita	147
7.2.3 - Expressão que permite obter a velocidade de Máximo Lucro (V_{mxl}) para Empresas em Regime de Mercado Monopolístico	148
7.2.4 - Expressão que permite obter a velocidade de Máximo Lucro (V_{mxl}) para Empresas em Regime de Mercado Oligopolístico	149
7.2.5 - Expressão que permite obter a velocidade de Máximo Lucro (V_{mxl}) para Empresas em Regime de Mercado de Concorrência Monopolística	151
7.3 - EXPRESSÕES DOS TEMPOS (t_t), CUSTO (C_t), DERIVADAS (t_t') e (C_t') PARA OS DEMAIS PROCESSOS MECÂNICOS DE USINAGEM	154
7.3.1 - Aplainamento	155
7.3.2 - Furação em Cheio Passante	155
7.3.3 - Furação em Cheio Não Passante	156
7.3.4 - Furação com Pré-furação	157
7.3.5 - Furação Escalonada	158
7.3.6 - Alargamento Cilíndrico	158
7.3.7 - Roscamento Cilíndrico	159
7.3.8 - Fresamento Frontal	160
7.3.9 - Fresamento Tangencial	161
7.3.10 - Brochamento	161
7.4 - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE MÁXIMO LUCRO (V_{mxl}) NO TORNEAMENTO DE PEÇAS DE UMA EMPRESA DE GRANDE PORTE, EM REGIME DE MERCADO DE CONCORRÊNCIA PERFEITA	162
7.4.1 - Característica da Máquina	163
7.4.2 - Característica do Material	163
7.4.3 - Característica da Ferramenta	163
7.4.3.1 - Porta-Pastilhas	163
7.4.3.2 - Pastilha	163
7.4.4 - Condições de Usinagem	163
7.4.5 - Dados de Custos e Tempos Fornecidos pela Empresa	163
7.4.6 - Cálculo da Velocidade de Corte de Mínimo Custo (V_o)	164

7.4.7 - Cálculo da Velocidade de Corte de Máxima Produção (V_{mp})	164
7.4.8 - Cálculo do Diâmetro Médio (d)	164
7.4.9 - Cálculo da Velocidade de Corte de Máximo Lucro (V_{ml})	166
7.4.10 - Programa Computacional que Permite Obter a Velocidade de Máximo Lucro (V_{ml}) no torneamento	167
 CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	 172
 SIMBOLOGIA	 177
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 185

INTRODUÇÃO

Dentre os objetivos deste trabalho, destacam-se o da determinação das expressões das velocidades de corte de mínimo custo (V_o) e de máxima produção (V_{mxp}) para os processos mecânicos de usinagem. É sabido que nas literaturas especializadas, envolvendo o estudo da otimização do corte, são fornecidas expressões das velocidades de corte de mínimo custo (V_o) e de máxima produção (V_{mxp}) para alguns processos mecânicos de usinagem. Suas deduções repousam em equações de tempos e custos de fabricação, e são apresentadas de maneira não muito clara. Para sanar esta dificuldade, este pesquisador propôs a partir de equações de tempos e de custos de fabricação bastante simples e fidedignas, com uso de ferramenta matemática adequada, estabelecer as expressões das velocidades de corte para os processos mecânicos de usinagem. Elas se encontram deduzidas e apresentadas no capítulo V. O outro aspecto envolvendo este trabalho, e apresentado no Capítulo VII é o do estabelecimento de expressões que permitem obter de maneira iterativa a velocidade de corte de máximo lucro (V_{mxl}), para empresas em regime de mercado de concorrência perfeita.

No final deste capítulo, são fornecidas Tabelas resumo contendo dados obtidos por simulações a partir de dados obtidos em uma empresa em regime de mercado de concorrência perfeita, no torneamento. As simulações foram feitas, variando-se as velocidades de corte (V_c) desde (V_o) até (V_{mxp}), para receita (R_t) constante e variáveis. À luz da micro-economia, análise foram feitas acerca dos resultados apresentados por estas Tabelas, e as conclusões são fornecidas no capítulo VIII, capítulo das conclusões e sugestões. Os demais capítulos, com exceção do de número VIII, fazem parte deste trabalho, como capítulos suportes ao desenvolvimento dos de números V e VII, sendo que o capítulo V intitula-se "velocidade de corte (V_o) e de máxima produção (V_{mxp}) para os processos mecânicos de usinagem" e o de número VII intitula-se "velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) para os processos mecânicos de usinagem", que são os capítulos que respondem pelos objetivos. O Capítulo I intitulado "Tempos de Fabricação" faz um estudo separado acerca dos termos que compõem a expressão do tempo de fabricação (t_t). Os estudos foram

feitos para facilidade de exposição, para o processo mecânico de torneamento. No que concerne ao tempo de corte (t_c), os estudos analíticos na determinação deste tempo, foram feitos, considerando uma única ferramenta atuando isoladamente, e várias ferramentas atuando simultaneamente. As expressões para o tempo de corte (t_c) encontram-se em (1.5.1) e (1.5.2). Para o tempo de reposição (t_r), fez-se um estudo considerando-se que as trocas das ferramentas foram feitas pré-determinadamente e não pré-determinadamente. As expressões para o tempo de corte (t_r) encontram-se à partir de 1.8.1

O capítulo II intitulado "procura, oferta, receita, custos e maximização do lucro", faz uma abordagem envolvendo a teoria micro-econômica, em que conceitos como custo marginal (CM_g) e receita marginal (RM_g) são fundamentais no estabelecimento da velocidade de máximo lucro (V_{mxl}). Conceitos envolvendo as empresas em suas diferentes estruturas de mercado são apresentados à partir do item 2.3. As expressões para determinação da velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) para as empresas em diferentes regime de mercado são apresentados à partir do item 7.2.3. Gráficos da maximização do lucro para as empresas nas diferentes estruturas de mercado são apresentados nos itens 2.6.1 a 2.6.4.

O capítulo III intitulado "curvas de vida e desgaste" apresenta as principais equações de vida da ferramenta, e as análises feitas sobre as mesmas. É introduzido o conceito de curva de vida para desgaste variável para pastilhas de metal duro com cobertura, onde observou-se que para pastilhas de metal duro com revestimento, em operação de desbaste, a vida é definida pelo lascamento. As curvas de vida para estas pastilhas foram obtidas em laboratório (UNICAMP) e em empresa de grande porte, nas mesmas condições de usinagem, conduzindo a resultados diferentes (Figura 3.31). O capítulo IV intitulado "Equivalência nas operações de usinagem" faz um estudo definindo os conceitos de velocidade e diâmetro equivalente, onde expressões do diâmetro equivalente para diferentes operações de corte são apresentados no item 4.2. O capítulo VI intitulado "vida de mínimo custo (T_o) e máxima produção (T_{mxp})" apresenta as expressões para a vida de mínimo custo (T_o) e máxima produção (T_{mxp}) para os processos mecânicos de usinagem com o uso da fórmula expandida e simplificada de Taylor.

CAPÍTULO ITEMPOS DE FABRICAÇÃO1.1 - INTRODUÇÃO

Para o mesmo GRÁU DE QUALIDADE DO PRODUTO FINAL pode-se afirmar que a comparação entre distintos métodos de produção deve ser quantitativa. Os diferentes métodos de produção variam de acordo com o grau de automação do processo, e sempre que possível as operações manuais são substituídas por operações mecânicas. Em termos econômicos, isto significa a substituição entre fatores de produção (substituição de mão-de-obra por capital).

Visto que as operações efetuadas mecanicamente são mais rápidas que as manuais, a diferença no grau de automação do trabalho se manifesta em tempo de produção por unidade de produto. Obviamente, o fluxo uniforme das matérias primas, produtos semi-acabados e acabados, evitando prazos desnecessários de espera e interrupções no processo de produção, influe sobre a produtividade da mão-de-obra em geral, e nos pontos individuais de produção [1,2,3].

O Tempo de Fabricação inclui todos os tempos necessários para realizar uma fase de usinagem. Esse tempo é dividido em dois grupos gerais [4]:

1 - Tempos-manuais.

Neste tempo incluem-se todos os movimentos necessários ao operador para fazer a operação de corte e a retirada da peça após usinagem; enfim, consta de elementos que dependem da habilidade do operador.

2 - Tempos-máquinas.

Neste tempo está incluído os movimentos rápidos de aproximação para o início do corte e saída da ferramenta após o corte, até sua posição inicial, mais o tempo de execução e giro da torre.

1.2 - CICLO DE USINAGEM

Refere-se aos trabalhos manuais ou máquinas, que possibilitam a execução de uma dada operação de corte. Um ciclo de usinagem geralmente apresenta as seguintes fases [5,6].

- a) Transporte, posicionamento, fixação da peça em bruto ou semi-acabada na máquina-ferramenta, e acionamento dos comandos para a partida da máquina;
- b) Aproximação e ou posicionamento das ferramentas para o início do corte, mudança da rotação ou avanço;
- c) Operações de corte das ferramentas;
- d) Afastamentos e ou posicionamentos das ferramentas nas suas posições iniciais;
- e) Inspeção da peça;
- f) Inspeção e ajustagem periódica das ferramentas;
- g) Reposição das ferramentas que não mais satisfazem as condições desejadas na peça ou ferramenta, (troca e ajustagem inicial) Nas operações de desbaste, tem-se como delimitante a possibilidade da perda da capacidade de corte ou quebra das ferramentas. Nas operações de acabamento os fatores delimitantes são principalmente as tolerâncias dimensionais e a rugosidade superficial;
- h) Acionamento dos comandos para a parada da máquina, desfixação, transporte e posicionamento da peça acabada;
- i) Preparo da máquina-ferramenta para a execução de Z peças, que só ocorre no início da mesma.

1.3 - FASES DE USINAGEM.

Correspondem a cada trabalho executado antes, durante e após cada ciclo de usinagem

1.4 - TEMPO TOTAL DE FABRICAÇÃO POR PEÇA

O Tempo Total de Fabricação por peça para um lote de Z peças para uma ferramenta é dado por [3,5,6]:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + t_p/Z + t_r \quad (1.1)$$

onde:

t_t - tempo total de fabricação por peça,

t_c - tempo de corte da ferramenta, correspondente à fase c;

t_s - tempos secundário de usinagem, correspondente às fases a, e, f, h;

t_a - tempo de aproximação e afastamento da ferramenta, correspondente às fases b e d;

t_p - tempo de preparação da máquina, correspondente à fase i,

t_r - tempo de reposição por peça, para a troca e ajuste inicial das ferramentas, fase g.

Quando são várias ferramentas, a expressão do tempo total de confecção por peça (t_t) é dado por:

$$t_t = \sum_{i=1}^m t_{c_i} + t_s + \sum_{i=1}^m t_{a_i} + t_p/Z + \sum_{i=1}^m t_{r_i} \quad (1.2)$$

1.5 - TEMPO DE CORTE

Define-se por tempo de corte de uma operação de usinagem, ao espaço de tempo em que as ferramentas em avanço de usinagem trabalham na remoção de cavacos da peça [5]. Para facilidade de exposição, faremos o estudo analítico do tempo de corte no processo mecânico do torneamento. Este estudo analítico pode ser dividido em duas partes [5]:

a) As ferramentas atuam isoladamente, não havendo superposição dos tempos de corte (Fig. 1.1)

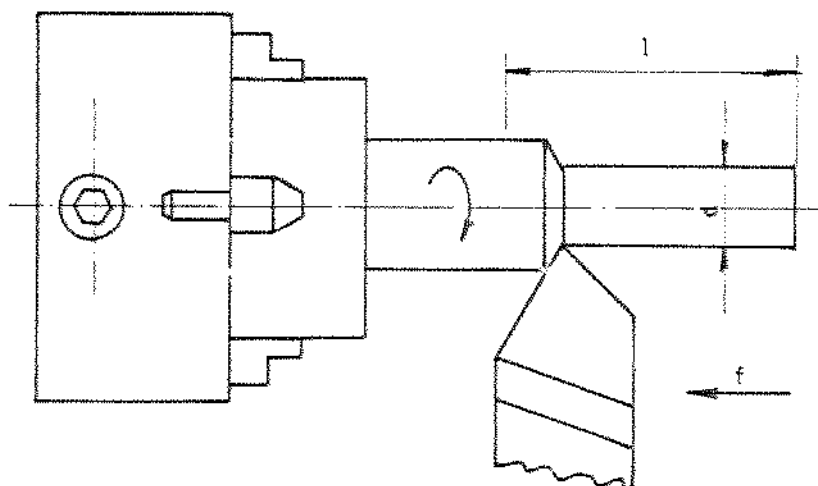


Fig. 1.1 - Torneamento com a ferramenta atuando isoladamente.

b) As ferramentas atuam simultaneamente, havendo superposição dos tempos de corte (Fig. 1.2).

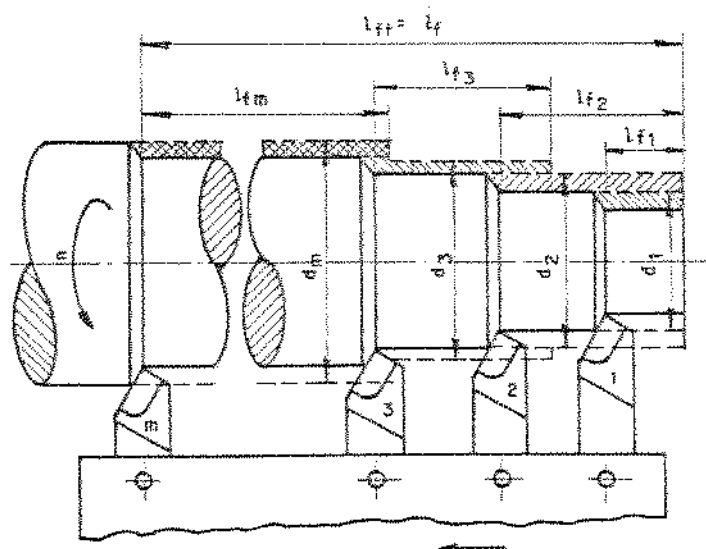


Fig. 1.2 - Torneamento com as ferramentas atuando simultaneamente.

1.5.1 Corta Ferramenta atua Isoladamente

O comprimento usinado l (Fig. 1.1), correspondente ao tempo de corte t_c de uma ferramenta é dado por [5]

$$t_c = \frac{l}{v} = \frac{l}{f \cdot n} \quad (1.3)$$

onde:

l = comprimento usinado;

v = velocidade de avanço da ferramenta;

n = rotação do eixo-árvore;

Quando são várias ferramentas atuando isoladamente o tempo de corte (t_c) é dado por:

$$t_c = \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{f_i \cdot n_i} \quad (1.4)$$

1.5.2 As Ferramentas atuam Simultaneamente

Neste caso há necessidade de se conceituar ferramenta-padrão. Ferramenta padrão é uma qualquer das m ferramentas que atuam simultaneamente numa operação de usinagem, escolhida como padrão de referência entre os tempos de corte, correspondentes a cada ferramenta envolvida na operação [5]. Todas as grandezas relativas à ferramenta padrão são indicadas pelo símbolo * (asterisco). A escolha de qualquer uma das m ferramentas envolvidas na operação de usinagem, como padrão de referência dos resultados obtidos. No caso, portanto, das ferramentas atuarem simultaneamente, o tempo de corte a ser utilizado é o tempo da ferramenta escolhida como padrão, porém relacionado com o tempo total de corte da operação através do coeficiente adimensional R dado por [5]

$$R = \frac{t^*}{t_c} \quad (1.5)$$

onde:

R = coeficiente adimensional;

t_c^* = tempo de corte correspondente a ferramenta padrão,

t_c = tempo total de corte da operação, correspondente às m ferramentas envolvidas atuando simultaneamente.

Por definição, o coeficiente adimensional R terá sempre um valor numérico compreendido no intervalo $0 < R \leq 1$. A determinação dos tempos de corte t_c^* (ferramenta-padrão) e t_c (total de operação) pode ser feita.

- experimentalmente, por meio de cronometragens;
- analiticamente, relacionando-se os percursos de avanço das m ferramentas envolvidas na operação. Por razões econômicas, escolhe-se como ferramenta-padrão àquela que tem maior influência nos custos da operação. Isto implica na necessidade de dispor-se as m ferramentas envolvidas na operação, de tal modo que $(m-1)$ ferramentas realizem a operação de corte durante o tempo de corte daquela que apresenta maior percurso de avanço l , para se ter $R \leq 1$ e simplificar o cálculo [6]

1.6 - TEMPOS SECUNDÁRIOS

Os tempos secundários são analisados através de Departamentos de tempos e métodos, visando a economia de movimentos e a diminuição dos tempos envolvidos.

1.7 - TEMPO DE PREPARAÇÃO

Este tempo inclui todos os tempos preliminares empregados em preparar a máquina para a usinagem. Teoricamente, o tempo de preparação para um determinado trabalho é o mesmo, tantas vezes quanto se repita esse trabalho. Na prática, porém, raramente é assim, pois que o trabalho executado antes, influi de forma decisiva sobre este tempo.

Há de se notar, que a desmontagem da máquina devido a uma determinada operação de corte esta intimamente ligada com a preparação da máquina para a operação seguinte. Mediante um

planejamento adequado, a sucessão dos trabalhos pode reduzir-se a um mínimo em relação ao tempo de desmontagem com o aproveitamento de determinadas ferramentas, dispositivos, calibres, etc. [7]. A máquina-ferramenta deve possuir também uma boa flexibilidade, para permitir que num tempo mínimo se introduza uma nova peça na produção. As máquinas de comando numérico com relação à flexibilidade, apresentam grandes vantagens sobre as máquinas sem este tipo de comando (convencionais, automáticas), pois com apenas algumas mudanças no programa de comando numérico e correções de ferramentas, introduz-se itens diversificados com a mesma preparação da máquina (fabricação em células). [8]

Além disso, os tempos de preparação da máquina com comando numérico diminuem em cerca de 20 a 70% em relação às máquinas convencionais [9,10].

1.8 - TEMPO DE REPOSIÇÃO

Entende-se por tempo de reposição t_r de uma operação de usinagem, ao tempo efetivamente gasto por peça, para a troca e ajuste de todas as ferramentas envolvidas na operação, que não mais satisfazem as condições de usinagem desejadas. O tempo de reposição está diretamente ligado ao n^o de peças usinadas por vida (Z_T), pois este define a frequência das paradas da máquina para troca e ajuste da ferramenta [6].

O procedimento de troca de ferramentas pode ser dividido em dois casos [11].

1 - Trocas Não Pré-determinadas:

Neste caso, as ferramentas são trocadas individualmente na ordem natural de sua ocorrência, quando elas não mais satisfazem as condições exigidas.

2 - Trocas Pré-determinadas:

Neste caso, existe um intervalo pré-determinado de troca. Existem duas alternativas possíveis:

- a) Todas as ferramentas são trocadas em um só grupo após a usinagem de uma pré-determinada quantidade de peças;
- b) As ferramentas são trocadas em grupos selecionados, de acordo

com a vida que elas apresentam

No esquema seguinte, Fig. 1.3 vê-se os casos, considerando-se uma máquina-ferramenta com três ferramentas, apresentando vidas diferentes, T_1 , T_2 e T_3 , tal que $T_2 < T_1$ e $T_1 < T_3$.

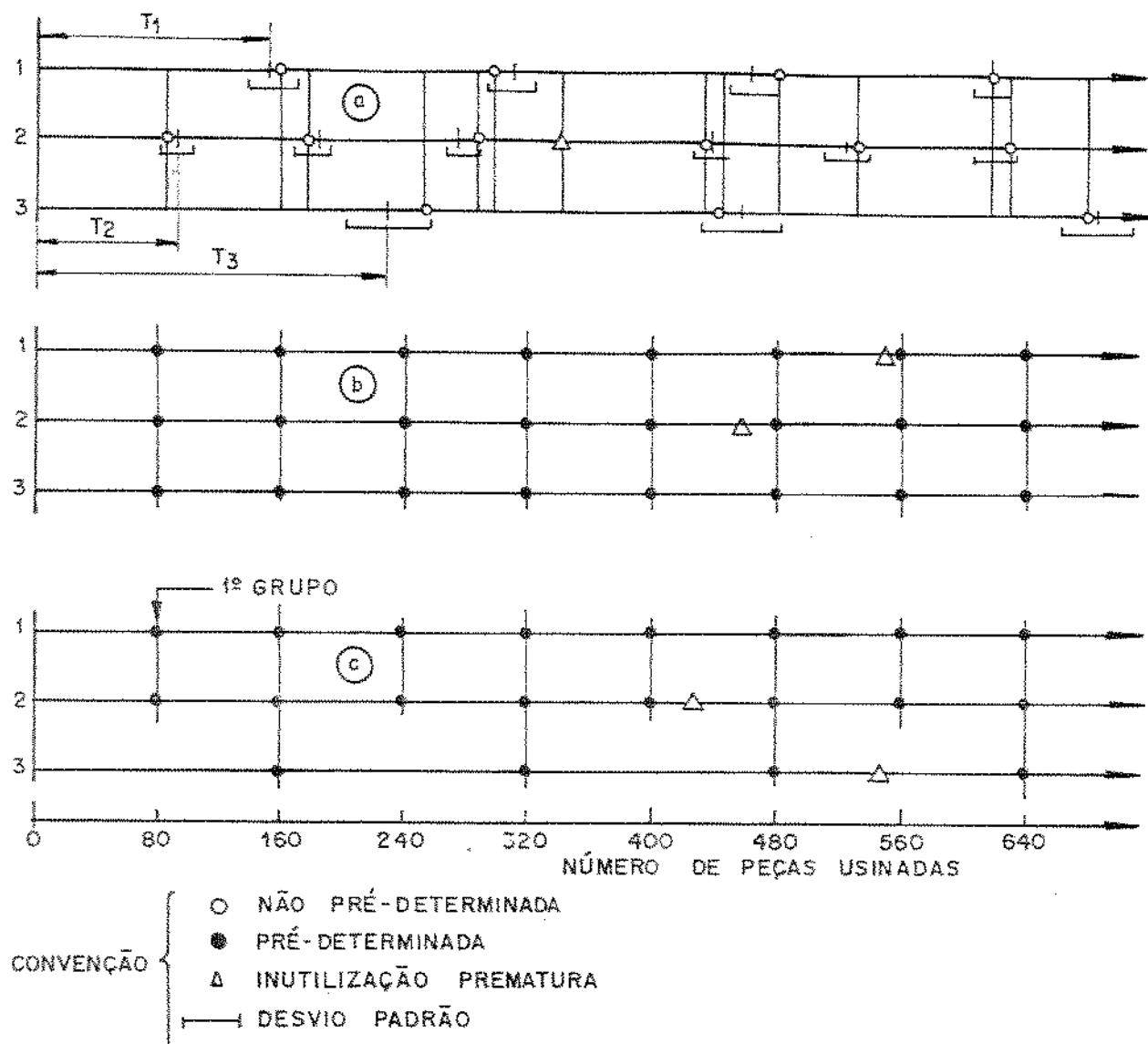


Fig. 1.3 - Procedimentos normais de troca das ferramentas
a) individual; b) um só grupo; c) grupos selecionados.

As vidas das ferramentas foram selecionadas, de sorte a se ter $T_1 \cong 2T_2$ e $T_3 \cong 3T_1$. Esta escolha foi feita de modo que a ferramenta Número 2 de vida T_2 usine um lote padrão, que neste exemplo é cerca de 80 peças. As demais ferramentas, de Números 1 e 3 usinem dois e

três lotes-padrão, respectivamente. O procedimento de troca das ferramentas ocorre da seguinte forma

- Troca individual (Fig. 1.3.a)

Ao usinar um lote-padrão (80 peças), pára-se a máquina-ferramenta e troca-se a ferramenta de Número 2 (Vida T_2). Ao usinarem-se dois lotes-padrão (160 peças), pára-se a máquina-ferramenta e são trocadas as ferramentas de Número 2 (Vida T_2) e a de Número 1 (Vida T_1). As usinarem-se três lotes-padrão (240 peças), pára-se a máquina-ferramenta e as ferramentas de Números 2 (Vida T_2) e 3 (Vida T_3) são trocados. Prossegue-se, até que se obtenha o lote de tamanho desejado (Z). Caso haja trocas prematura de ferramentas, o que ocorreu com a ferramenta de Número 2, a partir do quarto lote-padrão (320 peças), a sua troca se dará depois de atingir sua vida T_2 . A regularidade das trocas deverá ser mantida, mesmo com ocorrências de trocas prematura de ferramentas.

- Troca pré-determinada e em grupo (Fig. 1.3.b)

Neste caso, as ferramentas são trocadas de uma só vez (em grupo), todas as vezes que se usinar um lote padrão, ou seus múltiplos. A regularidade de trocas deve ser mantida, mesmo que haja trocas prematura de ferramentas, conforme ocorreu com as ferramentas de Números 1 (Vida T_1) e 2 (Vida T_2).

- Troca pré-determinada e em grupos selecionados (Fig. 1.3.c)

Neste caso, as ferramentas são trocadas em grupos selecionados, toda vez que se usinar um lote padrão ou seus múltiplos. As ferramentas que comporão o primeiro grupo, serão os que apresentarem as menores vidas, ou seja, as de Números 1 e 2. Neste exemplo, as trocas são feitas em grupos constituindo-se de duas e três ferramentas, alternando-se. A regularidade das trocas deve ser mantida, mesmo que ocorram trocas prematura de ferramentas, conforme ocorreu com as ferramentas de Números 2 (Vida T_2) e (Vida T_3)

1.8.1 — Determinação do Tempo de Reposição

Admitindo-se que a máquina-ferramenta é inicialmente preparada com m ferramentas já afiadas, tem-se para a ferramenta de ordem i

$$t_{ri} = \frac{n_{ti} \left(\frac{t}{ft} \right)_i}{Z} \quad (1.6)$$

$$n_{ti} = \frac{Z}{Z_{Ti}} - 1 \quad (1.7)$$

onde:

t_{ri} = tempo de reposição da i ésima ferramenta;

n_{ti} = Número total de trocas da i ésima ferramenta, na usinagem de um lote com Z peças;

$\left(\frac{t}{ft} \right)_i$ = tempo de troca e ajuste, correspondente a cada i ésima ferramenta;

Z_{Ti} = Número de peças usinadas por vida pela i ésima ferramenta.

1.8.1.1 Tempo total de reposição (t_r) com trocas de m ferramentas não pré-determinadas.

$$t_r = \sum_{i=1}^m t_{ri} = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^m n_{ti} \left(\frac{t}{ft} \right)_i \quad (1.8)$$

$$t_r = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{Z_{Ti}} - \frac{1}{Z} \right) \left(\frac{t}{ft} \right)_i \quad (1.9)$$

1.8.1.2 Tempo total de reposição (t_r) com trocas de m ferramentas

pré-determinadas e em grupo

$$t_r = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{Z_T^*} - \frac{1}{Z} \right) (t_{ft})_i \quad (1.10)$$

Quando as ferramentas são trocadas em um só grupo, apenas uma das ferramentas define o intervalo de troca (lote-padrão), podendo ser considerada como ferramenta-padrão da operação de usinagem. Neste caso, as $(m-1)$ ferramentas restantes apresentarão um mesmo Número de peças usinadas por vida [6]. O tempo total de reposição é dado pela equação (1.10).

1.8.1.3 - Tempo total de reposição (t_r) com trocas de m ferramentas pré-determinadas e em grupos selecionados

$$t_r = \sum_{g=1}^G \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{Z_{T,g}^*} - \frac{1}{Z} \right) (t_{ft})_{i,g} \right] \quad (1.11)$$

onde:

$Z_{T,g}^*$ = Número de peças do g ésimo lote-padrão;

$(t_{ft})_{i,g}$ = tempo de troca da i ésima ferramenta do g ésimo grupo;

G - Número de grupos selecionados;

m - Número de ferramentas constituintes de cada grupo

Neste trabalho, será estudado apenas a troca individual das ferramentas, cujo tempo total de reposição é dado pela expressão (1.9), e aplicado ao caso de uma única ferramenta.

CAPÍTULO II

PROCURA, OFERTA, RECEITA, CUSTOS E MAXIMIZAÇÃO DO LUCRO

2.1 - INTRODUÇÃO

A meta final de toda empresa sob qualquer modelo econômico é a produção de bens e serviços, os quais deverão satisfazer as necessidades (básicas e sociais) dos consumidores inseridos no seu universo. Portanto, assim como o consumidor procura produtos que lhe satisfaçam, a empresa procura fatores de produção ou recursos, de modo que lhe proporcionam a possibilidade de produzir os bens desejados. Paralelamente, a empresa cria riquezas, gera novas frentes de trabalho, distribue seus lucros, etc. O cumprimento destes objetivos, por outro lado, requer determinados recursos humanos, técnicos, materiais e financeiros, os quais permitirão a empresa aumentar seu patrimônio, e, conseqüentemente, retribuir os referidos recursos. Assim, ela assume na execução de suas atividades inúmeros compromissos, sendo que, no processo de compra e venda, incorre em determinados custos, os quais exigem obrigatoriamente o respectivo pagamento. Por exemplo, a mão de obra, os materiais diretos e indiretos, etc; são custos contraídos pela empresa em seu ciclo operacional, os quais exigirão, necessariamente, pagamentos quase que imediatos [12, 13].

Os conceitos da procura, oferta, receita, custo e maximização do lucro devem ser examinado sob a ótica das diversas estruturas diferenciadas de mercado onde atuam os grandes agentes econômicos, as empresas e os consumidores.

Existem vários fatores que dimensionam e dão formas as estruturas de mercado. Entre eles destacam-se:

- a) O número de empresas vendedoras que atuam no mercado;
- b) O tamanho e porte dessas empresas;
- c) A grande interdependência entre elas;
- d) As similaridades e as diferenciações entre bens e produtos dessas distintas empresas;
- e) A natureza e o mínimo de consumidores;

- f) A extensão das informações que tanto os Consumidores como as empresas vendedoras dispõem sobre os demais produtos comercializados no mercado.
- g) O grau de habilidade que as empresas individuais possuem para influenciar o mercado como um todo
- h) A facilidade com que as firmas entram e saem da indústria

Essas realidade são o resultado de uma expressiva evolução por que passou as estruturas do mercado.

2.2 - DESCRIÇÃO SUMÁRIA DAS ESTRUTURAS DE MERCADO.

Uma das classificações mais simples das estruturas concorrenciais é a de STACKELBERG (Tabela 2.1) [14, 15]

Sua simplicidade está no elemento básico que foi adotado para a diferenciação. Trata-se do número dos que intervêm no mercado, tanto do lado da oferta (vendedores), como do lado da procura (compradores). Essa forma de abordar a questão tornou-se clássica. Embora excessivamente simples, por deixar de considerar outros elementos também importantes para a diferenciação, ela seria a matriz de desenvolvimentos teóricos posteriores

Tab. 2.1 - Principais estruturas de mercado - uma síntese da classificação de Stackelberg.

Oferta \ Procura	Um só vendedor	Pequeno número de vendedores	Grande número de vendedores
Um só comprador	Monopólio bilateral	Quase-monopsônio	Monopsônio
Pequeno número de compradores	Quase-monopólio	Oligopólio bilateral	Oligopsônio
Grande número de compradores	Monopólio	Oligopólio	Concorrência perfeita

Segundo sua proposição, as estruturas de mercado prevalentes na realidade não se limitam apenas às hipóteses extremas da concorrência perfeita (em que se basearam os economistas liberais do século XVIII e XIX) e do monopólio (que passaria a ser particularmente considerado a partir de fins do século XIX). Partindo fundamentalmente desse elemento diferenciador, Stackelberg [14] evidenciou nove diferentes estruturas possíveis. São as que se encontram na Tabela 2.1. Considerando-se unicamente o número de compradores e vendedores, a concorrência perfeita seria caracterizada pelo grande número dos participantes, nos dois lados considerados. Em contraste, na hipótese de haver um grande número de compradores defrontando-se com apenas um vendedor, estaria caracterizada uma situação típica de monopólio, invertendo-se as posições, com grande número de vendedores mas com apenas um comprador, estaria configurada uma situação de monopsônio. E, diametralmente oposta à situação da concorrência perfeita, poderia ainda ser caracterizada uma outra situação extrema, definida pelo monopólio bilateral, em que se defrontariam no mercado apenas um vendedor e apenas um comprador. Além dessas, existiram também as situações definidas como Quase monopólio e Quase monopsônio. Trata-se de situações em que o único vendedor ou o único comprador teriam de se defrontar, respectivamente, com um número pequeno de compradores e de vendedores.

2.3 - AS QUATRO ESTRUTURAS DIFERENCIADAS

2.3.1 - Concorrência perfeita;

2.3.2 - Monopólio;

2.3.3 - Oligopólio;

2.3.4 - Concorrência monopolística.

2.3.1 - Concorrência perfeita.

Uma estrutura de mercado sob concorrência perfeita deve preencher as seguintes condições: a) Um número elevado de empresas

produtoras e de compradores, agindo independentemente, de tal forma que, pela pequena importância de cada um, nenhum possa reunir condições efetivas ou poder suficiente para modificar os padrões e os níveis da oferta e da procura e, conseqüentemente, o preço de equilíbrio prevalecente. b) Inexistência de quaisquer diferença entre os produtos ofertados pelas empresas produtoras; o produto da empresa A deve ser considerado pelos compradores como substituto perfeito dos produtos das empresas B, ..., K, ..., N. c) Perfeita permeabilidade de tal forma que não existam quaisquer barreiras para o ingresso de novas empresas, sendo igualmente fácil e socialmente inconseqüente o abandono do mercado por parte de qualquer uma das empresas que dele já participem. d) Devido à padronização dos produtos e ainda ao grande número de vendedores e compradores, não há qualquer possibilidade de que atitudes ou manobras isoladas possam alterar as condições vigentes; aliás, do ponto de vista de uma empresa isolada, são ineficazes quaisquer tentativas de diferenciação ou de concorrência extrapreço.

2.3.2 - Monopólio.

As condições que caracterizam o monopólio puro podem ser consideradas como diametralmente opostas às da concorrência perfeita. Em síntese, são as seguintes: a) Existência de apenas uma empresa, dominando inteiramente a oferta do setor considerado; dessa forma, no regime de monopólio, o ramo industrial e a firma são expressões sinônimas, pois a indústria monopolista é necessariamente constituída por uma única firma ou empresa. b) Inexistência no mercado de produtos capazes de substituir aquele que é produzido pela empresa monopolista; assim, não há alternativas possíveis para os compradores; estes ou comprarão do único produtor existente ou então deixarão de consumir o produto ou qualquer outro bem ou serviço capaz de substituí-lo satisfatoriamente. c) Inexistência de competidores imediatos, sobretudo devido às barreiras existentes para o ingresso de outras empresas no setor; como o surgimento de uma outra empresa implica o desaparecimento do monopólio, a manutenção das barreiras e das dificuldades de ingresso constitui condição sine qua non para a permanência da dominação vigente; as barreiras podem ser econômicas, técnicas ou legais. As

barreiras legais geralmente são impostas para resguardar determinados monopólios naturais, de que são exemplos alguns serviços de utilidade pública (como abastecimento d'água e telefonia) ou então algumas áreas de elevado interesse nacional (como é o caso, no Brasil, das atividades relacionadas à prospecção do petróleo). d) Considerável poder de influência sobre os preços e sobre o regime de abastecimento do mercado, em decorrência do qual o monopolista, responsável pela totalidade do fornecimento, pode controlar os níveis da produção e da oferta. Este poder, no caso de um monopólio privado, é tanto maior quanto menores forem as intervenções restritivas aplicadas pelo governo. e) Devido à plena dominação do mercado, os monopólios dificilmente recorrem à publicidade, como incentivadora da procura; os consumidores que necessitam de água, energia elétrica ou telefone só terão um fornecedor a quem recorrer; nesse sentido, quando empregada pelo monopolista, a publicidade tem muito mais finalidades institucionais do que de competição.

2.3.3 - Oligopólio.

As estruturas oligopolistas não são tão precisamente definidas como as da concorrência perfeita ou do monopólio. Dois setores de produção dominados por situações de oligopólio podem não reunir características inteiramente semelhantes. De forma geral, porém, as condições que regem o oligopólio são as seguintes: a) Um número pequeno de empresas dominando o mercado, de tal forma que, digamos, 80 ou 90% da oferta sejam realizados por um grupo relativamente reduzido de produtores. b) As indústrias sob estrutura oligopolística podem estar produzindo bens e serviços padronizados ou diferenciados; a atividade de um setor sob oligopólio tanto pode ser a mineração, em que os produtos são praticamente padronizados, como os setores automobilísticos, de eletrodomésticos ou de cosméticos, em que os produtos, de forma geral, são promovidos no mercado através de diversos elementos de diferenciação. c) Devido ao pequeno número de empresas dominantes, o controle sobre os preços pode ser amplo, dando lugar inclusive a acordos, conluíus e a práticas conspirativas; em certos casos, porém, as manobras são

dificultadas pela impraticabilidade da ação conjunta e pelo temor que as empresas possam ter quanto às reações de suas rivais. d) A concordância extra-preço é considerada como vital; como a "guerra de preços" pode vir a prejudicar todas as grandes empresas do setor, estas recorrem a outros expedientes concorrenciais, sobretudo nos casos em que é possível a diferenciação do produto. e) O ingresso de novas empresas geralmente é difícil; há consideráveis obstáculos, devido, em grande parte, à dominação exercida pelas gigantescas empresas que detêm parcelas substanciais do mercado.

2.3.4 - Concorrência monopolística.

A expressão "concorrência monopolística" foi cunhada por E.H. CHAMBERLEIN, [17] na década de 1930. Ela identifica um elevado número de situações de mercado verificadas na realidade prática e situadas entre os extremos da concorrência perfeita e do monopólio, mas sem as características resultantes do pequeno número de empresas que marcam o oligopólio. Trata-se, assim, de estruturas de mercado em que há um grande número de empresas concorrentes e em que as condições de ingresso são relativamente fáceis; todavia, cada uma das empresas concorrentes possui suas próprias patentes ou, então, é capaz de diferenciar o seu produto de tal forma que passa a criar um segmento próprio de mercado, que dominará e procurará manter. O consumidor, todavia, encontrará outros substitutos, não ocorrendo, dessa forma, a caracterização essencial do monopólio puro. Determinada patente ou determinado elemento de diferenciação pode significar uma espécie de monopolização. Mas, havendo outros concorrentes com bens ou serviços similares e substitutos, haverá também concorrência. Combinando-se, dessa forma, o elemento de monopolização com as possíveis forças concorrenciais, define-se uma estrutura especial de mercado, conhecida como concorrência monopolística. Em resumo, suas características principais são as seguintes: (a) Existência de grande número de empresas, relativamente iguais em poder concorrencial; esse número geralmente se situa numa posição intermediária entre a atomização da concorrência perfeita e a estrutura molecular do oligopólio. (b) Acentuada diferenciação dos produtos, como uma de suas mais

significativas peculiaridades o bem ou serviço de cada empresa apresenta particularidades capazes de distingui-lo dos demais e de criar um mercado próprio para ele; todavia, as diferenciações não implicam a inexistência de similares-substitutos, que sempre constituirão alternativas para os consumidores. (c) Apreciável, porém não muito ampla, capacidade de controle dos preços; (essa capacidade dependerá do grau de diferenciação real do produto, da proximidade das empresas concorrentes, de seu número e de seu esforços mercadológico). (d) Relativa facilidade para ingresso de novas empresas no mercado; essa facilidade é bem maior do que nas estruturas dominadas por oligopólios, mas algumas barreiras tornarão o ingresso sempre mais difícil do que no caso da concorrência pura. Essas barreiras são geralmente decorrentes das dificuldades existentes para conquistar fatias significativas do mercado e para diferenciar o novo produto a ser introduzido.

2.4 - A CURVA DA PROCURA SEGUNDO AS QUATRO ESTRUTURAS DIFERENCIADAS [14, 16]

Para a análise do comportamento das empresas, em cada uma das estruturas de mercado definidas, devemos inicialmente examinar as diferentes formas assumidas pelas curvas da procura; vistas do ponto de vista da empresa. Como estamos interessados em analisar o comportamento das empresas, procuraremos ver a procura na forma como ela se apresenta para a empresa, nas quatro estruturas concorrenciais que mais se aproximam na realidade prática.

2.4.1 - A curva da procura da empresa perfeitamente competitiva (Fig. 2.1) [14].

Devido às condições que regem a concorrência perfeita, a empresa não tem condições de exercer, nessa estrutura de mercado, quaisquer formas de controle sobre os preços vigentes. A empresa perfeitamente competitiva subordina-se aos preços resultantes do livre jogo das forças do mercado - determinados pela interação de um grande número de compradores e vendedores, que atuam independentemente e sem poderes individuais para promover qualquer tipo de manobra que implique a alteração das condições estabelecidas.

A total subordinação da empresa aos preços ditados pelo mercado advém, ademais, de sua limitada participação nesse mesmo mercado. A parcela do abastecimento do mercado proporcionada pela empresa perfeitamente competitiva é tão diminuta e o número de concorrentes é tão elevado, que a empresa não reúne qualquer condição para vender sua produção a preços superiores aos determinados pelo livre jogo das forças da oferta e da procura. Por outro lado, não necessitará reduzir os seus preços para níveis inferiores. Como o volume de sua participação é insignificante, a empresa poderá vender as quantidades que desejar, desde que se subordine aos preços vigentes.

Na Figura 2.1 está representada esta situação especial. O gráfico (a) reproduz as condições vigentes no mercado. As curvas PP e OO referem-se, respectivamente, à procura e à oferta no mercado considerado como um todo. O preço de equilíbrio, resultante dos livres movimentos que então se estabelecem, é dado pela intersecção das duas curvas, no ponto E, situando-se no nível p_0 . Este é o preço ao qual todas as empresas deverão necessariamente subordinar-se. Assim, do ponto de vista de cada uma das empresas participantes de um mercado perfeitamente competitivo, a curva da procura assume uma forma horizontal perfeitamente elástica, situando-se exatamente ao nível do preço de mercado. O gráfico (b)

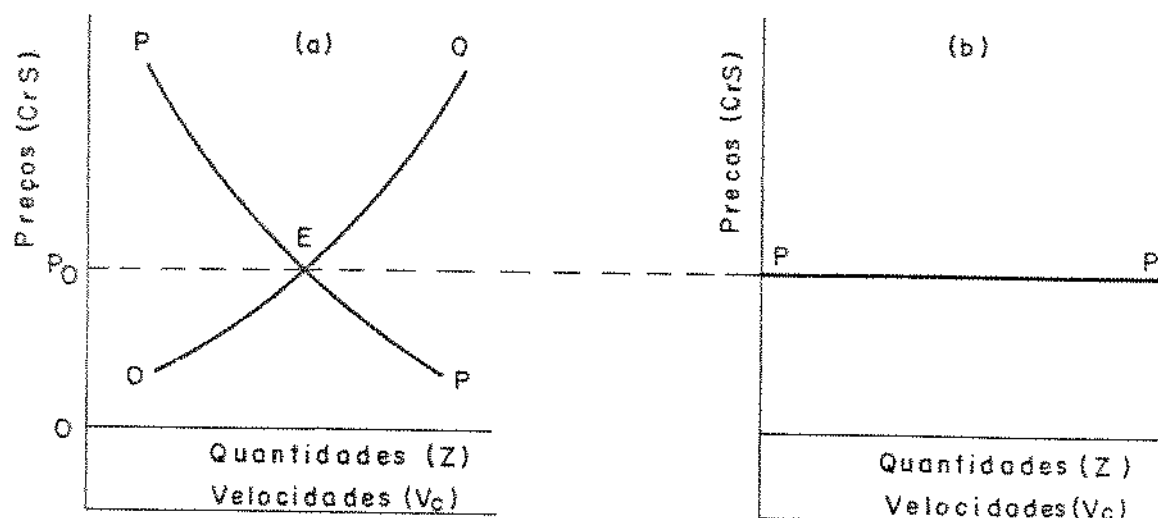


Figura 2.1 - A curva da procura do ponto de vista da empresa
(o caso da concorrência perfeita)

evidencia essa situação. Ao preço p_0 , qualquer quantidade que a empresa trazer ao mercado será absorvida. Não há interesse em operar abaixo desse nível. E não há possibilidades de praticar preços superiores.

2.4.2 - A curva da procura da empresa monopolista (Fig. 2.2) [14]

Para uma empresa monopolista a situação é inteiramente diferente da que se observa nas estruturas de mercado perfeitamente competitivas. No monopólio, como vimos, o mercado é inteiramente dominado por uma única empresa. Toda a procura dirigida ao produto da empresa monopolista somente poderá ser atendida por ela própria. Não há substitutos. Não há concorrentes. É plena a dominação do mercado.

Nessas condições, como mostramos na Figura 2.2, a curva da procura, do ponto de vista da empresa monopolista, é a própria curva do mercado como um todo. O monopólio não se subordina a determinado preço, ditado pelo mercado. Defrontando-se com toda uma escala típica de procura, ele poderá praticar infinitas combinações de preços-e-quantidades. Regulará as quantidades em função dos preços. E, na hipótese de não haver quaisquer restrições aplicadas pelo governo às suas formas operacionais, a empresa monopolista praticará a combinação que possibilite a maximização dos seus interesses.

Isto não significa, todavia, que a empresa monopolista poderá aumentar os seus preços infinitamente. Como não há substitutos para o seu produto, a curva da procura resultante é relativamente inelástica, mas não totalmente inelástica. Assim, os aumentos de preços possibilitam aumentos da receita total até certo limite. Como as quantidades procuradas diminuem à medida que os preços aumentam, haverá um ponto a partir do qual os aumentos de preços não gerarão receitas totais maiores. Desse ponto em diante, a queda das quantidades procuradas será mais que proporcional ao aumento de preços praticado.

Na Figura 2.2 essas observações podem ser visualmente verificadas. A receita total (que sempre resulta da multiplicação das quantidades vendidas pelos preços correspondentes) aumenta até

p_1 , para declinar a partir daí. Ao preço p_0 , a receita total (dada pelo produto $Op_0 \cdot Oq_0$) é menor do que a receita total ao preço p_1 , mas a expansão do preço para níveis superiores a p_1 implicará receitas totais cada vez menores.

Ainda que sujeita a essa limitação, a faixa de manobras da empresa monopolista é bastante ampla. A total dominação do mercado permite-lhe fixar-se na posição que julgar mais conveniente.

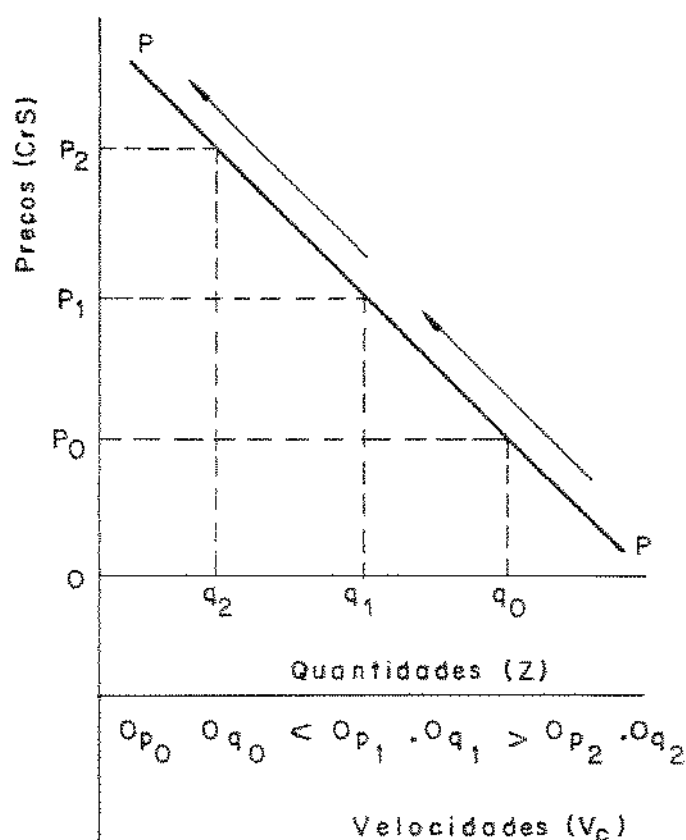


Figura 2.2 - A curva da procura do ponto de vista da empresa (o caso do monopólio)

2.4.3 - A curva da procura da empresa oligopolista (Fig. 2.3) [14]

As curvas de procura, do ponto de vista da empresa oligopolista, variam em função das características que se observam no oligopólio de que ela participa. Como vimos, há oligopólios de produtos padronizados; e há os de produtos diferenciados. Além disso, as empresas oligopolistas podem estar agindo

independentemente, ou podem estar atuando sob regras convencionadas através de acordos ou conluídos. As várias possibilidades decorrentes dessas diferentes situações implicam que a empresa pode enfrentar diferentes tipos de curvas de procura. "A interdependência dos produtores no mercado oligopolístico - adverte LEFTWICH [17] - torna difícil definir a curva de procura de uma empresa. Trata-se de uma dificuldade que os economistas não resolveram e provavelmente não resolverão de modo completo. Em alguns casos, a curva de procura com que a empresa se defronta é indeterminada. Em outros, todavia, pode ser determinada com alguma precisão".

Assim, para definirmos uma curva de procura, do ponto de vista da empresa oligopolista, vamos fixar-nos num tipo especial de oligopólio - em que as poucas empresas que dominam o mercado atuam independentemente. Na ausência de acordos ou conluídos, as decisões de uma empresa certamente provocarão reações nas empresas rivais. Embora sejam diferenciados, se os produtos são substitutos próximos, as reduções de preços postas em vigor por uma empresa poderão aumentar sua participação no mercado, em detrimento das taxas de participação das empresas rivais. Estas, contudo, dificilmente aceitarão passivamente a nova situação. Para não perderem vendas, baixarão também os seus preços. E a "guerra de preços" que então poderá ser estabelecida não possibilitará aumentos significativos nas vendas da empresa que deu origem ao processo.

Essa situação especial - que pode ser considerada típica para os oligopólios não organizados em conluídos - está reproduzida na Figura 2.3. A empresa oligopolista que se defronta com a curva de procura P poderá decidir aumentar seus preços, na expectativa de que não ocorrerão reduções significativas nas quantidades procuradas. Estas se reduzirão nas proporções indicadas pela projecção P' da curva, pressupondo-se, assim, que os aumentos praticados pela empresa seriam acompanhados pelas rivais, todas interessadas em obter aumentos de receita a curto prazo. Todavia, não existindo acordos ou conluídos, as rivais poderiam manter os seus preços - interessadas, dessa forma, em aumentar a fatia de sua participação no mercado. Essa atitude das rivais implicaria perdas de vendas e de receitas para a empresa que, isoladamente, decidiu aumentar os seus preços. A mesma consequência poderia ocorrer - examinando-se o

problema sob outro ângulo - caso a empresa oligopolista decidisse reduzir os seus preços; nesse caso, as expectativas de crescimento nas quantidades procuradas, dadas pela projecção P' da curva, poderiam ser frustradas pelas reacções das rivais. Estas, novamente interessadas em ampliar sua participação no mercado, também praticariam reduções em seus preços.

Por essas razões, a procura, do ponto de vista da empresa oligopolista não organizada em acordos ou conluíus, é geralmente dada por uma curva quebrada, como a da Figura 2.3. "A forma da curva - assinala HOGENDORN [16] - implica que a empresa hesitará em alterar a situação por meio de uma mudança de preços. Qualquer decisão para aumentar os preços acima de Op_0 reduzirá rapidamente as vendas e a receita total. O segmento da curva acima do "ponto de quebra" é altamente elástico; conforme já indicamos, as firmas concorrentes talvez não acompanhem o aumento de preços. Inversamente, uma diminuição de preço efetuada pela empresa representada na figura poderá ser acompanhada pelas firmas concorrentes, que não desejam perder vendas. A redução do preço, assim, poderá não aumentar muito a quantidade vendida e, ao longo desse segmento elástico da curva de procura, a receita total diminuirá rapidamente."

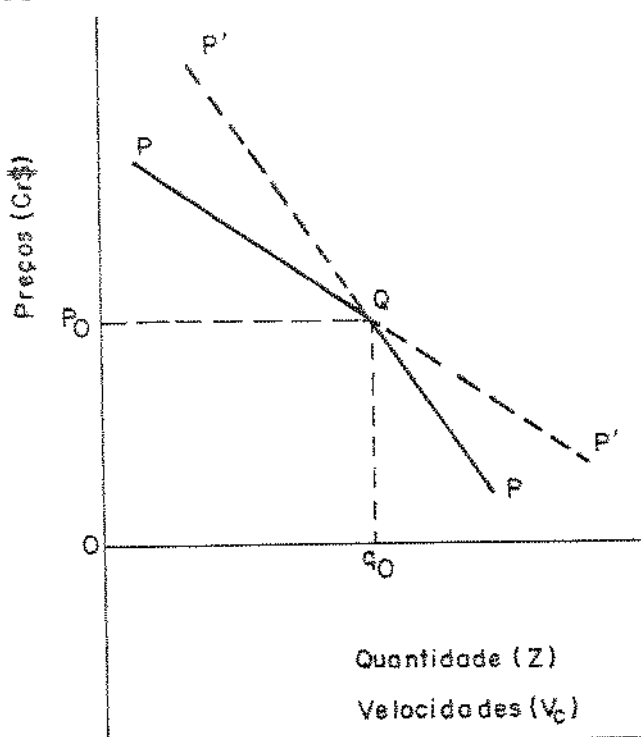


Figura 2.3 - A curva da procura do ponto de vista da empresa (o caso do oligopólio)

2.4.4 - A curva da procura da empresa sob concorrência monopolista
Fig. 2.4) [14]

Como nos casos anteriores, a forma da curva da procura com que se defronta uma empresa em concorrência monopolística provém das características dessa estrutura especial de mercado. Assim, situando-se a concorrência monopolística entre os extremos da concorrência perfeita e do monopólio, a curva típica da procura, do ponto de vista de uma empresa subordinada a esse regime de mercado, ficará também a meio-caminho entre a curva da procura da empresa perfeitamente competitiva e a da empresa monopolista.

A concorrência monopolística pressupõe elevado número de empresas, existência de produtos similares-substitutos (embora diferenciados ou protegidos por patentes) e consideráveis possibilidades de expedientes concorrenciais não baseados exclusivamente nos preços. Esta estrutura de mercado contém, assim, elementos que conduzem a uma forte concorrência, mas admite, ao mesmo tempo, elementos que implicam formas especiais de monopolização. Por isso, a curva da procura com que se defronta a empresa assemelha-se à reproduzida na Figura 2.4. Trata-se de uma curva, no seu todo, mais elástica que a da empresa monopolística. Entretanto, não chega aos limites da perfeita elasticidade que caracteriza a curva da procura da empresa perfeitamente competitiva. A elasticidade, aqui existente, advém, basicamente, do elevado número de similares-substitutos. Na hipótese de aumentos de preços, os consumidores poderão passar a preferir os produtos similares das empresas concorrentes. Além disso, os expedientes promocionais baseados na diferenciação do produto e em outras formas de concorrência extrapreço tanto poderão expandir a procura da empresa, deslocando-a de P para P' , como torná-la vítima da ação mais inteligente e agressiva das empresas concorrentes, deslocando-a negativamente de P para P'' .

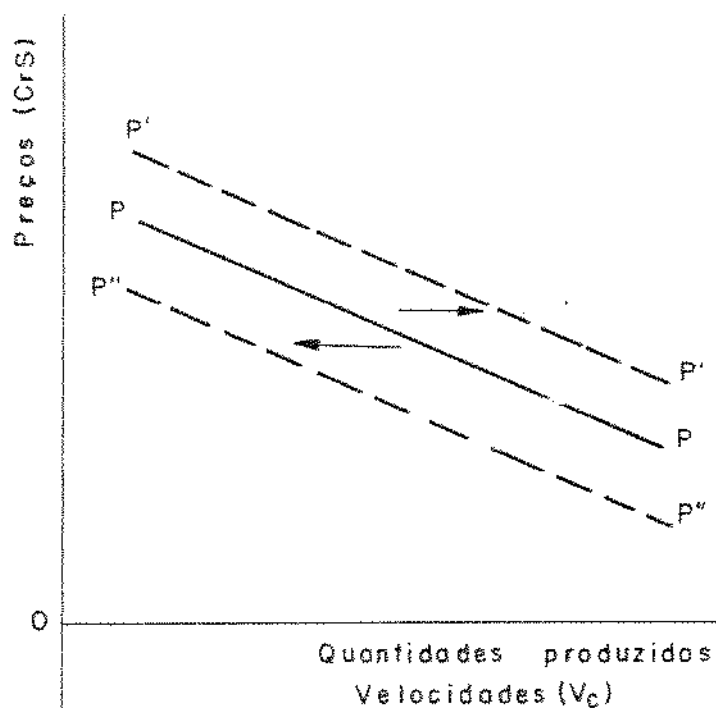


Figura 2.4 - A curva da procura do ponto de vista da empresa (o caso da concorrência monopolista)

2.5 - COMPORTAMENTO DOS CUSTOS [14, 17]

Após o exame das diferentes características da procura do ponto de vista da empresa nas quatro principais estruturas de mercado, será abordado dentro da complexa realidade dos sistemas de mercado, os custos de produção. A produção desenvolvida por uma empresa, independentemente da estrutura do mercado em que se situa, pode ser descrita como sendo uma função dos recursos que ela mobiliza. O volume da produção será maior ou menor na dependência do volume dos recursos que a empresa acionar. Uma parte dos recursos necessários para a produção varia diretamente em função do volume da própria produção. Outra parte, todavia, não varia a curto prazo, trata-se de um conjunto de recursos capazes de suportar volumes diferentes de produção. Assim, a curto prazo, há recursos fixos e variáveis. Os fixos são os que não variam em função das variações da produção. Os variáveis são os que, necessariamente, se alteram em função das variações da produção. Os recursos fixos incluem as edificações, o pessoal administrativo de cúpula, a manutenção de setores não diretamente envolvidos na atividade de produção, os

equipamentos e outros elementos que definem genericamente a "capacidade instalada" da empresa. Já os recursos variáveis incluem os insumos necessários à atividade de produção (matérias-primas e outros materiais intermediários), os operários, a energia e outros fatores envolvidos nessa mesma atividade. A diferente natureza dessas duas categorias de recursos conduz à ocorrência de custos de natureza também diferentes. Os recursos fixos e os variáveis conduzem, respectivamente, a custos fixos e variáveis. Os custos fixos incluem todas as formas de remuneração ou ônus decorrentes da manutenção dos correspondentes recursos. Os custos variáveis decorrem de todos os pagamentos dirigidos aos recursos que variam diretamente em função do volume de produção da empresa. Estes últimos alteram-se em função das quantidades dos fatores variáveis empregados. Como as quantidades produzidas variam diretamente em função do volume dos fatores variáveis, é lícito admitir que os custos variáveis alteram-se diretamente em função do nível da produção.

Para melhor compreensão do comportamento destes custos, a Tabela 2.2 fornece um conjunto de dados hipotéticos, porém teoricamente lógicos e justificáveis que permitirá a construção do gráfico da Figura 2.5.

Na primeira coluna, admitimos uma série crescente de quantidades produzidas. Nas outras três, registramos as três correspondentes séries de custos - fixos, variáveis e totais. Como ali se observa, os custos fixos totais (CFT) mantêm-se no nível de 2.000 cruzeiros, não importando qual seja o volume de produção admitido. A curto prazo, eles não se alteram, esteja a empresa produzindo zero, mil ou duas mil unidades - assim são os encargos representados pelos aluguéis, depreciações ou tributos incidentes sobre os ativos imobilizados, bem como os pagamentos aos setores que a empresa deve manter independentemente do ritmo ou do nível de suas atividades de produção. Já os custos variáveis totais (CVT) teoricamente inexistem quando a produção se iguala a zero, mas progridem à medida que a produção atinge níveis elevados. A progressão desses custos não é, todavia, constante. Inicialmente, a progressão é decrescente - os acréscimos dos custos variáveis são menos que proporcionais aos aumentos obtidos nas quantidades

produzidas. Passam depois por um curto intervalo de progressão constante, para, em seguida, se tornarem crescentes.

Tabela 2.2 -- Comportamento, a curto prazo, dos custos fixos, variáveis e totais

Quantidades produzidas (Z)	Em Cr\$		
	Custo fixo total (CFT)	Custo variável total (CVT)	Custo total (CT)
0	2.000	0	2.000
200	2.000	800	2.800
400	2.000	1.360	3.360
600	2.000	1.680	3.680
800	2.000	1.910	3.910
1.000	2.000	2.150	4.150
1.200	2.000	2.550	4.550
1.400	2.000	3.210	5.210
1.600	2.000	4.110	6.110
1.800	2.000	5.280	7.280
2.000	2.000	6.810	8.810
2.200	2.000	9.610	11.610

As razões principais que justificam esse comportamento residem num conceito bastante simples, traduzido pela expressão economias de escala. De início, há favoráveis possibilidades para economias de escala. Ao combinarmos com os recursos fixos disponíveis pequenas doses de recursos variáveis, estes não conseguirão inicialmente aproveitar com eficiência toda a potencialidade da empresa; isto significa que as primeiras unidades produzidas são geralmente obtidas mediante altos custos variáveis. Mas, à medida que a escala de produção for aumentando, as proporções da combinação dos recursos fixos e variáveis possibilitarão melhores rendimentos gerais, reduzindo-se então, as taxas de expansão desses custos, em proporção às unidades adicionais obtidas. Esse processo defrontar-se-á, entretanto, com posteriores limitações. Haverá um momento a partir do qual os recursos fixos existentes não suportarão mais, com igual eficiência, as doses adicionais de recursos variáveis. Aí então os acréscimos nas quantidades produzidas processar-se-ão a custos variáveis proporcionalmente mais altos.

Somando os dados referentes aos custos fixos totais e aos custos variáveis totais, obtemos os custos totais (CT), que aparecem na última coluna da Tabela 2.2. O seu comportamento, evidentemente, resulta do comportamento dos dois conceitos de custo que o definem. Assim, como se observa na Figura 2.5, enquanto os custos fixos totais são descritos por uma paralela ao eixo das quantidades produzidas, cortando o eixo vertical ao nível de 2 000 cruzeiros, os custos totais são descritos por uma curva de lenta e decrescente expansão inicial, para, posteriormente, apresentar taxas altas e progressivas de crescimento. A distância entre as duas curvas representa os custos variáveis totais.

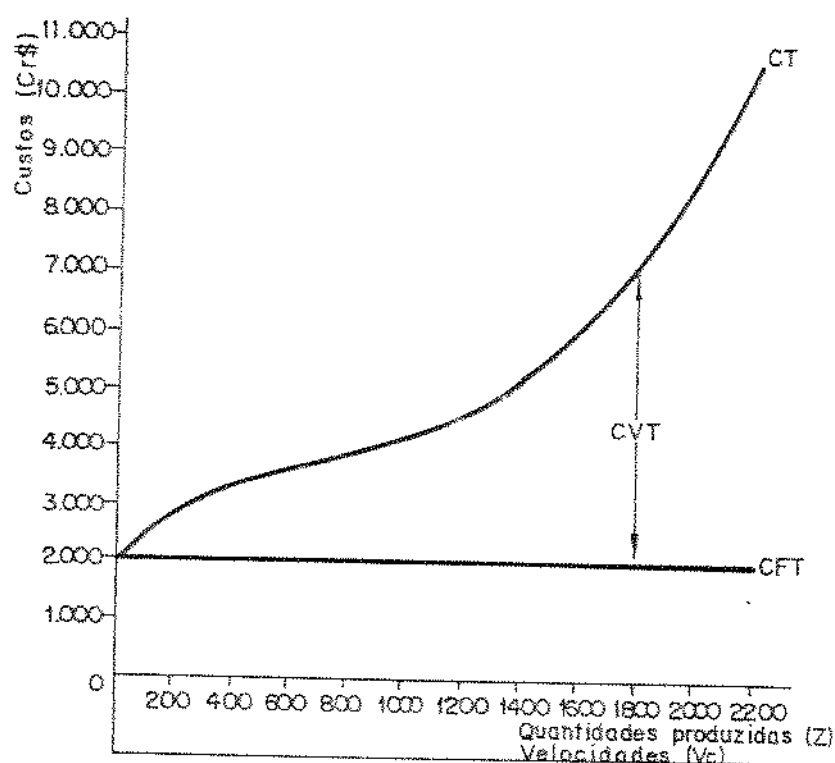


Fig. 2.5 - Representação gráfica do comportamento dos custos fixos, variáveis e totais a curto prazo.

Os custos fixos totais, a curto prazo, não se alteram em função das quantidades produzidas. Já os variáveis totais aumentam à medida que a produção aumenta, embora não em proporções constantes. E os custos totais são resultantes da soma dos custos fixos e variáveis totais. Assim, a distância entre as curvas dos custos fixos totais e dos

custos totais indica o montante dos custos variáveis totais. O custo total CT pode ser representado pela equação

$$CT = az^3 - bz^2 + cz + CFT \quad [18,19] \quad (2.1)$$

onde

$$a, c > 0 \quad e \quad b^2 < 3ac$$

Z - quantidades produzidas

A equação (2.1) é a que melhor representa a curva do custo total CT mostrada na figura 2.5

2.5.1 - Custos médios [14,17]

Os custos médios compreendem os seguintes custos:

- Custo fixo médio (CFM_e), custo variável médio (CVM_e) e o custo total médio (CTM_e). Todos eles se encontram reunidos na Tabela 2.3.
- O custo fixo médio (CFM_e) resulta da divisão do custo fixo total (CFT) pela quantidades produzidas, para cada um dos diferentes níveis de produção admitidos (Fig. 2.6). É dado por:

$$CFM_e = \frac{CFT}{Z} \quad (2.2)$$

Pela sua natureza, pode ser considerado como uma espécie de "taxa de alocação dos custos fixos" a cada uma das unidades produzidas.

Assim, para baixos níveis de produção, a taxa de alocação desses custos é alta. As primeiras unidades produzidas, ao absorverem o total dos custos fixos da empresa, são oneradas por uma taxa acentuadamente alta. Porém, à medida que a empresa atinge níveis mais altos de produção, como o total dos custos fixos permanece inalterado, será observada uma rápida redução da taxa de alocação por unidade. A redução será particularmente acentuada nos primeiros instantes, desacelerando-se progressivamente. Para as primeiras 200 unidades produzidas, os 2.000 cruzeiros de custos fixos resultam uma taxa média de 10,00 cruzeiros por unidade. Produzindo-se mais 200 unidades, a taxa situar-se-á ao nível de 5,00 por unidade, atingindo 2,0 ao nível de 1.000 unidades. A partir daí, porém embora continue decrescendo, o ritmo do decréscimo deixa de

ser tão acentuado. Há, assim, um persistente amortecimento da taxa de alocação resultante - até um ponto em que os acréscimos possíveis na produção já não provocarão reduções significativas nas taxas do custo.

- O custo variável médio (CVM_e) resulta da divisão do custo variável total (CVT) pelas quantidades produzidas, para cada um dos diferentes níveis de produção admitidos (Fig. 2.6)

$$\text{é dado por: } CVM_e = \frac{CVT}{Z} \quad (2.3)$$

Pela sua natureza, não apresenta disparidades tão acentuadas quanto as que se observam com os custos fixos médios. As taxas, para os diferentes níveis de produção admitidos, não apresentam quedas ou acréscimos tão acentuados - a magnitude da diferença entre os valores médios mais altos e os mais baixos é, nesse caso, menos expressiva do que no caso dos custos fixos. Além disso, o custo variável médio apresenta a particularidade de decrescer até certo nível de produção, mantendo-se relativamente constante durante certo intervalo, para, então, registrar progressiva tendência à expansão. Esse comportamento é decorrente do regime das economias de escala. Inicialmente, a empresa incorre em economias crescentes. Depois em economias constantes. E, finalmente, em economias decrescentes ou deseconomias.

- O custo total médio (CTM_e) resulta da soma do custo fixo médio (CFM_e) com o custo variável médio (CVM_e), (Fig. 2.6). É dado por:

$$CTM_e = CFM_e + CVM_e \quad (2.4)$$

O seu comportamento incorpora, evidentemente, os comportamentos dos custos fixos médios e variáveis médios. Assim, há um forte declínio inicial, não apenas resultante do declínio dos custos fixos, como também dos variáveis. Atravessa, em seguida, uma zona de estabilização relativamente prolongada e resultante de dois fatores combinados: a queda já menos acentuada do custo fixo médio e a ocorrência de economias constantes de escala assinaladas pelos custos variáveis. Por fim, revelará sensível tendência à expansão. Isto ocorrerá a partir do instante em que os acréscimos observados no custo variável médio passarem a suplantar os pequenos decréscimos do custo fixos médio.

$$2.5.2.3 - \text{Custo marginal} = \frac{dCT}{dV} = \frac{2}{3} + 2V + 4 = 4,67 + 2V$$

É o custo em que a empresa incorre para produzir uma unidade adicional. Pode ser definido também como sendo a variação na quantidade de peças produzidas em um determinado período, ou na variação da velocidade de corte (Fig. 2.6)

O custo marginal é dado por:

$$CM = \frac{dCT}{dV} = \frac{2}{3} + 2V + 4 = 4,67 + 2V \quad (2.5)$$

A Tabela 2.3 fornece seus valores na coluna 5. A Figura 3.3 representa graficamente as curvas dos custos definidas nos itens 2.5.1 e 2.5.2. A partir dos dados da Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Custos fixos, variáveis, totais e marginal, a curto prazo

Quantidades (produzidas) (Z)	Em Cr\$			
	Custo fixo	Custo variável	Custo total	Custo
	médio	médio	médio	marginal
	$\frac{CTF}{Z}$	$\frac{CVT}{Z}$	$\frac{CT}{Z}$	CMg
0				
200	10,00	4,00	14,00	4,00
400	5,00	3,40	8,40	2,40
600	3,33	2,80	6,13	1,60
800	2,50	2,39	4,89	1,15
1.000	2,00	2,15	4,15	0,80
1.200	1,67	2,12	3,79	0,60
1.400	1,43	2,29	3,72	0,30
1.600	1,25	2,57	3,82	0,50
1.800	1,11	2,92	4,03	0,75
2.000	1,00	3,40	4,40	1,00
2.200	0,91	4,00	4,91	1,40

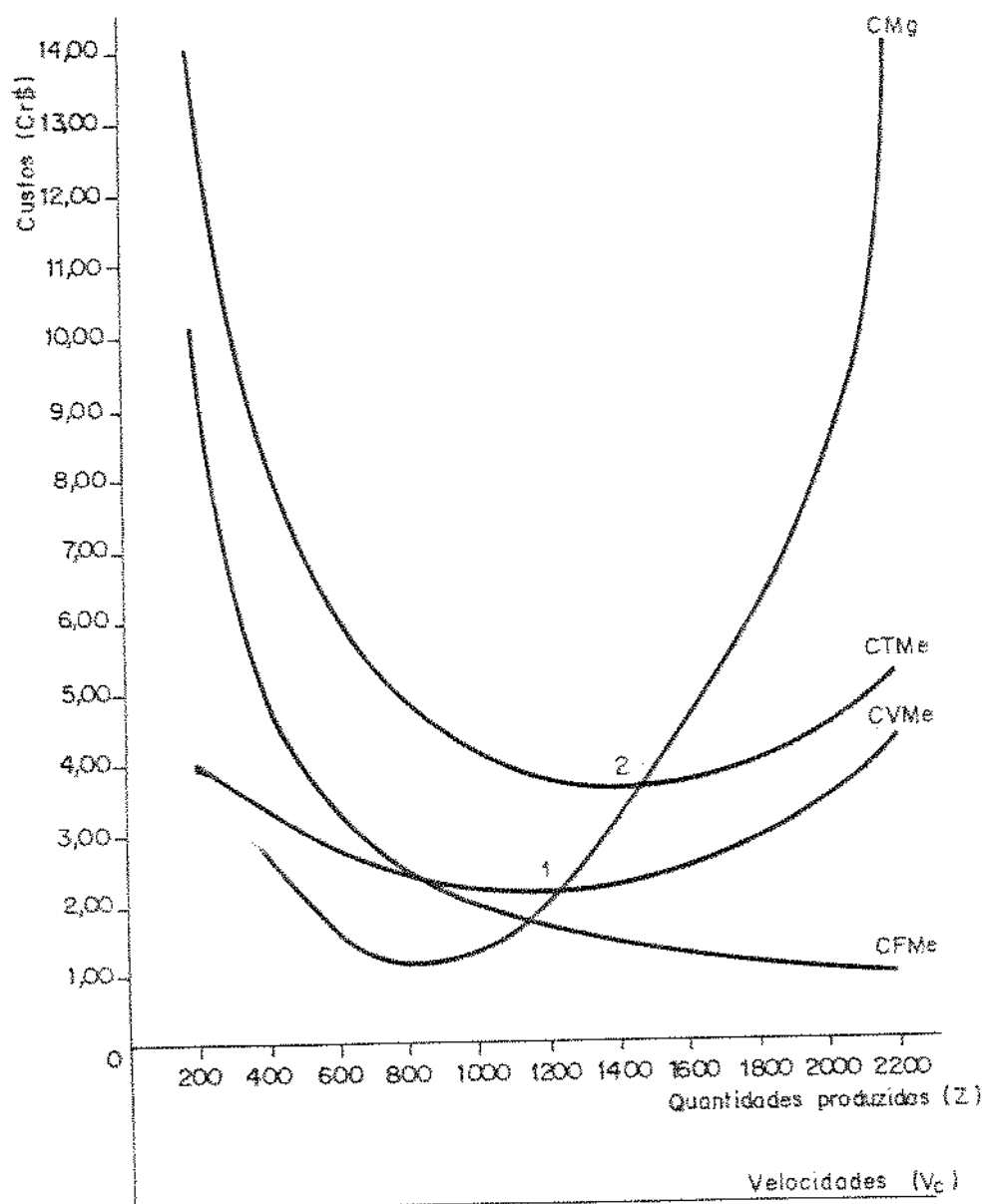


Fig. 2.6 - Comportamento dos custos fixos, variáveis e totais médios e do custo marginal a curto prazo

A curva do custo total médio é resultante da soma das curvas do custo fixo médio e do custo variável médio. A curva do custo marginal (que representa o custo em que a empresa incorre para produzir uma unidade adicional) corta a curva do custo variável médio em seu ponto mínimo (1), e a curva de custo total médio no seu ponto mínimo (2).

2.6 - A MAXIMIZAÇÃO DO LUCRO [14. 20]

Como ponto de partida, devemos admitir que nos sistemas econômicos fundamentados na propriedade privada dos meios de produção e na liberdade de iniciativa empresarial, um dos objetivos econômicos essenciais da empresa é a maximização do lucro - traduzida pela máxima diferença possível entre a receita total e o custo total.

O custo total, como vimos, resulta de todos os encargos fixos de manutenção da capacidade instalada, somados aos encargos variáveis diretamente decorrentes das atividades de produção. A empresa incorre em todos esses custos na expectativa de que a produção resultante dos recursos mobilizados gerará uma receita total compensadora - capaz não apenas de cobrir todos os encargos em que incorreu, como ainda de possibilitar determinada taxa excedente de lucro. Afinal, o lucro é o móvel da ação empresarial privada. E a empresa, dadas as condições prevaletentes no mercado em que atua, procurará torná-lo o mais alto possível. Sua maximização é um dos mais significativos parâmetros da eficiência privada.

Mesmo pressupondo as condições da concorrência perfeita, em que diversas "regras do jogo" são livremente estabelecidas através do mercado e do mecanismo do sistema de preços, a empresa procurará tornar máxima a diferença positiva entre suas receitas e seus custos. As faixas de manobra poderão ser bastante estreitas, mas, ainda assim, a empresa não poderá perder de vista o objetivo fundamental de maximizar os seus lucros. A mesma preocupação subsiste também nos oligopólios, embora a empresa, na hipótese de não haver conluios, sempre haverá de levar em conta as possíveis reações das empresas rivais, cada vez que determinada operação é desencadeada com o fim de tornar máximos os lucros a curto ou a longo prazo. Por outro lado, na concorrência monopolística, a diferenciação do produto e a luta pela conquista de faixas adicionais de participação no mercado têm por objeto principal a motivação do lucro maior. E no monopólio, em que as faixas de manobra são geralmente maiores, a maximização do lucro poderá ser perseguida com um grau de risco possivelmente reduzido. Mas, em todos os casos, independentemente da estrutura concorrencial

preexistente, a empresa sempre estará interessada em determinar a posição operacional que lhe permita a otimização de seus interesses.

Mas - esta é a pergunta relevante que a esta altura se impõe - como a empresa poderá, pelo menos teóricamente, determinar o ponto de maximização do seu lucro? Qual o nível de produção que torna máxima a distância entre a receita total e o custo total? Considerando-se as variações de elasticidade das diferentes curvas de procura, qual o nível de preço que maximizará os interesses da empresa?

Todas essas perguntas têm um evidente núcleo comum. Direta ou indiretamente elas envolvem o objetivo empresarial de maximização dos lucros. Não há, todavia, possibilidade de construção de um modelo teórico geral, para uma resposta única. O equilíbrio da empresa e a maximização de sua taxa de lucro dependem fundamentalmente da estrutura do mercado em que ela opera. Embora o comportamento dos custos possa ser considerado como independente das diferentes estruturas concorrenciais, o comportamento da receita está intrinsecamente ligado às curvas de procura com que a empresa se defronta. E essas curvas variam em função das características estruturais de cada mercado.

Assim, para a análise dos pressupostos teóricos da maximização do lucro e da conseqüente determinação do binômio preços-quantidades, vamos focalizar cada uma das quatro estruturas definidas.

2.6.1 - O modelo da concorrência perfeita (Fig. 2.7). [14]

Como destacamos em itens anteriores, uma das principais características da empresa perfeitamente competitiva é a sua subordinação aos preços prevalecentes no mercado de que participa. Aos níveis vigentes de preços, a empresa poderá vender as quantidades que desejar, pressupondo-se ademais, que nessa estrutura de mercado, devido ao elevado número de empresas concorrentes, a participação de cada uma é tão reduzida que, por mais que as vendas unitárias de determinada empresa sejam aumentadas, sua parcela de responsabilidade pelo abastecimento do mercado continuará insignificante. Em tais condições, não há, portanto, pelo menos

teoricamente e a curto prazo, quaisquer limitações às quantidades que a empresa perfeitamente competitiva poderá vender, desde que pratique o preço de mercado, resultante da interação das forças da oferta e da procura.

A curto prazo, a empresa procurará, então, ajustar o volume de sua produção, de tal forma que obtenha - a partir das pré-condições resultantes das forças da oferta e da procura - o máximo lucro que lhe for possível. O tamanho da empresa e sua capacidade de produção não poderão variar significativamente no curto prazo. Embora o mercado possa absorver, ao preço vigente, quaisquer quantidades que a empresa queira vender, esta estará limitada pela sua capacidade de produção instalada. Ainda assim, porém, sempre haverá uma escala de produção ao longo da qual a empresa poderá mover-se. Embora as alterações nas quantidades a produzir não possam variar do zero ao infinito, há certa faixa de manobra dentro da qual poderá a empresa optar pela posição que possibilite a maximização dos seus lucros, dada a estrutura de custos com que se defronta.

Para melhor ilustração dessas observações teóricas, vamos considerar os dados da Tabela 2.4. Ai está reproduzida a nossa já conhecida estrutura típica de custos, além de três novas colunas referentes aos preços, às escalas da receita total e aos resultantes lucros ou prejuízos em que a empresa pode eventualmente incorrer. Para a elaboração da escala da receita total, partimos do pressuposto de que o preço de mercado está ao nível de 5 cruzeiros por unidade. Praticando esse preço, a empresa perfeitamente competitiva poderá então determinar o nível de produção que conduza ao maior lucro possível. Esse nível será aquele em que se observar, em termos positivos, a máxima distância entre os custos totais e a receita total. Se a empresa nada produzir, seu prejuízo será igual ao seu custo fixo total - pois este é um custo estrutural em que a empresa incorre independentemente das quantidades que estiver produzindo. Se produzir e vender 200 unidades, a empresa incorrerá num custo total de 2.800 cruzeiros - 2.000 fixos mais 800 variáveis. O prejuízo será então menor, situando-se em 1.800 cruzeiros. Aumentando o volume das quantidades produzidas e, conseqüentemente, obtendo receitas totais sucessivamente maiores, a empresa reduzirá o

prejuízo, anulando-o no ponto em que o custo total se igualar a receita total. Isto se dará a um nível de produção ligeiramente inferior a 800 unidades. A partir daí, passará a obter lucro em escala crescente. Todavia, devido ao comportamento típico dos custos, haverá um ponto a partir do qual os aumentos da receita total deixarão de ser compensadores. Devido à ocorrência de deseconomias de escala, há um limite a partir do qual os custos passam a progredir aceleradamente, superando a possível progressão da receita. Os lucros totais começam, então, a declinar e a empresa poderá voltar a incorrer em prejuízo.

Ao longo deste percurso há, entretanto, um ponto de maximização do lucro. Segundo se observa no modelo numérico da Tabela 2.4, ele está situado no intervalo de 1.600 a 1.800 unidades produzidas. Nesse ponto, será observada a máxima distância positiva entre a receita e os custos

totais. As demonstrações gráficas da Figura 2.7 permitem a clara visualização desse ponto. No gráfico (a) estão representadas as curvas do custo total e da receita total. Esta última, para a empresa perfeitamente competitiva, é identificada por uma reta que passa pela origem. A perfeita elasticidade da curva da procura com que se defronta a empresa perfeitamente competitiva é a razão básica desse comportamento. Enquanto essa curva estiver abaixo da curva do custo total, a empresa estará incorrendo em prejuízo. Quando as duas curvas se interceptam, como em A, a empresa está operando com lucro zero. O lucro será positivo quando a curva da receita total situar-se acima da do custo total, situação que se observa entre os pontos A, de nivelção, e, ao longo desse intervalo de lucro, há um ponto em que se observará a distância máxima entre as duas curvas. Na demonstração gráfica, que obviamente coincide com os dados do modelo numérico em que estamos baseando este desenvolvimento teórico, esta distância está identificada por BC.

Além desta, há uma outra abordagem para identificação do ponto de maximização do lucro. Esta segunda forma está baseada nos conceitos de custo marginal e de receita marginal. O custo marginal, como vimos, é o custo em que a empresa incorre para produzir uma unidade adicional. Similarmente, a receita marginal é a resultante da venda de uma unidade adicional. Por razões facilmente

demonstráveis, a maximização do lucro dá-se no ponto em que a receita marginal se torna igual ao custo marginal. Vejamos por quê:

Nos intervalos iniciais da escala de produção, os custos não progridem muito rapidamente. Em termos marginais, eles até declinam, devido à ocorrência das chamadas economias de escala. No nosso modelo numérico, no intervalo de zero a 200 unidades, o custo marginal é de 4 cruzeiros por unidade, enquanto a receita marginal é de 5. Isto significa que há um ganho de 1 cruzeiro por unidade, como pode ser facilmente comprovado pela redução do prejuízo de 2.000 para 1.800 cruzeiros - com as primeira duzentas unidades produzidas, a empresa obteve um ganho total líquido de 200 cruzeiros. No intervalo seguinte, passando a escala operacional da empresa para 400 unidades, o ganho total com a produção de mais 200 unidades adicionais passou a ser maior. Para uma receita marginal de 5 cruzeiros (a qual, aliás, para a empresa perfeitamente competitiva, é constante e igual ao preço de mercado), a empresa teria um custo marginal de apenas 2,8. Isto significa que, nesse intervalo, há um ganho líquido de 2,2 por unidades produzida e vendida, reduzindo-se o prejuízo em 440 cruzeiros, ou seja, de 1.800 para 1.360.

Assim, sucessivamente, enquanto o custo marginal for inferior à receita marginal, sempre será lucrativo produzir mais. Enquanto cada unidade adicional produzida possibilitar um ganho adicional líquido para a empresa, ela aumentará o seu lucro aumentando a sua produção. Mesmo que a diferença entre o custo marginal e a receita marginal seja muito pequena, sempre haverá ganhos líquidos enquanto esta última for superior. E esses ganhos atingirão seu ponto máximo exatamente no instante em que o custo marginal e a receita marginal se igualarem. A partir daí, não será mais vantajoso aumentar a produção. As posições inverter-se-ão. O custo para produzir uma unidade adicional será superior à receita obtida com a venda dessa mesma unidade. Em lugar de aumento, haverá, então, redução do lucro.

No gráfico (b) da Figura 2.7, está reproduzida a abordagem marginalista. Aí se comprovam diversos princípios importantes. No ponto D, quando a curva do custo marginal intercepta a reta perfeitamente elástica da receita marginal, a empresa alcança o seu lucro máximo. Esse ponto coincide com o corte identificado pela

distância BC no gráfico (a). Observa-se ainda em (b) que, quando a curva do custo total médio cruza a da receita marginal, a empresa está operando com lucro zero, em seu ponto de nivelação. Os pontos desse cruzamento coincidem com os do gráfico (a), em que a curva do custo total cruza a da receita total. Finalmente, ainda na Figura 2.7, observou-se em (c) o comportamento da curva do lucro-prejuízo, comprovam-se as conclusões das abordagens anteriores. O ponto máximo dessa curva coincide com o corte BC em (a) e com o cruzamento D em (b).

Tabela 2.4 - Demonstração numérica de maximização do lucro pela empresa perfeitamente competitiva

Quantidades produzidas (Z)	Em Cr\$				
	Custo total (CT)	Receita total (RT = p . Z)	Custo marginal (CMg)	Preço ou receita marginal (p = RMg)	Lucro-prejuízo (RT - CT)
0	2.000	-0	—	—	-2.000
200	2.800	1.000	4,00	5,00	-1.800
400	3.360	2.000	2,80	5,00	-1.360
600	3.680	3.000	1,60	5,00	-680
800	3.910	4.000	1,15	5,00	-90
1.000	4.150	5.000	1,20	5,00	850
1.200	4.550	6.000	2,00	5,00	1.450
1.400	5.210	7.000	3,30	5,00	1.790
1.600	6.110	8.000	4,50	5,00	1.890
1.800	7.260	9.000	5,75	5,00	1.740
2.000	8.810	10.000	7,75	5,00	1.190
2.200	11.610	11.000	14,00	5,00	-610

Em (a) a demonstração baseou-se na abordagem do custo total: a maximização do lucro e a determinação das correspondentes quantidades a produzir dá-se no ponto em que se observa a distância máxima (BC) entre as curvas da receita total e do custo total. Em (b) a demonstração baseou-se na abordagem do custo marginal: a maximização dá-se no ponto (D) em que a curva do custo marginal intercepta a curva do preço (ou da receita marginal). Em (c) está representada graficamente a curva do lucro-prejuízo; a distância máxima em relação ao eixo horizontal (EF) também indica o ponto de maximização. Nas três demonstrações, A indica os pontos de nivelação.

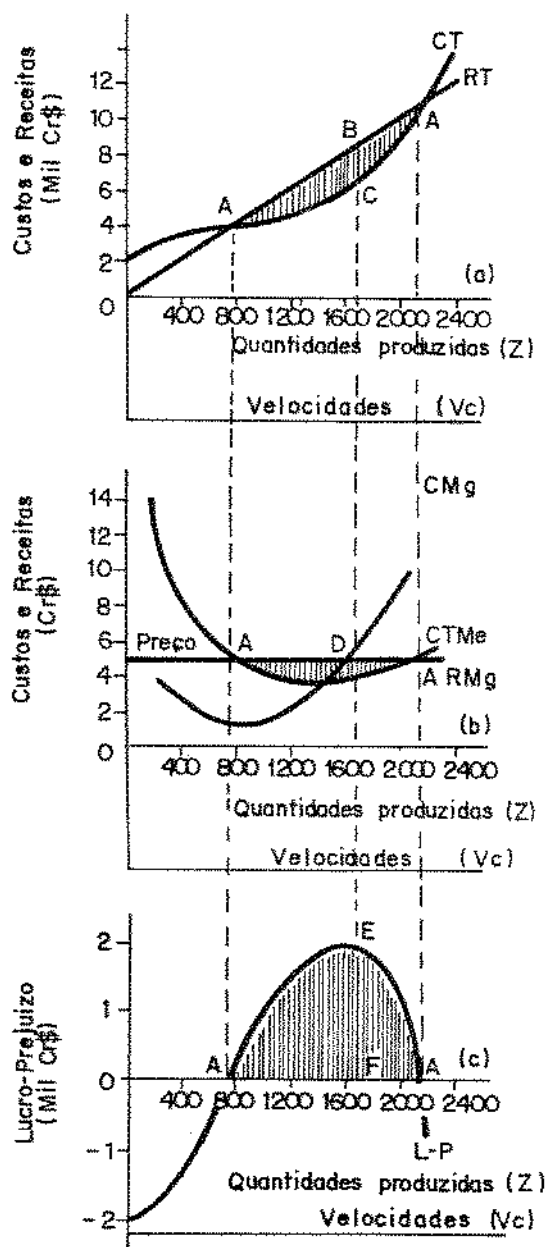


Figura 2.7 - Demonstrações gráficas da maximização do lucro pela empresa perfeitamente competitiva.

2.6.2 - O modelo do monopólio (Fig. 2.8) [14]

O comportamento da empresa monopolista difere do comportamento da empresa perfeitamente competitiva à medida que, no monopólio, a empresa tem amplo domínio sobre o mercado em que opera. Não há concorrentes nem substitutos para o seu produto. Não há um preço de mercado ao qual ela deva subordinar-se. Há, apenas, uma curva de procura com que ela se defronta e à qual se aplica o princípio fundamental de que as quantidades procuradas aumentam à medida que os preços diminuem. Além disso, a empresa defronta-se, ainda, com os rigores das estruturas típicas de custo. Afinal, a empresa monopolista, apesar de seu poder sobre o mercado, não é imune às regras fundamentais da demanda nem aos pressupostos das economias e das deseconomias de escala.

A curto prazo, a empresa monopolista procurará estabelecer as condições que lhe permitam a obtenção do lucro máximo. Não necessitando ajustar-se, passivamente, a determinado preço de mercado, a empresa monopolista poderá manobrar ao longo de toda uma escala de preços. Ao produzir e ao colocar no mercado uma quantidade reduzida de seu produto não concorrenciado, poderá praticar preços elevados, juntamente com o reduzido número de consumidores dispostos a adquirir o produto. Mas, à medida que a empresa aumentar as quantidades produzidas, a sua total absorção pelo mercado implicará, necessariamente, a redução do seu preço. A curva da procura com que a empresa monopolista se defronta é a curva de procura do mercado. Quantidades sucessivamente mais elevadas conduzem a preços sucessivamente mais baixos.

Evidentemente, raciocinando a curto prazo, a empresa procurará operar no ponto em que os seus lucros sejam maximizados. Manobrando o binômio preços-quantidades com vistas a esse objetivo fundamental, ela estará interessada em determinar o nível de produção e de oferta que lhe possibilite a máxima distância positiva entre a receita total e o custo total. Seu interesse não coincidirá necessariamente com as necessidades e potencialidades do mercado. Nessa estrutura concorrencial, não é a empresa que se subordina a regras e a dados determinados pelo mercado. Contrariamente, ela

manobra o mercado, pelo menos quanto aos níveis de produção e, conseqüentemente, quanto aos correspondentes níveis de preços que afinal prevalecerão.

Na Tabela 2.5 encontra-se um modelo numérico representativo da situação de uma empresa monopolista a curto prazo. A estrutura de custos que aí admitimos é a mesma do modelo anterior. Como já assinalamos, o comportamento típico dos custos independe da estrutura de mercado considerada. Quanto às colunas da receita, há significativas alterações, comparativamente ao modelo da empresa perfeitamente competitiva. Nesse caso, a procura não é definida por uma curva perfeitamente elástica. É representada por uma curva descendente, significando que o monopolista só consegue incrementar as suas vendas se reduzir o preço do seu produto. Como mostram os dados do modelo sob consideração, esse comportamento típico da procura, do ponto de vista da empresa monopolista, não permite um continuado aumento da receita total. Esta aumentará inicialmente, enquanto a empresa ainda estiver praticando preços considerados altos. Mas, depois de atravessar um intervalo de relativa estabilização, os aumentos da produção e das vendas, por exigirem preços cada vez mais baixos, acabarão por conduzir a receitas totais também mais baixas. "Além disso - como esclarece BACH [17] - o fato de o monopolista necessitar abaixar o preço dos seus produtos para incrementar as suas vendas faz com que a sua receita marginal seja menor do que o preço para todos os níveis de produção, exceto para o primeiro. A razão disso é que os cortes de preço não se aplicam apenas às unidades adicionais vendidas, mas a todas as unidades anteriores que poderiam ter sido vendidas a um preço maior. Assim, cada unidade adicional de vendas acrescenta à receita total o seu preço, menos a soma das reduções de preço sofridas por todas as unidades anteriores". A mecânica desta regra pode ser facilmente observada na Tabela 2.5, comparando-se as escalas descendentes do preço com as da receita marginal.

Aparentemente, devido às características da procura dirigida ao seu produto, a empresa monopolista tem relativa facilidade para sair da zona inicial de prejuízo, decorrente de

níveis muito baixos de produção, incapaz de cobrir os custos totais. Inicialmente, alterações relativamente maiores nas quantidades procuradas. Isto provoca um substancial aumento inicial da receita total, geralmente suficiente para eliminar o prejuízo e colocar a empresa pelo menos em posição operacional de nivelação. Subseqüentemente, os aumentos da produção e das vendas implicarão reduções de preços cada vez mais significativas, em termos relativos. Assim, embora a receita total possa continuar em alta, os aumentos serão processados a taxas decrescentes. E, após alcançar o seu mais alto nível, a receita total passará a declinar, reconduzindo a empresa a uma nova zona de prejuízo.

Em nosso modelo numérico, a maximização do lucro dá-se no intervalo compreendido entre 1200 a 1400 unidades. É nesse intervalo que se observam as regras básicas de maximização do lucro. A distância positiva entre a receita total e o custo total alcança o seu máximo. É também nesse intervalo que se cruzarão o custo marginal e a receita marginal.

Os valores desse modelo encontram-se graficamente transcritos na Figura 2.8. No gráfico (a) temos a demonstração do lucro máximo através das curvas da receita total e do custo total. Os pontos de nivelação estão identificados por A e o ponto de lucro máximo pela distância BC. No gráfico (b) está representada a abordagem marginalista. Ai se observa claramente o gradativo afastamento entre a curva da procura (definida através dos preços praticados a cada nível de produção) e a curva da receita marginal, decorrente de mecanismo a que já nos referimos. Exatamente no ponto D, em que se cruzam as curvas do custo marginal e da receita marginal, a empresa atinge o seu lucro máximo. Esse ponto não apenas coincide com a distância BC em (a), como ainda com o pico EF em (c).

Tabela 2.5 - Demonstração numérica de maximização do lucro pela empresa monopolista

Quantidade produzidas (Z)	Em Cr\$					
	Custo total (CT)	Preço (p) Definição da procura	Receita total (RT = p.Z)	Custo marginal (CMg)	Receita marginal (RMg)	Lucro-prejuízo (RT - CT)
0	2.000	—	0	—	—	-2.000
200	2.800	9,00	1.800	4,00	9,00	-1.000
400	3.360	8,40	3.360	2,80	7,80	0
600	3.680	7,80	4.680	1,60	6,60	1.000
800	3.910	7,20	5.760	1,15	5,40	1.850
1.000	4.150	6,60	6.600	1,20	4,20	2.450
1.200	4.550	6,00	7.200	2,00	3,00	2.650
1.400	5.210	5,40	7.560	3,30	1,80	2.350
1.600	6.110	4,80	7.680	4,50	0,60	1.570
1.800	7.260	4,20	7.560	5,75	- 0,60	300
2.000	8.810	3,60	7.200	7,75	- 1,80	- 1.610
2.200	11.810	3,00	6.600	14,00	- 3,00	- 5.010

A diferença essencial entre as demonstrações da maximização do lucro pela empresa perfeitamente competitiva e pela empresa monopolista resulta do diferente comportamento das curvas da procura. No monopólio, as curvas da procura e, conseqüentemente, da receita marginal são descendentes. Por isso, a receita total eleva-se até certo ponto, para depois declinar, como se vê em (a). Permanece o mesmo, porém, o princípio de maximização do lucro. Este ocorrerá na distância máxima - BC, no gráfico (a) - entre as curvas do custo total e da receita total. Ou na intersecção - indicada por D, no gráfico (b) - das curvas da receita marginal e do custo marginal. Em (c) encontra-se a curva do lucro-prejuízo; a distância EF indica o ponto de maximização. Nas três demonstrações, A indica os pontos de nivelção.

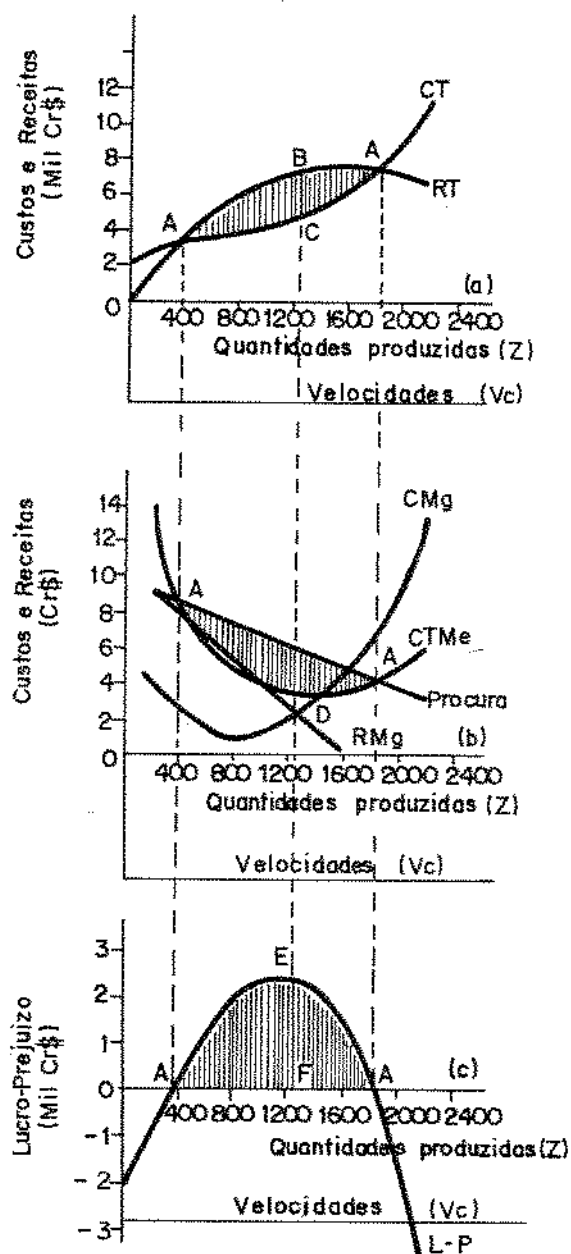


Figura 2.8 - Demonstrações gráficas da maximização do lucro pela empresa monopolista

2.4.3 - O modelo do oligopólio (Fig. 2.9) [14]

O comportamento da empresa oligopolista, quanto à determinação do volume de produção e de oferta que conduz à maximização do seu lucro, depende, fundamentalmente, das características observadas no seio do oligopólio de que ela participa. A variedade de situações oligopolistas é enorme, como já vimos. E, para cada situação, há regras específicas de maximização. Se, por exemplo, entre as empresas participantes de dada estrutura oligopolista houver acordos ou conluíus, a agência central que então controlará o mercado e as decisões adotará um comportamento idêntico ao de um monopólio. A produção da indústria como um todo será então coordenada, para que as quantidades oferecidas se ajustem em torno do ponto que possibilite a maximização do lucro. A partilha do mercado seria feita de forma a evitar que cada empresa, agindo isoladamente, obtivesse resultados finais mais expressivos. Se uma única empresa abandonar o cartel, sua conduta não será muito diferente da de uma empresa perfeitamente competitiva. Sua curva de procura será fixada ao nível dos preços praticados pelo cartel. E a possível razão que a teria levado a agir independentemente seria a convicção de que poderia vender mais do que a sua quota de partilha dentro dos preços estabelecidos. Finalmente, inexistindo qualquer forma de acordo ou de conluio, a empresa oligopolista agirá com enorme cautela. Suas decisões jamais deixarão de levar em conta as possíveis reações de suas rivais.

Assim sendo, a multiplicidade das características dos oligopólios pode conduzir a múltiplos padrões de comportamento. Não há uma regra definitiva para essa estrutura de mercado. As regras do jogo variarão em decorrência da organização interna do oligopólio, das relações existentes entre as empresas e do poder de dominação e de influência da empresa líder. Mas há uma situação especial que define com alguma precisão os problemas centrais da empresa oligopolista, bem como suas oportunidades e os seus riscos. Trata-se do oligopólio em que as empresas participantes atuam independentemente, não organizadas em acordos ou conluíus.

Prevalecendo esse tipo de oligopólio, como já vimos, a

empresa defronta-se com uma procura bem característica, indicada por uma curva "quebrada". Até o ponto de "queda", o comportamento da procura é ligeiramente descendente. A empresa experimentará sucessivos decréscimos nos preços, correspondentes aos acréscimos em seus volumes de produção e de vendas. A existência de produtos substitutos no mercado torna relativamente elástico esse segmento da curva. Apesar disso, a empresa obtém sucessivos - embora não muito acelerados - aumentos em sua receita total. Confrontando-se os níveis resultantes da receita com os do custo total, observa-se, tal como se encontra explícito no modelo numérico da Tabela 2.6, que a empresa, através do rebaixamento de seus preços e dos conseqüentes incrementos de vendas, consegue superar a zona inicial de prejuízo, logo alcançando expressivos níveis absolutos de lucro.

A insistência nesse tipo de comportamento poderá ser desastrosa. Se não houver conivência entre as empresas, formalizada através de um cartel centralizado, e se a empresa manipuladora da política de preços não tiver expressivo grau de dominação na indústria, suas rivais poderão eventualmente sentir-se prejudicadas pela gradativa perda de substância no mercado. Ocorrendo isto, poderá estabelecer-se uma verdadeira "guerra de preços". A curva da procura perderá sua natural continuidade. Sua tendência natural será interrompida por ponto de "quebra". E suas conseqüências serão desastrosas para todas as empresas, em decorrência da violenta queda da receita total que a todas atingirá indistintamente.

Em nosso modelo numérico, a possível "quebra" da procura não se situa no intervalo de maximização do lucro. Caso se situe exatamente aí, a "guerra de preços" será inevitável. Situando-se, todavia, além do ponto de maximização, os perigos desse tipo de atitude suicida são menos iminentes. A não ser que a empresa desencadeadora do processo tenha em vista objetivos de longo prazo, preocupando-se muito mais com a extensão de sua faixa de participação no mercado do que propriamente com o máximo lucro imediato.

Excluídas essas características especiais, os elementos determinantes do comportamento de curto prazo da empresa oligopolista são bastante parecidos com os das empresas subordinadas a outras estruturas concorrenciais. A maximização do lucro, também

aqui, dá-se no ponto de máxima distância entre as curvas da receita total e do custo total, dentro do segmento delimitado pelos pontos de nivelação. No modelo numérico que construímos, a maximização ocorre no intervalo situado entre 1.200 a 1.400 unidades produzidas. Isto se confirma nos três gráficos da Figura 2.9. Neles, além dos pontos de maximização do lucro - distância BC em (a), cruzamento D em (b) e pico EF em (c), pode ser visualizado o ponto de "quebra" da procura, bem como suas possíveis consequências quanto à violenta queda do lucro e dos vários conceitos de receita (total, média e marginal).

Tabela 2.6 - Demonstração numérica da maximização do lucro pela empresa oligopolista

Quantidades produzidas (Z)	Em Cr\$					
	Custo total (CT)	Preço (p) Definição da procura	Receita total (RT=p.q)	Custo marginal CMg	Receita marginal RMg	Lucro-prejuízo (RT-CT)
0	2.000	—	—	—	—	- 2.000
200	2.800	8,50	1.700	4,00	8,50	- 1.100
400	3.360	8,00	3.200	2,80	7,50	- 160
600	3.680	7,50	4.500	1,60	6,50	820
800	3.910	7,00	5.600	1,15	5,50	1.690
1.000	4.150	6,50	6.500	1,20	4,50	2.350
1.200	4.550	6,00	7.200	2,00	3,50	2.650
1.400	5.210	5,50	7.700	3,30	2,50	2.490
1.600	6.110	5,00	8.000	4,50	1,50	1.890
1.800	7.260	3,50	6.300	5,75	- 8,50	- 960
2.000	8.810	2,00	4.000	7,75	- 11,50	- 4.810
2.200	11.610	0,50	1.100	14,00	- 14,50	10.510

Há vários tipos de estruturas oligopolistas. Estas demonstrações fundamentam-se numa estrutura em que as poucas empresas existentes não firmaram acordo nem estabeleceram conluíus. A curva de procura "quebrada" da qual resultaram "quebras" nas curvas da receita total e da receita marginal, teria sido provocada por uma "guerra de preços". A maximização do lucro, dada pela distância BC em (a), pela intersecção D em (b) e pela distância EF em (c), está à esquerda do ponto de ruptura da curva da procura. A partir desse ponto, observa-se uma violenta queda da receita total e, conseqüentemente, uma suicida tendência ao prejuízo. Nas três demonstrações, A indica os pontos de nivelação.

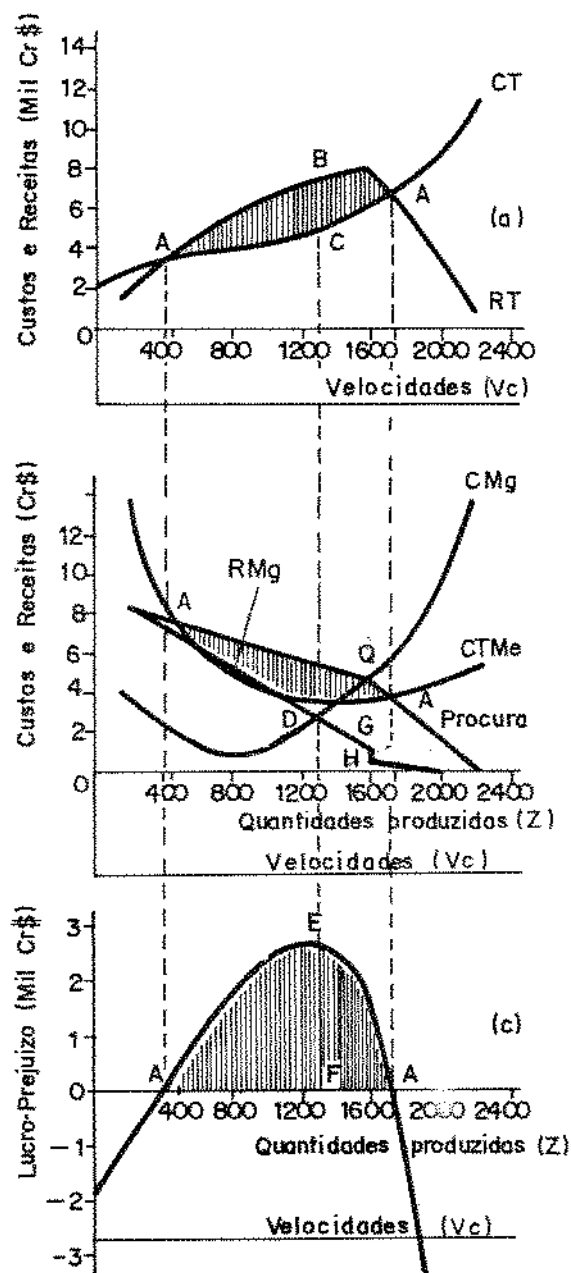


Figura 2.9 - Demonstrações gráficas da maximização do lucro pela empresa oligopolista

2.6.4 - O modelo da concorrência monopolística (Fig. 2.10) [14]

As condições que prevalecem na concorrência monopolística são peculiares. Trata-se de uma estrutura de mercado situada entre os extremos da concorrência perfeita e do monopólio. O número de empresas é suficientemente grande, mas o produto é real ou imaginariamente diferenciado. De forma geral, a política de preços de determinada empresa não afeta as condições de equilíbrio das demais. Cada empresa vende um produto diferenciado, fazendo dos valores positivos da diferenciação uma das armas principais para a conquista do mercado. Isto tende a tornar a curva da procura relativamente elástica. No lugar da escala perfeitamente horizontal enfrentada pela empresa perfeitamente competitiva, o padrão usual da procura dirigida à empresa monopolisticamente competitiva é a de uma curva levemente descendente. Além disso, as políticas de diferenciação dos produtos e as conseqüente conquista das preferências dos consumidores poderão provocar - até com certa facilidade - o deslocamento da procura préexistente. Ela poderá aumentar deslocando-se para a direita, caso a empresa consiga aumentar sua reputação, melhorar a sua imagem, tornar seu produto mais atraente ou ser mais agressiva do ponto de vista mercadológico. Mas poderá também diminuir deslocando-se para a esquerda, caso a política mercadológica das empresas concorrentes seja capaz de superar os esforços da empresa considerada.

A forma da curva de procura com que se defronta a empresa monopolisticamente competitiva bem como seus possíveis deslocamentos e suas conseqüentes influências sobre a curva da receita total estão representados na Figura 2.4. A maximização do lucro dá-se, como nos casos anteriores, pela distância máxima entre as curvas da receita total e do custo total. Ou, ainda, pelo mesmo princípio de igualação do custo marginal e da receita marginal. A diferença essencial em relação aos modelos da concorrência perfeita e do monopólio está na possibilidade latente de deslocamento da curva da procura e nas conseqüentes novas posições das curvas de receita.

Uma empresa monopolisticamente competitiva que se defronta com uma curva de procura P - vista no gráfico da Figura 2.4 - pode eventualmente ter a possibilidade de obtenção das receitas indicadas pela curva RT , vista em (2.10). Neste caso, o máximo que a empresa poderia conseguir seria operar com lucro zero, identificado por A ,

escapando assim das possíveis zonas de prejuízo. Caso determinados fatores, provocados ou não pelas empresas concorrentes, conduzissem ao deslocamento negativo de sua curva de procura, movimentando-a de P para P'' , a consequência inevitável seria o deslocamento para baixo, de RT para RT'' de sua curva de receita total. Nesse caso, a empresa esforçar-se-ia para operar na posição C , minimizando suas perdas. A maximização do lucro, no sentido em que até agora a tratamos, somente seria conseguida com o deslocamento positivo da procura, de P para P' , e da receita total, de RT para RT' . Nesse caso, operando em B , obteria a empresa o máximo lucro operacional possível. A maximização do lucro, na concorrência monopolística, depende fundamentalmente dos possíveis deslocamentos da procura dirigida ao produto diferenciado da empresa. O lucro máximo (BA), a nivelção (A) ou a perda mínima (AC) dependem, além da estrutura de custos, dos movimentos da procura. Estes podem deslocar a curva da receita total e modificar os resultados operacionais da empresa. Os deslocamentos da procura supostos em (2.4) podem eventualmente corresponder aos da receita total mostrados em (2.10).

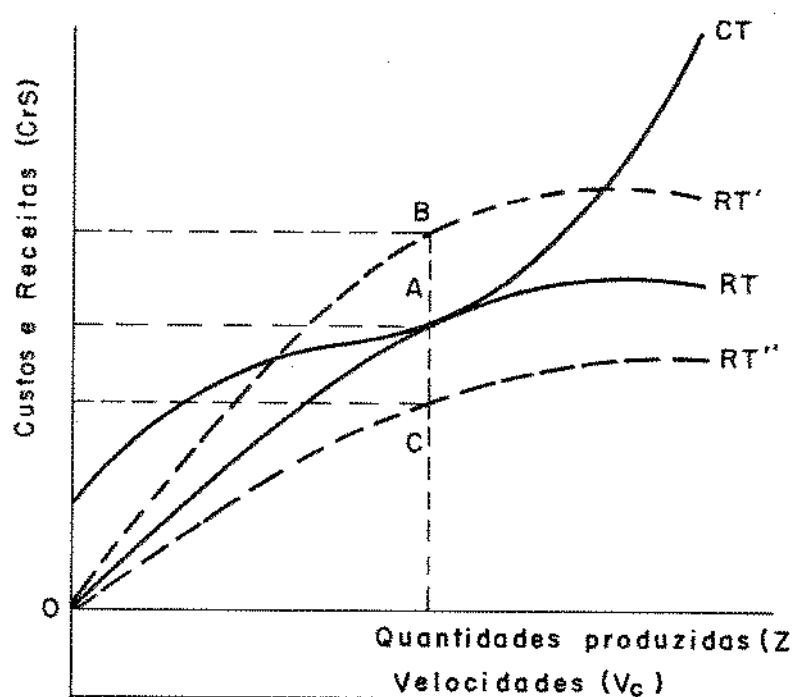


Figura 2.10 - Maximização do lucro pela empresa numa estrutura de concorrência monopolística.

CAPÍTULO IIICURVAS DE VIDA E DESGASTE3.1 - INTRODUÇÃO

Para se aplicar um plano de troca das ferramentas, faz-se necessário ter um controle frequente das condições de usinagem, temperaturas atingidas, forças de corte, desgastes das ferramentas, acabamentos superficiais, etc., a fim de se obter dados a respeito das vidas prováveis das ferramentas e consequentemente estabelecer as melhores condições de corte. O critério de vida da ferramenta está relacionado diretamente com as características das operações de usinagem. O critério mais simples, para a determinação da perda da capacidade de corte da ferramenta é aquele que admite a destruição total da aresta de corte [1,21].

3.2 - FORMAS DOS DESGASTES

Três formas principais de desgastes ocorrem no corte dos materiais metálicos [1,5,21]:

- desgaste por aderência;
- desgaste por abrasão;
- desgaste por difusão intermetálica.

No desgaste por aderência, partículas de cavaco se soldam sobre a superfície de saída da ferramenta (micro soldas) e ao saírem provocam o desgaste principalmente na superfície de folga.

No desgaste por abrasão, ocorre como resultado da presença de partículas duras na interface cavaco-ferramenta, à medida que o cavaco se move sobre a superfície de saída, desgastando-a por ação mecânica e térmica. As partículas duras podem se originar de constituintes duros da peça ou da ferramenta.

No desgaste por difusão intermetálica, há a difusão no estado sólido entre o material da ferramenta e a peça, nas condições de temperatura elevada e contato que existe na interface cavaco -

superfície de saída. A perda de certos constituintes nas reações provocadas pela difusão, enfraquecem a resistência mecânica da ferramenta [22].

3.3 - TIPOS DE DESGASTES QUE OCORREM NOS MATERIAIS DAS FERRAMENTAS DE CORTE [5,21,22]

- Largura de desgaste na superfície principal de folga (VB),
(Figuras 3.1 e 3.2)

O desgaste na superfície principal de folga é o desenvolvimento de uma zona de desgaste na ferramenta, devido à ação abrasiva existente entre a ferramenta e a superfície "nascente" gerado na peça, pela usinagem, (figuras 3.1 e 3.2).

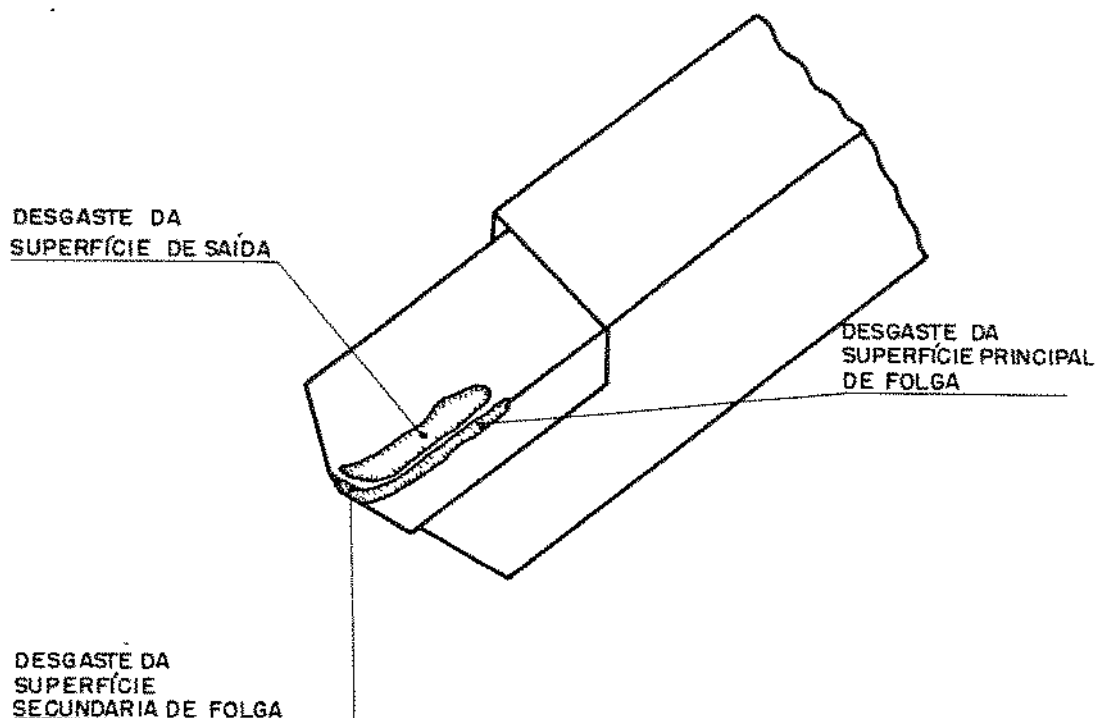


Fig. 3.1 - Desgaste das superfícies da ferramenta.

- Desgaste na superfície principal de folga, tipo entalhe (V_{BN}), (figura 3.2)

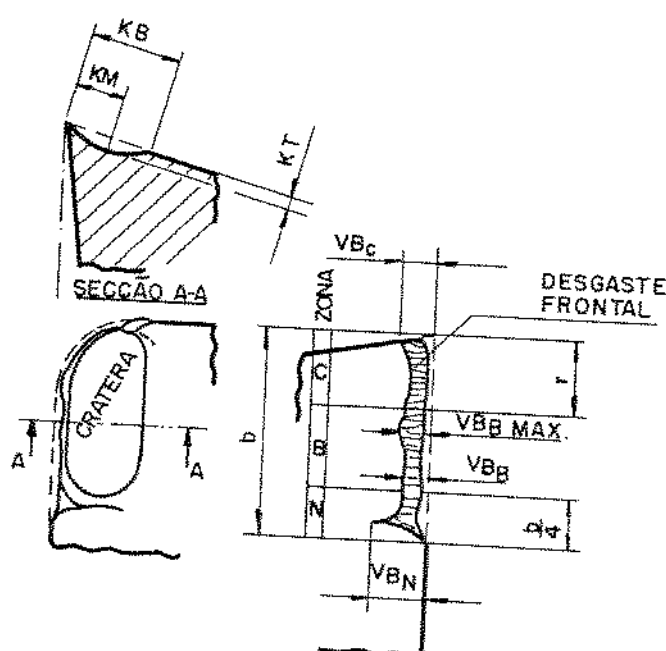


Figura 3.2 - Alguns tipos de desgaste em ferramentas de torneamento.

Quando o desgaste da ferramenta progride, uma ranhura desenvolve-se na superfície principal de folga (figura 3.2). O volume desgastado desta pode facilmente exceder o volume de desgaste de cratera e de desgaste frontal. Entretanto, esta ranhura normalmente não afeta a vida da ferramenta. O perfil e o comprimento do entalhe (V_{BN}), depende em grande parte da precisão de posicionamento da ferramenta. Em casos especiais, onde o desgaste de entalhes predomina sobre todos os outros fenômenos de desgaste da ferramenta, a largura do desgaste em forma de entalhe (V_{BN}) pode ser utilizada como medida do desgaste da ferramenta [23].

- Desgaste na superfície de saída da ferramenta KT, (figura 3.2)

O desgaste de cratera é o tipo de desgaste que mais ocorre na superfície de saída (figura 3.2). A principal causa do desgaste de cratera em alta velocidade de corte é o desgaste por difusão, devido à temperatura elevada desenvolvida na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta [24,25]. A cratera se forma tipicamente próxima ao ponto médio da área de contato ferramenta-cavaco, a uma distância da ponta da ferramenta (KM) correspondente à localização da máxima temperatura de corte. A profundidade de cratera (KT) pode ser utilizada como medida de desgaste da ferramenta, e um valor pré-determinado de (KT) pode ser utilizado como critério de fim de vida da ferramenta. A posição relativa da cratera, em relação à aresta de corte (KM), tem também alguma importância. Uma cratera profunda e larga, distante da aresta de corte pode ser menos prejudicial para a ferramenta do que uma cratera estreita e menos profunda, próxima à aresta de corte.

- Desgaste da superfície secundária de folga (figura 3.1)

No torneamento, a superfície usinada é principalmente formada pela ponta de corte e a aresta secundária de corte. Isto significa que qualquer modificação na ponta de corte, afeta a superfície usinada. Em operações de acabamento, com pequenos avanços, uma ou mais ranhuras são frequentemente encontradas na aresta secundária de corte, após um período de usinagem. Estas ranhuras provocam um aumento da rugosidade da superfície usinada. Uma avaliação direta deste tipo de desgaste da ferramenta é difícil, mas estes efeitos podem ser detectados pela medida da rugosidade. Um certo valor da rugosidade pode ser utilizado como critério de fim de vida da ferramenta [23].

A oxidação da aresta secundária de corte frequentemente acelera a destruição da ferramenta, quando se trabalha com ferramentas de metal duro, em temperatura elevadas, causadas por valores elevados de avanço e velocidade de corte. Em tais casos, a repentina deterioração da superfície usinada, causada pela

destruição da aresta secundária de corte, é utilizada como critério de fim de vida da ferramenta [23].

- Deformação da ponta de corte da ferramenta (figura 3.3)

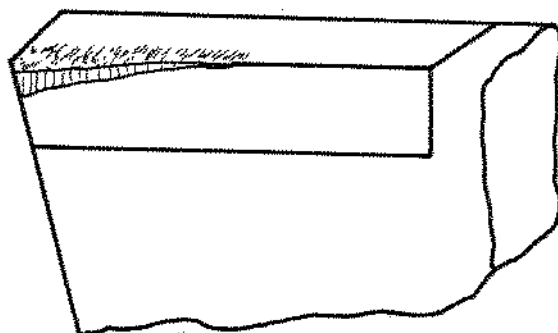


Figura 3.3 - Deformação da ferramenta devido a condições severas de usinagem.

A ponta de corte da ferramenta pode sofrer uma deformação permanente sob o efeito de temperaturas elevadas e das altas pressões existentes na zona de corte. Encontra-se este tipo de desgaste na usinagem de materiais que possuem elevadas resistências mecânicas. A deformação da ponta de corte da ferramenta provoca uma modificação na geometria da mesma, prejudicando a precisão e o acabamento superficial da peça usinada. Entretanto, a deformação da ponta de corte da ferramenta não pode ser utilizada como critério de fim de vida da ferramenta [1,21,25], embora cause em muitos casos, mais rápida ocorrência de avarias nas ferramenta de aço rápido, e torne mais severas as consequências da oxidação em ferramentas de metal duro [1,21], proporcionando à ferramenta uma vida bastante curta.

- Desprendimento de lascas:

O desprendimento de lascas de finas partículas da aresta de corte e o choque térmico (que ocorre frequentemente em corte interrompido), são importantes em ferramentas de corte de material quebradiço. A quantidade de lascamento e choque térmico é avaliado

pela largura de desgaste na superfície principal de folga (VB), (figura 3.1). O desprendimento de lascas em pastilhas com recobrimento é abordado no item 3.6

- Falha prematura:

Toda anomalia, toda espécie de falhas imprevisíveis da ferramenta e grandes deformações, as quais causam a inutilização imediata da ferramenta, podem ser causadas por um ponto duro no material da peça, ou por um acidente durante a operação na máquina - ferramenta. Uma ferramenta pode quebrar, lascar fortemente, deformar e sofrer uma falha imprevisível.

- Ruptura por quebra da ponta de corte (figura 3.4):

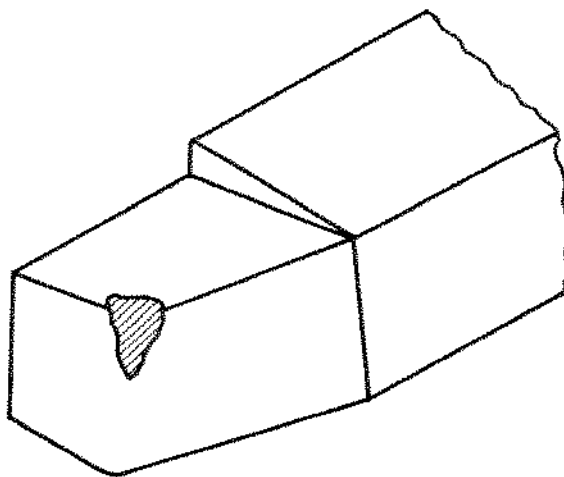


Figura 3.4 - Ruptura da ponta da ferramenta.

Esta falha ocorre devido à elevada temperatura desenvolvida na região de corte, assim como, choque mecânico, não habilidade do operador, (figura 3.4).

3.4 - CURVAS DE DESGASTE

As curvas de desgaste da ferramenta são curvas desgaste-tempo, onde os desgastes mais utilizados para a construção destes gráficos, são o desgaste da superfície principal de folga (VB) e o desgaste da superfície de saída (KT). Os valores destes desgastes são medidos em função do tempo de usinagem (figura 3.5).

3.5 - CURVAS DE VIDA

Denomina-se vida da ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzindo os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingindo esse tempo, a ferramenta deve ser substituída. Logo, a vida da ferramenta é o tempo entre duas trocas sucessivas necessárias, no qual ela trabalha efetivamente [5]. Para o traçado das curvas de vida deve-se construir em primeiro lugar gráficos auxiliares, que fornecem os desgastes da ferramenta para diferentes velocidades e tempos de trabalho, em determinadas condições do par ferramenta-peça. As medidas do desgaste da superfície de folga (VB) em função do tempo para diferentes velocidades de corte, fornecerão curvas como a da figura 3.5. Curvas

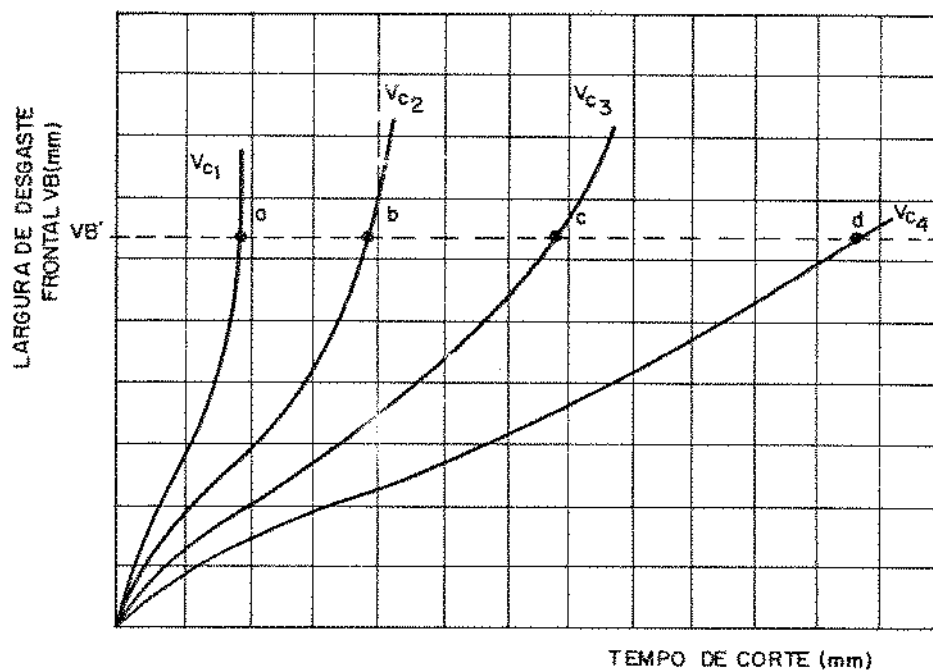


Figura 3.5 - Curvas de desgaste da ferramenta em função do tempo de usinagem.

semelhantes são obtidas medindo-se os desgastes de cratera (K_T), rugosidade superficial, etc.. De posse destas curvas, pode-se fixar o valor do desgaste que definirá a vida da ferramenta nas condições de usinagem desejadas.

A fixação de $VB = VB'$, por exemplo, informa que o desgaste chegando a esse valor a ferramenta deve ser substituída para evitar possível quebra, ou para manter as condições de acabamento fixadas. Obtém-se assim na figura 3.5 para $VB = VB'$ os pontos a, b, c e d das curvas de velocidades, os quais fornecerão os tempos de trabalho, ou seja, as vidas das ferramentas para as velocidades de corte V_{c1} , V_{c2} , V_{c3} e V_{c4} [5,21].

A representação em papel di-logarítmico da função $T=f(V_c)$ provenientes da marcação dos pontos a, b, c e d correspondentes às velocidades V_{c1} , V_{c2} , V_{c3} e V_{c4} , respectivamente, (figura 3.5), originam a fórmula simplificada de Taylor, que se aproxima de uma reta (figura 3.6).

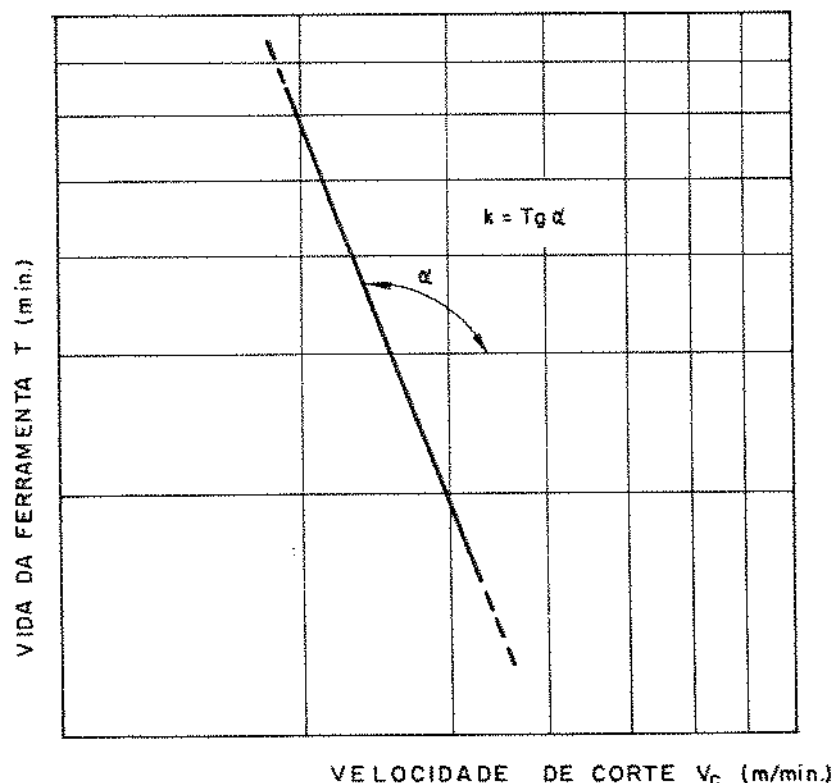


Figura 3.6 - Representação da vida da ferramenta, segundo o Modelo Simplificado de Taylor.

Neste caso, tem-se a expressão:

$$T V^{\frac{x}{c}} = K \quad (3.1)$$

onde:

T= vida da ferramenta em minuto;

x= coeficiente angular da reta ($x = -k$);

K= vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1 m/min.

A equação de Taylor (3.1) pode ser expressa também sob outra forma (principalmente quando o valor de K for muito grande, perde-se o sentido físico desta grandeza), ou seja:

$$V^{\frac{Y}{c}} T = C \quad (3.2)$$

onde:

$$Y = \frac{1}{x} \quad (3.3)$$

$$C = K \quad (3.4)$$

C representa a velocidade de corte para a vida da ferramenta que é igual a 1 minuto.

A norma ISO 3685 padroniza os testes para a determinação da curva de vida da ferramenta de torneamento e utiliza para sua representação o modelo simplificado de Taylor. Segundo esta norma, os critérios usados para fim de vida da ferramenta são os seguintes [26]:

a) a largura média da região de desgaste na superfície de folga $VB=0,3$ mm, se a região de desgaste for considerada regularmente afetada na zona B (figura 3.2);

b) a largura máxima da região de desgaste da superfície de folga $VB_{max}=0,6$ mm se a superfície de folga está irregularmente afetada na zona B (figura 3.2);

c) a profundidade da cratera KT (figura 3.2) é dada pela fórmula $KT = 0,06 + 0,3 f$ [mm], com f em mm/volta.

O valor $VB = 0,3$ mm é tomado como um valor ideal, porque os valores mais baixos causariam uma dispersão muito grande dos

resultados, visto que a elevada taxa inicial de desgaste teria maior influência; valores mais elevados de VB tornariam os ensaios dispendiosos e poderiam não ser alcançados nos testes. Com relação ao critério de fim de vida pelo acabamento superficial, esta norma indica os seguintes valores para Ra: 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3 e 10 μm . Com relação aos desgastes convencionais VB e KT, se não estiver claro qual o tipo de desgastes predominante, é possível utilizar dois critérios, resultando em duas curvas do tipo $V_c \times T$, ou critério misto, onde tem-se uma curva resultante $V_c \times T$ (figura 3.7).

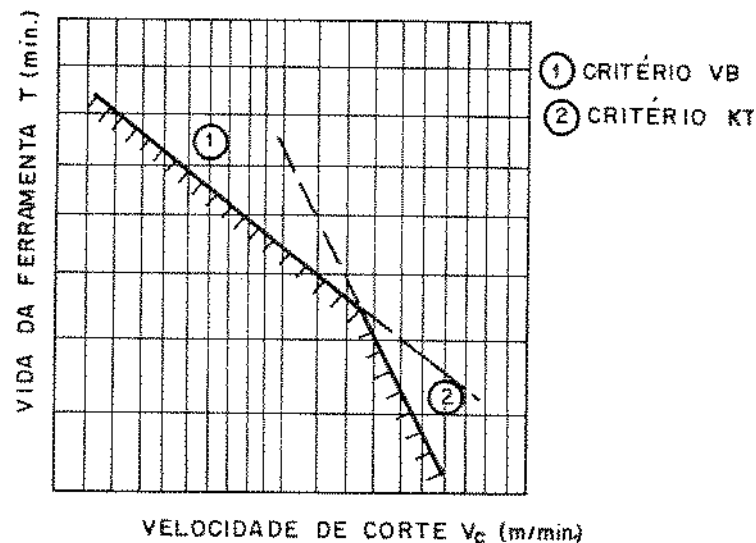


Figura 3.7 - Representação da curva de vida utilizando dois critérios diferentes para o fim da vida da ferramenta.

Depois das pesquisas de Taylor, diversos estudiosos propuseram vários modelos matemáticos relativos à vida da ferramenta, dentre os quais tem-se [27].

$$- \text{WOXEN (1932)} \quad V_c = \left(\frac{T \times}{T} \right)^{\alpha} C_w \left(\frac{q_o + q}{1 + 9q} \right) \quad (3.5)$$

$$- \text{GILBERT (1950)} \quad T V_c^x f^Y (a_p)^Z = K_1 \quad (3.6)$$

$$- \text{KRONENBERG (1954)} \quad V_c = \frac{C_{VB}}{A^f} \frac{(G/5)^g}{(T/60)^q} \quad (3.7)$$

$$- \text{COLDING (1960)} \quad k - ax + bx^2 + cy + dy^2 - Z \\ + ez^2 + fxy + gyz + hxz = 0 \quad (3.8)$$

onde

$$x = \log q; y = \log V_c; Z = \log T$$

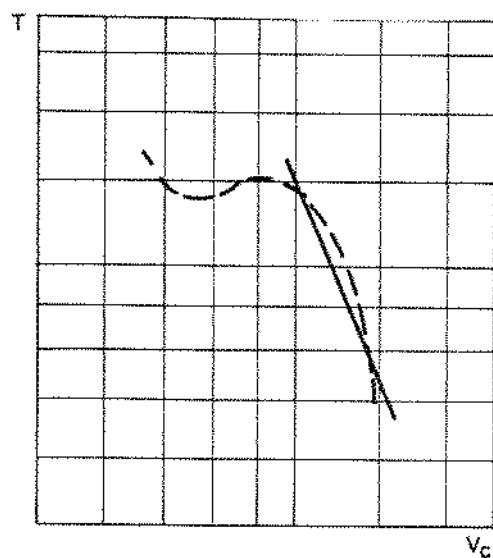
$$- \text{MATTHIJSEN (1965)} \quad V_c (e + T) = C \quad (3.9)$$

$$- \text{KRONENBERG (1968)} \quad (V_c + K) T^n = C \quad (3.10)$$

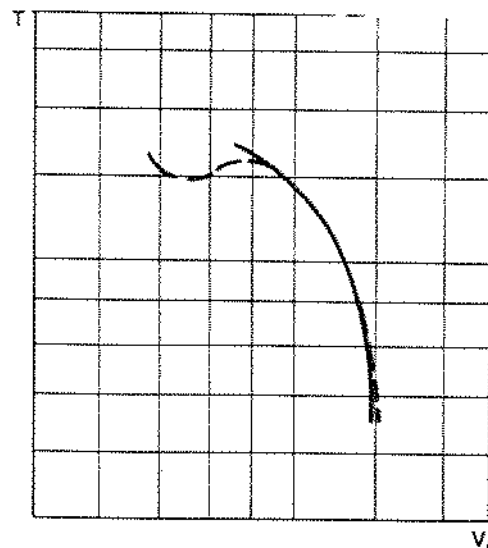
$$- \text{HIRSCH (1969)} \quad V_c T^n = f^{-1} a_p^{-f} V_c k^h C \quad (3.11)$$

$$- \text{KÖNIG-DEPIEREUX (1969)} \quad T = e^{-\frac{k V_c \circ V_c^m}{m} - \frac{i_f \circ f^n}{n}} + C \quad (3.12)$$

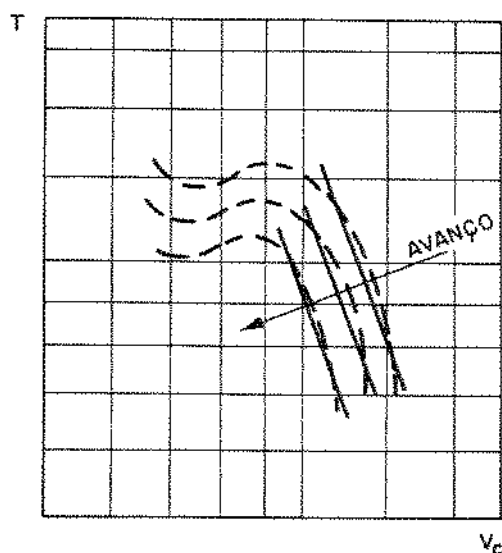
Na figura 3.8, tem-se a representação de alguns destes modelos.



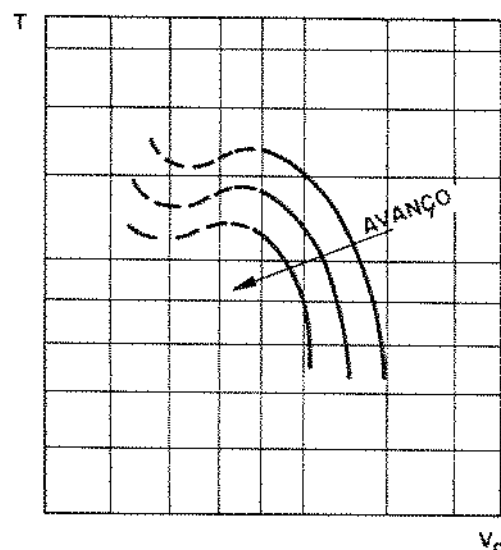
a) MODELO DE TAYLOR



b) MODELO DE KRONENBERG



c) MODELO DE GILBERT



d) MODELO DE DEPIEREUX

Figura 3.8 - Representação de alguns modelos matemáticos da vida da ferramenta.

3.5.1 - Considerações sobre equações da vida da ferramenta

3.5.1.1 - Equações de Taylor:

A equação de Taylor mais conhecida é a fórmula simplificada $V_c T^Y = C$ (3.2) onde V_c é a velocidade de corte, T a

vida da ferramenta, Y o coeficiente angular da curva de vida, e C a velocidade de corte para a vida de 1 min.

Esta fórmula indica na maioria das vezes uma relação linear entre $\log T$ e $\log v_c$ (Y constante). Pode-se afirmar que a não linearidade ocorre principalmente nos casos [28].

- a) usinagem de materiais de elevada resistência e materiais resistentes ao calor;
- b) usinagem de materiais em geral, quando as condições de corte propiciam uma elevada vida da ferramenta;
- c) quando se utiliza uma elevada taxa de remoção de material.

A linearidade da equação de Taylor parece ser razoavelmente válida na usinagem de aços carbono e na usinagem de materiais com baixo teor de liga em condições de desbaste leve ($a_p = 2$ a 4 mm; $f = 0,2$ a $0,5$ mm/v) em velocidades tais, que a vida da ferramenta se situe entre 10 e 50 min [28].

A equação (3.2) relaciona a velocidade de corte com a vida da ferramenta para um determinado par ferramenta-peça, e não leva em conta outros fatores, como as variáveis de corte e a geometria da ferramenta. Devido a este fato, Kronenberg [29] desenvolveu a equação

$$v_{c60} = \frac{C_1}{A^Z} \quad (3.13)$$

onde:

C_1 é uma constante que representa a velocidade de corte para uma área (A) de corte igual a 1 mm^2

Z é a inclinação da curva $\log v_{c60} - \log A$, para uma vida $T = 60$ minutos.

A equação (3.13) leva em conta tanto o avanço como a profundidade de corte, porém o raio de ponta da ferramenta não consta da expressão.

3.5 1.2 - Equação de Gilbert:

Gilbert [30] sugeriu em 1950 uma equação utilizando conjuntamente as variáveis avanço, profundidade de corte e

velocidade de corte. Esta expressão passou a denominar-se Equação Expandida de Taylor, como segue:

$$T V_C^X f^Y a_P^Z = K_1 \quad (3.14)$$

onde:

K_1 , x , Y , e z são constantes.

Esta expressão é bastante utilizada, mas omite a geometria da ferramenta, e supõe que os expoentes x , Y e z são constantes, ou seja, a variação de V_C , f e a_P não afeta os expoentes. Os expoentes são considerados interdependentes. Desde que se admita a hipótese desta constância, esta expressão é muito útil, porém, a avaliação das constantes é bastante trabalhosa exigindo uma série muito grande de ensaios. Uma extensão das expressões de Taylor (3.1), (3.14) é obtida relacionando-se exponencialmente o desgaste VB em função do tempo de usinagem (figura 3.9).

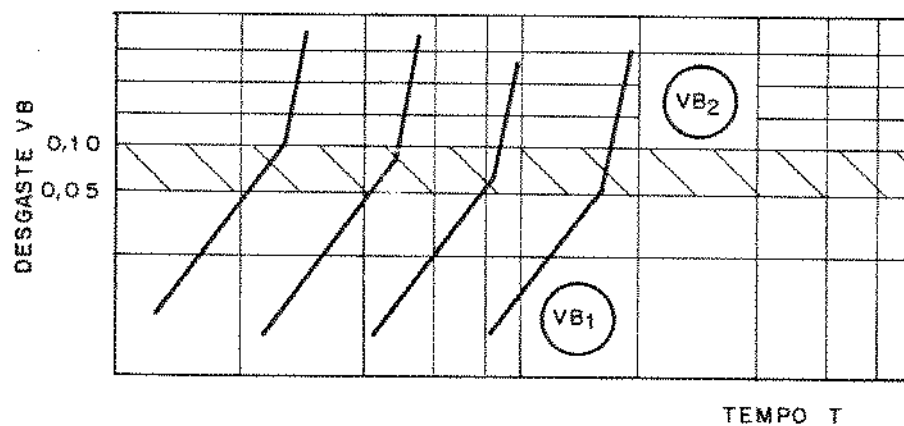


Figura 3.9 - Largura do desgaste VB em função do tempo de usinagem

De acordo com a figura (3.9), tem-se as seguintes relações [31]:

$$V_{B1} = C_2 t^{n_1} \quad (3.15)$$

$$VB_2 = C_3 t^{n_2} \quad (3.15)$$

Existem tabelas para os valores de n_1 e n_2 para as diferentes classes de metal duro e vários materiais [31], porém a variação destes expoentes, de acordo com estas tabelas, é muito pequena, podendo-se afirmar que $n_1 \cong 0,6$ e $n_2 \cong 1,3$. Observa-se também que os valores de C_2 e C_3 variam linearmente com v_c e que os expoentes n_1 e n_2 independem da velocidade de corte. A utilização da expressão (3.15) ou (3.16) dependerá da faixa de desgaste que se está utilizando.

3.5.1.3 - Equação de Woxen:

Woxen [32] sugeriu em 1932 que a vida da ferramenta poderia ser relacionada com a temperatura de corte, pela avaliação do balanço térmico do processo de corte. Demonstrou que a temperatura de corte era uma função direta do cavaco equivalente (q), para uma determinada velocidade de corte e um determinado par ferramenta-peça. O cavaco equivalente (q) é definido como a relação entre o comprimento da aresta de corte que está em contato com a peça (L) e a área (A) da seção de corte (figura 3.10).

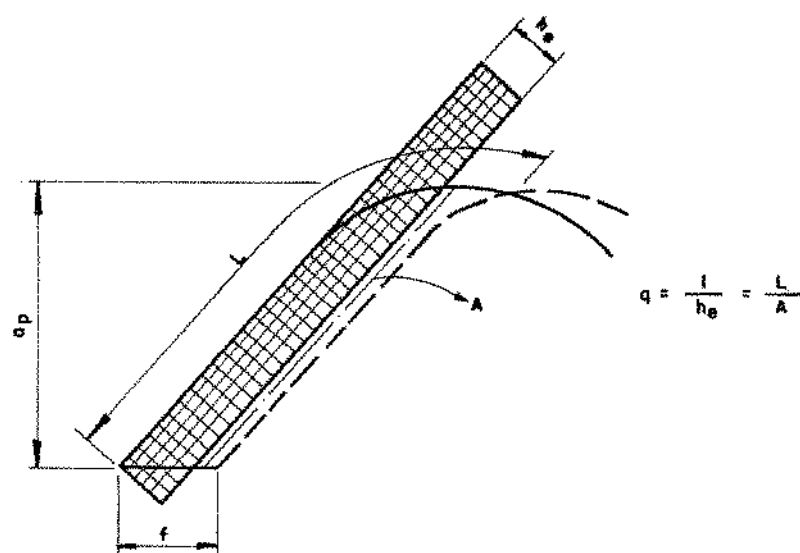


Figura 3.10 - Cavaco equivalente.

$$q = \frac{L}{A} \text{ [mm}^{-1}\text{]} \quad (3.17)$$

A equação inversa de (3.17), chama-se espessura equivalente do cavaco h_e ,

$$h_e = \frac{A}{L} \text{ [mm]} \quad (3.18)$$

Woxen supôs que havia uma relação direta entre a temperatura de corte e a vida da ferramenta, tendo-se como critério de fim de vida uma determinada temperatura θ_1 , esta temperatura corresponde a um determinado tempo T_1 (figuras 3.11, 3.12).

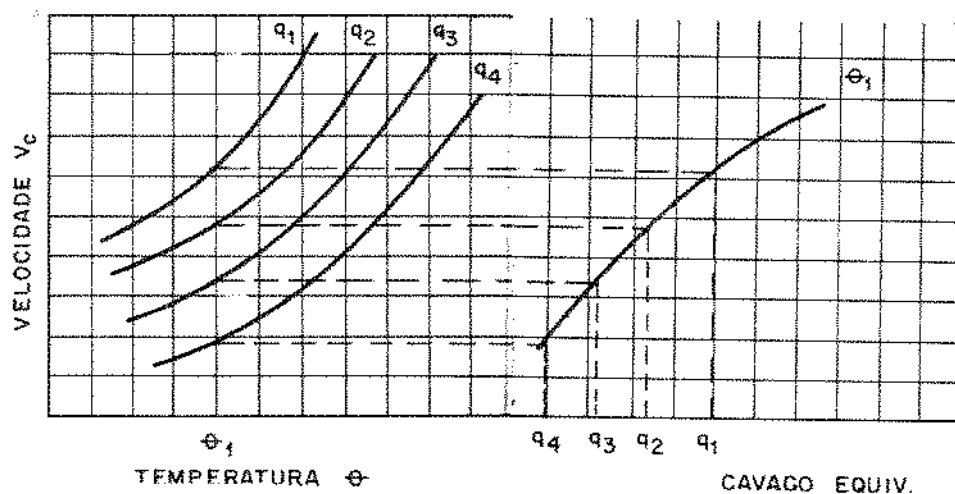


Figura 3.11 - Relação entre a velocidade de corte e a temperatura para diversos valores do cavaco equivalente e entre a velocidade de corte e o cavaco equivalente para uma determinada temperatura de corte.

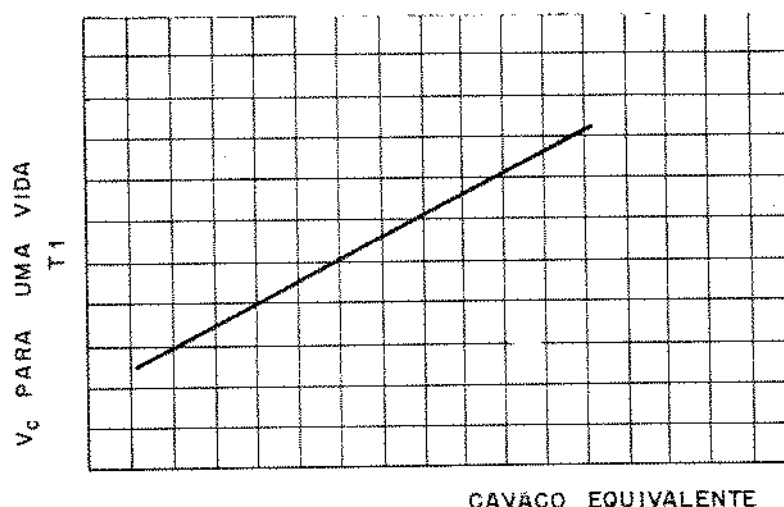


Figura 3.12 - Relação entre a velocidade de corte e o cavaco equivalente para uma determinada vida T_1 da ferramenta (que corresponde a uma temperatura θ_1).

A partir do gráfico ilustrado na figura 3.12, Woxen propôs a relação [31].

$$v_c = Cw (q_o + q) \quad (3.19)$$

Uma vez que os gráficos $v_c = f(q)$ não são necessariamente lineares, introduziu-se o fator de correção $\frac{1}{(1+gq)}$ com g constante, obtendo a relação

$$v_c = Cw \left(\frac{q_o + q}{1 + gq} \right) \quad (3.20)$$

A vida T da ferramenta foi introduzida na expressão (3.20) através do termo $(T_x/T)^\alpha$, admitindo sempre a validade da equação simplificada de Taylor, resultando em [31]

$$v_c = \left(\frac{T_x}{T} \right)^\alpha Cw \left(\frac{q_o + q}{1 + gq} \right) \quad (3.21)$$

onde:

T_x representa uma vida escolhida da ferramenta;

Cw constante dependente do material da peça e da ferramenta.

A aplicação prática da expressão (3.21) era muito difícil, desta forma, Colding [33] baseado na teoria acima propôs a relação

$$v_c T^\alpha q^\gamma = C'w \quad (3.22)$$

Brewer e Rueda [34] notaram que os expoentes α e γ não são necessariamente constantes ou independentes entre si. Recorrendo a análise dimensional, o próprio Colding sugeriu a expressão (3.23):

$$k + a \log q + c \log v_c - \log T + h \log q \log T = 0 \quad (3.23)$$

ou de uma maneira mais geral,

$$k - ax + bx^2 + cy + dy^2 - z + ez^2 + gyz + hxz = 0 \quad (3.24)$$

onde:

$x = \log q$; $y = \log v_c$; $z = \log T$ e a, b, c, d, e, f, g, h , são constantes obtidas experimentalmente.

As equações (3.23) e (3.24) embora expressem com um certo grau de precisão as curvas de vida, têm pouco sentido prático.

3.5.1.4 - Equação de DEPIEREUX:

Depiereux [35] desenvolveu em 1969 uma equação que pode acomodar as não-linearidades dos gráficos $\log T - \log v_c$ e $\log T - \log f$. Curvas típicas representando esta expressão estão mostradas nas figuras 3.13 e 3.14.

a) para um determinado avanço,

$$\operatorname{tg} \alpha = - \left(\frac{d \log T}{d \log v_c} \right)_f = k \quad (3.25)$$

$$k = k_{v_c} v_c^m \quad (3.26)$$

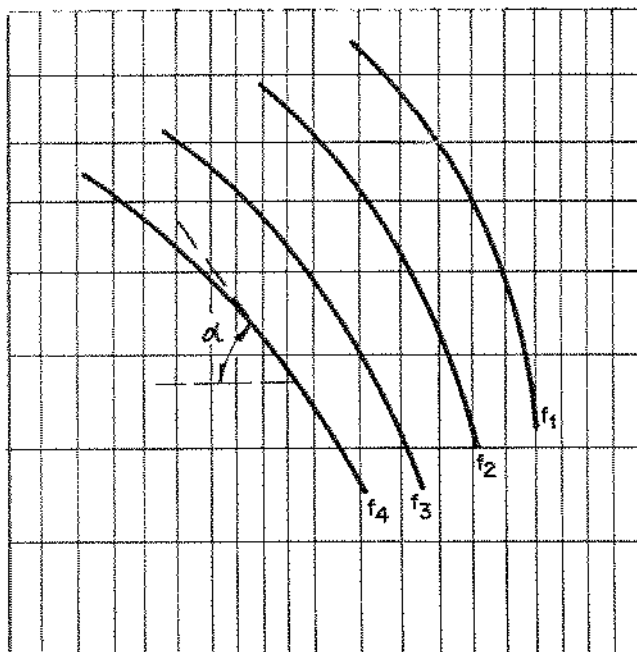
b) para uma determinada velocidade de corte

$$\operatorname{tg} \beta = - \left(\frac{d \log T}{d \log f} \right)_{V_c} = 1 \quad (3.27)$$

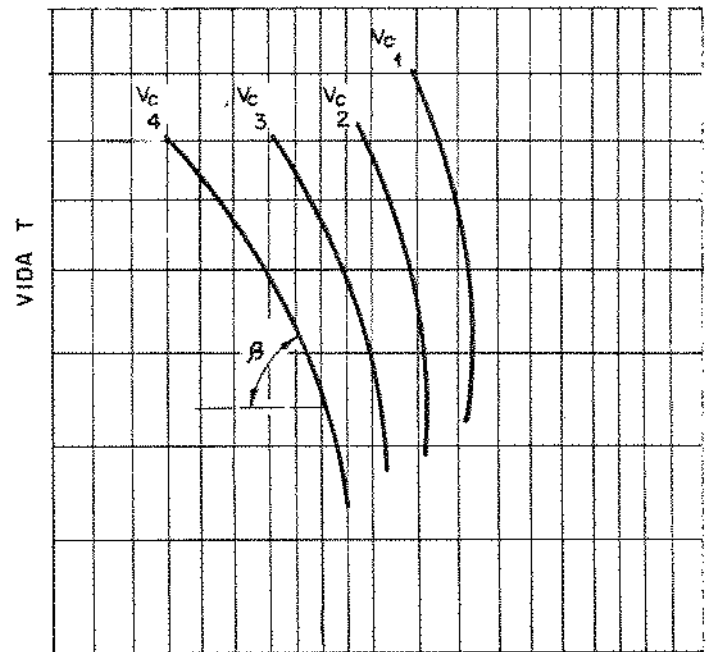
$$i = i_f f^n \quad (3.28)$$

Isto é, os coeficientes angulares das curvas de vida variam linearmente com a velocidade de corte e avanço, na representação di-logarítmica. A expressão desenvolvida por Depiereux para representar curvas de vida semelhantes àquelas ilustradas na figura 3.13 é dada por:

$$T = e^{-\frac{k_{V_c} V_c^m}{m} - \frac{i_f f^n}{n} + c} \quad (3.29)$$



(a)

VELOCIDADE DE CORTE V_c 

(b)

AVANÇO f

Figura 3.13 - Curvas de vida em função da velocidade de corte e do avanço.

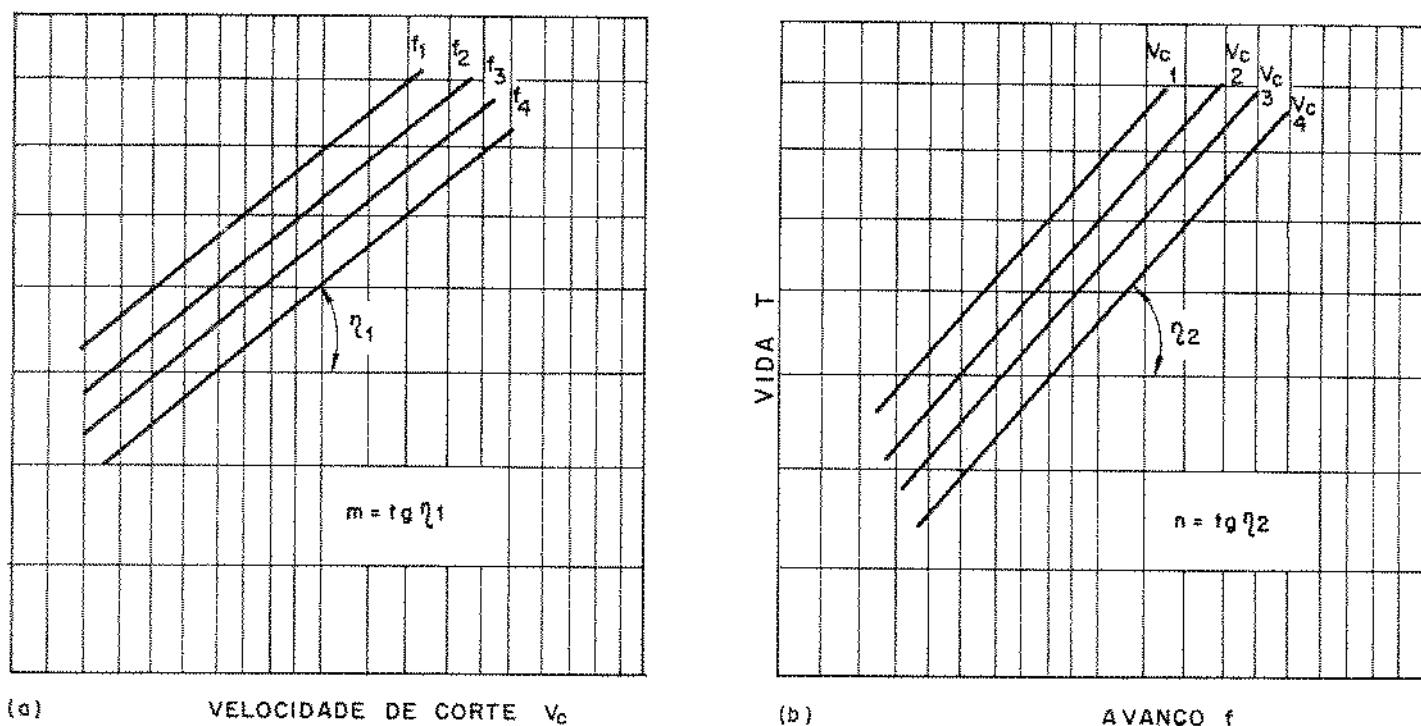


Figura 3.14 - Variação das inclinações das curvas $T - V_c$ e $T - f$

3.6 - CURVAS DE VIDA E DESGASTE PARA PASTILHAS DE METAL DURO COM COBERTURA, OBTIDAS EM LABORATÓRIO

3.6.1 - Introdução:

Com o desenvolvimento de revestimento multi-camadas há um interesse muito grande no estudo do comportamento do desgaste das ferramentas revestidas. O aumento da resistência ao desgaste destas ferramentas permanece mesmo após o revestimento já ter saído da pastilha, principalmente na superfície de saída da ferramenta.

J. Billingham, P. Hancock e J.P. Chubb [36] analisaram o comportamento de várias pastilhas revestidas fornecidas por vários fabricantes e notaram que após determinado tempo de usinagem todas as pastilhas analisadas apresentavam lascamentos principalmente na superfície de folga da ferramenta. Este comportamento foi observado tanto em pastilhas com uma, duas ou três camadas de revestimentos [36]. De seus ensaios, os mesmos chegaram as seguintes conclusões.

- o desgaste determinante de fim de vida das pastilhas recobertas ocorre na superfície de folga da ferramenta, e não na superfície de saída;
- o desgaste inicial na superfície de folga da ferramenta ocorre pelo mecanismo de abrasão, o qual é substituído nos estágios finais da vida da ferramenta (quando ocorre então o lascamento dos revestimentos) por um mecanismo combinado de difusão/abrasão;
- as várias inconstâncias na vida da ferramenta são devido ao fato que a superfície de folga da ferramenta é muito propensa ao lascamento do revestimento, principalmente pelo fato do difícil controle da homogeneidade das camadas durante o processo de deposição. Com relação ao comportamento das curvas de vida nada é relatado.

3.6.2 - Curvas de Desgaste:

Com o fim de analisar as curvas de desgaste e de vida das pastilhas de metal duro revestidas, foram realizadas ensaios de torneamento por Novaski [21] na usinagem do aço ABNT 1055. Os ensaios foram feitos no Laboratório da Divisão de Engenharia de Campinas - UNICAMP, utilizando o TORNO CNC ROMI - modelo Cosmos 30, com variação contínua de velocidades (67 à 3000 rpm) e potência de 30 CV. O porta-pastilhas e as pastilhas utilizadas têm as seguintes características.

- Porta-pastilhas: SDJCL 2020 K11 ($\alpha_o = 7^\circ$; $\lambda_s = 0^\circ$; $\gamma_o = 0^\circ$, $x_r = 93$) Fabricante Sandvik (figura 3.15);
- Pastilhas: DCMM - 11T30852 ($\alpha_o = 7^\circ$; $\lambda_s = 0^\circ$; $\gamma_o = 18^\circ$) Fabricante Sandvik (figura 3.15), classe GC415, revestimento triplo (TiC/Al₂O₃/TiN) em substrato P15.

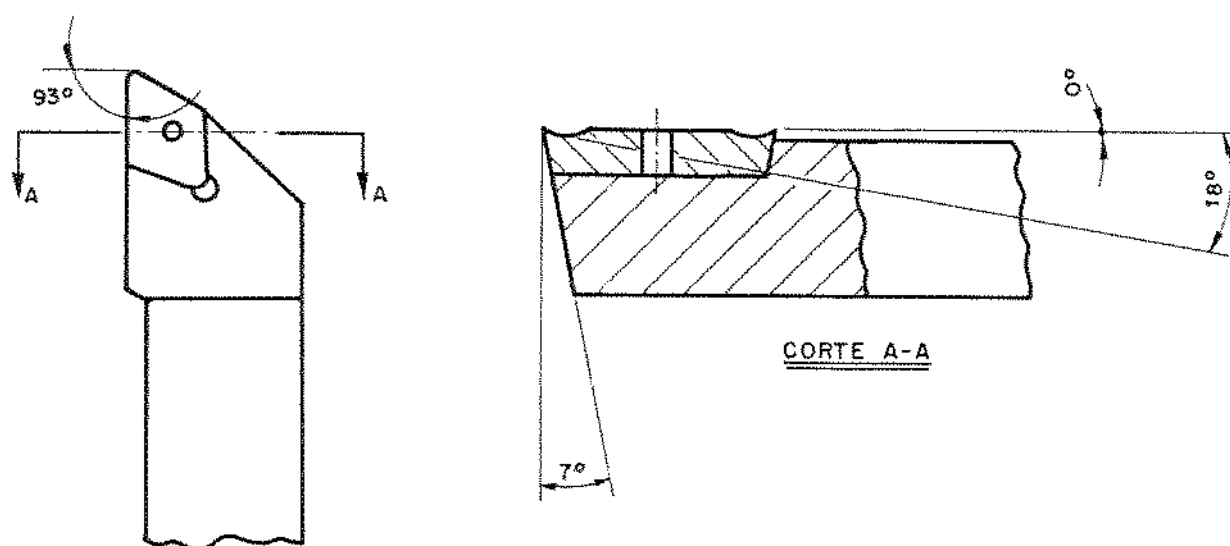


Figura 3.15 - Geometria da ferramenta utilizada nos ensaios.

As condições de usinagem empregadas foram as seguintes:

- velocidade de corte (V_c) = 170; 190; 210; 240 [m/min];
- avanços (f) = 0,25; 0,35; 0,40 [mm/V];
- profundidade de corte (a_p) = 1,9 [mm];
- fluido de corte = óleo solúvel renolub em solução 1:40.

As dimensões dos corpos de prova ensaiados são as seguintes:

- corpo de prova centrado e faceado (ABNT 1055) com 300 [mm] de comprimento e diâmetro 35 [mm] (trefilado para este diâmetro). Sua composição química (NBR 6006-ABNT) é a seguinte:

ABNT	% Elementos Químicos									
1055	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Pb	V
	0,55	0,85	0,022	0,012	0,20	-	-	-	-	-

Os ensaios foram realizados em três passes para cada corpo de prova, sendo que os desgastes das ferramentas foram controlados através de um microscópio digital (Zeiss) e prosseguiram até o aparecimento de lascamento nos revestimentos. Os resultados dos ensaios para as curvas de desgaste são apresentados nas figuras 3.16, 3.17 e 3.18

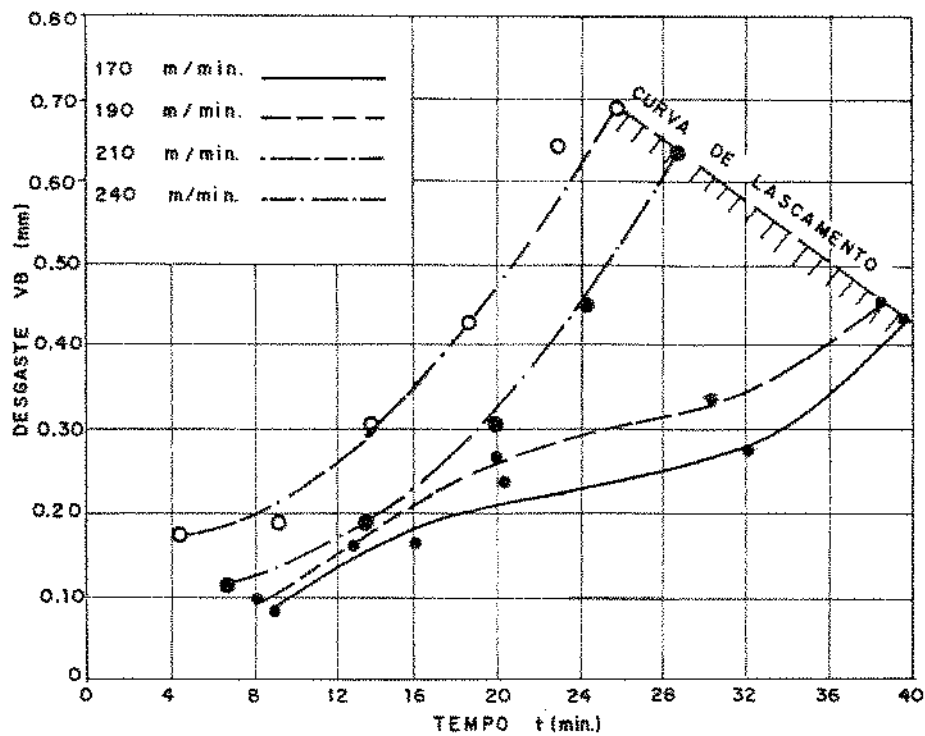


Figura 3.16 - Curvas de desgaste para $f = 0,25$ [mm/V]. [21]

Nas figuras 3.16, 3.17 e 3.18 nota-se que com o aumento da velocidade de corte, para um mesmo avanço, obtêm-se valores maiores do desgaste VB até ocorrer o lascamento.

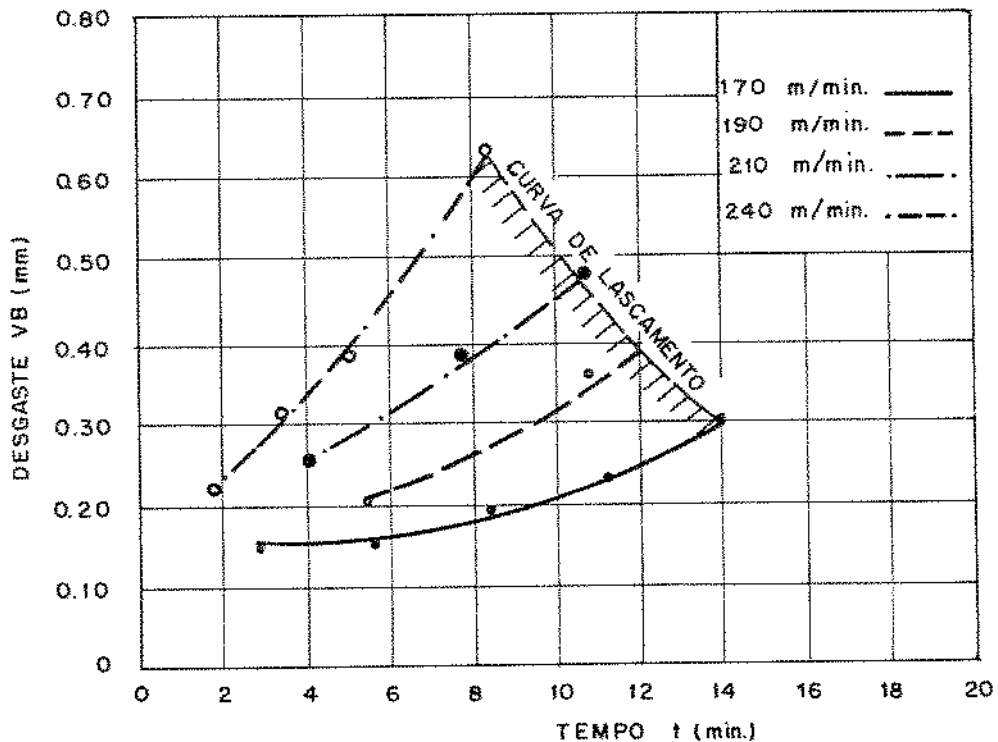


Figura 3.17 - Curvas de desgaste para $f = 0,35$ [mm/V]. [21]

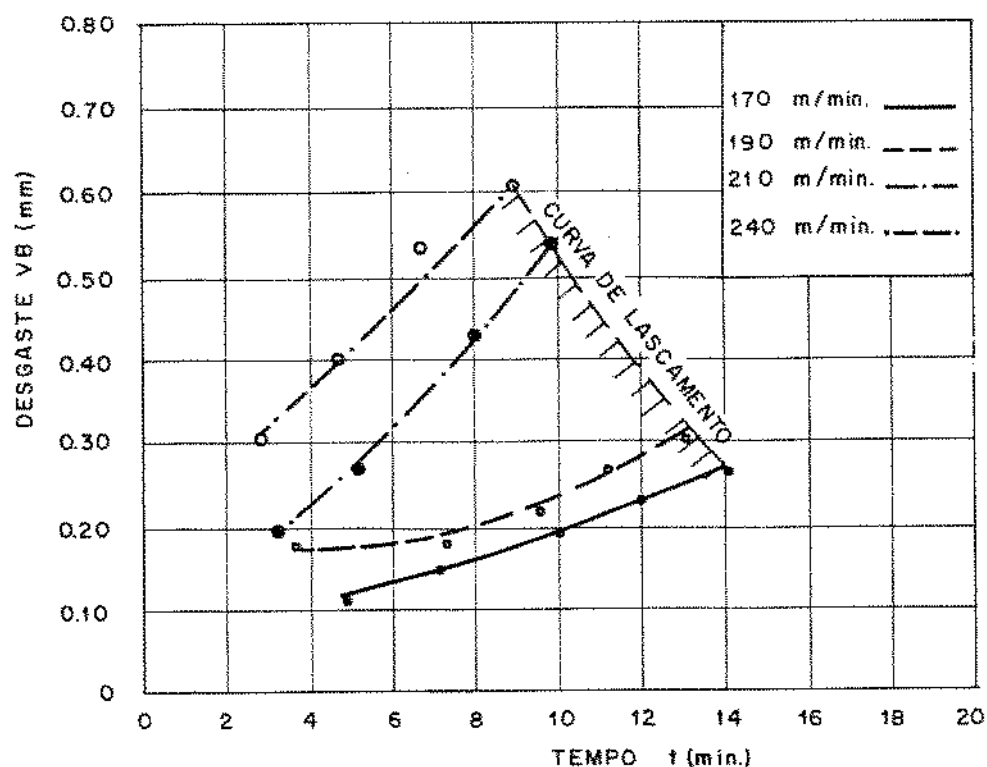


Figura 3.18 - Curvas de desgaste para $f = 0,40$ [mm/U]. [21]

A figura 3.19 ilustra com maior clareza este aspecto.

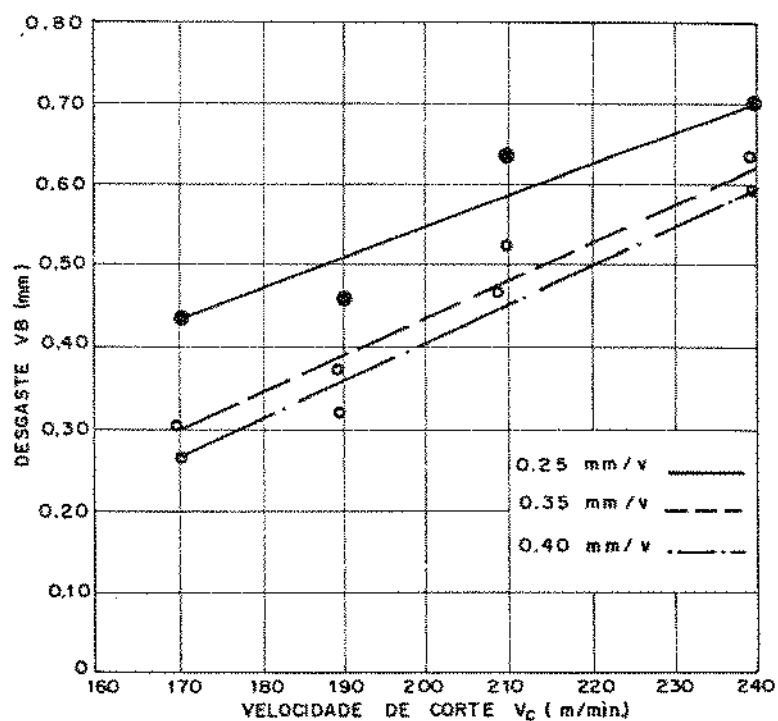


Figura 3.19 - Variação dos valores limites de VB, nos quais ocorreram lascamentos dos revestimentos, em função da velocidade de corte. [21]

Com relação ao avanço, observa-se que quanto maior o seu valor, mantendo-se a velocidade de corte constante, menor é o valor do desgaste VB até ser atingido o lascamento (figura 3.19). Nota-se da figura 3.19 que a variação dos valores de VB, onde ocorreram os lascamentos é aproximadamente linear, tanto em função da velocidade de corte, como do avanço. Observa-se que as retas ilustradas na figura 3.19 são aproximadamente paralelas entre si.

As figuras 3.20, 3.21 e 3.22 são gráficos em escala di-logarítmica entre o desgaste (VB) e o tempo de usinagem (t), em minuto.

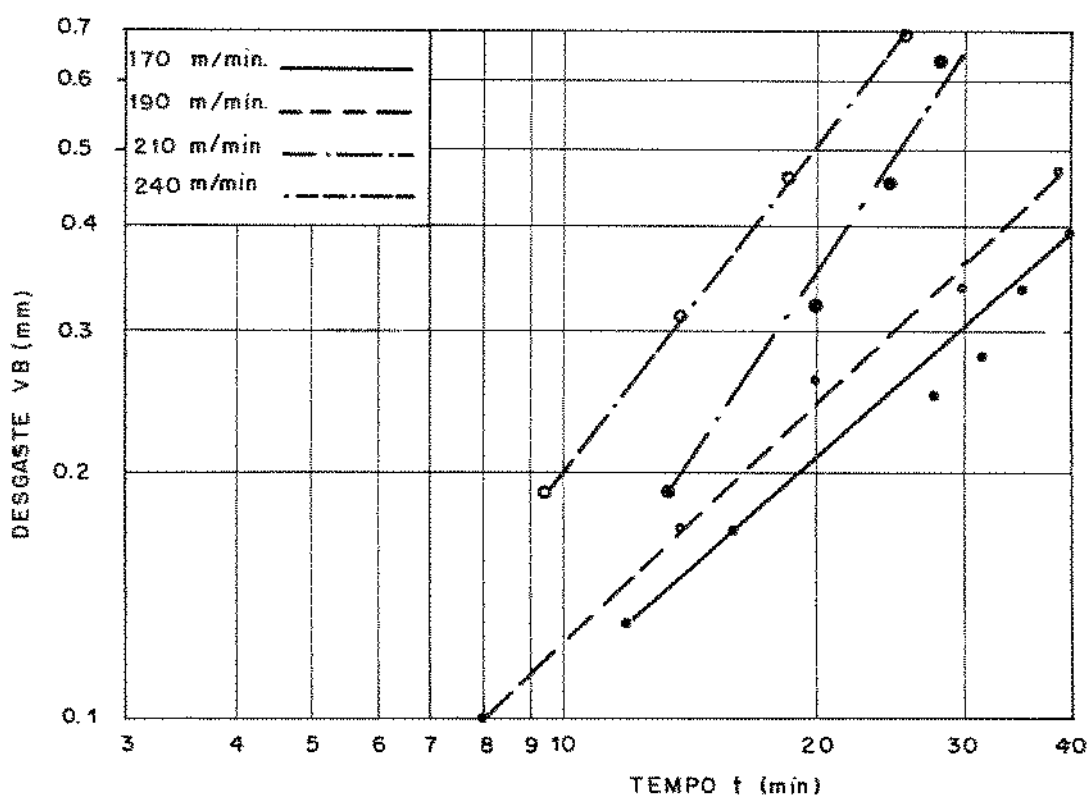


Figura 3.20 - Largura do desgaste VB em função do tempo de usinagem, para $f = 0,25$ [mm/V]. [21]

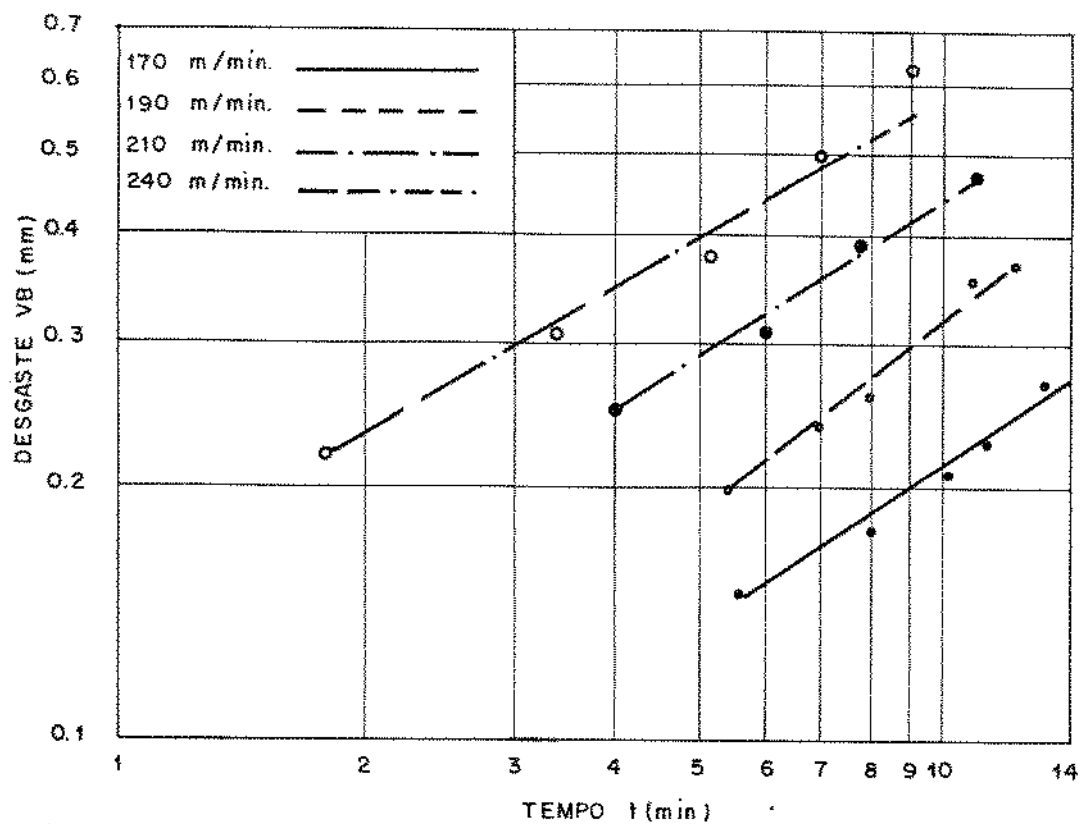


Figura 3.21 - Largura do desgaste VB em função do tempo de usinagem, para $f = 0,35$ [mm/V]. [21]

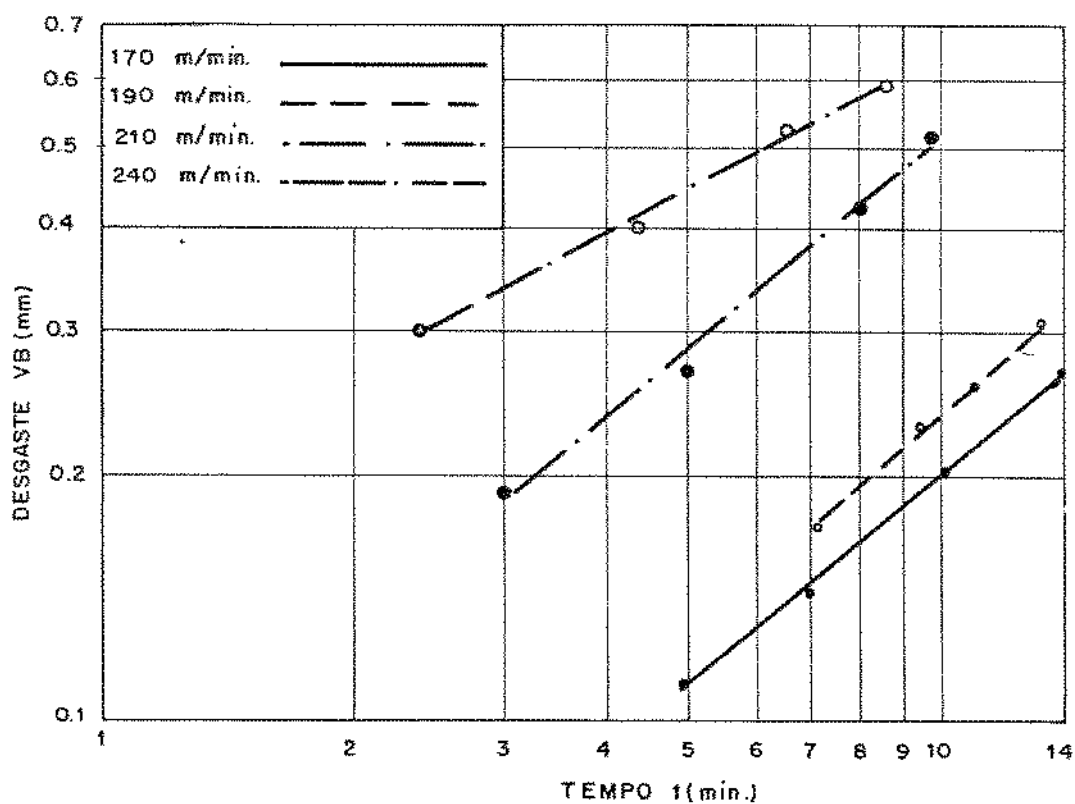


Figura 3.22 - Largura do desgaste VB em função do tempo de usinagem, para $f = 0,40$ [mm/V]. [21]

Dos gráficos ilustrados nas figuras 3.20, 3.21 e 3.22, e das expressões

$$VB = 0,0130 \cdot t^{0,91} \quad (f = 0,25 \text{ [mm/V]} \text{ e } V_c = 170 \text{ [mm/min]}) \quad (3.30)$$

e

$$VB = 0,1900 \cdot t^{0,53} \quad (f = 0,40 \text{ [mm/V]} \text{ e } V_c = 240 \text{ [mm/min]}) \quad (3.31)$$

observa-se que:

- os valores dos expoentes variaram tanto com os avanços como com as velocidades de corte;
- os valores das constantes não apresentaram uma variação linear com a variação da velocidade de corte.

3.6.3 - Curvas de Vida:

A partir das curvas de desgaste obtidas (figuras 3.16, 3.17 e 3.18) foram traçadas as curvas de vida correspondentes. Nota-se que a Equação simplificada de Taylor $V_c T^Y = C$ ajusta-se perfeitamente aos dados obtidos, ou seja, existe uma linearidade dos gráficos $\log T - \log V_c$. Nas figuras 3.23, 3.24 e 3.25 estão traçadas as curvas de vida para dois critérios, ou seja:

- a) $VB = 0,3 \text{ [mm]}$, como recomendado pela norma ISO 3685 [26]; para este valor se encontram comumente os valores tabelados da vida para pastilhas sem revestimentos [37];
- b) para valores diferentes de VB , isto é, para os tempos onde ocorreram os lascamentos dos revestimentos.

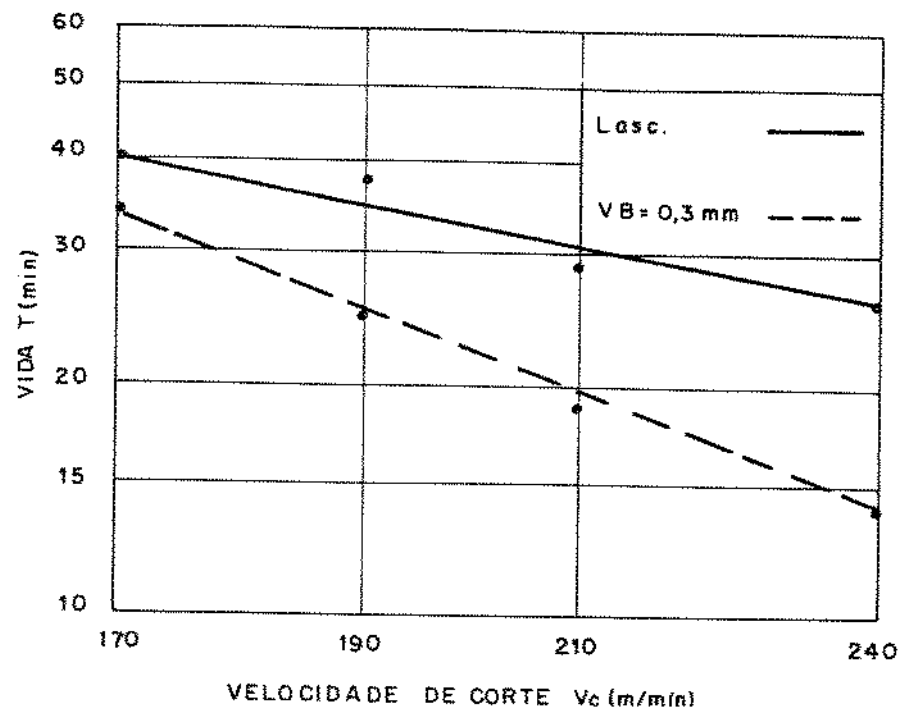


Figura 3.23 - Curvas de vida para $f = 0,25$ [mm/V]. [21]

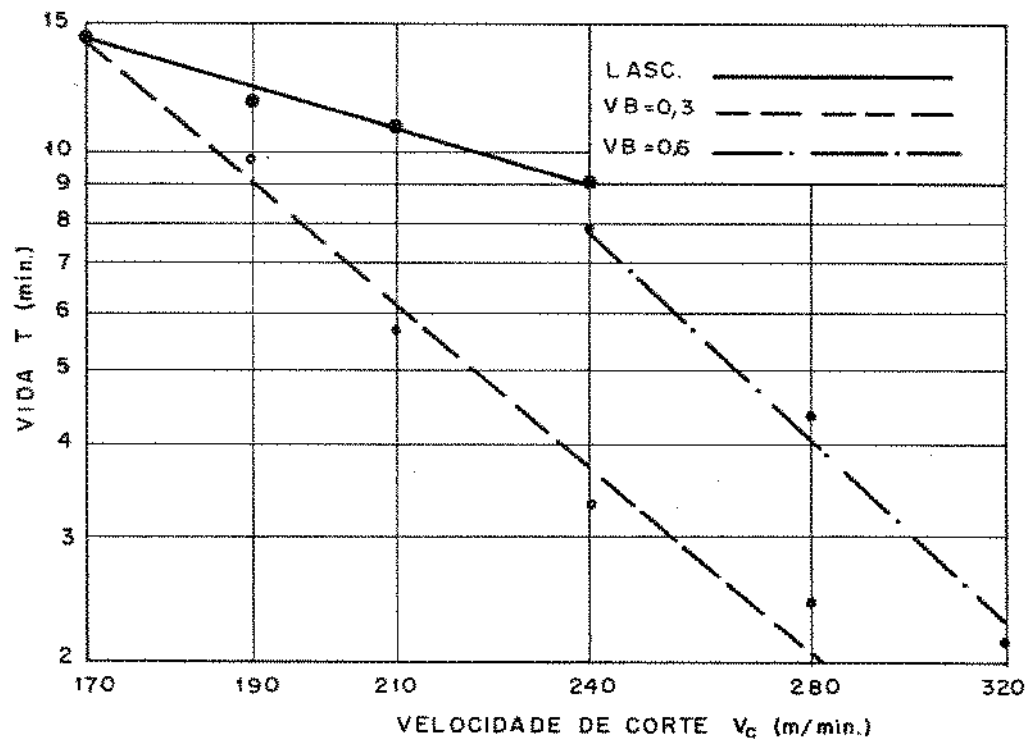


Figura 3.24 - Curvas de vida para $f = 0,35$ [mm/V]. [21]

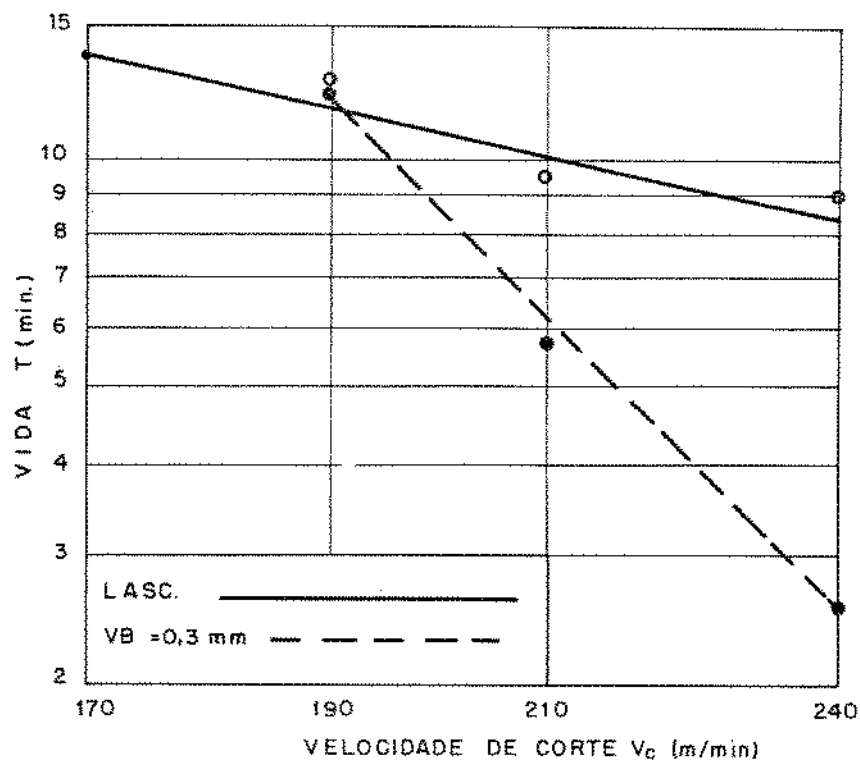


Figura 3.25 - Curvas de vida para $f = 0,40$ [mm/V]. [21]

Das figuras 3.23, 3.24 e 3.25 observa-se que:

- ao se utilizar como critério de fim de vida o valor $VB = 0,3$ [mm], pode-se estar sub-utilizando a capacidade da pastilha (figura 3.23 e figura 3.24). Por outro lado, a pastilha pode lascar antes de ser atingido este critério (figura 3.25);
- para valores mais elevados da velocidade de corte (figura 3.23) pode-se utilizar um outro critério de fim de vida, ou seja, um outro valor para VB .

Conclui-se, portanto, que para o caso de pastilhas de metal duro revestidas, a utilização de um único critério de fim de vida para todas as velocidades de corte é ineficiente, devendo-se adotar os critérios mais pertinentes a cada caso.

3.7 - CURVAS DE VIDA PARA PASTILHAS DE METAL DURO COM COBERTURA, OBTIDAS NA EMPRESA

3.7.1 - Introdução:

Os erros que se cometem ao utilizarem dados obtidos em ensaios realizados em laboratório no meio industrial, faz com que o usuário lance mão de dados obtidos no pé da máquina, em ensaios conduzidos na empresa. Este procedimento elimina totalmente os erros que se cometeriam, caso usasse os dados de ensaios de vida em laboratório. Isto se justifica pelos seguintes fatos [21]:

- a obtenção da curva de vida em laboratório é feita através de um eixo com diâmetro constante. As peças industriais normalmente não possuem diâmetros constantes, mas sim escalonados. Quando da utilização de máquinas-ferramenta (tornos) com variação discreta de velocidades para a produção de peças, tem-se então, que utilizar a teoria da equivalência de usinagem (Cap. IV item 4.5) que faz algumas aproximações, induzindo conseqüentemente a erros;
- mesmo que o meio industrial utilize máquinas-ferramenta (tornos) com variação contínua de velocidades, dificilmente o diâmetro da peça ensaiada em laboratório coincide com o diâmetro da peça a ser trabalhada. O fato dos diâmetros serem diferentes acarreta dissipação de calor diferente através da peça, o que pode alterar a vida da ferramenta, modificando o grau de recalque e conseqüentemente a força de usinagem;
- em laboratório trabalha-se com profundidade de corte constante, condição esta nem sempre mantida no meio industrial;
- os critérios de desgaste para levantamento da curva de vida em laboratório nem sempre coincidem com os critérios desejáveis no meio industrial.

3.7.2 - Procedimento Adotado:

Para se evitar os erros citados em 3.7.1, faz-se o levantamento da curva de vida diretamente na peça em trabalho (produção em série e repetitiva), para lotes maiores do que 1000 peças [38], em função do número de peças produzidas. Desta forma, a equação simplificada de Taylor se torna:

$$Z_T V_C^X = K' \quad (3.32)$$

ou

ou

$$V_c Z_T^{X'} = C' \quad (3.33)$$

onde:

Z_T é o número de peças usinadas por vida da ferramenta
Graficamente, tem-se (figura 3.26):

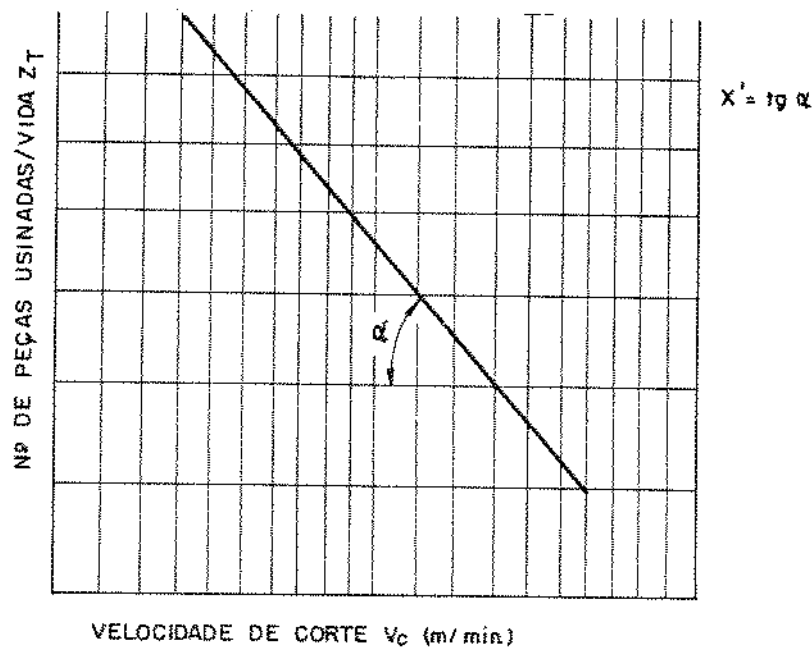


Figura 3.26 - Curva de vida em função do número de peças usinadas [21]

A curva acima deve ser levantada para máquinas-ferramenta (tornos), com variação contínua de velocidades. Para máquinas-ferramenta (tornos) com variação discreta de velocidades, faz-se o levantamento da curva de vida não em função da velocidade de corte, mas da rotação da máquina, ou seja, a equação simplificada de Taylor tomaria a forma:

$$Z_T n^{X''} = k'' \quad (3.34)$$

ou

$$n Z_T^{Y''} = C'' \quad (3.35)$$

Graficamente, tem-se a mesma curva mostrada na figura 3.26 porém, colocada na abscissa a rotação da máquina ao invés da velocidade de corte. Com este procedimento, eliminam-se as aproximações que seriam feitas pela teoria da equivalência de usinagem, bem como problemas

etc. Por outro lado, traça-se a curva de vida diretamente, sem a necessidade de se traçar as curvas de desgaste, uma vez que os pontos obtidos nos ensaios são colocados diretamente no papel di-logarítmico.

3.7.3 - Curvas de Vida obtidas na Empresa

Com o fim de analisar o comportamento da vida das ferramentas (pastilhas de metal duro revestidos) em operação de torneamento em desbaste, foram realizados ensaios em uma empresa de grande porte, sendo estes ensaios realizados por Novaski [21], com as seguintes características:

- a) características da máquina: torno CNC Index, comando GE42, alimentação por barras, variação contínua de velocidades (31,5 à 3500 [rpm] e potência de 22 kW;
- b) características do material: aço ABNT 1055, com a mesma composição química e dureza do ensaiado em laboratório, e pertencente ao mesmo lote que pertenceu os do ensaiados em laboratório, (vide item 3.6.2);
- c) dimensões da peça-obra (figura 3.27);
- d) características da ferramentas (vide item 3.6.2);
- e) condições de usinagem (vide item 3.6.2)

Após as usinagens das peças, as pastilhas foram observadas através de uma lupa graduada, e prosseguiram até o aparecimento de lascamentos dos revestimentos. Mediram-se os desgastes VB das pastilhas que apresentaram lascamentos. As curvas de vida foram levantados diretamente em função do número de peças usinadas, tendo-se como critério de fim de vida o aparecimento de lascamentos do revestimento no raio de ponta. Os ensaios foram repetidos 6 vezes para cada condição de usinagem. As figuras 3.28, 3.29 e 3.30 apresentam os resultados obtidos.

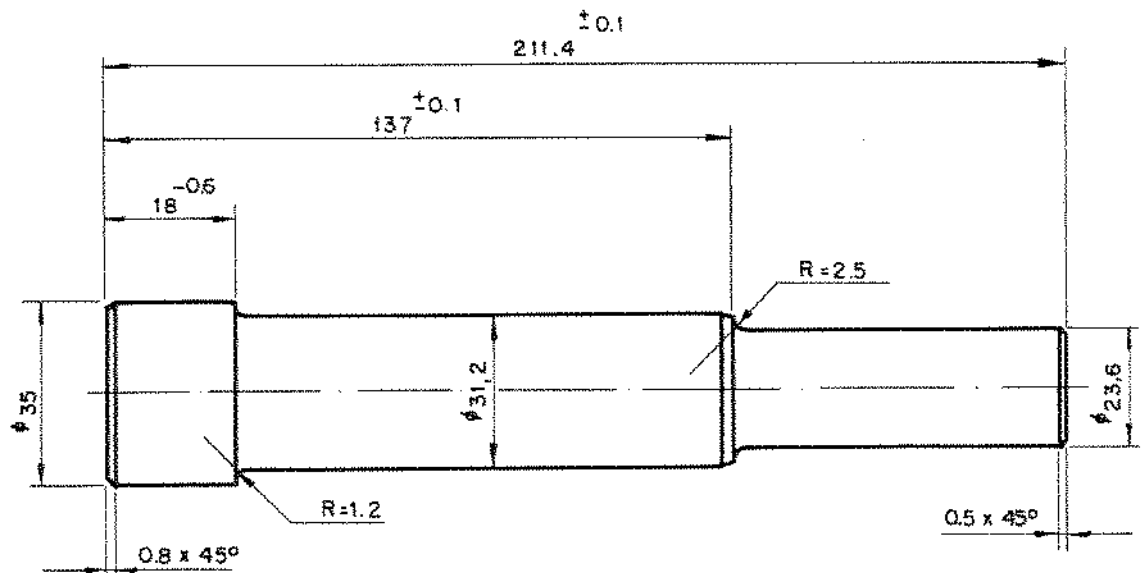
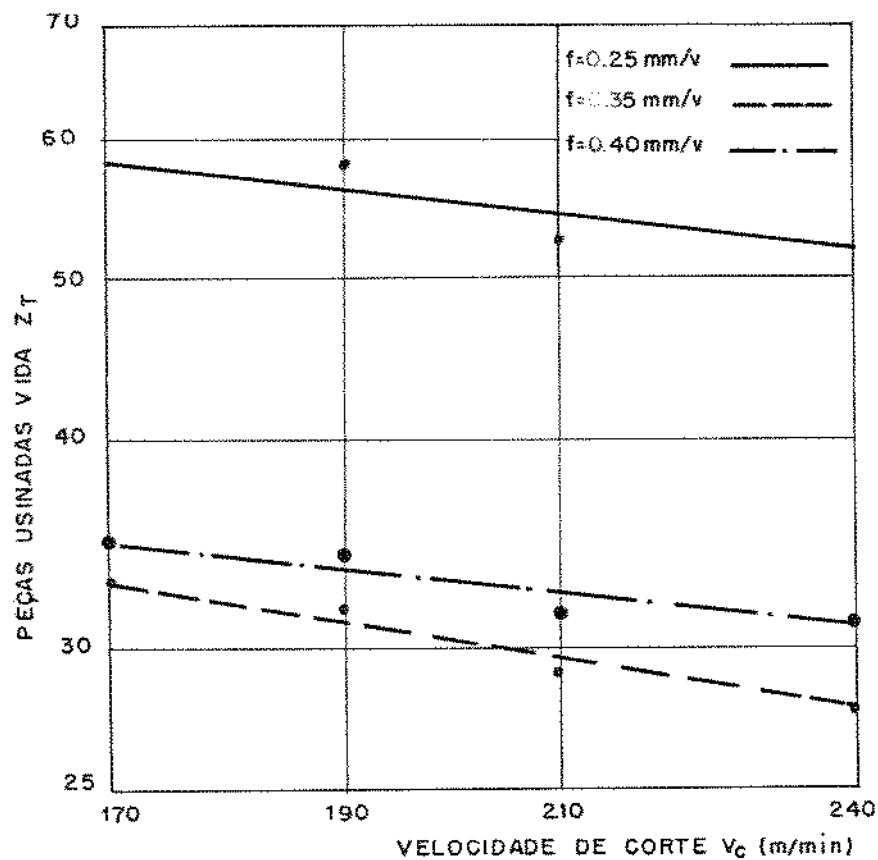
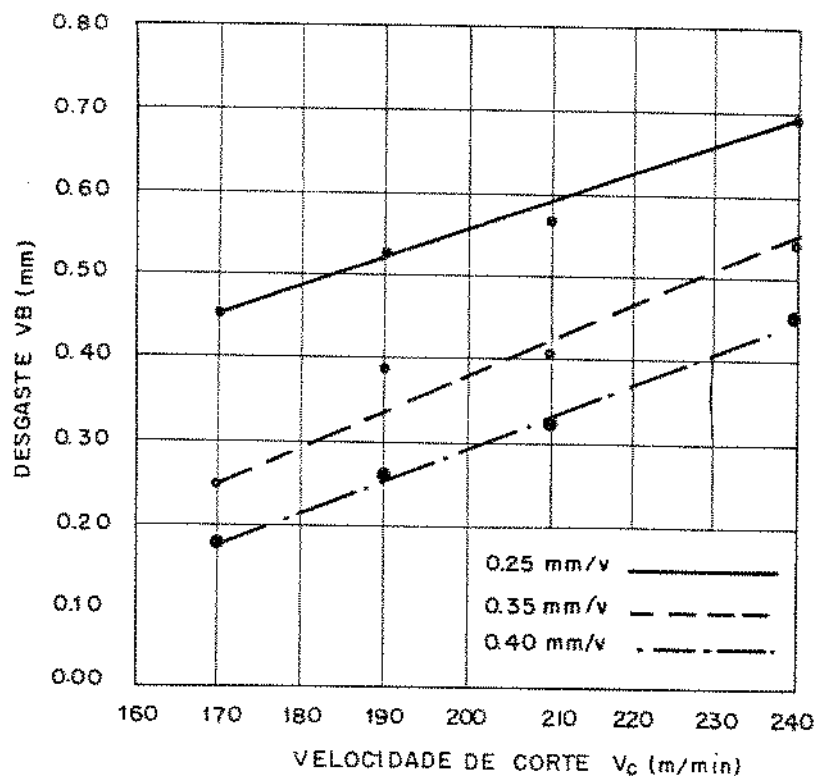


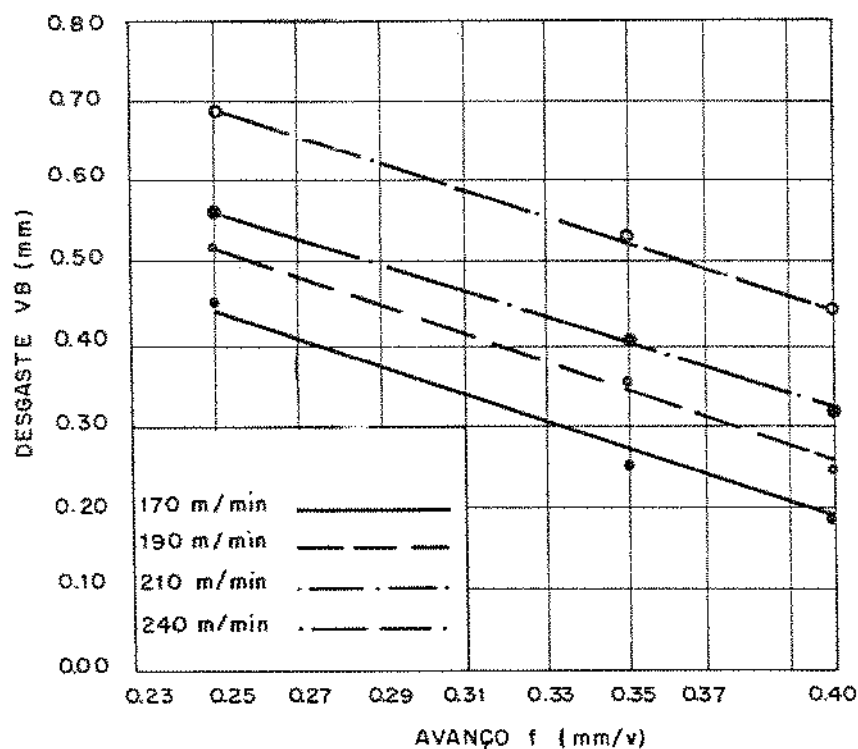
Figura 3.27 - Dimensões da peça-obra usinada, sendo 3 passes de $a_p=1,9$ [mm] e $l_f = 74,4$ [mm] e 1 passe de $a_p = 1,9$ [mm] em $l_f = 119$ [mm].



Figuras 3.28 - Curvas de vida levantadas diretamente nas peças em produção. Os pontos representados para cada caso são os valores médios de 6 medições. [21]



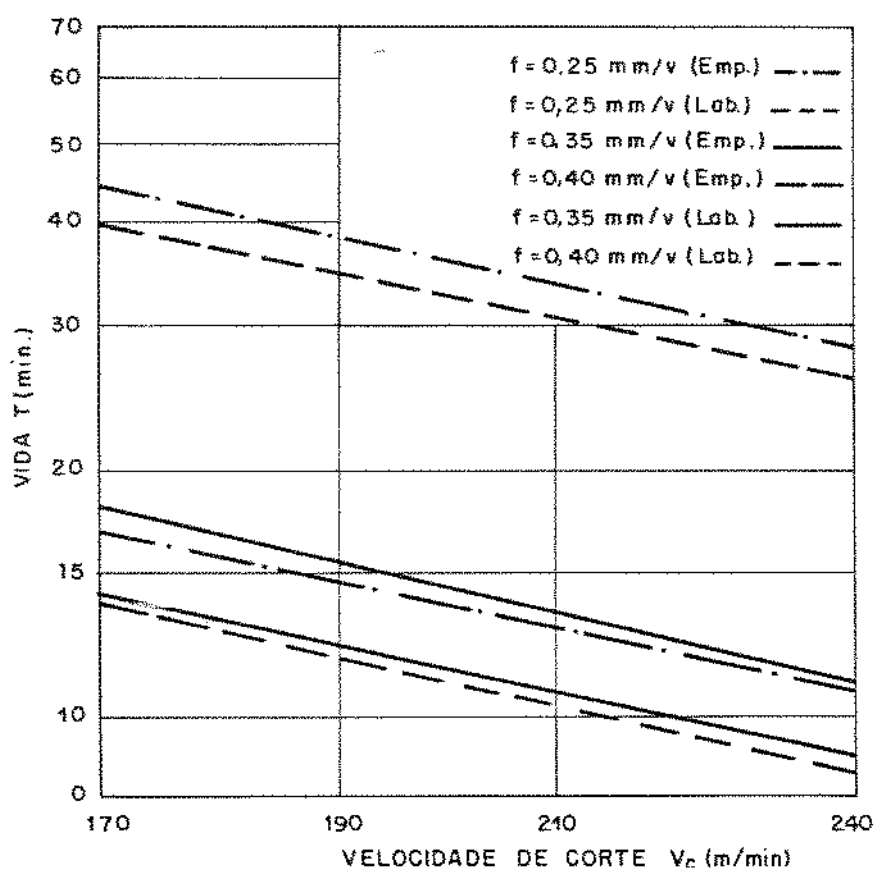
Figuras 3.29 - Variação dos valores de VB, nos quais ocorreram os lascamentos dos revestimentos, em função da velocidade de corte. [21]



Figuras 3.30 - Variação dos valores de VB, nos quais ocorreram os lascamentos dos revestimentos, em função do avanço. [21]

Da mesma forma do ocorrido nos ensaios efetuados em corpos de prova em laboratório, observa-se também que a variação dos valores de VB, onde ocorreram os lascamentos é aproximadamente linear em função da velocidade de corte, como também em função do avanço e as retas ilustradas na figuras 3.29 são aproximadamente paralelas entre si, o mesmo ocorrendo com as retas ilustradas na figuras 3.30.

A figuras 3.31 apresenta, tanto as curvas de vida obtidas no laboratório como aquelas levantadas diretamente na empresa, tendo-se como critério o lascamento dos revestimentos, válidas entre 170 e 240 [m/min].



Figuras 3.31 - Curvas de vida obtidas em laboratório e na empresa. [21].

A tabela 3.1 fornece as equações de vida obtidas em laboratório e na empresa.

Analisando os resultados fornecidos pela tabela 3.1 conclui-se que no caso das pastilhas com revestimento triplo (TiC/Al₂O₃/TiN) em substrato P15, vale as seguintes relações:

$$X = X' + 1 \quad (3.36)$$

e

$$K = \frac{K' \cdot 1_f \cdot \pi \cdot d}{1000f} \quad (3.37)$$

onde X' e K' são coeficientes da fórmula simplificada de Taylor obtidos em ensaios em empresa em função do número de peças usinadas. X e K são coeficientes da fórmula simplificada de Taylor obtidos em ensaios de vida em laboratório.

AVANÇO (mm/v)	LABORATÓRIO (Eq. vida)		EMPRESA (Eq. vida)	
	f(Z _T)	f(T)	f(Z _T)	f(T)
0,25	0,25 v _c .Z _T = 187	0,800 v _c .T = 3257	0,327 v _c .T = 3257	0,754 v _c .T = 3004
0,35	0,30 v _c .Z _T = 118	0,768 v _c .T = 1298	0,423 v _c .Z _T = 289	0,703 v _c .T = 1310
0,40	0,412 v _c .Z _T = 239	0,708 v _c .T = 1100	0,340 v _c .Z _T = 201	0,746 v _c .T = 1407

Tabela 3.1 - Comparação entre as equações de vida obtidas em laboratório e em Empresa. [21]

CAPÍTULO IV

EQUIVALÊNCIA NAS OPERAÇÕES DE USINAGEM

4.1 - INTRODUÇÃO

Em diversos processos mecânicos de usinagem, constata-se frequentemente que, devido ao fato das peças possuírem diâmetros variáveis e a maioria das máquinas-ferramenta serem de variação discreta de velocidades, há necessidade para o estudo das condições econômicas de usinagem, da determinação da velocidade e avanço equivalentes.

Define-se velocidade de corte equivalente numa operação de usinagem com velocidade de corte variável, a velocidade de corte constante que origina no mesmo tempo de usinagem, o mesmo desgaste da ferramenta, quando obtido com velocidade de corte variável, nas mesmas condições de avanço, profundidade de corte, geometria efetiva da ferramenta, fluido de corte, para o par ferramenta-peça considerado [38]. Analiticamente é dada pela expressão:

$$V_c = \sqrt{\frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} V_c^x dt}, \quad (4.1)$$

a qual é aplicável dentro do campo de validade da fórmula simplificada de Taylor $T.V_c^x = K$, onde x e K são constantes para um determinado par ferramenta-peça e condições de corte pré-estabelecidos. Tal expressão foi verificada experimentalmente por Kazinczy e determinada analiticamente por Armarego e Brown. Estes dois pesquisadores consideraram para sua dedução analítica, que as curvas de desgaste da ferramenta, em função do tempo de usinagem, se assemelhavam a segmentos de retas. Posteriormente Ferraresi demonstrou esta fórmula para um caso geral, admitindo as curvas de vida paralela, para diferentes valores do desgaste da ferramenta [38,39,40].

4.2 - DIÂMETRO EQUIVALENTE

Considere-se uma operação de usinagem com velocidade de corte variável e a peça sendo usinada com a velocidade de corte equivalente V_e . Para facilidade de explanação, admitamos que o

processo mecânico de usinagem seja o torneamento. O diâmetro equivalente correspondente à esta velocidade é definido pela equação (Figura 4.1).

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

onde a rotação n é constante e o diâmetro de corte equivalente é dado por:

$$d_e = \frac{1000}{\pi \cdot n} \sqrt{\frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} V_c^x dt} \quad (4.3)$$

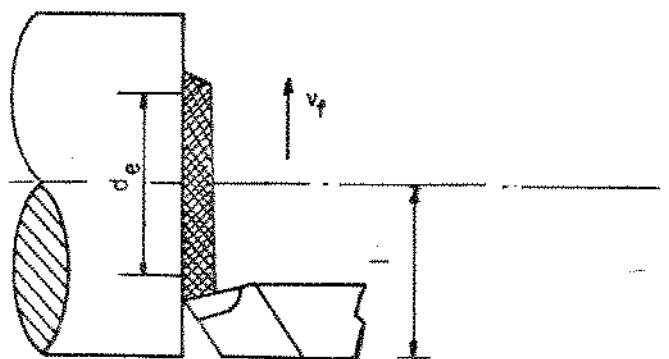


Figura 4.1 - Diâmetro - equivalente para operações de corte com velocidade de corte variável.

De acordo com as formulações realizadas por Ferraresi, as expressões dos diâmetros - equivalentes para as diferentes operações de corte são [38].

FACEAMENTO (Figura 4.2)

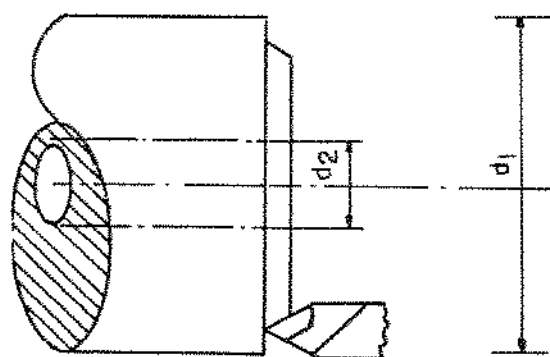


Figura 4.2 - Faceamento de uma peça onde a mesma ferramenta trabalha em diferentes diâmetros.

$$d_e = \left\{ d_1^x \left[\frac{1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{x+1}}{(x+1) \left(1 - \frac{d_2}{d_1} \right)} \right] \right\}^{1/x} \quad (4.4)$$

TORNEAMENTO CÔNICO (Figura 4.3)

$$d_e = d_2 \left[\frac{1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{x+1}}{(x+1) \left(1 - \frac{d_1}{d_2} \right)} \right]^{1/x} \quad (4.5)$$

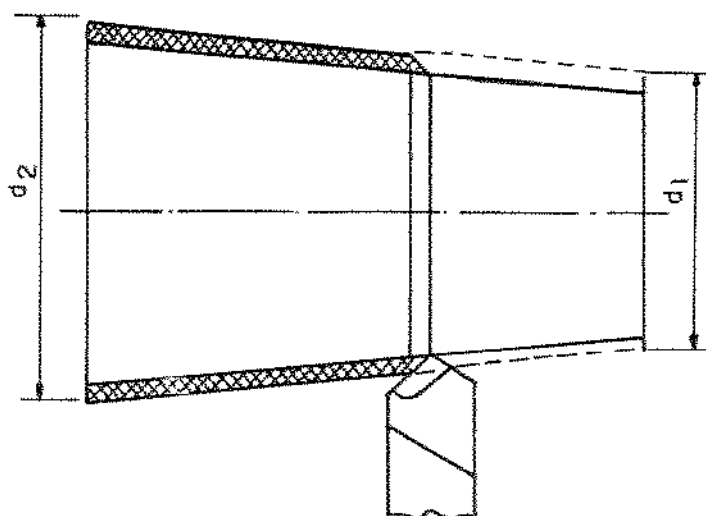


Figura 4.3 - Torneamento cônico de uma peça.

TORNEAMENTO CILÍNDRICO EM DIFERENTES DIÂMETROS (Fig. 4.4)

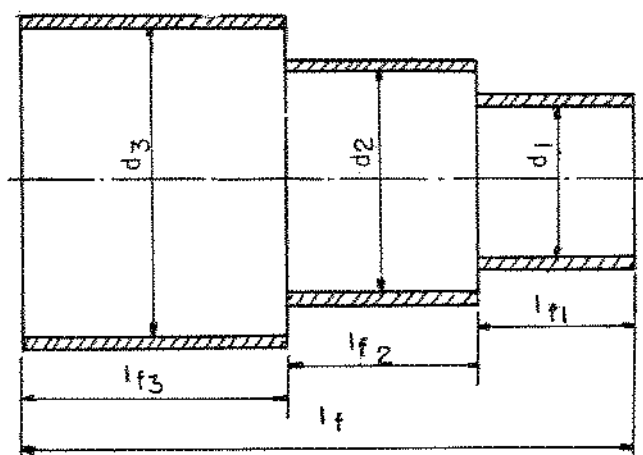


Figura 4.4 - Torneamento cilíndrico de uma peça com vários diâmetros

$$d_e = \sqrt{\frac{1}{l_f} \sum_{i=1}^m d_i^2 l_{fi}} \quad (4.6)$$

4.3 - CONSIDERAÇÕES EM TORNO COPIADORES

Nos tornos copiadores, o percurso l_f da ferramenta nem sempre coincide com o percurso l_{fc} do carro onde está fixa a ferramenta, sendo dependente do ângulo de inclinação do copiador δ , (Fig. 4.5) [1,6]

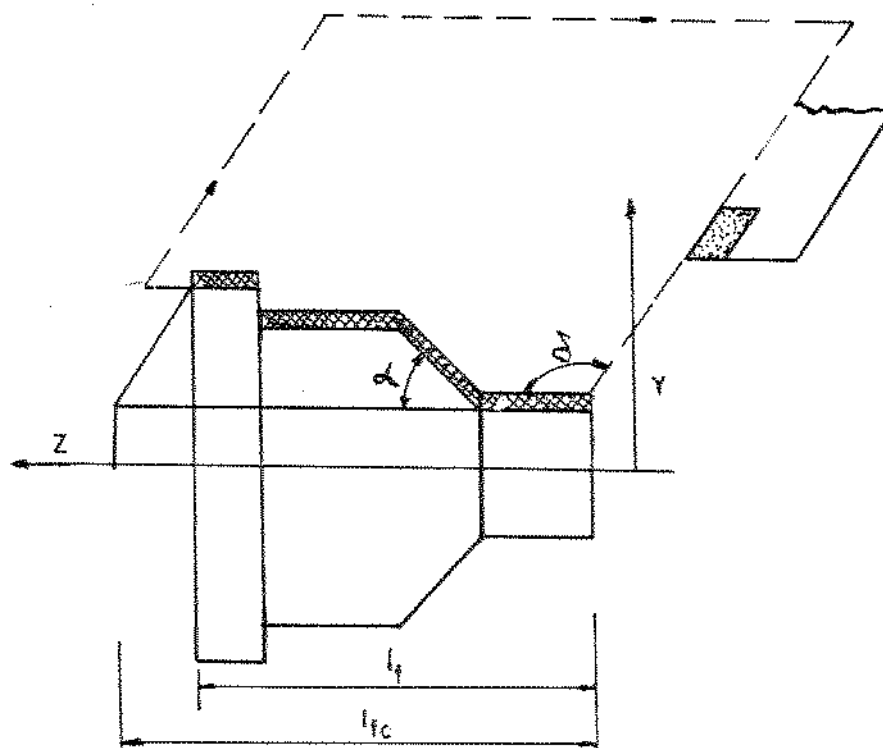


Figura 4.5 - Relação entre o percurso de avanço do carro e o percurso de avanço da ferramenta.

4.3.1 - Relação entre o Percurso de Avanço do Carro e o da Ferramenta

Demonstra-se [1,6] que a relação entre o percurso de avanço do carro e o percurso de avanço da ferramenta é dado por:

$$l_{fc} = (1 - \cotg \delta \operatorname{tg} \alpha) l_f \quad (4.7)$$

4.3.2 - Relação entre a velocidade de avanço do carro e a velocidade de avanço da ferramenta

Demonstra-se [1,6] que a relação entre a velocidade de avanço do carro e a velocidade de avanço da ferramenta é dado por:

$$V_f = \frac{V_{fc}}{1 - \cotg \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (4.8)$$

4.3.3 - Relações entre os avanços da ferramenta e do carro

As relações existentes entre os diversos avanços da ferramenta e o avanço do carro, são fornecidas pelas expressões (4.9) a 4.12), cujas demonstrações se encontram em [1,6] e são dadas por:

$$f_t = \frac{\operatorname{sen} \delta}{\operatorname{sen}(\delta - \alpha)} f_c \quad (4.9)$$

$$f_u = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen}(\delta - \alpha)} f_c \quad (4.10)$$

$$f_y = \frac{\operatorname{sen} \delta \cdot \operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen}(\delta - \alpha)} f_c \quad (4.11)$$

$$f = \frac{f_c}{(1 - \cotg \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha)} \quad (4.12)$$

4.4 - AVANÇO EQUIVALENTE

Define-se avanço equivalente numa operação de usinagem com avanço variável, o avanço de corte constante que origina no mesmo tempo de usinagem, o mesmo desgaste da ferramenta quando obtido com avanço variável, nas mesmas condições de velocidades de corte, profundidade de corte, geometria efetiva da ferramenta, fluido de corte para o par ferramenta-peça [38]. Da mesma forma que para a velocidade de corte equivalente, tem-se para o avanço equivalente da ferramenta a expressão:

$$f_e = \sqrt[4]{\frac{1}{tc} \int_0^{t_c} f t^3 dt} \quad (4.13)$$

a qual é aplicável dentro do campo de validade da fórmula simplificada de Taylor $T \cdot f t^3 = w$.

4.5 - EMPREGO DA TEORIA DA EQUIVALÊNCIA DE USINAGEM

A utilização do avanço equivalente é feita quando se usina uma peça com avanços da ferramenta variáveis. Quando as velocidades de corte também são variáveis (caso típico de tornos copiadores, onde tanto os avanços como as velocidades podem ser variáveis - peças escalonadas), (Figura 4.6). Deve-se calcular tanto o avanço como a velocidade de corte equivalentes, para se determinar a vida da ferramenta através da curva $T-V_c$.

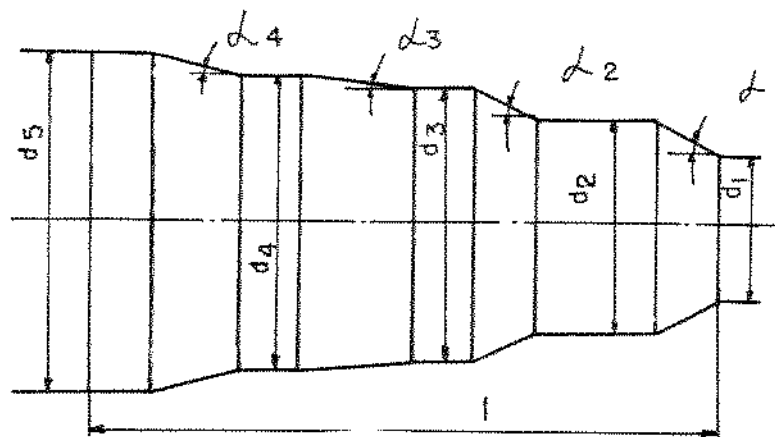


Figura 4.6 - Torneamento de uma peça com velocidade de corte e avanço da ferramenta variáveis.

CAPÍTULO V

VELOCIDADES DE CORTE DE MÍNIMO CUSTO (V_c) E DE MÁXIMA PRODUÇÃO (V_{maxp}) PARA OS PROCESSOS MECÂNICOS DE USINAGEM

5.1 _ INTRODUÇÃO

Este capítulo visa fornecer aos estudiosos do assunto e usuários na área de engenharia de manufatura voltado para aspecto econômico da usinagem, expressões das velocidades de mínimo custo e máxima produção para os diferentes processos mecânicos de usinagem. Deve-se notar no presente trabalho, que a dedução para se chegar as expressões das velocidades de corte, foi feita, tanto para a velocidade de mínimo custo quanto para a de máxima produção para o torneamento. Salienta-se que isto não é necessário, visto que uma vez se tenha a expressão da velocidade de máxima produção, a da velocidade de mínimo custo, é facilmente obtida por simples artifício, trabalhando com a expressão da velocidade de máxima produção o que foi feito para os demais processos.

5.2. _ DEDUÇÃO DAS EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA O TORNEAMENTO. (Figura 5.1)

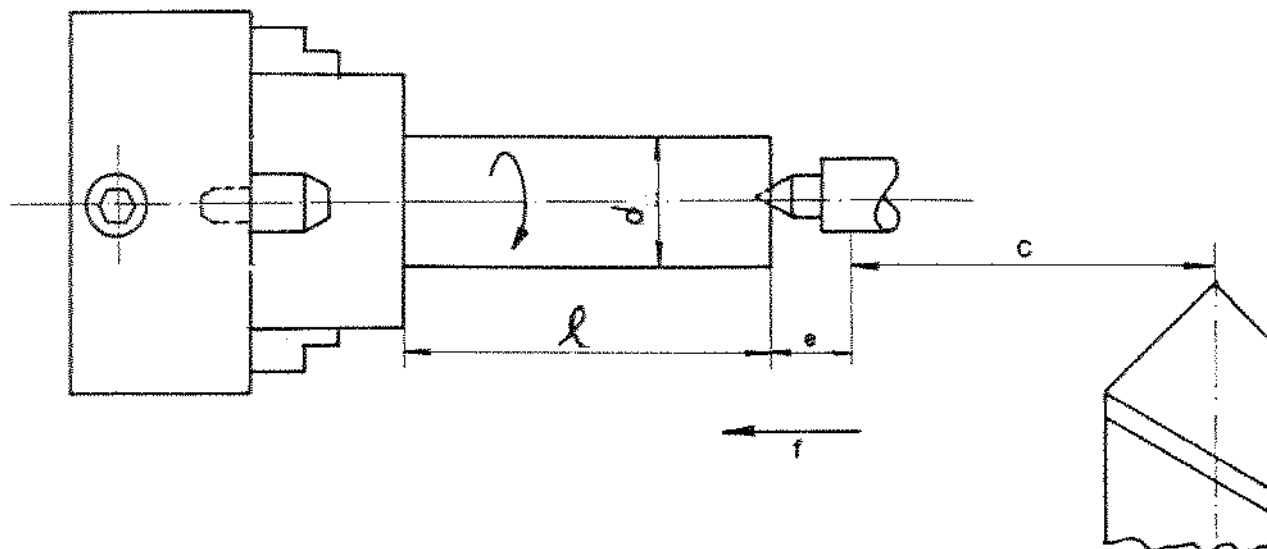


Figura 5.1 _ Torneamento. [42]

5.2.1 - Velocidade de Máxima Produção (V_{mxp})

Para a determinação da velocidade de corte, no qual o tempo de fabricação por peça (t_t) é mínimo, deve-se igualar a zero a diferencial total do tempo (t_t). A expressão do tempo é dada por

$$t_t = t_c + t_s + t_a + t_p/Z + t_r \quad [5,6] \quad (1.1)$$

A diferencial total do tempo deverá ser em relação à velocidade de corte e ao avanço da ferramenta por peça, pois na expressão (1.1), as grandezas profundidade de corte (a_p), expoentes x , Y e z e a constante K_1 da fórmula expandida de Taylor $T.V_c^x.f^Y(a_p)^z = K_1$ são consideradas constantes [1,21].

Da expressão (1.1)

t_t = tempo total de confecção por peça:

t_c = tempo de corte da ferramenta, correspondente à fase c (cap I - (1.2));

t_s = tempos secundários de usinagem, correspondente às fases a, e, f, h (cap I - (1.2));

t_a = tempo de aproximação e afastamento da ferramenta correspondente às fases b e d (Cap. I - (1.2));

t_p = tempo de preparação da máquina, correspondente à fase i (Cap. I - (1.2));

t_r = tempo de reposição por peça, para a troca e ajuste inicial das ferramentas, fase g (Cap I - (1.2))

$$\text{Como } t_t = F(f, V_c) \quad (5.1)$$

$$dt_t = \frac{\partial t_t}{\partial f} df + \frac{\partial t_t}{\partial V_c} dV_c \quad (5.2)$$

$$\text{como } dt_t = 0, \quad (5.3)$$

implica em que $\frac{\partial t_t}{\partial f}$ e $\frac{\partial t_t}{\partial V_c}$ se tornem nulos. A velocidade de corte (V_{mxp}) será então a raiz da equação $\frac{\partial t_t}{\partial V_c} = 0$ ou de $\frac{\partial t_t}{\partial f} = 0$

$$\frac{\partial t_t}{\partial V_c} = \frac{\partial t_c}{\partial V_c} + \frac{\partial t_s}{\partial V_c} + \frac{\partial t_a}{\partial V_c} + \frac{\partial t_{p/z}}{\partial V_c} + \frac{\partial t_r}{\partial V_c} \quad (5.4)$$

Da expressão (5.4), $\frac{\partial t_s}{\partial V_c}$, $\frac{\partial t_{p/z}}{\partial V_c} = 0$ pois independem da velocidade de corte.

$$\frac{\partial t_c}{\partial V_c} = - \frac{\pi d l}{1000 f V_c^2} \quad (5.5)$$

sendo

$$t_c = \frac{\pi d l}{1000 f V_c} \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial t_a}{\partial V_c} = - \frac{\pi d e}{1000 f V_c^2} \quad (5.7)$$

sendo

$$t_a = \frac{(2c+1+e)}{V_{rap}} + \frac{\pi d e}{1000 f V_c} \quad (\text{Figura 5.1}) \quad (5.8)$$

onde V_{rap} é a velocidade em movimento rápido

$$\frac{\partial t_r}{\partial V_c} = \frac{(x-1)V_c^{x-2} f^{Y-1} (a_p)^Z \pi \cdot d \cdot l \cdot t f_t}{1000 K_1} \quad (5.9)$$

Substituindo as expressões (5.5), (5.7) e (5.9) em (5.3), vem

$$- \frac{\pi d (1+e)}{1000 f V_c^2} + \frac{(x-1)V_c^{x-2} f^{Y-1} (a_p)^Z \pi \cdot d \cdot l \cdot t f_t}{1000 K_1} = 0 \quad (5.10)$$

onde

$$V_{mxp} = \sqrt[x]{\frac{K_1 (1+e)}{(x-1) f^Y (a_p)^Z t f_t \cdot l}} \quad (5.11)$$

De maneira análoga, em relação ao avanço chega-se à equação (5.12), dada por:

$$-\frac{\pi d(1+e)}{1000 f^2 v_c} + \frac{(Y-1)f^{Y-2} v_c^{X-1} (a_p)^Z n d l t f_t}{1000 K_1} = 0 \quad (5.12)$$

onde:

$$v_{mxp} = \sqrt[X]{\frac{K_1(1+e)}{(Y-1)f^Y (a_p)^Z t f_t l}} \quad (5.13)$$

As equações (5.10) e (5.12) não podem ser satisfeitas simultaneamente, de sorte que, um único mínimo não ocorre admitindo-se válida a equação de Taylor expandida. Sabe-se que $y < x$, de modo que, para um determinado avanço, a velocidade de corte calculada através de (5.11) é menor do que a calculada por meio de (5.13). A razão entre as expressões (5.11) e (5.13) é $\frac{(v_c)_v}{(v_o)_f} = \frac{Y-1}{X-1}$

• De acordo com [37] esta razão adquire os seguintes valores conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Razão entre os expoentes Y e X da fórmula de Taylor.

Material da peça	Material da Ferramenta	GEOMETRIA						Formato da Pastilha	V_{c15} m/min	V_B [mm]	f [mm]	a_p [mm]	$\frac{Y-1}{X-1}$
		γ_o°	α_o°	λ_s°	χ_r°	ϵ_r°	r mm						
ABNT 1035 Revenido	P10	6	5	0	60	60	0,8	TPUN160308	306	0,4	0,2	2,0	0,25
	P20	6	5	0	60	60	0,8	TPUN160308	245	0,5	0,3	2,5	0,22
	P30	6	5	0	60	60	0,8	TPUN160308	196	0,5	0,4	3,0	0,22
	Aço Rápido (12-1-4-5)	14	7	4	60	90	1,0	-	52	0,5	0,4	3,0	0,28
ABNT1045 Estado Bruto de Laminação	P20	6	5	0	60	60	0,8	TPUN160308	186	0,33	0,3	2,5	0,19
	P30	6	5	0	60	60	0,8	TPUN160308	163	0,20	0,3	2,5	0,23
	Aço Rápido (10% Co)	14	7	4	60	90	1,0	-	84	0,60	0,2	2,0	-
	Aço Rápido (10% Co)	14	7	4	60	90	1,0	-	63	0,4	0,2	2,0	-
ABNT B640 Beneficiado	P20	6	5	0	60	60	0,8	TPUN160308	189	0,24	0,3	2,5	0,28
	P30	6	5	0	60	60	0,8	TPUN160308	175	0,28	0,3	2,5	0,19
	Aço Rápido (10% Co)	10	7	4	60	90	1,0	-	82	0,60	0,2	2,0	-
	Aço Rápido (10% Co)	10	7	4	60	90	1,0	-	64	0,4	0,2	2,0	-

A Figura 5.2 mostra a representação gráfica das curvas $\frac{\partial t_t}{\partial V_c}$ e $\frac{\partial t_t}{\partial f}$ para diferentes avanços. [43]

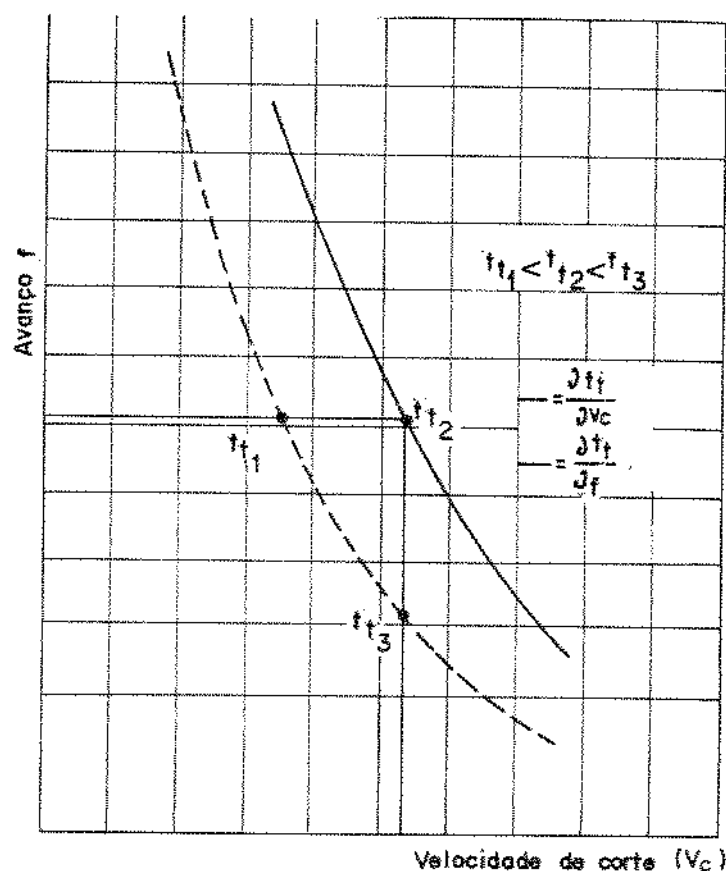


Figura 5.2 - Representação gráfica dos tempos mínimos.

Demonstra-se a partir de (5.11), e com o uso de (5.13) e (5.13), que o tempo t_{t1} é menor que t_{t2} , e que t_{t2} é menor que t_{t3} , ou seja, $t_{t1} < t_{t2} < t_{t3}$; portanto, o tempo por peça diminui à medida que o avanço aumenta. Desta forma as condições de usinagem baseado no mínimo tempo por peça, deve ser calculada através da expressão (5.11) com a seleção do maior avanço admissível [43]

5.2.2 - Velocidade de mínimo custo (V_o)

Para a determinação da velocidade de corte, na qual o custo de fabricação por peça é mínimo, deve-se igualar a zero a diferencial total do custo (C_t). A expressão do custo é dada por:

$$C_t = C_{tc} + C_{ti} + C_{tp} + C_{tr} + C_{fe} \quad [1,5] \quad (5.14)$$

A diferencial do custo deverá ser em relação à velocidade de corte e ao avanço da ferramenta por peça, pois, na expressão (5.14), as grandezas profundidade de corte (a_p), expoentes x , y e z e a constante K_1 da fórmula expandida de Taylor $T.V_c^x.f^y.(a_p)^z = K_1$ são consideradas constantes [1,21]

Da expressão (5.14)

C_t = custo total de fabricação, por peça;
 C_{tc} = custo devido ao tempo de corte, por peça;
 C_{ti} = custo devido aos tempos improdutivos, por peça;
 C_{tp} = custo devido ao tempo de preparação da máquina, por peça;
 C_{tr} = custo de reposição das ferramentas, por peça;
 C_{fe} = custo das ferramentas, por peça.

- Custo de tempo de corte (C_{tc}).

O custo do tempo de corte é dado por:

$$C_{tc} = (C_m + S_o) \frac{t_c}{60} \quad (5.15)$$

onde:

S_o é o salário do operador por hora (incluído sobre Taxas);

C_m é o custo da máquina por hora, dado por:

$$C_m = \frac{1}{H} \left[\left(V_o^* - \frac{K^*(V_o^* - V_R)}{n} \right) i + C_F \right] \quad [21] \quad (5.16)$$

onde:

H = número de horas em atividade da máquina por ano, por turno;

V_o^* = valor atual da máquina [Cr\$],

K^* = idade da máquina em anos;

V_R = valor residual da máquina [Cr\$],

n = vida prevista para máquina [anos],

i = taxa mínima de atratividade para investimento no equipamento [%],

C_F = custos fixos anuais do centro de custos onde localiza-se a máquina.

Fazendo-se $C_2 = C_m + S_u$, tem-se, para o custo relativo ao tempo de corte

$$C_{tc} = \frac{C_2 \cdot t_c}{60} \quad (5.17)$$

- Custo dos tempos improdutivos (C_{ti})

O custo dos tempos improdutivos é dado por

$$C_{ti} = C_2 \cdot \frac{t_i}{60} \quad (5.18)$$

onde

$$t_i = t_s + t_a \quad (5.19)$$

- Custo de preparação da máquina, por peça (C_{tp})

O custo de preparação da máquina, por peça, é dado por

$$C_{tp} = C_3 \cdot \frac{t_p}{Z} \quad (5.20)$$

onde

$$C_3 = C_{ft} + \frac{t_{ft}}{60} C_2 \quad (5.21)$$

é o custo da ferramenta por vida + custo de troca da ferramenta em Cr\$,

t_p = tempo de preparação da máquina em horas,

Z = número de peças do lote.

- Custo de reposição das ferramentas (C_{tr})

O custo de reposição das ferramentas, quando trocadas individualmente, é dado por [6]

$$C_{tr} = \frac{C_2}{60} \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{Z_{Ti}} - \frac{1}{Z} \right) (t_{ft})_i \quad (5.22)$$

- Custo das ferramentas, por peça (C_{fe})

O custo das ferramentas, por peça, para o caso em que as ferramentas são de aço rápido ou com pastilhas soldadas, é dado por [1]

$$C_{fe} = \frac{C_{fT}}{Z_T} \quad (5.23)$$

e

$$C_{fT} = V_{of} - \frac{n_f^* (V_{of} - V_{Rf})}{n_f} + C_{af} \cdot t_{fa} \quad (5.24)$$

onde

n_f^* = Número de afiações já efetuadas pela ferramenta;

n_f = Número de vidas da ferramenta (Número de afiações possíveis da ferramenta);

V_{of} = Valor atual da ferramenta [Cr\$];

V_{Rf} = Valor residual da ferramenta [Cr\$];

C_{af} = Custo de afiação da ferramenta por minuto [Cr\$/min];

t_{fa} = Tempo de afiação da ferramenta [min].

No caso das ferramentas serem com pastilhas intercambiáveis, é dado por [1]

$$C_{fe} = \frac{1}{Z_T} \left[\frac{V_{of}}{n_{fp}} + \frac{C_p}{n_p} \right] \quad (5.25)$$

onde

n_{fp} = vida média do porta-pastilhas expresso em quantidades de arestas cortantes,

V_{of} = valor atual do porta-pastilhas [Cr\$];

C_p = custo atual da pastilha [Cr\$];

n_p = número de arestas cortantes da pastilha.

como

$$C_t = F(f, V_c) \quad (5.26)$$

$$dC_t = \frac{\partial C_t}{\partial f} df + \frac{\partial C_t}{\partial V_c} dV_c \quad (5.27)$$

como

$$dC_t = 0 \quad (5.28)$$

implica em que $\frac{\partial C_t}{\partial f}$ e $\frac{\partial C_t}{\partial V_c}$ se tornem nulos.

A velocidade de corte (V_o) será então a raiz da equação

$$\frac{\partial C_t}{\partial V_c} = 0 \quad \text{ou} \quad \text{de} \quad \frac{\partial C_t}{\partial f} = 0$$

$$\frac{\partial C_t}{\partial V_c} = \frac{\partial C_{tc}}{\partial V_c} + \frac{\partial C_{ti}}{\partial V_c} + \frac{\partial C_{tp}}{\partial V_c} + \frac{\partial C_{tr}}{\partial V_c} + \frac{\partial C_{fe}}{\partial V_c} \quad (5.29)$$

Da expressão (5.29) $\frac{\partial C_{tp}}{\partial V_c} = 0$, pois independe da velocidade de corte

$$\frac{\partial C_{tc}}{\partial V_c} = - \frac{C_2 \pi d l}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot V_c^2} \quad (5.30)$$

$$\frac{\partial C_{ti}}{\partial V_c} = - \frac{C_2 \pi d e}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot V_c^2} \quad (5.31)$$

$$\frac{\partial C_{fe}}{\partial V_c} = \frac{(x-1) V_c^{x-2} f^{Y-1} (a_p)^Z \pi d l C_{fT} \cdot 60}{60 \cdot 1000 K_1} \quad (5.32)$$

$$\frac{\partial C_{tr}}{\partial V_c} = \frac{C_2 (x-1) V_c^{x-2} f^{Y-1} (a_p)^Z \pi d l t_{ft}}{60 \cdot 1000 K_1} \quad (5.33)$$

Substituindo as expressões (5.29) a (5.32) em (5.27) vem:

$$- \frac{C_2 \pi d}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot V_c^2} (1+e) + \frac{(x-1) V_c^{x-2} f^{Y-1} (a_p)^Z \pi d l}{60 \cdot 1000 K_1} [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] = 0 \quad (5.34)$$

onde

$$V_o = \sqrt[2]{\frac{C_2 K_1 (1+e)}{(x-1) f^Y (a_p)^Z (C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}) l}} \quad (5.35)$$

De maneira análoga, em relação ao avanço, chega-se à equação (5.36) dada por:

$$\begin{aligned}
 & - \frac{C_2 \pi d (1+e)}{60 \cdot 1000 f^2 V_c} + \\
 & + \frac{\left[(Y-1) f^{Y-2} V_c^{X-1} (a_p)^{Z \pi \cdot d \cdot l} [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \right]}{60 \cdot 1000 K_1} = 0
 \end{aligned} \quad (5.36)$$

onde

$$V_o = \sqrt[X]{\frac{C_2 K_1 (1+e)}{\left[(Y-1) f^Y (a_p)^Z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \right]}} \quad (5.37)$$

Fazendo-se as mesmas considerações que foram feitas para a máxima produção ao mínimo custo, as condições de usinagem baseada no mínimo custo por peça, deve ser calculada através da expressão (5.34), com a seleção do maior avanço admissível [44]. A figura 5.3 mostra a representação gráfica das curvas $\frac{\partial C_t}{\partial V_c}$ e $\frac{\partial C_t}{\partial f}$, para diferentes avanços.

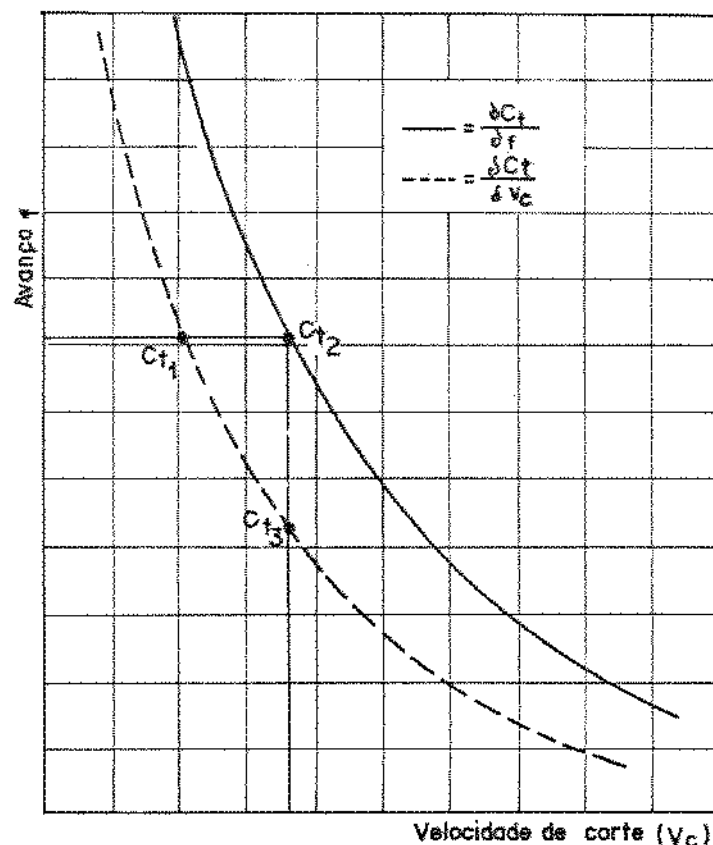


Figura 5.3 - Representação gráfica dos custos mínimos. [43]

Demonstra-se a partir de (5.14), e com o uso de (5.35) e (5.37), que o custo C_{t1} é menor que C_{t2} , e que C_{t2} é menor que C_{t3} ou seja, $C_{t1} < C_{t2} < C_{t3}$; portanto, o custo por peça diminui à medida que o avanço aumenta.

5.3 - FATORES RESTRITIVOS A SELEÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CORTE [43]

5.3.1 - Máximo Avanço da Máquina

Deve-se selecionar o máximo avanço fornecido pela máquina ferramenta, e calcular a velocidade de mínimo custo através de (5.34) na operação de desbaste, e que não ocorra nenhum problema vibracional no sistema máquina-peça-ferramenta.

5.3.2 - Máxima Velocidade de Corte

Calcular a velocidade de corte como em, (5.34). Compará-la com a máxima velocidade de corte permitida pela máquina ferramenta. Se a velocidade de corte calculada for menor que a da máquina, ela deve ser usada.

5.3.3 - Potência da Máquina

A potência fornecida pelo motor da máquina-ferramenta é dada por:

$$P_M = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot \eta} = \frac{K_s \cdot f \cdot (a_p) \cdot V_c}{60 \cdot \eta} \quad [5] \quad (5.38)$$

sendo:

$$K_s = K_{s1} \cdot h^{-Z^*} = K_{s1} (f \cdot \sin \alpha_r)^{-Z^*} \quad [5] \quad (5.39)$$

onde:

F_c = Força de corte [N];

K_s = Pressão específica de corte [N/mm²];

η = Rendimento da máquina-ferramenta.

η = Rendimento da máquina-ferramenta.

Substituindo a expressão de K_s dada por (5.39) em (5.38) a expressão de V_c torna-se

$$V_c = \frac{60 (\text{sen } \alpha_r)^{Z^*} P_M \cdot f}{K_{s1} \cdot a_p^{Z^* - 1} \cdot \eta} \quad (5.40)$$

Desta forma, usando-se o maior avanço admissível, as velocidades devem ser calculadas pelas expressões (5.34), (5.40) e comparadas. A menor delas deve ser a usada. A Figura (5.4) ilustra o fato

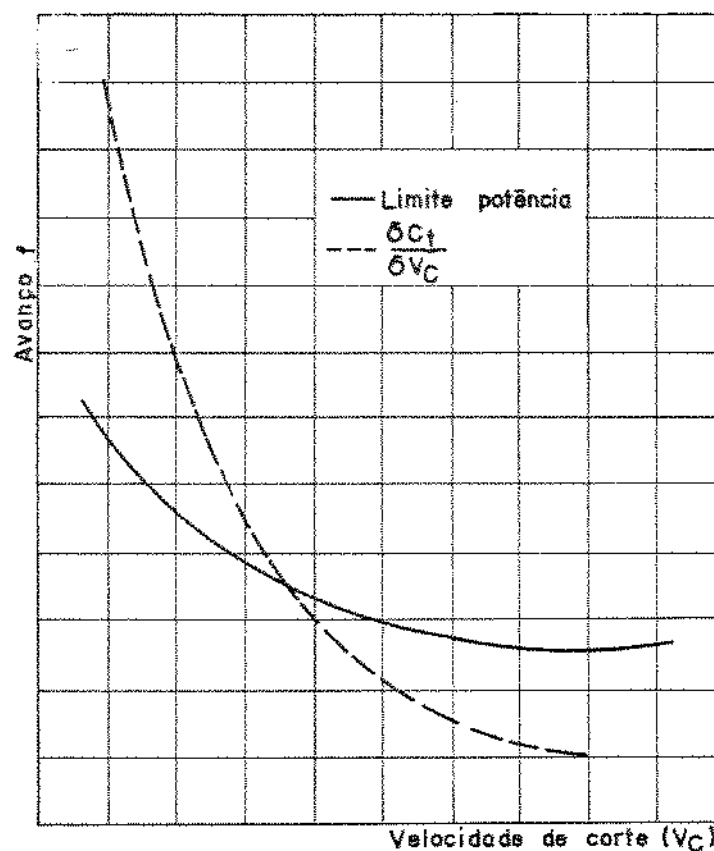


Figura 5.4 - Curva velocidade-avanço para mínimo custo e limite de potência

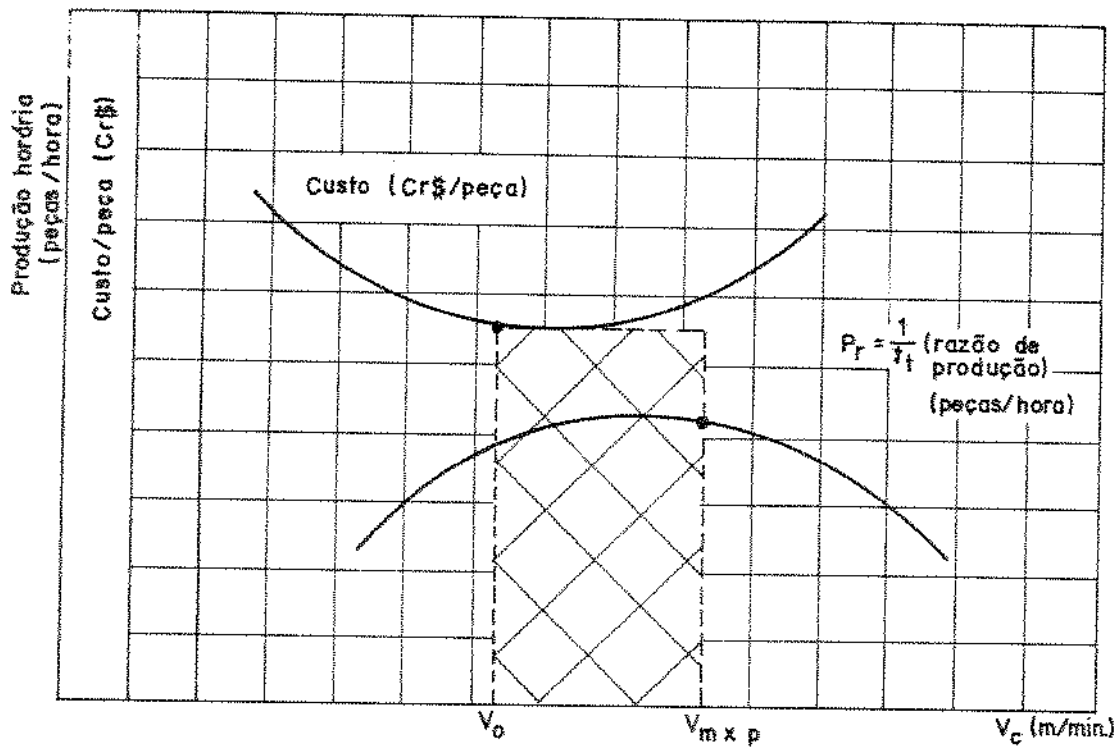
5.3.4 - Acabamento Superficial

O acabamento superficial nas operações de usinagem, depende do tipo e da forma do cavaco, da geometria da ferramenta e do próprio processo. Cavacos de forma descontínua podem causar ranhuras na ferramenta, prejudicando o acabamento superficial da peça, além de ocasionarem variações de forças, com deflexão da ferramenta e formação de sulcos na superfície usinada. Cavacos contínuos, mas com a presença na ferramenta da aresta postíça de corte, provocam problemas similares na superfície usinada e na ferramenta. A aresta postíça é instável e fratura periodicamente, depositando partículas de material na superfície usinada da peça. Com aumento da velocidade de corte, há um aumento da temperatura de corte, a qual provoca uma recristalização e uma mudança de fase do material da aresta postíça de corte. Ela por sua vez perde sua dureza, não opondo resistência às forças de usinagem. Tem-se assim o desaparecimento da aresta postíça. A velocidade com que se dá este desaparecimento, é denominada velocidade crítica. A influência do avanço se faz sentir no sentido de diminuir a velocidade crítica, quando se aumenta o avanço [43]. A rugosidade máxima ($R_{\max}$) está relacionada com o avanço e o raio da ponta da ferramenta, através da expressão $R_{\max} = \frac{f^2}{8 \cdot R}$ [5] onde R é o raio da ponta da ferramenta. Assim, para um dado acabamento superficial e uma geometria da ferramenta, existe um valor máximo admissível do avanço, o qual deve ser usado para o cálculo do mínimo custo.

5.4 - INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA

Define-se intervalo de máxima eficiência, ao intervalo compreendido entre as velocidades V_o e $V_{\max}$. Figura 5.5. Este intervalo define a faixa ótima de trabalho, dentro da qual se tem as condições de máxima produção e mínimo custo. Para velocidades menores que V_o , tem-se um aumento do custo de produção por peça e uma queda de produção. Para velocidade de corte maiores que $V_{\max}$, há um acréscimo do custo de produção e uma queda de produção. Porém,

para velocidades crescentes de V_c , a partir de V_0 até V_{mxp} , haverá um aumento do custo por peça e um correspondente aumento da produção [5]



com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T \cdot V_c^x = K$, as expressões das velocidades de máxima produção (V_{mxp}) e de mínimo custo (V_0 para o torneamento são dadas por:

$$V_{mxp} = \sqrt[x]{\frac{K(1+e)}{(x-1)t \cdot \frac{1}{ft}}} \quad (5.41)$$

$$V_0 = \sqrt[x]{\frac{\frac{C}{2} K(1+e)}{(x-1) \left[\frac{C}{2} \frac{t}{ft} + 60 \frac{C}{ft} \right] \cdot \frac{1}{ft}}} \quad (5.42)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c \cdot T^Y = C$, as expressões das velocidades de máxima produção (V_{mxp}) e de mínimo custo (V_o) para o torneamento são dadas por

$$V_{\text{mxp}} = C \sqrt{\frac{1}{Y} \frac{Y(1+e)}{(1-Y)t_{ft} l}} \quad (6.43)$$

$$V_o = C \sqrt{\frac{1}{Y} \frac{C_2 (1+e) Y}{(1-Y) [C_2 t_{ft} + 60 C_{fr}] l}} \quad (6.44)$$

5.5 - EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA O APLAINAMENTO

(Fig. 5.6)

(PLAINA DE MESA-HIDRAULICA)

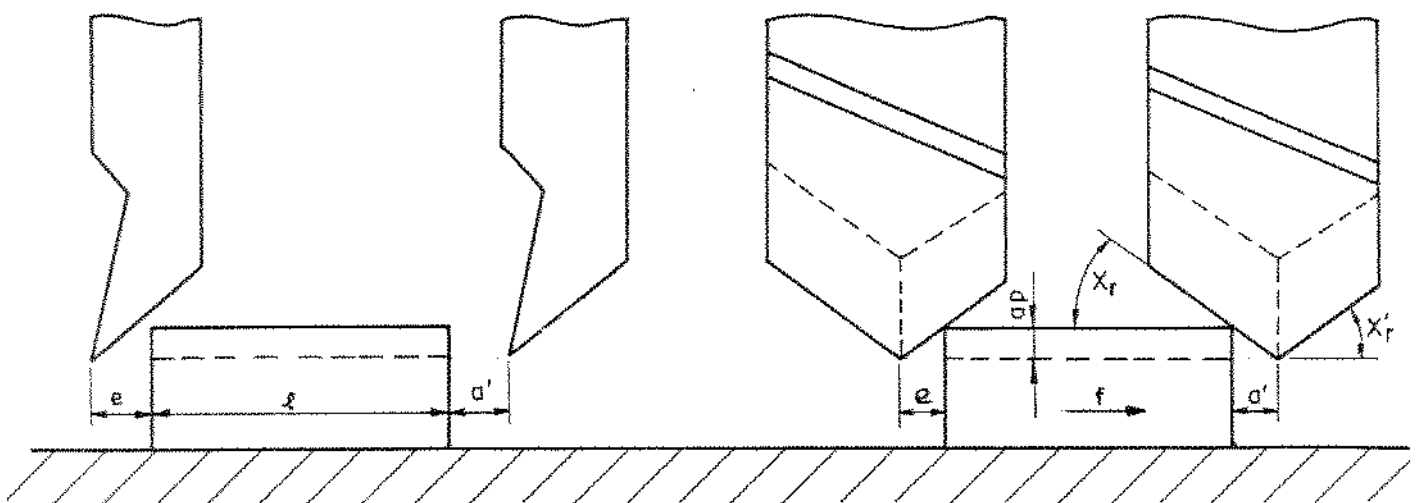


Figura 5.6 - Aplainamento [44]

5.5.1 - Velocidade de Máxima Produção (V_{mxp})

Da expressão (5.4) com $\frac{\partial t_s}{\partial v_c}, \frac{\partial t_p/Z}{\partial v_c} = 0$ vem

$$\frac{\partial t_c}{\partial v_c} = - \frac{1}{(v_{ci})^2} \quad (5.45)$$

sendo

$$t_c = \frac{1}{v_{ci}} \quad (5.46)$$

onde v_{ci} é a velocidade de corte na ida

$$\frac{\partial t_a}{\partial v_c} = - \frac{2}{(v_{ci})^2} (a' + e) \quad (5.47)$$

sendo

$$t_a = \frac{2}{v_{ci}} (a' + e) + \frac{2}{v_{cr}} (e + 1 + a') \quad (\text{Fig. 5.6}) \quad [45] \quad (5.48)$$

onde v_{cr} é a velocidade de retorno.

$$\frac{\partial t_r}{\partial v_c} = \frac{x v_{ci}^{x-1} f^Y (a_p)^Z t_{ft} 1}{K_1} \quad (5.49)$$

Substituindo as expressões (5.45), (5.47) e (5.49) na equação (5.3), vem.

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{(v_{ci})^2} - \frac{2}{(v_{ci})^2} (a' + e) \\ & + \frac{x v_{ci}^{x-1} f^Y (a_p)^Z t_{ft} 1}{K_1} = 0 \end{aligned} \quad (5.50)$$

onde

$$v_{ci} = v_{mxp} = \sqrt[x+1]{\frac{K_1 (1 + 2a' + 2e)}{x + f^Y (a_p)^Z t_{ft} 1}} \quad (5.51)$$

5.5.2 - Velocidade de Mínimo custo (V_o)

$$V_o = \sqrt{\frac{x+1}{x \cdot f^Y \cdot (a_p)^Z} \frac{C_2 K_1 (1+2a' + 2e)}{[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \cdot 1}} \quad (5.52)$$

com o uso da Fórmula simplificada de Taylor $T \cdot V_c^X = K$, as expressões para o aplainamento (plaina de mesa hidráulica), são dadas por:

$$V_{mxp} = \sqrt{\frac{x+1}{x \cdot t_{ft} \cdot 1} \frac{K(1+2a' + 2e)}{1}} \quad (5.53)$$

$$V_o = \sqrt{\frac{x+1}{x \cdot [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \cdot 1} \frac{C_2 K(1+2a' + 2e)}{1}} \quad (5.54)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c^Y = C$, as expressões para o aplainamento (plaina de mesa hidráulica), são dadas por:

$$V_{mxp} = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{\frac{1}{1+Y}}{t_{ft} \cdot 1} \frac{Y(1+2a' + 2e)}{1}} \quad (5.55)$$

$$V_o = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{\frac{1+Y}{Y}}{[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \cdot 1} \frac{C_2 Y(1+2a' + 2e)}{1}} \quad (5.56)$$

Nas expressões (5.51) a (5.56) $a' = a_p \cotg \alpha_r$, $e = a_p \cotg \alpha_r X_r$, $e = a$ (mm).

5.6 - EXPRESSÕES DAS VELOCIDADES DE CORTE PARA A FURAÇÃO EM CHEIO

5.6.1 - Furação Passante (Fig. 5.7)

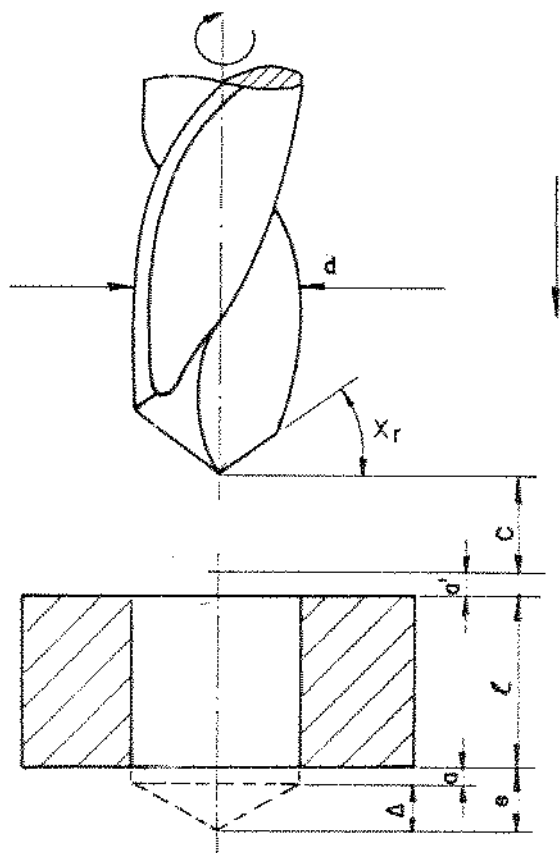


Figura 5.7 - Furação passante. [42]

5.6.1.1 - Velocidade de máxima produção (V_{mxp})

Da expressão (5.4) com $\frac{\partial t_s}{\partial v_c}$, $\frac{\partial t_{p/2}}{\partial v_c} = 0$

vem:

$$\frac{\partial t_c}{\partial v_c} = - \frac{\pi d l}{1000 f v_c^2} \quad (5.57)$$

sendo

$$t_c = \frac{\pi d l}{1000 f v_c^2} \quad (5.58)$$

$$\frac{\partial t_a}{\partial v_c} = - \frac{\pi d (e+a')}{1000 f v_c^2} \quad (5.59)$$

sendo

$$t_a = \frac{2C+1+e+a'}{V_{rap}} + \frac{\pi d(e+a')}{1000 f V_c} \quad (\text{fig 5.7}) \quad (5.60)$$

onde V_{rap} é a velocidade em movimento rápido.

$$\frac{\partial t_r}{\partial V_c} = \frac{x V_c^{x-1} f^Y(a_p)^Z t_{ft} l}{K_1} \quad (5.61)$$

Substituindo as expressões (5.57), (5.59) e (5.61) na equação (5.3) vem

$$\begin{aligned} - \frac{\pi d l}{1000 f V_c^2} - \frac{\pi d(e+a')}{1000 f V_c^2} \\ + \frac{x V_c^{x-1} f^Y(a_p)^Z t_{ft} l}{K_1} = 0 \end{aligned} \quad (5.62)$$

onde

$$V_{mxp} = \sqrt[x+1]{\frac{\pi d K_1 (1+e+a')}{1000 x f^{Y+1}(a_p)^Z t_{ft} l}} \quad (5.63)$$

5.6.1.2 - Velocidade de mínimo custo (V_o)

$$V_o = \sqrt[x+1]{\frac{C_2 \pi d K_1 (1+e+a')}{1000 x f^{Y+1}(a_p)^Z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.64)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T V_c^x = K$, as expressões para a furação passante são dadas por.

$$V_{mxp} = \sqrt[x+1]{\frac{\pi d K_1 (1+e+a')}{1000 x f t_{ft} l}} \quad (5.65)$$

$$V_o = \sqrt[x+1]{\frac{C_2 \pi d K (1+e+a')}{1000 x f [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.66)$$

$$V_o = \sqrt{\frac{x+1}{1000 \cdot x \cdot f} \frac{C_2 \pi d K (1+e+a')}{[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] I}} \quad (5.66)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c T^Y = C$, as expressões para a furação passante são dadas por:

$$V_{mxp} = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{\frac{1+Y}{Y}}{\frac{\pi d Y (1+e+a')}{1000 \cdot f \cdot t_{ft} \cdot I}}} \quad (5.67)$$

$$V_o = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{\frac{1+Y}{Y}}{\frac{\pi d Y (1+e+a')}{1000 \cdot f [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] I}}} \quad (5.68)$$

Nas expressões (5.63) a (5.68) $e = a + \Delta$ sendo $a \cong a' = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d}{2} \operatorname{tg} X_r$ (Fig. 5.7).

5.6.2 - Furação não passante (Fig. 5.8)

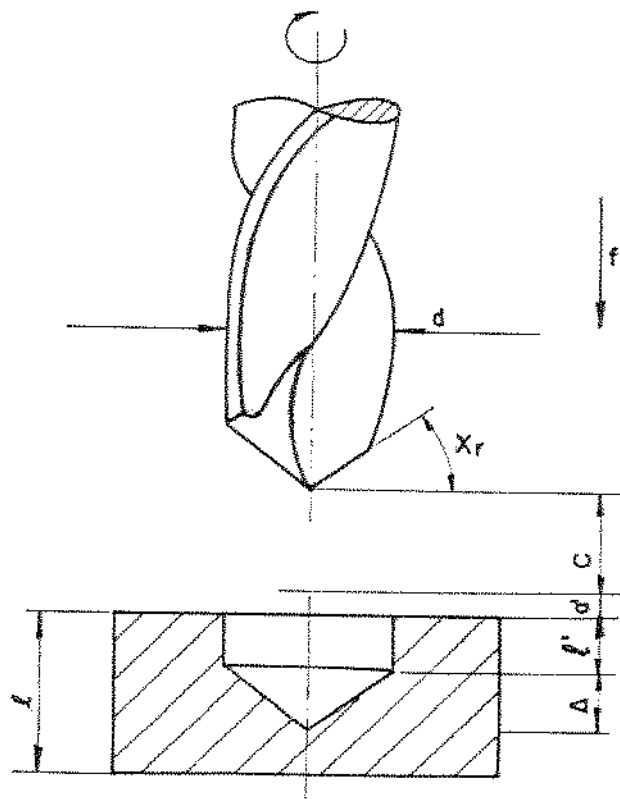


Fig. 5.8 - Furação Não Passante

5.6.2.1 - Velocidade de máxima produção (V_{mxp})

Da expressão (5.4) com $\frac{\partial t_s}{\partial v_c}, \frac{\partial t_{p/z}}{\partial v_c} = 0$

vem:

$$\frac{\partial t_c}{\partial v_c} = - \frac{\pi d l'}{1000 f v_c^2} \quad (5.69)$$

sendo

$$t_c = \frac{\pi d l'}{1000 f v_c} \quad (5.70)$$

$$\frac{\partial t_a}{\partial v_c} = - \frac{\pi d (a' + \Delta)}{1000 f v_c^2} \quad (5.71)$$

sendo

$$t_a = \frac{2C + \Delta + l' + a'}{v_{rap}} + \frac{(a' + \Delta)\pi d}{1000 f v_c} \quad (5.72)$$

onde v_{rap} é a velocidade em movimento rápido, $a' \cong a = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$
com $\Delta = \frac{d}{2} \cdot \text{tg} X_r$ (Fig. 5.8).

$$\frac{\partial t_r}{\partial v_c} = \frac{x v_c^{x-1} f^Y (a_p)^Z t_{ft} l'}{K_1} \quad (5.73)$$

Substituindo as expressões (5.69), (5.71) e (5.73) na equação (5.3) vem

$$\begin{aligned} & - \frac{\pi d l'}{1000 f v_c^2} - \frac{\pi d (a' + \Delta)}{1000 f v_c^2} \\ & + \frac{x v_c^{x-1} f^Y (a_p)^Z t_{ft} l'}{K_1} = 0 \end{aligned} \quad (5.74)$$

onde:

$$V_{mxp} = \sqrt[x+1]{\frac{\pi d K_1 (1' + a' + \Delta)}{1000 \cdot x \cdot f^{Y+1} (a_p)^Z t_{ft} 1'}} \quad (5.75)$$

5.6.2.2 - Velocidade de mínimo custo (V_o)

$$V_o = \sqrt[x+1]{\frac{C_2 \pi d K_1 (1' + a' + \Delta)}{1000 \cdot x \cdot f^{Y+1} (a_p)^Z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] 1'}} \quad (5.76)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $I.V_c^X = K$, as expressões para a furacão não passante, são dadas por:

$$V_{mxp} = \sqrt[x+1]{\frac{\pi d K (1' + a' + \Delta)}{1000 \cdot x \cdot f \cdot t_{ft} 1'}} \quad (5.77)$$

$$V_o = \sqrt[x+1]{\frac{C_2 \pi d K (1' + a' + \Delta)}{1000 \cdot x \cdot f [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] 1'}} \quad (5.78)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c.T^Y = C$, as expressões para a Furacão não passante são dadas por:

$$V_{mxp} = C^{\frac{1}{1+Y}} \cdot \sqrt[\frac{1+Y}{Y}]{\frac{\pi d Y (1' + a' + \Delta)}{1000 \cdot f \cdot t_{ft} 1'}} \quad (5.79)$$

$$V_o = C^{\frac{1}{1+Y}} \cdot \sqrt[\frac{1+Y}{Y}]{\frac{C_2 \pi d Y (1' + a' + \Delta)}{1000 \cdot f [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] 1'}} \quad (5.80)$$

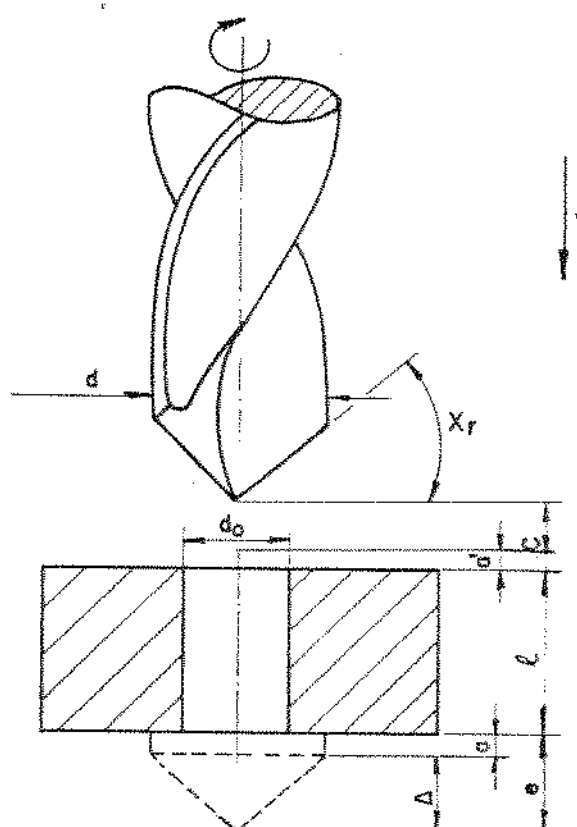
5.6.3 - Furação com pré-furação (Fig 5.9)

Fig. 5.9 - Furação com pré-furação

Aplicação das expressões (5.63) a (5.68) sendo $\Delta = \frac{d-d_0}{2}$
 $\text{tg} X_r$ (Fig 5.9)

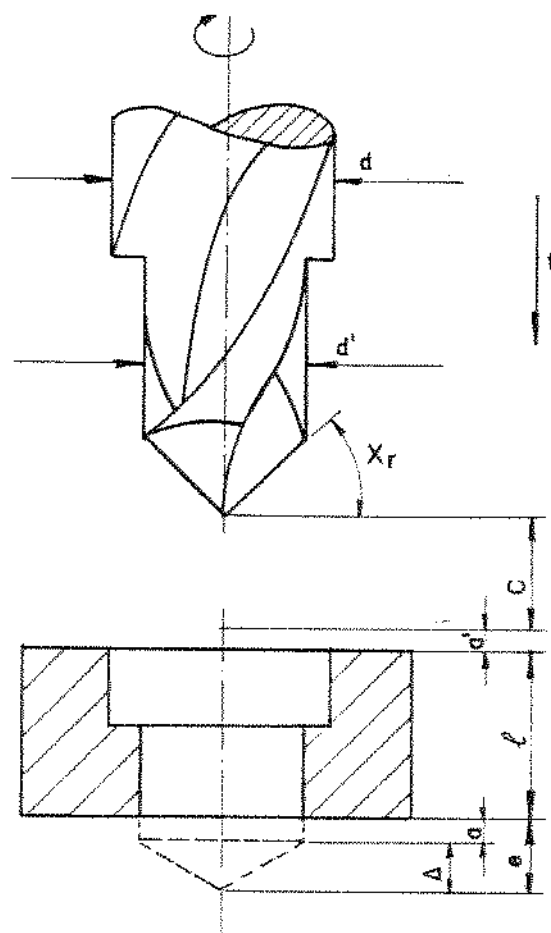
5.6.4 - Furação escalonada (Fig. 5.10)

Fig. 5.10 - furação escalonada.

5.6.4.1 - Velocidade de máxima produção (V_{mxp})

Da expressão (5.4) com $\frac{\partial t_s}{\partial v_c}$, $\frac{\partial \frac{tp}{Z}}{\partial v_c} = 0$ vem.

$$\frac{\partial t_c}{\partial v_c} = - \frac{\pi d' l}{1000 f v_c^2} \quad (5.81)$$

sendo:

$$t_c = \frac{\pi d' l}{1000 f v_c} \quad (5.82)$$

$$\frac{\partial t_a}{\partial v_c} = - \frac{\pi d(e+a^*)}{1000 f v_c^2} \quad (5.83)$$

sendo:

$$t_a = \frac{2c+l+e+a^*}{v_{rap}} + \frac{\pi d(e+a^*)}{1000 f v_c^2} \quad (\text{Fig. 5.9}) \quad (5.84)$$

onde v_{rap} é a velocidade em movimento rápido

$$\frac{\partial t_r}{\partial v_c} = \frac{\kappa v_c^{\kappa-1} f^Y(a_p)^Z t_{ft} l}{K_1} \quad (5.85)$$

Substituindo as expressões (5.81), (5.83) e (5.85) na equação (5.3) vem

$$\begin{aligned} & - \frac{\pi d^* l}{1000 f v_c^2} - \frac{\pi d^* (e+a^*)}{1000 f v_c^2} \\ & + \frac{\kappa v_c^{\kappa-1} f^Y(a_p)^Z t_{ft} l}{K_1} = 0 \end{aligned} \quad (5.86)$$

onde:

$$v_{mxp} = \sqrt[\kappa+1]{\frac{\pi d^* K_1 (l+e+a^*)}{1000 \kappa f^{Y+1} (a_p)^Z t_{ft} l}} \quad (5.87)$$

5.6.4.2 - Velocidade de mínimo custo (v_o)

$$v_o = \sqrt[\kappa+1]{\frac{C_2 \pi d^* K_1 (l+e+a^*)}{1000 \kappa f^{Y+1} (a_p)^Z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.88)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T v_c^\kappa = K$, as expressões para a furação escalonada são dadas por.

$$V_{\text{mxp}} = \sqrt{\frac{x+1}{1000} \frac{\pi d' K (1+e)}{x \cdot f \cdot t_{ft} \cdot 1}} \quad (5.89)$$

$$V_o = \sqrt{\frac{x+1}{1000} \frac{C_2 \pi d K_1 (1+e)}{x \cdot f \left[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT} \right] \cdot 1}} \quad (5.90)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c \cdot T^Y = C$, as expressões para a furacão escalonada são dadas por (5.63) a (5.68), substituindo nas mesmas $\underline{d}$ por d' .

Nas expressões (5.87) a (5.90), $e = a + \Delta$, $a \cong a' = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d'}{2} \text{tg} X_r$ (Fig. 5.10).

5.7 - Expressões das Velocidades de Corte para o Alargamento Cilíndrico (Fig. 5.11)

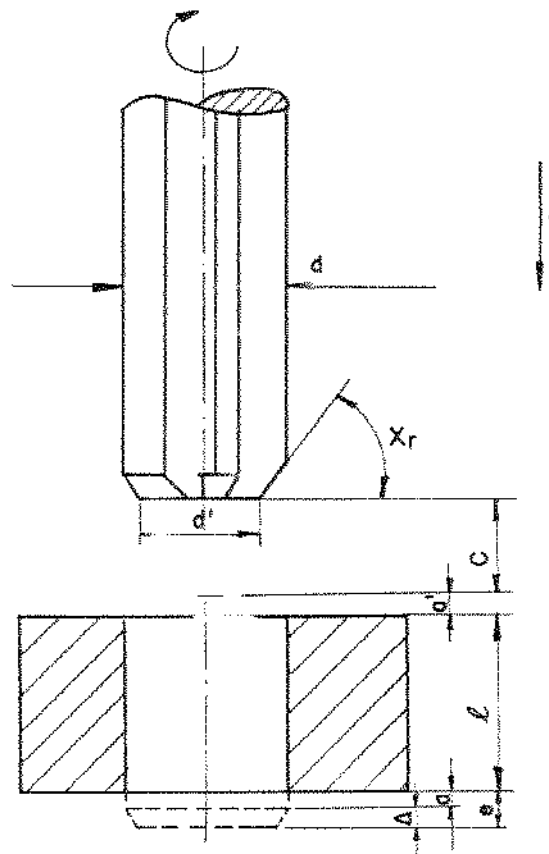


Fig. 5.11 - Alargamento cilíndrico. [42]

5.7.1 - Velocidade de máxima produção (V_{mxp})

Da expressão (5.4) com $\frac{\partial t_s}{\partial v_c}, \frac{\partial t_p}{\partial v_c} = 0$ vem

$$\frac{\partial t_c}{\partial v_c} = - \frac{\pi d l}{1000 f_Z \cdot Z' \cdot v_c^2} \quad (5.91)$$

sendo

$$t_c = \frac{\pi d l}{1000 f_Z \cdot Z' \cdot v_c} \quad (5.92)$$

$$\frac{\partial t_a}{\partial v_c} = - \frac{\pi d (e+a')}{1000 f_Z \cdot Z' \cdot v_c^2} \quad (5.93)$$

sendo

$$t_a = \frac{2c+l+e+a'}{v_{rap}} + \frac{\pi d (e+a')}{1000 f_Z Z' \cdot v_c} \quad (\text{Fig. 5.13}) \quad (5.94)$$

onde v_{rap} é a velocidade em movimento rápido.

$$\frac{\partial t_r}{\partial v_c} = \frac{x v_c^{x-1} f_Z^Y (a_p)^Z Z'^{Y-1} t_{ft} \cdot 1}{K_1} \quad (5.95)$$

Substituindo as expressões (5.91), (5.93) e (5.95) na expressão (5.3) vem:

$$\begin{aligned} & - \frac{\pi d l}{1000 f_Z \cdot Z' \cdot v_c^2} - \frac{\pi d (e+a')}{1000 f_Z Z' \cdot v_c^2} \\ & + \frac{x v_c^{x-1} f_Z^Y (a_p)^Z Z'^{Y-1} t_{ft} \cdot 1}{K_1} \end{aligned} \quad (5.96)$$

onde:

$$v_{mxp} = \sqrt[x+1]{\frac{\pi d K_1 (1+e+a')}{1000 \cdot x f_Z^{Y+1} (a_p)^Z Z'^Y t_{ft} \cdot 1}} \quad (5.97)$$

5.7.2 - Velocidade de mínimo custo (V_o)

$$V_o = \sqrt{\frac{x+1}{1000 \cdot x \cdot f_z^{Y+1} (a_p)^Z Z^{Y+1} \left[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT} \right] l}} \frac{C_2 \pi d K_1 (1+e+a')}{1} \quad (5.98)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T.V_c^x = K$, as expressões para o alargamento cilíndrico são dadas por:

$$V_{mxp} = \sqrt{\frac{x+1}{1000 \cdot x \cdot f_z \cdot t_{ft} \cdot l}} \frac{\pi d K (1+e+a')}{1} \quad (5.99)$$

e

$$V_o = \sqrt{\frac{x+1}{1000 \cdot f_z \left[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT} \right] l}} \frac{C_2 \pi d K (1+e+a')}{1} \quad (5.100)$$

Com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c^Y = C$, as expressões para o alargamento cilíndrico são dadas por:

$$V_{mxp} = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{1+Y}{Y} \frac{\pi d Y (1+e+a')}{1000 \cdot f_z \cdot t_{ft} \cdot l}} \quad (5.101)$$

$$V_o = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{1+Y}{Y} \frac{C_2 \pi d Y (1+e+a')}{1000 \cdot f_z \left[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT} \right] l}} \quad (5.102)$$

Nas expressões (5.97) a (5.102), $e = a + \Delta$, $a \cong a' = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d-d'}{2} \text{ Tg} X_r$ (Fig. 5.11).

5.8 - Expressões das velocidades de corte para o Roscamento cilíndrico (Fig. 5.12)

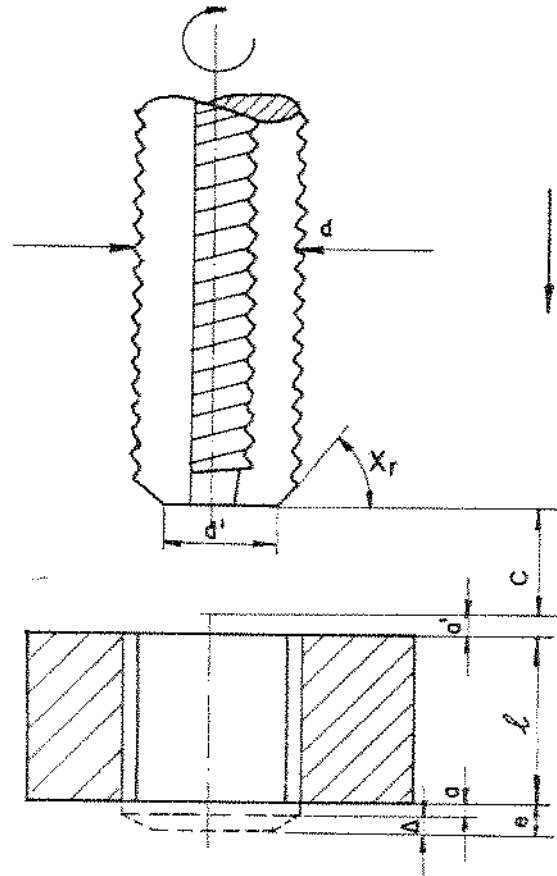


Fig. 5.12 - Roscamento Cilíndrico. [42]

Da expressão (5.4) com $\frac{\partial t_s}{\partial v_c}$, $\frac{\partial t_{p/Z}}{\partial v_c} = 0$ vem:

$$\frac{\partial t_c}{\partial v_c} = - \frac{\pi d l}{1000 P v_c^2} \quad (5.103)$$

sendo:

$$t_c = \frac{\pi d l}{1000 P v_c} \quad (5.104)$$

$$\frac{\partial t_a}{\partial v_c} = - \frac{\pi d (e + a^*)}{1000 P v_c^2} \quad (5.105)$$

$$\frac{\partial t_a}{\partial v_c} = - \frac{\pi d(e+a')}{1000 p v_c^2} \quad (5.105)$$

sendo

$$t_a = \frac{2c+1+e+a'}{v_{rap}} + \frac{\pi d(e+a')}{1000 p v_c} \quad (\text{Fig. 5.14}) \quad (5.106)$$

onde v_{rap} é a velocidade em movimento rápido.

$$\frac{\partial t_r}{\partial v_c} = \frac{x v_c^{x-1} p^Y (a_p)^Z l t_{ft}}{K_1} \quad (5.107)$$

Substituindo as expressões (5.103), (5.105), e (5.107) na expressão (5.3) vem

$$\begin{aligned} & - \frac{\pi d l}{1000 p v_c^2} - \frac{\pi d(e+a')}{1000 p v_c^2} \\ & + \frac{x v_c^{x-1} p^Y (a_p)^Z l t_{ft}}{K_1} = 0 \end{aligned} \quad (5.108)$$

onde

$$v_{mxp} = \sqrt[x+1]{\frac{\pi d K_1 (1+e+a')}{1000 x p^{Y+1} (a_p)^Z l t_{ft}}} \quad (5.109)$$

e

$$v_o = \sqrt[x+1]{\frac{C_2 \pi d K_1 (1+e+a')}{1000 x p^{Y+1} (a_p)^Z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.110)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T \sim v_c^x = K$, as expressões para o roscamento cilíndrico são dadas por.

$$v_{mxp} = \sqrt[x+1]{\frac{\pi d K (1+e+a')}{1000 x p l t_{ft}}} \quad (5.111)$$

$$V_o = \sqrt{\frac{C_2 \pi d k (1+e+a')}{1000 \times p [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.112)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c . T^Y = C$, as expressões para o roscamento cilíndrico são dadas por:

$$V_{mxp} = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{\frac{1+Y}{Y} \pi d Y (1+e+a')}{1000 \times p l t_{ft}}} \quad (5.113)$$

$$V_o = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{\frac{1+Y}{Y} C_2 \pi d Y (1+e+a')}{1000 \times p [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.114)$$

Nas expressões (5.109) a (5.114), $e = a + \Delta$, $a \cong a' = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$,

$\Delta = \frac{(d-d')}{2} \text{ Tg} X_r$ (Figura 5.12) e $p = \frac{1}{m}$, sendo m = números de fios de rosca por unidade de comprimento de rosca,

5.9 - Expressões das Velocidades de Corte para o Fresamento Frontal (Figura 5.13)

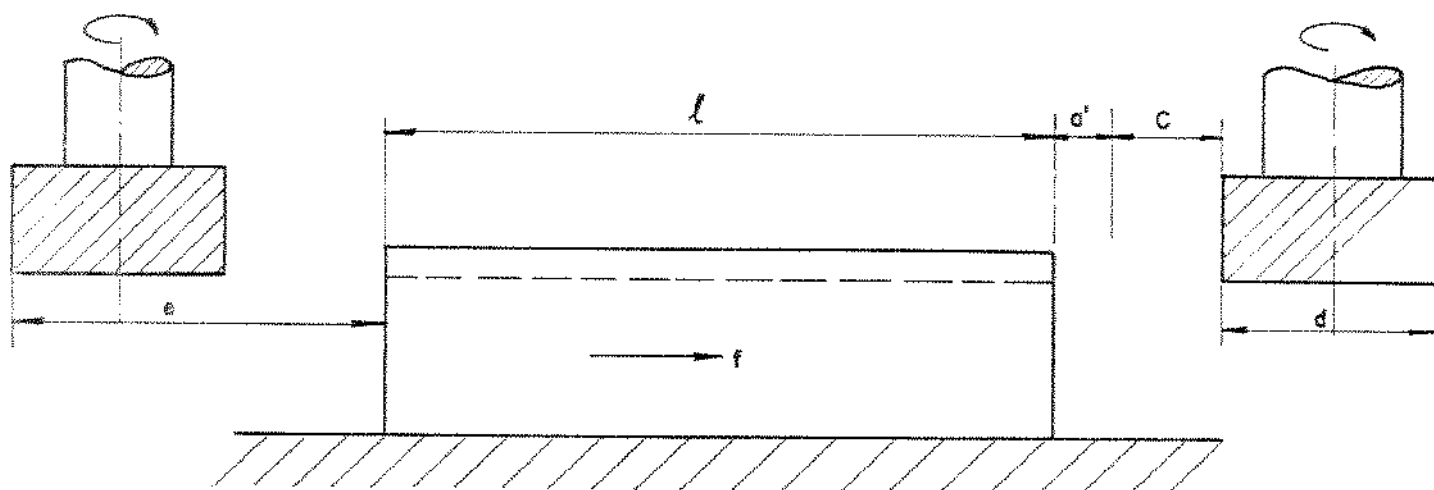


Fig. 5.13 - Fresamento Frontal [42]

5.9.1 - Velocidade de máxima produção (V_{exp})

Da expressão (5.4) com

$$\frac{\partial t_s}{\partial v_c}, \frac{\partial t_{p/2}}{\partial v_c} = 0, \text{ vem}$$

$$\frac{\partial t_c}{\partial v_c} = - \frac{\pi d l}{1000 f_z Z' v_c^2} \quad (5.115)$$

sendo

$$t_c = \frac{\pi d l}{1000 f_z Z' v_c^2} \quad (5.116)$$

$$\frac{\partial t_a}{\partial v_c} = - \frac{\pi d (a' + e)}{1000 f_z Z' v_c^2} \quad (5.117)$$

sendo

$$t_a = \frac{2c + e + l + a'}{v_{\text{rap}}} + \frac{\pi d (a' + e)}{1000 f_z Z' v_c^2} \quad (\text{Fig. 5.13}) \quad (5.118)$$

onde v_{rap} é a velocidade em movimento rápido

$$\frac{\partial t_r}{\partial v_c} = \frac{x v_c^{x-1} f_z^Y (a_p)^Z Z'^{Y-1} t_{ft} l}{K_1} \quad (5.119)$$

Substituindo as expressões (5.115), (5.117) e (5.119) na expressão (5.3), vem

$$- \frac{\pi d l}{1000 f_z Z' v_c^2} - \frac{\pi d (a' + e)}{1000 f_z Z' v_c^2} + \frac{x v_c^{x-1} f_z^Y (a_p)^Z Z'^{Y-1} t_{ft} l}{K_1} = 0 \quad (5.120)$$

onde

$$V_{\text{mxp}} = \sqrt{\frac{\pi d K_1 (1+a'+e)}{1000 \cdot x \cdot f_Z^{Y+1} (a_p)^Z Z^Y t_{ft} l}} \quad (5.121)$$

5.9.2 - Velocidade de mínimo custo (V_o)

$$V_o = \sqrt{\frac{C_2 \pi d K_1 (1+a'+e)}{1000 \cdot x \cdot f_Z^{Y+1} (a_p)^Z Z^Y [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.122)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T \cdot V_c^x = K$, as expressões para o fresamento frontal são dadas por:

$$V_{\text{mxp}} = \sqrt{\frac{\pi d K (1+a'+e)}{1000 \cdot x \cdot f_Z \cdot t_{ft} l}} \quad (5.123)$$

$$V_o = \sqrt{\frac{C_2 \pi d K (1+a'+e)}{1000 \cdot x \cdot f_Z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.124)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c \cdot T^Y = C$, as expressões para o fresamento frontal são dadas por:

$$V_{\text{mxp}} = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{\pi d Y (1+a'+e)}{1000 \cdot f_Z \cdot t_{ft} l}} \quad (5.125)$$

$$V_o = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{\pi d Y (1+a'+e)}{1000 \cdot f_Z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.126)$$

Nas expressões (5.121) a (5.126), $a' \cong (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $e = (d + 1) \text{ mm}$

5.10 - Expressões das Velocidades de corte para o Fresamento Tangencial (Fig 5.14)

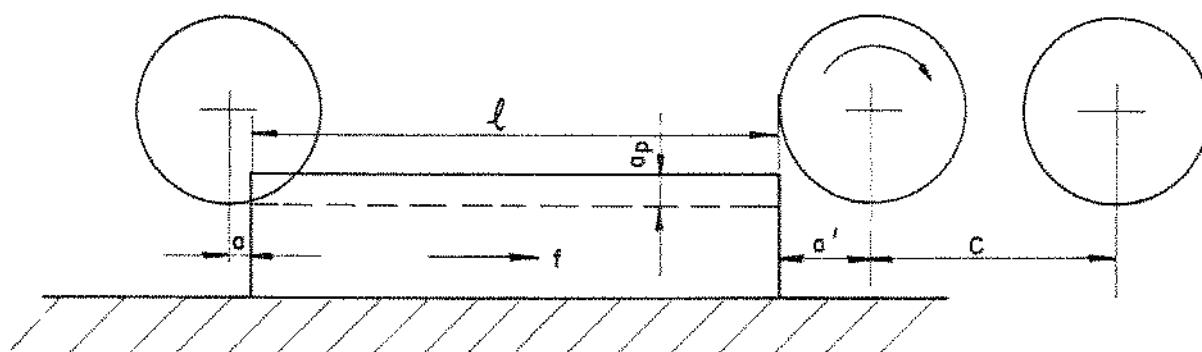


Figura 5.14 - Fresamento tangencial. [42]

Aplicação das expressões (5.121) a (5.126) fazendo nas mesmas $a' = \left[\sqrt{d \cdot a_p - (a_p)^2} + 1 \right] \text{ mm}$, $a = (2 \text{ a } 5) \text{ mm}$ [44].

5.11 - Expressões das velocidades de corte para o Brochamento (Fig. 5.15)

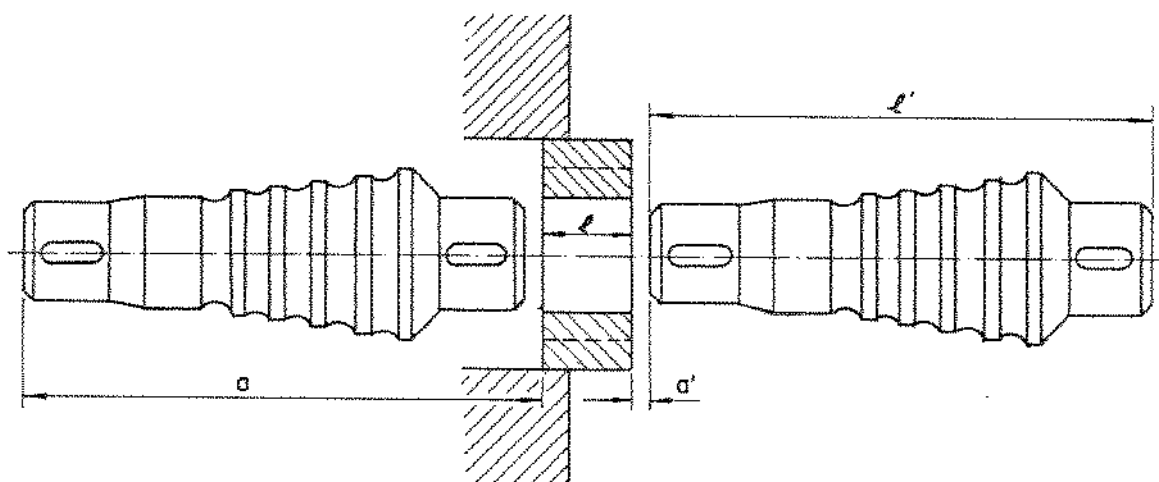


Fig. 5.15 - Brochamento interno.

5.11.1 - Velocidade de máxima produção (V_{mxp})

Da expressão (5.4) com $\frac{\partial t_s}{\partial v_c}, \frac{\partial t_p/Z}{\partial v_c} = 0$, vem

$$\frac{\partial t_c}{\partial v_c} = - \frac{1}{v_c^2} \quad (5.127)$$

sendo

$$t_c = \frac{1}{v_c} \quad (5.128)$$

$$\frac{\partial t_a}{\partial v_c} = - \frac{(2a' + 2a + 1)}{v_c^2} \quad (5.129)$$

sendo

$$t_a = \frac{(2a' + 2a + 1)}{v_c} \quad (5.130)$$

$$\frac{\partial t_r}{\partial v_c} = \frac{x v_c^{x-1} f_Z^Y Z^{Y-1} (a_p)^Z t_{ft} l}{K_1} \quad (5.131)$$

Substituindo as expressões (5.127), (5.129) e (5.131) na expressão (5.3), vem:

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{v_c^2} - \frac{(2a' + 2a + 1)}{v_c^2} \\ & + \frac{x v_c^{x-1} f_Z^Y Z^{Y-1} (a_p)^Z t_{ft} l}{K_1} = 0 \end{aligned} \quad (5.132)$$

onde

$$v_{\text{mxp}} = \sqrt[x+1]{\frac{2K_1(1+a'+a)}{x \cdot f_Z^Y Z^{Y-1} a_p^Z t_{ft} l}} \quad (5.133)$$

5.11.2 - Velocidade de mínimo custo (V_o)

$$V_o = \sqrt{\frac{x+1}{x \cdot f_2^Y \cdot Z^{Y-1} \cdot a_p^Z} \frac{C_2 \cdot 2 \cdot K_1 (1+a'+a)}{[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.134)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c^X = K$, as expressões para o brochamento (interno e externo) são dadas por

$$V_{mxp} = \sqrt{\frac{x+1}{x \cdot Z^Y \cdot t_{ft} \cdot l} \frac{2 \cdot K (1+a'+a)}{1}} \quad (5.135)$$

e

$$V_o = \sqrt{\frac{x+1}{x \cdot Z^Y} \frac{C_2 \cdot 2 \cdot K (1+a'+a)}{[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}} \quad (5.136)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c^Y = C$, as expressões para o Brochamento (interno e externo) são dadas por

$$V_{mxp} = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{\frac{1+Y}{Y}}{\frac{2 \cdot Y (1+a'+a)}{Z^Y \cdot t_{ft} \cdot l}}} \quad (5.137)$$

e

$$V_o = C^{\frac{1}{1+Y}} \sqrt{\frac{\frac{1+Y}{Y}}{\frac{C_2 \cdot 2 \cdot Y (1+a'+a)}{Z^Y [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l}}} \quad (5.138)$$

Nas expressões (5.133) a (5.138), $a' \cong (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$, $a = (1 \text{ a } 1) \text{ mm}$ (Fig. 5.15)

CAPÍTULO VI

VIDA DE MÍNIMO CUSTO (T_0) E DE MÁXIMA PRODUÇÃO (T_{mxp})
PARA OS PROCESSOS MECÂNICOS DE USINAGEM

6.1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento das expressões para o cálculo da vida de ferramentas de corte dos processos mecânicos de usinagem, é de suma importância no planejamento do processo produtivo. Por meio destas expressões, pode-se estabelecer as vidas prováveis das mesmas, prever um plano de trocas das ferramentas, e um uso mais racional, através de uma escolha das melhores condições de corte.

6.2 - Expressões da Vida para o Torneamento (Fig. 5.1)6.2.1 - Vida para a máxima produção (T_{mxp})

Através da fórmula expandida de Taylor $T V_c^x f'(a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_{mxp}$ e $V_c = V_{mxp}$ com V_{mxp} fornecido pela expressão (5.11) vem:

$$T_{mxp} = \frac{(x-1)(t_{tf}+1)}{(1+e)} \quad (6.1)$$

6.2.2 - Vida para o mínimo custo (T_0)

Através da fórmula expandida de Taylor $T V_c^x f'(a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_0$ e $V_c = V_0$ com V_0 fornecido pela expressão (5.35) vem:

$$T_0 = \frac{(x-1) \left[C_2 t_{ft} + 60 C_{ft} \right]}{C_2 (1+e)} \quad (6.2)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T V_c^x = k$, as expressões para a vida de mínimo custo (T_0) e máxima produção (T_{mxp}) para o

torneamento são conforme (6.3) e (6.4), respectivamente.

$$T_{mxp} = \frac{(x-1)(t_{ft} - 1)}{(1+e)} \quad (6.3)$$

$$T_o = \frac{(x-1) \left[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT} \right] 1}{C_2 (1+e)} \quad (6.4)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c . T^Y = C$, as expressões para o torneamento são dadas por.

$$T_{mxp} = \frac{Y (1+e)}{(1-Y) t_{ft} . 1} \quad (6.5)$$

$$T_o = \frac{C_2 Y (1+e)}{(1-Y) \left[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT} \right] 1} \quad (6.6)$$

Nas expressões (6.1) a (6.6), $e \cong (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$.

6.3 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA A APLAINAMENTO (Fig. 5.6)

6.3.1 - Vida para a máxima produção (T_{mxp})

Através da fórmula expandida de TAYLOR $T V_c^x f(a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_{mxp}$ e $V_c = V_{mxp}$ com V_{mxp} fornecido pela expressão (5.51) vem

$$T_{mxp} = \frac{K_1^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{(1+2a+2e) f^{Y/x} (a_p)^{Z/x}}{x \cdot t_{ft} \cdot 1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.7)$$

6.3.2 - Vida para o mínimo custo (T_o)

Através da Fórmula expandida de TAYLOR $T . V_c^x f(a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_o$ e $V_c = V_o$ com V_o fornecido pela expressão (5.52) vem.

$$T_o = \frac{K_1 \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{C_2 (1+2a+2e) f^{Y/X} (a_p)^{Z/X}}{x [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}]^1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.8)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $I \cdot V_c^x = K$, as expressões para a vida de máxima produção (T_{mxp}) e mínimo custo (T_o) para o aplainamento (plana de Mesa - Hidráulica) são dadas por:

$$T_{mxp} = \frac{K \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{(1+2a+2e)^{\frac{x}{x+1}}}{x \cdot t_{ft} \cdot 1} \right]} \quad (6.9)$$

e

$$T_o = \frac{K \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{C_2 (1+2a+2e)^{\frac{x}{x+1}}}{x [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}]^1} \right]} \quad (6.10)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c \cdot T^Y = C$, as expressões para o aplainamento (plana de mesa - Hidráulica), são dadas por:

$$T_{mxp} = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{Y(1+2a+2e)^{\frac{1}{1+Y}}}{t_{ft} \cdot 1} \right]} \quad (6.11)$$

e

$$T_o = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{C_2 Y(1+2a+2e)^{\frac{1}{1+Y}}}{[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}]^1} \right]} \quad (6.12)$$

Nas expressões (6.7) a (6.12), $a' = a_p \cotg X_r$, $e = a$ mm,
 $a = a_p \cotg X_r$.

6.4 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA A FURAÇÃO

6.4.1 - Furação em Cheio Passante (Fig 5.7)

6.4.1.1 - Vida para a máxima produção (T_{mxp})

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^X \cdot f^Y \cdot a_p^Z = K_1$ fazendo $T = T_{mxp}$ e $V_c = V_{mxp}$ com V_{mxp} fornecido pela expressão (5.63) vem

$$T_{mxp} = \frac{K_1 \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{\pi d (1+e+a') f^{\frac{Y-x}{x}} (a_p)^{Z/x}}{1000 \times t_{ft} \cdot l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.13)$$

6.4.1.2 - Vida para o mínimo custo (T_o)

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^X \cdot f^Y \cdot a_p^Z = K_1$ fazendo $T = T_o$ e $V_c = V_o$ com V_o fornecido pela expressão (5.64) vem

$$T_o = \frac{K_1 \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{C_2 \pi d (1+e+a') f^{\frac{Y-x}{x}} (a_p)^{Z/x}}{1000 \times [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \cdot l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.14)$$

Com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T \cdot V_c^X = k$, as expressões para a vida de máxima produção (T_{mxp}) e mínimo custo (T_o) para a Furação passante são dadas por:

$$T_{mxp} = \frac{K \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{\pi d (1+e+a^*)}{1000 x f l t_{ft}} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.15)$$

e

$$T_o = \frac{K \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{C_2 \pi d (1+e+a^*)}{1000 x f [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.16)$$

Com o uso da Fórmula simplificada de Taylor $V_c \cdot T^Y = C$, as expressões para a furação passante são dadas por

$$T_{mxp} = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{\pi d Y (1+e+a^*)}{1000 f \cdot t_{ft} \cdot l} \right]^{\frac{1}{1+Y}}} \quad (6.17)$$

$$T_o = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d \cdot Y (1+e+a^*)}{1000 f \cdot [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l} \right]^{\frac{1}{1+Y}}} \quad (6.18)$$

Nas expressões (6.13) a (6.18), $e = a + \Delta$, $a \cong a^* = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d}{n} \text{ Tg} X_r$ (Fig. 5.7)

6.4.2 - Furação em cheio não passante (Fig. 5.8)

6.4.2.1 - Vida para a máxima produção (T_{mxp})

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^X f^Y a_p^Z = K_1$ fazendo $T = T_{mxp}$ e $V_c = V_{mxp}$ com V_{mxp} dado por (5.75) vem:

$$T_{\text{mxp}} = \frac{K_1 \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{\pi \cdot d \cdot (1' + e + a') f^{\frac{Y-x}{x}} (a_p)^{\frac{Z}{x}}}{1000 \times t_{ft} 1'} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.19)$$

6.4.2.2 - Vida para o mínimo custo (T_o)

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^x f a_p^Z = K_1$ fazendo $T = T_o$ e $V_c = V_o$ com V_o fornecido pela expressão (5.76) vem:

$$T_o = \frac{K_1 \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d \cdot (1' + a' + \Delta) f^{\frac{Y-x}{x}} (a_p)^{\frac{Z}{x}}}{1000x [C_2 t_{ft} + 60C_{fT}] 1'} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.20)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T \cdot V_c^x = K$, as expressões para a vida de máxima produção (T_{mxp}) e mínimo custo (T_o) para a furacão não passante, são dadas por:

$$T_{\text{mxp}} = \frac{K \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{\pi d (1' + a' + \Delta)}{1000x \cdot f \cdot t_{ft} 1'} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.21)$$

e

$$T_o = \frac{K \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d (1' + a' + \Delta)}{1000 \times f [C_2 t_{ft} + 60C_{fT}] 1'} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.22)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c \cdot T^Y = C$, as expressões para a furacão não passante, são dadas por:

$$T_{\text{mxp}} = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{\pi d Y (1^* + a^* + \Delta)}{1000 f t_{ft} 1^*} \right] \frac{1}{1+Y}} \quad (6.23)$$

e

$$T_o = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{C_2 \pi . d . Y (1^* + a^* + \Delta)}{1000 f [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] 1^*} \right] \frac{1}{1+Y}} \quad (6.24)$$

Nas expressões (6.19) a (6.24), $a^* \cong (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d}{2} \text{ Tg} \theta$ (Fig 5.8)

6.4.3 - Furação com pré-furação (Fig. 5.9)

Aplicação das expressões de (6.13) a (6.18), sendo $a_p = \frac{d-d_o}{2}$, $e = a + \Delta$ com $a \cong a^* = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d-d_o}{2} \text{ Tg} X_r$ (Fig 5.9)

6.4.4 - Furação escalonada (Fig. 5.10)

6.4.4.1 - Vida para a máxima produção (T_{mxp})

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^x f(a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_{\text{mxp}}$ e $V_c = V_{\text{mxp}}$ com V_{mxp} fornecido pela expressão (5.87), vem:

$$T_{\text{mxp}} = \frac{K_1 \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{\pi . d^* (1+e+a^*) f^{\frac{Y-x}{x}} (a_p)^{\frac{Z}{x}}}{1000 x t_{ft} . l} \right] \frac{x}{x+1}} \quad (6.25)$$

6.4.4.2 - Vida para o mínimo custo (T_o)

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^x f^Y(a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_o$ e $V_c = V_o$ com V_o fornecido pela expressão (5.88), vem

$$T_o = \frac{K_1^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d' (1+e+a') f^{\frac{Y-x}{x}} (a_p)^{Z/x}}{1000 \times [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.26)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T V_c^x = K$, as expressões para a vida de máxima produção (T_{mxp}) e mínimo custo (T_o) para a furacão escalonada são dadas por:

$$T_{mxp} = \frac{K^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{\pi d' (1+e+a')}{1000 \times f t_{ft} l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.27)$$

e

$$T_o = \frac{K^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d' (1+e+a')}{1000 \times f [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.28)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c \cdot T^Y = C$, as expressões para a furacão escalonada são dadas por

$$T_{mxp} = \frac{C^{\frac{1}{1+Y}}}{\left[\frac{\pi d' Y (1+e+a')}{1000 \times f t_{ft} l} \right]^{\frac{1}{1+Y}}} \quad (6.29)$$

e

$$T_o = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d^* Y (1+e+a^*)}{1000 f [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l} \right]^{\frac{1}{1+Y}}} \quad (6.30)$$

Nas expressões (6.25) a (6.30), d^* é o diâmetro menor da broca escalonada, $e = a + \Delta$ sendo $a \cong a^* = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d^*}{2} \text{ Tgx}_r$ (Fig. 5.10)

6.5 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O ALARGAMENTO CILÍNDRICO (Fig. 5.11)

6.5.1 - Vida para a máxima produção (T_{mxp})

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^X f^Y(a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_{mxp}$ e $V_c = V_{mxp}$ com V_{mxp} fornecido pela expressão (5.97), vem:

$$T_{mxp} = \frac{K_1 \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{\pi \cdot d (1+e+a^*) (a_p)^{\frac{Z}{X}} Z^{\frac{Y}{X}} f^{\frac{Y-X}{X}}}{1000 \times t_{ft} \cdot l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.31)$$

6.5.2 - Vida para a mínimo custo (T_o)

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^X f^Y(a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_o$ e $V_c = V_o$ com V_o fornecido pela expressão (5.98), vem:

$$T_o = \frac{K_1 \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d (1+e+a^*) (a_p)^{\frac{Z}{X}} Z^{\frac{Y}{X}} f^{\frac{Y-X}{X}}}{1000 \times [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.32)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T V_c^x = K$, as expressões para a vida de máxima produção (T_{mxp}) e mínimo custo (T_o) para o alargamento cilíndrico são dadas por:

$$T_{mxp} = \frac{K \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{\pi d (1+e+a^*)}{1000 x f_z \cdot t_{ft} \cdot l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.33)$$

e

$$T_o = \frac{K \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d (1+e+a^*)}{1000 x f_z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.34)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c T^Y = C$, as expressões para o alargamento cilíndrico são dadas por:

$$T_{mxp} = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{\pi d Y (1+e+a^*)}{1000 f_z \cdot t_{ft} \cdot l} \right]^{\frac{1}{1+Y}}} \quad (6.35)$$

e

$$T_o = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d \cdot Y (1+e+a^*)}{1000 f_z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l} \right]^{\frac{1}{1+Y}}} \quad (6.36)$$

Nas expressões (6.31) a (6.36) $e = a + \Delta$, sendo $a \cong a' = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{(d-d')}{2} \text{ Tgx}_r$ (Fig. 5.11)

6.6 - Expressões da vida para o Roscamento Cilíndrico (Fig 5.12)6.6.1 - Vida para a máxima produção (T_{mxp})

Através da fórmula expandida de Taylor $T.V_c^x f^y(a_p)^z = K_1$, fazendo $T = T_{mxp}$ e $V_c = V_{mxp}$ com V_{mxp} fornecido pela expressão (5.109) vem:

$$T_{mxp} = \frac{K_1^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{\pi \cdot d (1+e+a') P^{\frac{Y-x}{x}} (a_p)^{z/x}}{1000 \times t_{ft} \cdot l} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.37)$$

6.6.2 - Vida para o mínimo custo (T_o)

Através da fórmula expandida de Taylor $T.V_c^x f^y(a_p)^z = K_1$, fazendo $T = T_o$ e $V_c = V_o$ com V_o fornecido pela expressão (5.110) vem:

$$T_o = \frac{K_1^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d (1+e+a') P^{\frac{Y-x}{x}} (a_p)^{z/x}}{1000 \times [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] i} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.38)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T.V_c^x = K$, as expressões para a vida de máxima produção (T_{mxp}) e mínimo custo (T_o) para o roscamento cilíndrico são dadas por:

$$T_{mxp} = \frac{K^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{\pi d (1+e+a')}{1000 \times p \cdot l \cdot t_{ft}} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.39)$$

e

$$T_o = \frac{K \frac{1}{x+1}}{\left[\frac{C_2 \pi d (1+e+a')}{1000 \times p [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] 1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.40)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c T^Y = C$, as expressões para o roscamento cilíndrico são dadas por:

$$T_{mxp} = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{\pi d Y (1+e+a')}{1000 p \cdot l \cdot t_{ft}} \right]^{\frac{1}{1+Y}}} \quad (6.41)$$

e

$$T_o = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d \cdot Y (1+e+a')}{1000 p \cdot [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] 1} \right]^{\frac{1}{1+Y}}} \quad (6.42)$$

Nas expressões (6.37) a (6.42) $e = a + \Delta$, sendo $a \cong a' = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{(d-d')}{2} \text{Tgx}_r$ (Fig. 5.12) e $p = \frac{1}{m}$, sendo m = Número de fios de rosca por unidade de comprimento de rosca.

6.7 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O FRESAMENTO FRONTAL (Fig. 5.13)

6.7.1 - Vida para a máxima produção (T_{mxp})

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^X \cdot f^Y \cdot (a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_{mxp}$ e $V_c = V_{mxp}$ com V_{mxp} fornecido pela expressão (5.121) vem:

$$T_{\text{mxp}} = \frac{K_1^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{\pi \cdot d (1+a'+e) f_z^{\frac{x}{x+1}} Z^{\frac{Y}{x+1}} (a_p)^{\frac{Z}{x+1}}}{1000 \times t_{ft} \cdot 1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.43)$$

6.7.2 - Vida para o mínimo custo (T_0)

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^x \cdot f^Y (a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_0$ e $V_c = V_0$ com V_0 fornecido pela expressão (5.122) vem:

$$T_0 = \frac{K_1^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{C_2 \pi d (1+a'+e) f_z^{\frac{x}{x+1}} Z^{\frac{Y}{x+1}} a_p^{\frac{Z}{x+1}}}{1000 \times [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \cdot 1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.44)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T \cdot V_c^x = K$, as expressões para a vida de máxima produção (T_{mxp}) e mínimo custo (T_0) para o fresamento frontal são dadas por:

$$T_{\text{mxp}} = \frac{K^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{\pi d (1+a'+e)}{1000 \times f_z \cdot t_{ft} \cdot 1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.45)$$

e

$$T_0 = \frac{K^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{C_2 \pi d (1+a'+e)}{1000 \times f_z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \cdot 1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.46)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_c^Y \cdot T^X = C$, as expressões para o fresamento frontal são dadas por:

$$T_{\text{mxp}} = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{\pi d Y (1+a^*+e)}{1000 f_z \cdot t \cdot f_t \cdot l} \right] \frac{1}{1+Y}} \quad (6.47)$$

e

$$T_o = \frac{C \frac{1}{1+Y}}{\left[\frac{C_2 \pi \cdot d \cdot Y (1+a^*+e)}{1000 f_z [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] l} \right] \frac{1}{1+Y}} \quad (6.48)$$

Nas expressões (6.43) a (6.48), $a^* \cong (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$, $e = (d+1) \text{ mm}$

6.8 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O FRESAMENTO TANGENCIAL (Fig. 5.14)

Aplicação das expressões (6.43) a (6.48) fazendo nas mesmas $a^* = \left[\sqrt{d \cdot a_p - (a_p)^2} + 1 \right] \text{ mm}$, $a \cong (2 \text{ a } 5) \text{ mm}$ [44]

6.9 - EXPRESSÕES DA VIDA PARA O BROCHAMENTO (Fig. 5.15)

6.9.1 - Vida para a máxima produção (T_{mxp})

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^X \cdot f^Y \cdot (a_p)^Z = K_1$, fazendo $T = T_{\text{mxp}}$ e $V_c = V_{\text{mxp}}$ com V_{mxp} fornecido pela expressão (5.133) vem:

$$T_{\text{mxp}} = \frac{K_1^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{2(1+a'+a) Z^{\frac{Y+x}{x}} (a_p)^{Z/x} f_z^{Y/x}}{x \cdot t_{ft} \cdot 1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.49)$$

6.9.2 - Vida para o mínimo custo (T_o)

Através da fórmula expandida de Taylor $T \cdot V_c^x \cdot f^Y \cdot a_p^Z = K_1$, fazendo $T = T_o$ e $V_c = V_o$ com V_o fornecido pela expressão (5.134) vem:

$$T_o = \frac{K_1^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{C_2 \cdot 2(1+a'+a) Z^{\frac{Y+x}{x}} (a_p)^{Z/x} f_z^{Y/x}}{x \cdot [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \cdot 1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.50)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $T \cdot V_c^x = K$, as expressões para a vida de máxima produção (T_{mxp}) e mínimo custo (T_o) para o brochamento (interno e externo), são dadas por:

$$T_{\text{mxp}} = \frac{K^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{2 \cdot (1+a'+a) \cdot Z^{\frac{Y+x}{x}}}{x \cdot t_{ft} \cdot 1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.51)$$

e

$$T_o = \frac{K^{\frac{1}{x+1}}}{\left[\frac{C_2 \cdot 2(1+a'+a) \cdot Z^{\frac{Y+x}{x}}}{x \cdot [C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \cdot 1} \right]^{\frac{x}{x+1}}} \quad (6.52)$$

com o uso da fórmula simplificada de Taylor $V_C \cdot T^Y = C$, as expressões para o brochamento (interno e externo), são dadas por:

$$T_{\text{mxp}} = \frac{C^{\frac{1}{1+Y}}}{\left[\frac{2 \cdot Y(1+a^*+a) \cdot Z^*}{t_{ft} \cdot 1} \right]^{\frac{1}{1+Y}}} \quad (6.53)$$

e

$$T_o = \frac{C^{\frac{1}{1+Y}}}{\left[\frac{C_2 \cdot 2 \cdot Y(1+a^*+a) \cdot Z^*}{[C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}] \cdot 1} \right]^{\frac{1}{1+Y}}} \quad (6.54)$$

Nas expressões (6.49) a (6.54), $a^* \cong (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$, $a = (1^*+1) \text{ mm}$.

CAPÍTULO VIIVELOCIDADE DE MÁXIMO LUCRO (V_{mxl}) PARA OS PROCESSOS
MECÂNICOS DE USINAGEM7.1 - INTRODUÇÃO

A determinação da velocidade de corte de máximo lucro (V_{mxl}) nos processos produtivos é de extrema complexidade, pelo fato de sua dependência, tanto dos tempos improdutivos (t_1), como da receita por peça (R_t) [1,21,46]. Para se tornar possível estabelecer a expressão que permite obtê-la de maneira iterativa, recorre-se à teoria micro-econômica [14,17]. À luz desta teoria, verifica-se que esta velocidade se dá, quando a receita marginal (RM_g) iguala-se ao custo marginal (CM_g). Para empresas em regime de mercado de concorrência perfeita, a receita por peça (R_t) é uma reta paralela ao eixo da abscissa, cortando as curvas de custo total médio (C_t) nos pontos (1) e (4) e marginal no ponto (3), pontos estes correspondentes às velocidades de corte (V_1), (V_{mxl}) e (V_{mxp}) (Figura 7.2). Na Figura 7.2, V_1 é a velocidade de corte, abaixo da qual se tem prejuízos. V_{mxl} e V_{mxp} são as velocidades de corte de máximo lucro e máxima produção, respectivamente. Na mesma figura, as curvas de custo marginal (CM_g) e total médio (C_t) se interceptam no ponto (2), ponto este, correspondente à velocidade de mínimo custo (V_0). Para empresas em regime de mercado de concorrência perfeita, a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) situa-se no intervalo entre as velocidades de corte (V_0) e (V_{mxp}), (Figura 7.2).

7.2 - PROCEDIMENTO PARA SE OBTER A EXPRESSÃO DA VELOCIDADE DE CORTE
DE MÁXIMO LUCRO (V_{mxl})7.2.1 - Condição de Máxima Razão de Lucro

A condição de máxima razão de lucro ocorre quando a receita marginal iguala-se ao custo marginal (Capítulo II); ou seja, quando a derivada primeira da razão de lucro em relação ao número de peças produzidas num determinado período for igual a zero.

A razão de lucro é definida por:

$$L_R = R_R - C_R \quad (7.1)$$

onde:

$$R_R = R_t \cdot P_r \quad (7.2)$$

$$C_R = C_t \cdot P_r \quad (7.3)$$

em que $P_r = \frac{1}{t_t}$ é o número de peças produzidas por minuto.

Os conceitos de custo marginal e receita marginal (Capítulo II), são agora estendidos em relação à velocidade de corte. Derivando-se parcialmente a expressão (7.1) em relação à velocidade de corte, e igualando a zero, tem-se:

$$\frac{\partial L_R}{\partial v_c} = \frac{\partial R_R}{\partial v_c} - \frac{\partial C_R}{\partial v_c} = 0 \quad (7.4)$$

ou seja, a velocidade de máximo lucro ocorre quando há a igualdade entre a receita marginal e o custo marginal (7.5).

$$\frac{\partial R_R}{\partial v_c} = \frac{\partial C_R}{\partial v_c} \quad (7.5)$$

Substituindo-se as expressões de t_t (1.1) e C_t (5.14) nas expressões (7.2) e (7.3) e derivando-se parcialmente em relação à velocidade de corte, após o que, igualando-as, a expressão resultante é a que permite obter a velocidade de máximo lucro (v_{mxl}). Esta expressão é dada por:

$$t_t' (R_t - C_t) = t_t (R_t' - C_t') \quad (7.6)$$

onde:

$$t_t = t_c + t_a + t_s + t_{p/z} + t_r \quad (1.1) \quad [5,6]$$

$$C_t = C_{tc} + C_{ti} + C_{tp} + C_{fe} + C_{tr} \quad (5.14) \quad [5,41]$$

$$t_t^* = \frac{\partial t_t}{\partial V_c} \quad (7.7)$$

$$C_t^* = \frac{\partial C_t}{\partial V_c} \quad (7.8)$$

$$R_t^* = \frac{\partial R_t}{\partial V_c} \quad (7.9)$$

7.2.2 - Expressão que permite obter a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) para empresas em regime de mercado de concorrência perfeita.

No (capítulo II - 2.4.1) vê-se que a receita R_t (Figura 2.1) é uma reta paralela ao eixo da abscissa de equação

$$R_t = (C_t)_{V_{mxp}} \quad (7.10)$$

onde $(C_t)_{V_{mxp}}$ é o valor do custo total médio (C_t) para a velocidade de máxima produção (V_{mxp}). Com o uso da expressão (7.6) na condição de R_t constante e sua derivada $R_t^* = 0$, surge a expressão (7.11) dada por:

$$t_t^* (R_t - C_t) = - t_t C_t^* \quad (7.11)$$

Substituindo em (7.11) a expressão (7.10), vem:

$$t_t^* ((C_t)_{V_{mxp}} - C_t) = - t_t C_t^* \quad (7.12)$$

expressão que permite obter de maneira iterativa a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) para empresas em regime de mercado de concorrência perfeita. Uma outra maneira de se obter a expressão da velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) em regime de mercado de concorrência perfeita é através da igualdade entre a receita marginal (RM_g) e o custo marginal (CM_g). No (Capítulo II - 2.4.1),

vê-se que a receita marginal (RM_g) (Figura 2.1) é uma reta de equação $RM_g = (C_t)_{V_{mxp}}$ (7.13). No mesmo capítulo (Item 2.5.2), o custo marginal (CM_g) é dado pela Expressão $CM_g = 3a^*V_c^2 - 2b^*V_c + C^*$ (2.5) igualando (7.13) e (2.5), vem:

$$3a^*V_c^2 - 2b^*V_c + C^* = (C_t)_{V_{mxp}} \quad (7.14)$$

A velocidade de corte (V_c) que torna esta igualdade é dada por:

$$V_c = V_{mxl} = \frac{2.b^* \pm \sqrt{4.b^{*2} - 12a^*(C^* - (C_t)_{V_{mxp}})}}{6a^*} \quad (7.15)$$

O valor de V_{mxl} dado por (7.15), deverá situar-se no intervalo entre V_0 e V_{mxp} . As constantes a^* , b^* e C^* devem ser obtidas experimentalmente.

7.2.3 - Expressão que permite obter a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) para empresas em regime de mercado monopolístico.

No (capítulo II, 2.4.2), vê-se que a Receita (R_t) (Figura 2.2) é uma reta de equação

$$R_t = R_0 - \frac{R_0}{V_0^*} V_c \quad (7.16)$$

onde R_0 é o valor da receita (R_t) para a velocidade de corte (V_c)=0. V_0^* é o valor da velocidade de corte (V_c) para a receita (R_t) = 0. Substituindo a expressão de (R_t) (7.15) em (7.16), obtém-se a expressão (7.17) dada por:

$$t_t^* \left[\left(R_0 - \frac{R_0}{V_0^*} V_c \right) - C_t \right] = t_t \left[\left(-\frac{R_0}{V_0^*} - C_t^* \right) \right] \quad (7.17)$$

que permite obter a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) de maneira iterativa em empresas em regime de mercado monopolístico. Uma outra maneira de se obter a expressão da velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) para empresas em regime de mercado monopolístico é através da igualdade entre a receita marginal (RM_g) e o custo marginal (CM_g). No

(Capítulo II, 2.6.2), vê-se que a receita marginal (RM_g) (Figura 2.8) é uma reta de equação $RM_g = R_o - 2 \frac{R_o}{V_o^*} V_c$ (7.18) [18]. No mesmo Capítulo (item 2.5.2), o custo marginal (CM_g) é uma curva de equação $CM_g = 3a^* V_c^2 - 2b^* V_c + C^*$ (2.5). Igualando (7.18) e (2.5), tem-se:

$$R_o - 2 \frac{R_o}{V_o^*} V_c = 3a^* V_c^2 - 2b^* V_c + C^* \quad (7.18)$$

A velocidade de corte (V_c) que torna esta igualdade é dada por

$$V_c = V_{mxl} = \frac{-(2R_o - 2b^* V_o^*) \pm \sqrt{(2R_o - 2b^* V_o^*)^2 - 12a^* (V_o^*)^2 (C^* - R_o)}}{6a^* V_o^*} \quad (7.19)$$

O valor de V_{mxl} dado pela expressão (7.19) deverá ser menor do que a velocidade de mínimo custo (V_o) (Figura 2.8). As constantes a^* , b^* e c^* devem ser obtidas experimentalmente.

7.2.4 - Expressão que permite obter a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) para empresas em regime de mercado oligopolístico.

No (capítulo II, 2.4.3), vê-se que a Receita (R_t) (Figura 2.3) é uma reta de equação

$$R_t = \left[\frac{R^* - R_o}{V_c^*} \right] V_c + R_o \quad (7.20)$$

(Trecho PQ) da figura 2.3.

R_o é o valor da receita (R_t) para a velocidade de corte (V_c) = 0. R^* é o valor da receita para a velocidade de corte (V_c) = V_c^* , velocidade esta corresponde ao ponto de inflexão (Q) da curva de procura.

Substituindo a expressão de (R_t) (7.20) em (7.6), obtém-se a expressão (7.21) dada por:

$$t_t' \left[\left[\left[\frac{R^* - R_o}{V_c^*} \right] V_c + R_o \right] - C_t \right] = t_t \left[\left[\frac{R^* - R_o}{V_c^*} \right] - C_t^* \right] \quad (7.21)$$

que permite obter a velocidade de máximo lucro ($V_{mx\ell}$) de maneira iterativa para empresas em regime de mercado oligopolístico. Uma outra maneira de se obter a expressão da velocidade de máximo lucro ($V_{mx\ell}$) para empresas em regime de mercado oligopolístico é através da igualdade entre a receita marginal (RM_g) e o custo marginal (CM_g). No (Capítulo II, 2.6.3), vê-se que a receita marginal (RM_g), (Figura 2.9) é uma reta de equação

$$R_{mg} = \left[\frac{R^{**} - R_o}{V_c^*} \right] V_c + R_o \quad , \quad (7.22)$$

(trecho GH), (Figura 2.9)

R^{**} é o valor da receita para a velocidade de corte (V_c) = V_c^* , que corresponde ao ponto de inflexão (G) da curva de receita marginal. No mesmo capítulo (item 2.5.2), o custo marginal (CM_g) é dado pela equação $CM_g = 3a^*V_c^2 - 2b^*V_c + C^*$ (2.5). Igualando (7.22) e (2.5), tem-se:

$$\left[\frac{R^{**} - R_o}{V_c^*} \right] V_c + R_o = 3a^*V_c^2 - 2b^*V_c + C^* \quad (7.23)$$

A velocidade de corte (V_c) que torna esta igualdade é dada por:

$$V_c = V_{mx\ell} = \frac{\left[2b^* + \left(\frac{R^{**} - R_o}{V_c^*} \right) \right] \pm \sqrt{\left[2b^* + \left(\frac{R^{**} - R_o}{V_c^*} \right) \right]^2 - 12a^*[C^* - R_o]}}{6a^*} \quad (7.24)$$

O valor de $V_{mx\ell}$ dado pela expressão (7.24) deverá ser menor do que a velocidade de mínimo custo (V_o) (Figura 2.9). As constantes a^* , b^* e C^* devem ser obtidas experimentalmente.

7.2.5 - Expressão que permite obter a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) para empresas em regime de mercado de concorrência monopolística.

O modelo gráfico apresentado no capítulo II (Item 2.6.4), Figura (2.10) faz referência à determinação da velocidade de máximo lucro relativo às curvas de custo total (CT) e receita total (RT). A figura 7.1 [18] fornece o modelo gráfico que permite uma melhor visualização e determinação da velocidade de máximo lucro (V_{mxl}).

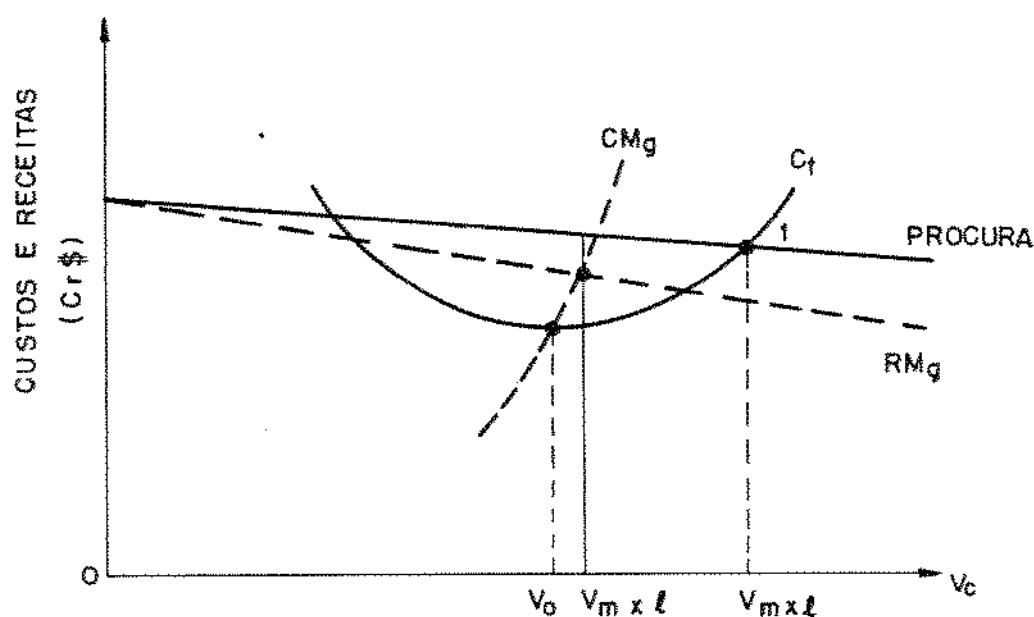


Figura 7.1 - Modelo gráfico para determinar a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) para empresas em regime de mercado de concorrência monopolística

Na figura 7.1 a receita (R_t) é uma reta de equação $R_t = \left(\frac{(C_t)_{V_{mxp}} - R_0}{V_{mxp}} \right) V_c + R_0$ (7.25) onde R_0 é o valor da receita (R_t) para a velocidade de corte ($V_c = 0$). $(C_t)_{V_{mxp}}$ é o valor do custo para a velocidade de máxima produção (V_{mxp}) que é numericamente igual à receita (R_t) no ponto (1). (Figura 7.1).

Substituindo a expressão de (R_t) (7.25) em (7.6), obtém-se a expressão (7.26) dada por:

$$t_t^* \left[\left(\frac{(C_t) V_{mxp} - R_0}{V_{mxp}} \right) V_c + (R_0 - C_t) \right] = t_t \left[\left(\frac{(C_t) V_{mxp} - R_0}{V_{mxp}} \right) - C_t^* \right] \quad (7.26)$$

que permite obter de maneira iterativa a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) em empresas em regime de mercado de concorrência monopolística. O valor de V_{mxl} deverá situar-se no intervalo entre V_0 e V_{mxp} (Figura 7.1)

Não é possível obter a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) pela igualdade entre a receita marginal (RM_g) e custo marginal (CM_g) de maneira analítica, pelo fato da receita marginal (RM_g) ficar explicitamente dependente da velocidade de máximo lucro conforme

expressão $RM_g = \left(\frac{R^{***} - R_0}{V_{mxl}} \right) V_c + R_0$ (7.27) R^{***} é o valor da receita para a velocidade de corte ($V_c = V_{mxl}$). Por intermédio de um software aplicativo [47] as expressões (1.1), (5.14), (7.7) e (7.8), quando aplicadas ao torneamento, tornam-se as expressões (7.28), (7.29), (7.30) e (7.31), respectivamente, dadas por:

$$t_t = \frac{31416 \cdot 10^{-7} d}{f} \left[\frac{V_c^{x-1} t_{ft} \ell}{k} + \frac{(\ell+e)}{V_c} \right] + (t_a + t_{p/2} + t_s - t_{ft/2}) \quad (7.28)$$

$$C_t = \frac{524 \cdot 10^{-7} d \cdot C_2}{f} \left[\frac{V_c^{x-1} t_{ft} \ell}{k} + \frac{(\ell+e)}{V_c} \right] + 166667 \cdot 10^{-7} C_2 \left(t_a + t_s - \frac{t_{ft}}{2} \right) + \frac{t_p C_3}{2} + \frac{314 \cdot 10^{-5} V_c^{x-1} C_{ft} d \cdot \ell}{f \cdot k} \quad (7.29)$$

$$t_t^* = \frac{31416 \cdot 10^{-7} d}{f} \left[\frac{V_c^{x-2} t_{ft} (x-1) \ell}{k} - \frac{(\ell+e)}{V_c^2} \right] \quad (7.30)$$

$$C_t^* = \frac{524 \cdot 10^{-7} d \cdot C_2}{f} \left[\frac{V_c^{x-2} t_{ft} (x-1) \ell}{k} - \frac{(\ell+e)}{V_c^2} \right] +$$

$$+ \frac{314 \cdot 10^{-5} \text{ d. } \ell \cdot C_{fT}(x-1) V_c^{x-2}}{f \cdot k} \quad (7.31)$$

A confiabilidade das expressões (7.28) a (7.31) pode ser verificada nos pontos (2) e (4) da figura 7.2. No ponto (2), o custo (C_t) é mínimo, implicando que sua derivada (C_t') deverá se tornar igual a zero. Da expressão (7.31) na condição de $C_t' = 0$ vem:

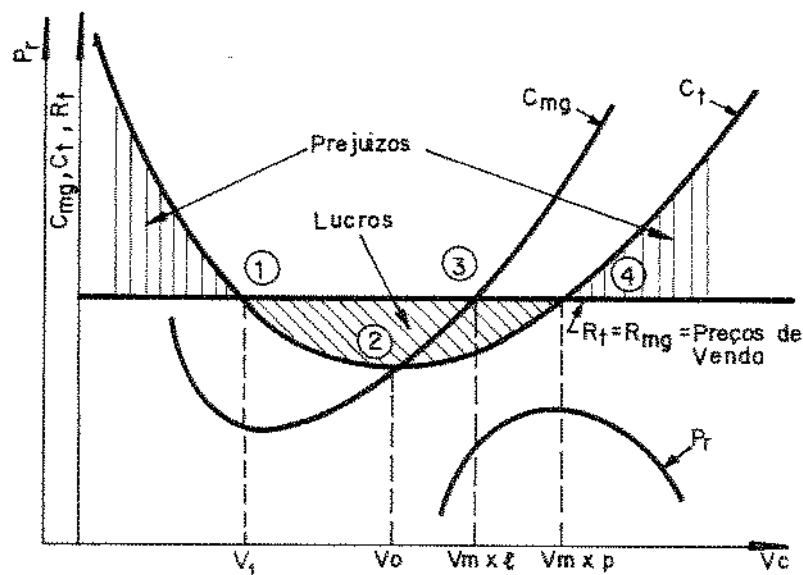


Figura 7.2 - Curvas de produção (P_r), custo (C_t), custo marginal (C_{mg}) e Receita (R_t) versus velocidade de corte (V_c), [14]

$$\frac{524 \cdot 10^{-7} \text{ d. } C_2}{f} \left[\frac{V_c^{x-2} t_{ft}(x-1)\ell}{k} - \frac{(\ell+e)}{V_c^2} \right] = - \frac{314 \cdot 10^{-5} \text{ d. } \ell \cdot C_{fT}(x-1) V_c^{x-2}}{f \cdot k} \quad (7.32)$$

A expressão da velocidade de corte (V_c) que torna esta igualdade é dada por:

$$V_c = \sqrt[3]{\frac{C_2 K (\ell+e)}{(x-1)(C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}) \ell}} \quad (7.33)$$

que é a própria expressão da velocidade de mínimo custo (V_o) (5.42). No ponto (4), a taxa de produção é máxima, o que corresponde a um tempo (t_t) mínimo, implicando que sua derivada (t_t') deverá se tornar igual a zero. Da expressão (7.30) na condição de $t_t' = 0$ vem:

$$\frac{31416 \cdot 10^{-7}}{f} d \left[\frac{V_c^{x-2} t_{ft}(x-1)l}{k} - \frac{(l+e)}{V_c^2} \right] = 0 \quad (7.34)$$

A expressão da velocidade de corte (V_c) que resolve esta equação é dada por:

$$V_c = \sqrt[3]{\frac{k(l+e)}{(x-1)t_{ft}l}} \quad (7.35)$$

que é a própria expressão da velocidade de corte de máxima produção (V_{mxp}) (5.41).

Observações:

- 1 - Na aplicação das expressões de (7.28) a (7.31), utilizar o máximo avanço disponível da máquina-ferramenta (torno), avanço este que deve ser compatível com a potência da máquina e com o acabamento superficial da peça [5,43].
- 2 - No torneamento das peças, utilizar sempre que possível a relação a_p/f entre (6-10) [5].
- 3 - A velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) encontra-se nas vizinhanças do valor médio entre V_o e V_c^* médio, onde $V_c^* \text{ médio} = \frac{V_o + V_{mxp}}{2}$ [48], facilitando sobremaneira a procura desta velocidade em tornos com variação contínua de velocidades.

7.3 - Expressões dos tempo (t_t), custo (C_t), derivadas (t_t') e (C_t') para os demais processos mecânicos de usinagem.

7.3.1 - Aplainamento (Figura 5.6)

$$t_t = \frac{\ell t_{ft} v_c^x}{K} + (\ell + 2a' + 2e) \frac{1}{v_c} + (t_a + t_s + t_{p/Z} - t_{ft/Z}) \quad (7.36)$$

$$C_t = \frac{(60C_{fT} + C_2 t_{ft}) \ell}{K} v_c^x + C_2 (\ell + 2a' + 2e) \frac{1}{v_c} + \frac{C_2}{60} (t_a + t_s - t_{ft/Z}) + \frac{t_p C_3}{Z} \quad (7.37)$$

$$t_t^* = \frac{\ell t_{ft} x v_c^{x-1}}{K} - (\ell + 2a' + 2e) \frac{1}{v_c^2} \quad (7.38)$$

$$C_t^* = \frac{(60C_{fT} + C_2 t_{ft}) \ell}{K} v_c^{x-1} \cdot x - C_2 (\ell + 2a' + 2e) \frac{1}{v_c^2} \quad (7.39)$$

Nas expressões (7.36) a (7.39), $a' = a_p \cotg x_r$, $e = a$ (mm), $a = a_p \cotg x_r^*$

7.3.2 - Furação em cheio passante (Figura 5.7)

$$t_t = \frac{\ell t_{ft}}{K} v_c^x + \frac{\pi d (a' + \ell + e)}{1000 f} \frac{1}{v_c} + (t_a + t_s + t_{p/Z} - t_{ft/Z}) \quad (7.40)$$

$$C_t = \frac{\ell}{60K} (60C_{fT} + C_2 t_{ft}) v_c^x + \frac{\pi d C_2}{60000 f} (a' + \ell + e) \frac{1}{v_c}$$

$$+ \frac{C_2}{60} (t_s + t_a - t_{ft}/Z) + \frac{t_p C_3}{Z} \quad (7.41)$$

$$t_t^* = \frac{\ell^* t_{ft}}{K} \times V_c^{x-1} - \frac{\pi d (\ell^* + a^* + e)}{1000 f} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.42)$$

$$C_t^* = \frac{\ell^*}{60K} (60C_{fT} + C_2 t_{ft}) \times V_c^{x-1} - \frac{\pi d C_2}{60000 f} (a^* + \ell^* + e) \frac{1}{V_c^2} \quad (7.43)$$

Nas expressões (7.40) a (7.43), $e = a + \Delta$, $a \cong a^* = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d}{2} \text{Tgx}_r$ (Figura 5.7).

7.3.3 - Furação em cheio não passante (Figura 5.8)

$$t_t = \frac{\ell^* t_{ft}}{K} V_c^x + \frac{\pi d (a^* + \ell^* + \Delta)}{1000 f} \frac{1}{V_c} + (t_a + t_s + t_p/Z - t_{ft}/Z) \quad (7.44)$$

$$C_t = \frac{\ell^*}{60K} (60C_{fT} + C_2 t_{ft}) V_c^x + \frac{\pi d C_2}{60000 f} (\ell^* + a^* + \Delta) \frac{1}{V_c} + \frac{C_2}{60} (t_s + t_a - t_{ft}/Z) + \frac{t_p C_3}{Z} \quad (7.45)$$

$$t_t^* = \frac{\ell^* t_{ft}}{K} V_c^{x-1} \times x - \frac{\pi d (a^* + \ell^* + \Delta)}{1000 f} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.46)$$

$$C_t^* = \frac{\ell^*}{60K} (60C_{fT} + C_2 t_{ft}) \times V_c^{x-1}$$

$$- \frac{\pi d C_2}{60000 f} (\ell^* + a^* + \Delta) \frac{1}{V_c^2} \quad (7.47)$$

Nas expressões (7.44) a (7.47), $a^* \cong (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d}{2} \text{ Tg} \alpha_r$ (Figura 5.8).

7.3.4 - Furação com pré-furação (Fig. 5.9)

$$t_t = \frac{\ell}{K} \frac{t_{ft}}{V_c^x} + \frac{\pi d (a^* + \ell + e)}{1000 f} \frac{1}{V_c} + \left[t_a + t_s + t_{p/Z} - \frac{t_{ft}}{Z} \right] \quad (7.48)$$

$$C_t = \frac{\ell}{60K} (60C_{fT} + C_2 t_{ft}) V_c^x + \frac{\pi d C_2}{60000 f} (\ell + a^* + e) \frac{1}{V_c} + \frac{C_2}{60} (t_s + t_a - t_{ft/Z}) + \frac{t_p C_3}{Z} \quad (7.49)$$

$$t_t^* = \frac{\ell}{K} \frac{t_{ft}}{V_c^x} \times V_c^{x-1} - \frac{\pi d (a^* + \ell + e)}{1000 f} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.50)$$

$$C_t^* = \frac{\ell}{60K} (60C_{fT} + C_2 t_{ft}) \times V_c^{x-1} - \frac{\pi d C_2}{60000 f} (\ell + a^* + e) \frac{1}{V_c^2} \quad (7.51)$$

Nas expressões (7.49) a (7.51), $e = a + \Delta$, $a \cong a^* = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d - d_0}{2} \text{ Tg} \alpha_r$ (Figura 5.9).

7.3.5 - Furação escalonada (Figura 5.10)

$$t_t = \frac{\ell}{K} \frac{t_{ft}}{V_c^x} + \frac{\pi d^* (a^* + e + \ell)}{1000 f} \frac{1}{V_c} + \left(t_a + t_s + t_{p/Z} - \frac{t_{ft}}{Z} \right) \quad (7.52)$$

$$C_t = \frac{\ell}{60K} (60C_{fT} + C_2 t_{ft}) V_c^x + \frac{\pi d^* C_2}{60000 f} (a^* + e + \ell) \frac{1}{V_c} + \frac{C_2}{60} \left(t_s + t_a + t_{ft/Z} \right) + \frac{t_p C_3}{Z} \quad (7.53)$$

$$t_t^* = \frac{\ell}{K} \frac{t_{ft}}{V_c^x} - \frac{\pi d^* (a^* + e + \ell)}{1000 f} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.54)$$

$$C_t^* = \frac{\ell}{60K} (60C_{fT} + C_2 t_{ft}) V_c^{x-1} - \frac{\pi d^* C_2 (a^* + e + \ell)}{60000 f} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.55)$$

Nas expressões (7.52) a (7.55), $e = a + \Delta$, $a \cong a^* = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d^*}{2} \tan \alpha_r$ (Figura 5.10).

7.3.6 - Alargamento cilíndrico (Figura 5.11)

$$t_t = \frac{\ell}{Z^* K} \frac{t_{ft}}{V_c^x} + \frac{\pi d (a^* + e + \ell)}{1000 f_z Z^*} \frac{1}{V_c} + \left(t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{t_{ft}}{Z} \right) \quad (7.56)$$

$$C_t = \frac{(60C_{fT} + C_2 t_{ft}) \ell}{60 Z^* K} V_c^x + \frac{\pi d C_2 (a^* + e + \ell)}{60000 f_z Z^*} \frac{1}{V_c}$$

$$+ \frac{C_2}{60} \left[t_a + t_s - \frac{t_{ft}}{Z} \right] + \frac{t_p C_3}{Z} \quad (7.57)$$

$$t_t^* = \frac{\ell t_{ft}}{Z^* K} \times V_c^{x-1} - \frac{\pi d (a^* + e + \ell)}{1000 f_z Z^*} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.58)$$

$$C_t^* = \frac{(60 C_{fT} + C_2 t_{ft}) \ell V_c^{x-1}}{60 Z^* K} \times$$

$$- \frac{\pi d C_2 (a^* + e + \ell)}{60000 f_z Z^*} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.59)$$

Nas expressões (7.56) a (7.59), $e = a + \Delta$, $a \cong a^* = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d^* - d}{2} \tan \alpha_r$ (Figura 5.11).

7.3.7 - Roscamento cilíndrico (Figura 5.12)

$$t_t = \frac{\ell t_{ft}}{K} V_c^x + \frac{\pi d (a^* + e + \ell)}{1000 p} \frac{1}{V_c} +$$

$$+ \left[t_a + t_s + \frac{t_p}{Z} - \frac{t_{ft}}{Z} \right] \quad (7.60)$$

$$C_t = \frac{\ell}{60K} (60 C_{fT} + C_2 t_{ft}) V_c^x + \frac{\pi d C_2 (a^* + e + \ell)}{60000 p} \frac{1}{V_c} +$$

$$+ \frac{C_2}{60} \left[t_s + t_a - \frac{t_{ft}}{Z} \right] + \frac{t_p C_3}{Z} \quad (7.61)$$

$$t_t^* = \frac{\ell t_{ft}}{K} \times V_c^{x-1} - \frac{\pi d (a^* + e + \ell)}{1.000 p} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.62)$$

$$C_t^* = \frac{\ell}{60K} (60 C_{fT} + C_2 t_{ft}) \times V_c^{x-1} +$$

$$= \frac{\pi d C_2 (a' + e + \ell)}{60000 p} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.63)$$

Nas expressões (7.60) a (7.63), $e = a + \Delta$, $a \cong a' = (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$ e $\Delta = \frac{d-d'}{2} \tan \alpha_r$ (Figura 5.12)

7.3.8 - Fresamento frontal (Figura 5.13)

$$t_t = \frac{\ell t_{ft}}{Z' K} V_c^x + \frac{\pi d (a' + e + \ell)}{1000 f_z Z'} \frac{1}{V_c} + \left[t_a + t_s + t_p / Z - \frac{t_{ft}}{Z} \right] \quad (7.64)$$

$$C_t = \frac{\ell}{60 K Z'} (60 C_{fT} + C_2 t_{ft}) V_c^x + \frac{\pi d C_2 (a' + e + \ell)}{60000 f_z Z'} \frac{1}{V_c} + \frac{C_2}{60} \left[t_s + t_a - \frac{t_{ft}}{Z} \right] + \frac{t_p C_3}{Z} \quad (7.65)$$

$$C_t' = \frac{\ell}{60 K Z'} (60 C_{fT} + C_2 t_{ft}) \times V_c^{x-1} + \frac{\pi d C_2 (a' + e + \ell)}{60000 f_z Z'} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.66)$$

$$t_t' = \frac{\ell t_{ft}}{Z' K} \times V_c^{x-1} + \frac{\pi d (a' + e + \ell)}{1000 f_z Z'} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.67)$$

Nas expressões (7.64) a (7.67), $a' \cong (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$, $e = (d+1) \text{ mm}$

7.3.9 - Fresamento tangencial (Figura 5.14)

$$t_t = \frac{\ell \cdot t_{ft}}{Z^* K} V_c^x + \frac{\pi d (a^* + e + \ell)}{1000 f_z Z^*} \frac{1}{V_c} +$$

$$+ \left(t_a + t_s + t_{p/Z} - \frac{t_{ft}}{Z} \right) \quad (7.68)$$

$$C_t = \frac{\ell}{60 K Z^*} (60 C_{fT} + C_2 t_{ft}) V_c^x + \frac{\pi d C_2 (a^* + e + \ell)}{60000 f_z Z^*} \frac{1}{V_c} +$$

$$+ \frac{C_2}{60} \left(t_s + t_a - \frac{t_{ft}}{Z} \right) + \frac{t_p C_3}{Z} \quad (7.69)$$

$$C_t^* = \frac{\ell}{60 K Z^*} (60 C_{fT} + C_2 t_{ft}) x V_c^{x-1} - \frac{\pi d C_2 (a^* + e + \ell)}{60000 f_z Z^*} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.70)$$

$$t_t^* = \frac{\ell \cdot t_{ft}}{Z^* K} x V_c^{x-1} + \frac{\pi d (a^* + e + \ell)}{1000 f_z Z^*} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.71)$$

Nas expressões (7.68) e (7.71), $a^* = \left[\sqrt{d \cdot a_p^2 - a_p^2} + 1 \right]$ mm, $a \cong (2 \text{ a } 5)$ mm [44] (Figura 5.14).

7.3.10 - Brochamento (Figura 5.15)

$$t_t = \frac{\ell \cdot t_{ft}}{K} V_c^x + \frac{2 (a^* + e + \ell)}{Z^*} \frac{1}{V_c}$$

$$+ \left(t_a + t_s + t_{p/Z} - \frac{t_{ft}}{Z} \right) \quad (7.72)$$

$$C_t = \frac{(60 C_{fT} + C_2 t_{ft}) \ell}{K} V_c^x + \frac{2 C_2 (a^* + e + \ell)}{Z^*} \frac{1}{V_c}$$

$$+ \frac{C_2}{60} \left[t_a + t_s - t_{ft}/Z \right] + \frac{t_p C_3}{Z} \quad (7.73)$$

$$t_t^* = \frac{\ell t_{ft} \times V_c^{x-1}}{K} - \frac{2(a' + e + \ell)}{Z^*} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.74)$$

$$C_t^* = \frac{(60C_{f1} + C_2 t_{ft}) \ell \times V_c^{x-1}}{K} - \frac{2C_2(a' + e + \ell)}{Z^*} \frac{1}{V_c^2} \quad (7.75)$$

Nas expressões (7.72) a (7.75), $a' \cong (1 \text{ a } 2) \text{ mm}$, $a = (\ell' + 1) \text{ mm} =$

7.4 - Determinação da Velocidade de máximo lucro ($V_{mx\ell}$) no torneamento de peças de uma empresa de grande porte, em regime de mercado de concorrência perfeita (Figura 7.3)

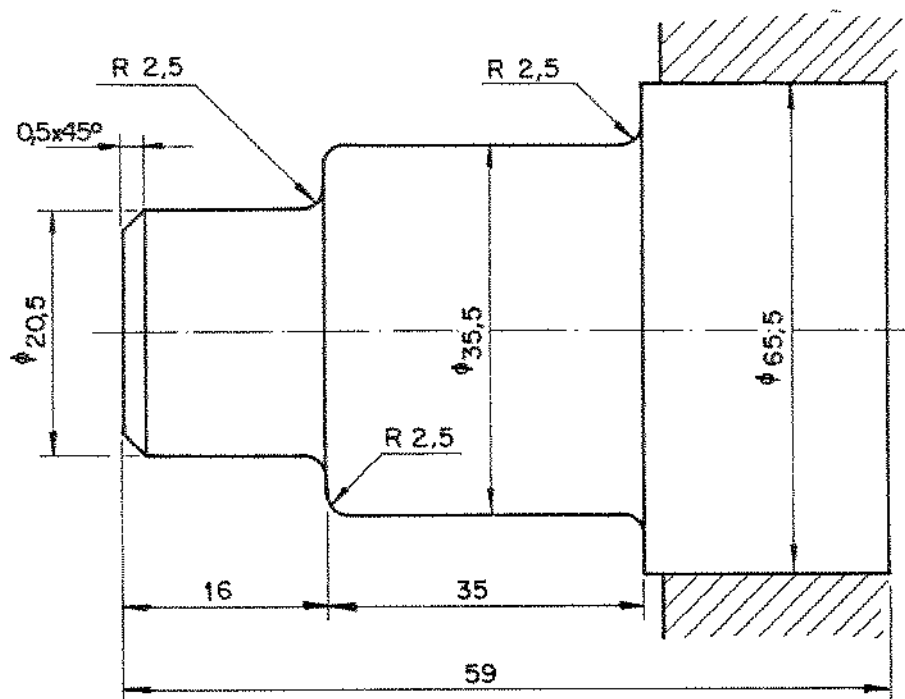


Figura 7.3 - Dimensões da peça usinada (desbaste) sendo 6 passes de $a_p = 2,5 \text{ mm}$ e $\ell = 51 \text{ mm}$ e 3 passes de $a_p = 2,5 \text{ mm}$ em $\ell = 16 \text{ mm}$.

7.4.1 - Característica da máquina

Torno CNC RDMI, modelo Galaxy, com variação contínua de velocidades (30 à 2900 rpm) e potência de 20 cv.

7.4.2 - Característica do material

ABNT 1015, laminado, $H_B = 125$ fornecido em TARUGOS $\phi 65,5 \times 59$.

7.4.3 - Característica da Ferramenta

7.4.3.1 - Porta-pastilhas: PCLNR 2525 M12 (Fabricante SANDVIK)

7.4.3.2 - Pastilha: CNMG 120408, Classe GC - 435 com Triplo revestimento (TiC/ Al_2O_3 /TiN), em substrato P_{35} , (Fabricante SANDVIK).

7.4.4 - Condições de usinagem

Velocidade de corte (V_c) = 290 m/min
 Avanço (f) = 0,3 mm/volta
 Profundidade de corte (a_p) = 2,5 mm
 Fluido de corte = óleo solúvel

7.4.5 - Dados de custos e tempos fornecidos pela empresa

- Custo da hora máquina (C_m)	= NCz\$ 58,30/h
- Salário do operador+encargos sociais (S_o)	= NCz\$ 50,00/h
- Custo do porta-pastilhas (V_{of})	= NCz\$ 1425,00
- Custo da pastilha (C_p)	= NCz\$ 116,00
- Tempo de troca da ferramenta (t_{ft})	= 0,5 min
- Tempo de aproximação e afastamento da Ferramenta à posição inicial (t_a)	= 0,072 min
- Tempo de preparação da máquina (t_p)	= 36 min
- Tempo secundários (t_s)	= —
- Tamanho do lote (Z)	= 79 peças

- Critério de fim de vida = lascamento do revestimento na ponta de corte.
- Valor da BTN em janeiro/90 = NCz\$ 10,9518

7.4.6 - Cálculo da velocidade de corte de mínimo custo (V_o)

$$V_o = \sqrt[4]{\frac{C_2 K(\ell + e)}{(x-1)(C_2 t_{ft} + 60 C_{fT}) \ell}} \quad (5.41)$$

os valores de x e K para o par ferramenta - peça GC-435-1015 e avanço $f = 0,3$ mm/volta são 4,9 e $1,74 \cdot 10^{13}$ [49], respectivamente. O valor de e na expressão é 2 mm conforme programa NC da peça. Desta forma, para facilidade de cálculo, o valor de $e = 2$ mm será desprezado na presença do valor $\ell = 354$ mm.

$$V_o = \sqrt[4]{\frac{108,3 \cdot 1,74 \cdot 10^{13}}{(4,9-1)(108,3 \cdot 0,5 + 60 \cdot 31,37)}} = 211$$

$$V_o = 211 \text{ m/min}$$

7.4.7 - Cálculo da velocidade de corte de máxima produção (V_{mxp})

$$V_{mxp} = \sqrt[4]{\frac{K(\ell + e)}{(x-1)t_{ft} \ell}} \quad (5.40)$$

vide consideração conforme item 7.4.6.

$$V_{mxp} = \sqrt[4]{\frac{1,74 \cdot 10^{13}}{(4,9-1)0,5}} = 439$$

$$V_{mxp} = 439 \text{ m/min}$$

7.4.8 - Cálculo do diâmetro médio (d)

$$d_1 = \frac{65,5 + 60,5}{2} = 63 \text{ mm}$$

$$d_2 = \frac{65,5+55,5}{2} = 58 \text{ mm}$$

$$d_3 = \frac{55,5+50,5}{2} = 53 \text{ mm}$$

$$d_4 = \frac{50,5+45,5}{2} = 48 \text{ mm}$$

$$d_5 = \frac{45,5+40,5}{2} = 43 \text{ mm}$$

$$d_6 = \frac{40,5+35,5}{2} = 38 \text{ mm}$$

$$d_7 = \frac{35,5+30,5}{2} = 33 \text{ mm}$$

$$d_8 = \frac{30,5+25,5}{2} = 28 \text{ mm}$$

$$d_9 = \frac{25,5+20,5}{2} = 23 \text{ mm}$$

$$C = 1 + 3,32 \log n \quad [50] \quad (7.76)$$

$$C = 1 + 3,32 \log 9$$

$$C = 4$$

$$h = \frac{\bar{R}}{C} \quad [50] \quad (7.77)$$

$$h = \frac{63-23}{4} = 10$$

$$h = 10$$

$$\bar{x} = A + h \left[\frac{\sum (f \cdot d^*)}{\sum f} \right] \quad [50] \quad (7.78)$$

Classes de diâmetro	Frequência (f)	d*	f . d*
23 - 33	2	-3	-6
33 - 43	2	-2	-4
43 - 53	2	-1	-2
53 - 63	3	0	0
	$\Sigma f = 9$		$\Sigma(f . d^*) = -12$

$$\bar{x} = \frac{63+53}{2} + 10 \left(-\frac{12}{9} \right) = 44,67$$

$$\bar{x} = d = 44,67 \text{ mm}$$

7.4.9 - Cálculo da Velocidade de corte de máximo lucro ($V_{mx\ell}$)

Da expressão,

$$t_t^* (R_t - C_t) = -t_t C_t^*$$

para $R_t = (C_t)_{V_{mxp}} = (C_t)_{439} = 21,69$ vem:

$$t_t^* (21,69 - C_t) = -t_t C_t^* \quad (7.79)$$

De maneira iterativa, a velocidade de corte (V_c) que satisfaz a expressão (7.79) é a velocidade de corte $V_c = 267 \text{ m/min}$.

Da expressão (7.79) pela substituição de V_c por $V_c = 267 \text{ m/min}$ vem:

$$t_t^* = -0,0021201$$

$$C_t = 16,9401$$

$$C_t^* = -0,0088399$$

$$t_t = 1,15541$$

Substituindo estes valores em (7.79) tem-se:

$$-0,0021201 (21,69 - 16,84) = -1,15541 \cdot 0,0088399$$

$$-0,0102823 \times -0,0102137$$

$$R^* = \frac{0,0102823}{0,0102137} = 1,0067$$

e

$$R^* = 0,67\%$$

7.4.10 - Programa computacional que permite obter a velocidade de máximo lucro (U_{mxl}) no torneamento.

```

10 CLEAR
20 PRINT "CÁLCULO DE VMXL"
30 INPUT "X"; X
35 INPUT "Tft"; T
40 INPUT "K"; K
45 INPUT "DIAMETRO"; D
50 INPUT "Lf"; L
55 INPUT "f"; F
60 INPUT "Ta"; A1
65 INPUT "Tp"; A2
70 INPUT "z"; Z
80 INPUT "Ts"; A3
85 INPUT "Cft"; H
90 INPUT "C2"; A4
100 A7=A*K/((X-1)*(A4*T+60*H))
110 A7=A7^(1/X)
120 A8=(K/((X-1)*T))^(1/X)
130 A7=INT(A7):AB= INT(AB)
140 PRINT "V0="; A7
150 PRINT "VMXP="AB
160 S=1.701412E+38
170 INPUT "Rt"; R
180 FOR V=A7 TO A8 STEP 1
185 W1=W:U1=U:Y1=Y:J1=J
190 GOSUB 1900
330 IF ABS(N)>S THEN 380
340 S=ABS(N)
350 NEXT V
360 PRINT "NAO FOI ENCONTRADA VMXL"
370 GOTO 460
380 S1=U1*(R-J1)
385 S2=W1*Y1
390 IF ABS(S1)>ABS(S2) THEN 405
395 S3=ABS(S2)/ABS(S1)
400 GOTO 410
405 S3=ABS(S1)/ABS(S2)
410 L1=R-J1
415 L2=L1/W1
420 PRINT "VMXL=";V-1
425 PRINT "Tt=";W1
430 PRINT "Tt=";U1
435 PRINT "Ct=";J1
440 PRINT "Cl*=";Y1

```

```

445 PRINT "Lt=",L1
450 PRINT "LR=",L2
455 PRINT "RAZAO=",S3
460 INPUT "VOCE QUER VARIAR A RECEITA (S/N)",Q$
465 IF Q$="S" THEN 160
470 INPUT "VOCE QUER TESTAR OUTRAS VELOCIDADES ?(S/N)",X$
480 IF X$="S" THEN 500
490 END

500 INPUT "RT",R
510 INPUT "RT",V
520 GOSUB 1900
530 S1=U*(R-J)
540 S2=W*Y
550 IF ABS(S1)>ABS(S2) THEN 580
560 S3=ABS(S2)/ABS(S1)
570 GOTO 590
580 S3=ABS(S1)/ABS(S2)
590 L1=R-J
600 L2=L1/W
610 PRINT "Tt=",W
620 PRINT "Tt'=",U
630 PRINT "Ct=",J
640 PRINT "Ct'=",Y
650 PRINT "LP=",L1
660 PRINT "LR=",L2
670 PRINT "RAZAO=",S3
675 GOTO 470
680 END

1900 A= .0031416*D*L/F
2000 M=V^(X-1)*T/(K+1/V
2100 B=A1+A2/Z+A3-T/
2200 W=A*M+B
2300 C=.0000524*D*L*A4/F
2400 G=.0166667*A4*(B-A2/Z)
2500 A5=H+T*A4/60
2600 E=A2*A5/Z
2700 A6=.00314*D*L*H/(F*K)
2800 J=C*M+G+E+A6*V^(X-1)
2900 Q=V^(X-2)*T*(X-1)/K-1/V^2
3000 Y=Q*C+A6*(X-1)*V^(X-2)
3100 U=A*Q
3200 N=U*(R-J)+W*Y
3210 RETURN

```

As Tabelas 7.1 e 7.2 apresentam valores de velocidades de corte (V_c) (Coluna 2), tempo total (t_t) (coluna 3), custo total (C_t) (Coluna 4), derivada do tempo total (t_t') (coluna 5), derivada do custo total (C_t') (coluna 6), lucro por peça (C_p) (coluna 7), razão de lucro (L_R) (coluna 8) e razão (R') (coluna 9) para receita constante (R_t) = 21,69 (coluna 1), (Tabela 7.1) e receitas variáveis (R_t) (coluna 1), Tabela 7.2.

Tabela 7.1 - Valores de velocidades de Corte (V_c), Tempos (T_t), Custos (C_t), Derivadas (T_t' e C_t'), Lucros por Peça (L_p), Razão de lucros (L_r) e Razão (R'), para a receita constante: $R_t = \text{Ncz\$ } 21,69$

R_t	V_c	T_t	C_t	T_t'	C_t'	L_p	L_r	R'
21.69	211	1.311703	16.60131	-3.6174×10^{-3}	1.3196×10^{-4}	5.088669	3.87946	106.345
21.69	230	1.249078	16.62664	-2.9993×10^{-3}	2.8034×10^{-3}	5.06337	4.05368	4.33685
21.69	250	1.194451	16.71428	-2.4825×10^{-3}	5.9856×10^{-3}	4.97572	4.16570	1.72776
21.69	267	1.155407	16.84006	-2.1200×10^{-3}	8.8399×10^{-3}	4.84994	4.19761	1.00708
21.69	270	1.149132	16.86736	-2.0629×10^{-3}	9.3619×10^{-3}	4.82264	4.19677	1.08138
21.69	290	1.111477	17.09057	-1.7123×10^{-3}	1.3009×10^{-2}	4.59944	4.13813	1.83595
21.69	318	1.080308	17.38994	-1.4116×10^{-3}	1.6988×10^{-2}	4.30006	3.98040	3.02334
21.69	330	1.054771	17.77263	-1.1472×10^{-3}	2.1349×10^{-2}	3.91737	3.71396	5.01092
21.69	370	1.018293	18.82125	-9.0887×10^{-4}	2.6138×10^{-2}	3.44324	3.32922	8.63815
21.69	400	1.002268	19.89255	-3.8258×10^{-4}	4.0266×10^{-2}	1.79745	1.79338	58.6283
21.69	420	0.996578	20.7612	-1.8720×10^{-4}	0.0468	0.92818	0.93137	268.4019
21.69	439	0.994757	21.690	-4.8116×10^{-5}	5.3580×10^{-2}	0	0	450943.6

Tabela 7.2 - Valores de velocidades de Corte (V_c), Tempo (T_t), Custo (C_t), Derivadas (T_t' e C_t'), Lucro por Peça (L_p), Razão de lucro (L_r) e Razão (R'), para a receitas variáveis.

R_t	V_c	T_t	C_t	T_t'	C_t'	L_p	L_r	R'
16.55	211	1.311703	16.60131	-3.6174×10^{-3}	1.3196×10^{-1}	-5.1308×10^{-2}	-3.9115×10^{-2}	1.07225
18.00	230	1.240209	16.63575	-2.9142×10^{-3}	3.2720×10^{-3}	1.36425	1.0002	1.02071
21.00	254	1.184703	16.73953	-2.3919×10^{-3}	6.6426×10^{-3}	3.26047	2.75214	1.00907
21.00	262	1.166260	16.79801	-2.2211×10^{-3}	7.9828×10^{-3}	4.20199	3.60296	1.00249
21.69	267	1.155407	16.84006	-2.1208×10^{-3}	8.8399×10^{-3}	4.84994	4.19761	1.00708
27.00	297	1.09988	17.18634	-1.6022×10^{-3}	1.4361×10^{-2}	9.81366	8.92249	1.00459
30.00	309	1.081727	17.37306	-1.4257×10^{-3}	1.6780×10^{-2}	12.6269	11.6726	1.00829

Rt	Vc	Tt	Ct	Tt'	Ct'	Lp	Lr	R'
35.00	324	1.061881	17.68461	-1.2234×10^{-3}	0.0200	17.3514	16.3402	1.00039
40.00	336	1.048111	17.90487	-1.0733×10^{-3}	2.2739×10^{-2}	22.0951	21.0951	1.00498
45.00	345	1.038935	18.11917	-9.6644×10^{-4}	2.4898×10^{-2}	26.8808	25.8735	1.00429
50.00	353	1.831571	18.32629	-8.7490×10^{-4}	2.6890×10^{-2}	31.6737	38.7043	1.00119
60.00	365	1.021872	18.66771	-7.4273×10^{-4}	3.0033×10^{-4}	41.3323	40.4476	1.00030
70.00	374	1.01560	18.94982	-6.4701×10^{-4}	3.2502×10^{-2}	51.0510	50.2659	1.00063
80.00	381	1.011346	19.18347	-5.7425×10^{-4}	3.4474×10^{-2}	60.8165	60.1343	1.00112
98.00	387	1.008085	19.39569	-5.1289×10^{-4}	3.6252×10^{-2}	70.6043	70.0380	1.00919
100.00	391	1.006115	19.54309	-4.7244×10^{-4}	3.7450×10^{-2}	80.4569	79.9679	1.00881
120.00	398	1.003053	19.81272	-4.0242×10^{-4}	3.9599×10^{-2}	100.187	99.8824	1.01505
140.00	404	1.000817	20.05598	-3.3409×10^{-4}	4.1495×10^{-2}	119.846	119.846	1.00917
160.00	408	0.999523	20.22454	-3.0383×10^{-4}	4.2786×10^{-2}	139.842	139.842	1.00701
180.00	411	0.998656	20.35456	-2.7452×10^{-4}	4.3770×10^{-2}	159.646	159.861	1.00265
200.00	414	0.997876	20.48716	-2.4532×10^{-4}	4.4766×10^{-2}	179.513	179.895	1.01436
210.00	415	0.997635	20.53211	-2.3561×10^{-4}	4.5101×10^{-2}	189.468	189.917	1.00792
300.00	422	0.996223	20.85619	-1.6790×10^{-4}	4.7485×10^{-2}	279.144	288.202	1.00935
310.00	422	0.996223	20.85611	-1.7486×10^{-4}	4.7486×10^{-2}	289.144	290.240	1.02622
400.00	426	0.995629	21.0498	-1.2938×10^{-4}	4.8881×10^{-2}	378.951	380.615	1.00745
439.00	427	0.995504	21.09797	-1.1977×10^{-4}	4.9234×10^{-2}	417.902	419.789	1.02124
5560	439	0.994757	21.7146	-4.8116×10^{-5}	5.3500×10^{-2}	5538.28	5567.48	2.00134

caso deseja-se determinar a velocidade de corte V_1 (Figura 7.2), velocidade esta abaixo da qual tem-se prejuízos, deve ter-se o seguinte procedimento:

Variar V_c incrementalmente desde V_0 até V_1 , de modo que ao atingir V_1 , a expressão (7.78) se reproduza:

$$(C_t)V_1 = (C_t)V_{mxp} = R_t \quad (7.80)$$

Na aplicação prática em questão, o valor desta velocidade (V_1) é de 43.56 m/min, o que corresponde a uma rotação de 310 rpm

Nas tabelas 7.1 e 7.2, as velocidades de corte (V_c) são as próprias velocidades de máximo lucro (V_{mxl}), calculadas de acordo com o programa computacional apresentado no item 7.4.10.

A tabela 7.1 fornece os valores de $V_c = V_{mxl}$ para a receita $R_t = NCz21,69$.

A tabela 7.2 fornece os valores de $V_c = V_{mxl}$ para as receitas variáveis (R_t).

A faixa de rotação para o torno, nesta aplicação, em que se verifica somente lucros, é entre 310 a 2900 rpm.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho permite tirar as seguintes conclusões:

- 8.1 - As velocidades de corte e as vidas das ferramentas fornecidas pelas expressões apresentadas nos capítulos V e VI, respectivamente, mostram suas dependências com a curva de vida da ferramenta, comprimento usinado, sistema de troca de ferramenta, setup, custo (homem-máquina) e custo (vida da ferramenta + troca).
- 8.2 - Nos processos mecânicos do torneamento e aplainamento, as velocidades de corte e as vidas das ferramentas não dependem das dimensões das mesmas, o que não ocorre com os demais processos, onde a dimensão da ferramenta é grandeza significativa.
- 8.3 - Em aplicações práticas no torneamento, o termo $\frac{L}{V_c}$ que compõem as expressões das velocidades e vidas das ferramentas, pode ser negligenciado, todas as vezes, em que seu valor for muito pequeno, em comparação com o valor do comprimento usinado (L). Seu valor porém, não pode ser negligenciado, no torneamento de peças de pequeno comprimento, como por exemplo, na usinagem em tornos automáticos com alimentação contínua de barras.
- 8.4 - A velocidade de máximo lucro ($V_{\max \pi}$) obtida através da equação (7.15), representativa de empresas em regime de mercado de concorrência perfeita, a qual derivou da igualdade entre a receita marginal (RM_g) e o custo marginal (CM_g) é dependente dos coeficientes a^* , b^* e c^* e da receita (R_t) que é numericamente igual ao custo (C_t) para a velocidade de corte (V_c) = $V_{\max \pi}$. a^* , b^* e c^* são os coeficientes do custo marginal $CM_g = 3a^* V_c^2 - 2b^* V_c + c^*$.

8.5 - A velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) obtida através da equação (7.20), representativa de empresas em regime de mercado monopolístico, a qual derivou da igualdade entre a receita marginal (RM_g) e o custo marginal (CM_g) é dependente dos coeficientes a^* , b^* e c^* , da receita (R_t) = R_o , que é a receita para a velocidade de corte (V_c) = 0, e da velocidade (V_c) = V_o^* que é a velocidade para a receita (R_t) = 0. a^* , b^* e c^* são os coeficientes do custo marginal $CM_g = 3a^*V_c^2 - 2b^*V_c + c^*$.

8.6 - A velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) obtida através da equação (7.25), representativa de empresas em regime de mercado oligopolístico com "guerra de preços", a qual derivou da igualdade entre a receita marginal (RM_g) e o custo marginal (CM_g) é dependente dos coeficientes a^* , b^* e c^* , das receitas (R_t) = R_o e R_t = R^{**} e da velocidade (V_c) = V_c^* . As receitas R_o e R^{**} correspondem às da velocidades de corte (V_c) = 0 e ao do ponto de inflexão (G) da curva de receita marginal (RM_g), respectivamente (Figura 2.9). A velocidade de corte (V_c) = V_c^* , é a velocidade do ponto de inflexão (Q) da curva de procura (Figura 2.9). a^* , b^* e c^* são os coeficientes do custo marginal $CM_g = 3a^*V_c^2 - 2b^*V_c + c^*$.

8.7 - A velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) para empresas em regime de mercado de concorrência monopolística não pode ser obtida pela igualdade entre a receita marginal (RM_g) e o custo marginal (CM_g), pelo fato da receita marginal (RM_g) ficar explicitamente dependente da velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) através da expressão $R_{mg} = \left[\frac{R^{***} - R_o}{V_{mxl}} \right] V_c + R_o \cdot R^{***}$ e o valor da receita para a velocidade de corte (V_c) = (V_{mxl}). A luz da micro-economia, esta não determinação da velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) por este encaminhamento, se dá, pelo fato de não se poder avaliar o efeito propaganda na receita marginal (RM_g), o que a torna desconhecida nesta estrutura de mercado.

8.8 - A velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) obtida de maneira iterativa pelas expressões (7.12), (7.17), (7.22) e (7.25) representativas de empresas em diferentes estruturas de mercado, é dependente da curva de vida da ferramenta, comprimento usinado, tempos improdutivos, sistema de troca da ferramenta, setup, custo (homem-máquina), custo (vida da ferramenta + troca), dimensões da ferramenta, avanço e tamanho do lote. Sómente nos processos mecânicos do torneamento e aplainamento é que a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) independe das dimensões da ferramenta.

8.9 - A receita (R_t) na expressão geral $t_t' (R_t - C_t) = t_t (R_t' - C_t')$ que permite obter de maneira iterativa a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) é a receita gerada na usinagem, portanto, a receita na usinagem por peça. Isto importa em dizer que na composição dos custos (C_t), se se levar em conta os demais custos, como por exemplo, matéria prima, manuseio, energia elétrica, etc, a receita gerada refletirá bem de perto a receita por peça.

8.10 - A tabela 7.2 reflete bem o comportamento da receita (R_t) para empresas em regime de mercado de concorrência perfeita. Esta tabela fornece dados obtidos por simulações, a partir de dados obtidos em uma empresa em regime de mercado de concorrência perfeita, no torneamento. As simulações foram feitas, variando-se as velocidades de corte (V_c) desde $V_c = V_o = 211$ m/min até $V_c = V_{mxp} = 439$ m/min, calculando-se as receitas (R_t) correspondentes. Observa-se que para a velocidade de corte (V_c) = $V_{mxl} = 267$ m/min, o custo (C_t) = 16,84006 (NCz/peça) para uma receita (R_t) = 21,69 (NCz/peça) que é o próprio preço de venda. Para a velocidade de corte (V_c) = $V_{mxp} = 439$ m/min, o custo (C_t) = 21,7146 (NCz/peça) para uma receita (R_t) = 5560 (NCz/peça). Isto mostra lucros por peça diferentes obtidos para um mesmo produto. No caso de $V_c = V_{mxl} = 267$ m/min, o lucro por peça (L_p) = 4,84994 (NCz/peça). Para $V_c = V_{mxp} = 439$ m/min o lucro

, por peça (L_p) = 5538,28 (NCz/peça). Num mercado não especulativo, o lucro por peça (L_p) = 5538,28 (NCz/peça) seria impraticável; não haveria consumidor para este produto produzido por esta empresa nesta condição. O consumidor procuraria outras empresas fornecedoras do mesmo produto para adquiri-lo. A razão deste fato é de que a oferta e procura é que estabelece o preço de venda fazendo com que o vendedor não opere nem acima e nem abaixo deste preço. Nesta aplicação, o preço de venda do produto é de 21,69 (NCz/peça), permitindo portanto um lucro por peça (L_p) = 4,84994 (NCz/peça). O preço de venda de 21,69 (NCz/peça) é o preço de equilíbrio entre a oferta e procura.

8.11 - Das expressões (7.12), (7.17), (7.22) e (7.25) que permitem obter de maneira iterativa a velocidade de máximo lucro (V_{mxl}) em diferentes estruturas de mercado, em se tratando da usinagem, a expressão que tem sentido prático é a (7.12). As demais expressões são representativas de empresas que operam com produtos diferentes dos de remoção de cavacos. Caso venham a ser constituídas empresas produtoras de peças com remoção de cavacos e que se constituam em empresas diferentes das de livre concorrência, as expressões (7.17), (7.22) e (7.25) retratam bem esta grandeza.

8.12 - As tabelas 7.1 e 7.2 mostram a coerências dos resultados apresentados, inclusive com relação ao sinal algébrico na composição da expressão $t_t(R_t - C_t) = -t_t C_t'$. Na Tabela 7.1 está evidenciado, que nas simulações feitas, ao variar (V_c) desde $V_o = 211$ m/min até $V_{mxp} = 439$ m/min com a receita (R_t) constante e igual a 21,69 (NCz/peças), e superior aos valores apresentados pelos custos, o primeiro membro da expressão $t_t(R_t - C_t) = -t_t C_t'$ é sempre positivo. Por outro lado, como t_t é sempre (positivo), o segundo membro da expressão acima tem de se tornar positivo. Isto implica em C_t' ser (negativo), o que ocorre, conforme mostra a tabela 7.1

- 8.13 - A tabela 7.1, mostra também que para $(V_c) = V_o = 211$ m/min, o custo $C_t = 16,60131$ (NCz/peça) e sua derivada $C_t^* = +0,000132$. Teóricamente, este valor deveria ser zero, já que para $(C_t)_{\min} \rightarrow C_t^* = 0$. Esta pequena discrepância apresentada nos resultados, se explica pelo fato de se cometerem erros na determinação dos expoentes x e k da fórmula de Taylor e no tempo de troca da ferramenta (t_{ft}), quando no cálculo de C_t^* . Esta conclusão também é válida quando se analisa os resultados apresentados na Tabela 7.1 para o tempo de fabricação (t_t) e sua derivada (t_t^*), para a velocidade de corte $(V_c) = V_{mxp} = 439$ m/min

SUGESTÕES

- 8.14 - Levantamento das curvas de vida das ferramentas para as operações de aplainamento, alargamento, roscamento e brochamento, para dar sentido prático às expressões das velocidades de corte de mínimo custo (V_o) e máxima produção (V_{mxp}).
- 8.15 - Levantamento de dados práticos em empresas de grande porte e em regime de mercado de concorrência perfeita para as operações de furacão e fresamento, na determinação da velocidade de máximo lucro (V_{mxl}).

SIMBOLOGIA

- a - distância mínima de saída da ferramenta, em relação a face da peça, em avanço de usinagem (mm);
 α - ângulo de rampa da peça, em graus;
 a_p - profundidade de corte (mm);
 a^* - distância mínima de posicionamento da ferramenta, em relação à face da peça, em avanço de usinagem, antes do início de corte (mm);
 a^* - constante nas expressões para cálculo da velocidade de máximo lucro (V_{mxc});
 b^* - constante nas expressões para cálculo da velocidade de máximo lucro;
 C - distância de posicionamento da ferramenta, antes do início do corte, em avanço rápido (mm), número de classes da distribuição amostral dos diâmetros médios, velocidade de corte para a vida da ferramenta igual a 1 minuto, na fórmula simplificada de Taylor;
 Ca_f - custo de afiação da ferramenta por minuto (Cr\$/min);
 C_F - custos fixos de localização da máquina-ferramenta (Cr\$);
 C_{fe} - custo da ferramenta por peça (Cr\$/peça);
 CFM_e - custo fixo médio (Cr\$/peça);
 C_{fT} - custo da ferramenta por vida (Cr\$/vida);
 CFT - custo fixo total (Cr\$);
 C_M - custo da máquina por hora (Cr\$/h);

CM_g - custo marginal (Cr\$/peça);

C_p - custo atual da pastilha (Cr\$);

C_R - razão de custo (Cr\$/min);

C_t - custo total médio (Cr\$/peça);

CT - custo total (Cr\$);

CTM_e - custo total médio (Cr\$/peça);

C_{tc} - custo devido ao tempo de corte (Cr\$)

C_{ti} - custo devido aos tempos improdutivos (Cr\$/peça);

C_{tp} - custo devido ao tempo de preparação (CR\$/peça);

C_{tr} - custo de reposição das ferramentas (Cr\$/peça);

CVM_e - custo variável médio (CR\$/peça);

CVT - custo variável total (Cr\$);

C_t^* - derivada do custo total médio (C_t) em relação à velocidade de corte (V_c);

C^* - constante nas expressões para cálculo da velocidade de máximo lucro ($V_{m\lambda}$);

C_2 - custo (máquina + homem hora) (Cr\$/h);

C_3 - custo (ferramenta por vida + custo de troca) (Cr\$);

d - diâmetro médio, diâmetro da ferramenta (mm);

d_e - diâmetro equivalente (mm);

ϕ - ângulo de inclinação do copiador, em graus;

Δ - comprimento da ponta da broca, alargador e macho (mm);

d' - diâmetro menor da broca escalonada, diâmetro guia do alargador e macho (mm);

e - distância da ponta de corte da ferramenta, em relação à face da peça, na entrada ou saída, com a ferramenta em avanço de usinagem (mm);

f - avanço da ferramenta (mm/volta);

F_c - força de corte (N);

f_c - avanço do carro (mm/volta);

f_e - avanço equivalente (mm/volta);

f_t - avanço da ferramenta (mm/volta);

f_z - avanço por dente (mm);

h - espessura de corte (mm), amplitude da classe da distribuição amostral de diâmetros;

H - número de horas em atividade da máquinas por ano, por turno;

i - taxa mínima de atratividade para investimento no equipamento (%);

K - velocidade de corte para vida da ferramenta igual a 1 minuto na fórmula simplificada de Taylor;

KT - desgaste na superfície de saída na ferramenta (mm);

K_s - pressão específica de corte (N/mm^2);

K_{s1} - constante específica do metal para uma secção de corte de 1 mm de espessura por 1 mm de largura;

K^* - idade da máquina em anos;

K_1 - constante da fórmula expandida de Taylor;

l - comprimento usinado (mm);

l_f - percurso de avanço da ferramenta (mm);

l_{fc} - percurso de avanço do carro (mm);

L_p - lucro por peça (Cr\$);

L_R - razão de lucro (Cr\$/min);

l^* - comprimento do furo não passante (mm), comprimento da brocha (mm);

m - Número de fios de rosca por unidade de comprimento de rosca;

n - rotação do eixo-árvore (rpm), vida prevista para máquina em anos;

η - rendimentos da máquina - ferramenta (%);

n_f - número de vidas da ferramenta;

n_{fp} - vida média do porta-pastilhas, expresso em quantidades de arestas cortantes;

n_f^* - número de afiações já efetuados pela ferramenta;

n_p - número de arestas cortantes da pastilha;

P - passo da rosca (mm), preços (Cr\$);

P_M - potência fornecida pelo motor (W);

P_r - número de peças produzidas por hora;

q - quantidades produzidas;

R - coeficiente adimensional que correlaciona o tempo de corte da ferramenta padrão, com o tempo total de corte, raio da ponta da ferramenta (mm);

$R_{\max}$ - rugosidade máxima (μm);

RM_g - receita marginal (Cr\$/peça);

R_0 - receita para a velocidade de corte (V_c) = 0 (Cr\$);

R_R - razão de receita (Cr\$/min);

R_t - receita total média (Cr\$/peça);

RT - receita total (Cr\$);

R_t^* - derivada da receita total média (R_t) em relação a velocidade de corte (V_c);

$\bar{R}$ - Amplitude da distribuição amostral de diâmetros;

R^* - receita para a velocidade de corte (V_c) = V_c^* , velocidade esta correspondente ao ponto de inflexão (G) da curva de receita marginal do oligopólio, (Cr\$);

R^{**} - receita para a velocidade de corte (V_c) = V_c^* , que corresponde ao ponto de inflexão (G) da curva de receita marginal do oligopólio Cr\$;

R^{***} - receita marginal para a velocidade de corte (V_c) = $V_{\max}$ para empresas em regime de mercado de concorrência monopolista (Cr\$);

S_0^* - salário do operário por hora (incluindo sobre - taxas) (Cr\$/h);

T - vida da ferramenta (min);

t_a - tempo de aproximação e afastamento da ferramenta à posição inicial (min/peça);

t_c - tempo total de corte (min/peça);

t_{ci} - tempo de corte da i -ésima ferramenta (min/peça);

t_{ft} - tempo de troca da ferramenta (min);

$(t_{ft})_{i,g}$ - tempo de troca da i -ésima ferramenta pertencente ao g -
ésima grupo (min);

T_o - vida da ferramenta para o mínimo custo (mm);

t_p - tempo de preparação da máquina para usinar Z peças (min);

t_r - tempo total de reposição das ferramentas (min/peças);

t_{ri} - tempo de reposição da i -ésima ferramenta (min/peça);

t_s - tempos secundários (min/peças);

t_t - tempo total de fabricação (min/peça);

t_t' - derivada do tempo total de fabricação (t_t) em relação à
velocidade de corte (V_c);

VB - desgaste na superfície principal de folga (mm);

VB_N - desgaste na superfície principal de folga, tipo entalhe (mm);

V_c - velocidade de corte (m/min);

V_e - velocidade de corte equivalente (m/min);

V_f - velocidade de avanço (mm/min);

V_{fc} - velocidade de avanço do carro (mm/min);

V_{mxf} - velocidade de máximo lucro (min/min);

V_{mxp} - velocidade de máxima produção (min/min);

V_o - velocidade de mínimo custo (min/min);

V_{of} - valor atual da ferramenta (Cr\$);

V_R - valor residual da máquina-ferramenta (Cr\$);

V_{Rf} - valor residual da ferramenta (Cr\$);

V_c^* - velocidade de corte correspondente ao ponto de inflexão (Q) da curva de procura da empresa em regime de mercado oligopolístico (m/min);

V_o^* - velocidade de corte (V_c) para a receita (R_t) = 0 (m/min);

V_o^* - valor atual da máquina (Cr\$);

V_1 - velocidade de corte abaixo da qual se têm prejuízos (m/min);

x - expoente das fórmulas simplificada e expandida de Taylor;

x_r - ângulo de posição da aresta principal de corte em graus;

x'_r - ângulo de posição de aresta lateral de corte em graus;

y - expoente das fórmulas simplificada e expandida de Taylor;

z - expoente da fórmula expandida de Taylor, tamanho do lote;

Z_T - número de peças usinadas por vida da ferramenta

Z_{T1} - número de peças usinadas por vida pela i -ésima ferramenta;

Z^* - números de dentes do Alargador, da fresa e da brocha;

Z^* - inclinação da reta $K_5 \times h$ em graus;

Z_T^* - número de peças usinadas por vida pela ferramenta-padrão;

W - vida da ferramenta para um avanço da ferramenta $f \equiv 1$ mm/volta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - NOVASKI, OLIVIO - Uma contribuição ao estudo das condições econômicas de usinagem. Faculdade de engenharia de campinas, 1983. Tese (mestrado) - Faculdade de engenharia da UNICAMP.
- [2] - BARNES, RALPH M - Estudo de movimentos e tiempos. São Paulo, Edgar Blücher, 1977.
- [3] - BARNES, RALPH M - Motion and time study: design and measurement of work. New York, John Wiley & sons, INC, 1968
- [4] - PEDRÓS, JOSÉ MARIA - Cálculo de los tiempos de fabricación para máquinas herramientas. Barcelona, labor, 1955.
- [5] - FERRARESI, DINO - Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo, Edgard Blücher, 1970.
- [6] - PALLEROSI, CARLOS AMADEU - Formulação de um método geral de análise das condições econômicas de usinagem. Faculdade de Engenharia de Campinas, 1972. Tese (Doutoramento) - Faculdade de Engenharia da UNICAMP.
- [7] - SÉRIO, LUIS C - Tecnologia de grupo no planejamento de sistema produtivos. Apostila fornecida pela Sobracon no curso dado pelo autor, em São Paulo, Abril/1988.
- [8] - AGOSTINHO, OSWALDO LUIZ - Estudo da flexibilidade dos sistemas produtivos. Faculdade de Engenharia de São Carlos, 1985 Tese (Doutoramento) - Faculdade de Engenharia de São Carlos.
- [9] - FERREIRA, AUREO C et al - Características e programação de máquinas com comando numérico. Apostila fornecida pelo grupo de treinamento em comando numérico, UFSC, Florianópolis, 1984.
- [10] - TELLES, GERALDO NONATO - Controle numérico de máquinas - ferramenta - apostila fornecida pela Faculdade de Engenharia da UNICAMP, Campinas, 1982.

- [11] - OKUSHIMA, KEIJI et al - A contribution to determination of tool change interval. Bulletin of Japan society of mechanical engineers, 12 (52): 910-917, 1969.
- [12] - OLIVEIRA, JOSÉ ALBERTO NASCIMENTO - Engenharia Econômica: uma abordagem às decisões de investimento. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1982.
- [13] - GARÓFALO, GILSON DE LIMA et al - Micro- economia - Teoria da Firma e Análise da Oferta. São Paulo, Atlas, 1976, 2
- [14] - ROSSETTI, JOSÉ PASCHOAL - Introdução à Economia. São Paulo, Atlas, 1978
- [15] - ALBUQUERQUE, MARCOS CINTRA CAVALCANTI - Introdução à teoria econômica. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1976.
- [16] - MANSFIELD, E. et al - Micro-Economia, Teoria e Aplicações. Rio de Janeiro, Campus, 1978.
- [17] - LEFTWICH, RICHARD H - O sistema de preços e a alocação de recursos. São Paulo, Pioneira, 1973.
- [18] - WATSON, DONALD S et al - Micro - Economia. São Paulo, Saraiva, 1979.
- [19] - HENDERSON, JAMES M - Teoria Micro - Econômica. São Paulo, pioneira, 1976.
- [20] - DOOLEY, RICHARD et al - Administração de empresas: análise contábil e financeira. São Paulo, Nova Cultural, 1988.
- [21] - NOVASKI, OLIVIO - Determinação das condições Econômicas de usinagem através de parâmetros obtidos na empresa. Faculdade de Engenharia de Campinas, 1989. Tese (Doutoramento) - Faculdade de Engenharia da UNICAMP.

- [22] - DIETER, GEORGE E. - Metalurgia Mecânica, Rio de Janeiro. Guanabara Dois, 1981.
- [23] - Ministério da Indústria e Comércio - Determinação das Características de Usinagem dos materiais e ferramentas de procedência nacional, na operação de torneamento. Centro de tecnologia - UNICAMP, Campinas, 1976.
- [24] - LOLADZE, T. N. - Abhängigkeit des Werkzeugverschleisses Von den Schnittbedingungen bei spanabhebenden Bearbeitung, Industrie Anzeiger, 89 (58): 27-32, 1967.
- [25] - REITER, N. - Hartmetall, ein Universeller schneidstoff TrennKompedium, Bergisch Gladbach, ETF. p. 95-116, 1971 vol. 1.
- [26] - International Organization for standartization - Tool life testing with single - point turning tools - ISO 3685. Switzerland, Iso, 1988.
- [27] - ESSEL, K. et al - Analyse der standzeitgleichungen, Industrie Anzeiger, 94 (5): 92-93, 1972.
- [28] - BARROW, G. - Tool life equations and machining economics. in: proceedings of the 12th international machine tool design and research conference. Manchester, Macmillan, 1971, p. 481-493.
- [29] - KRONENBERG, M. - Replacing the Taylor formula by a new tool life equation, international journal of machine tool design and research. 10, 1971.
- [30] - GILBERT APUD ESSEL et al - Analyse der standzeitgleichungen, Industrie anzeiger, 94 (5): 92-93, 1972.
- [31] - MICHELETTI, F. GIAN. - Tecnologia meccanica - II taglio dei metalli 2. ed. Torino, torinese, 1977.

- [32] - ARMAREGO, E. J. A. et al - The machining of metals. New Jersey, prentice hall, 1969
- [33] - COLDING, B. N. - A three dimensional tool life equation, machining economics - translation of the ASME, 81; 1959.
- [34] - BREWER, R. C. et al - A simplified approach to the optimum selection of machining parameters, Engineers Digest, 24 (9); 1963.
- [35] - DEPIEREUX, W. R. - Ermittlung optimaler schnittbedingungen, Industrie anzeiger, 32 (17): 711-712, 1970.
- [36] - BILLINGHAM, J. et al. - Coated cutting tools; influence of composition and surface integrity in high speed machining, final technical report school of industrial science Cranfield (Publicação interna), 1978.
- [37] - FERRARESI, DINO - Características de usinagem dos metais para a operação de torneamento. São Paulo, ABM, 1987
- [38] - FERRARESI DINO - Otimização das condições de usinagem em uma empresa de produção seriada. Anais do 1^o Simpósio Brasileiro sobre Tecnologia de Usinagem. SOBRACON São Paulo, Marco/1989.
- [39] - FERRARESI, DINO - Considerações sobre equivalência nas operações de usinagem. Apostila do curso de Pós-Graduação "tópicos especiais da usinagem dos metais", FEC, UNICAMP, 1980.
- [40] - ARMAREGO, E. J. A. et al. - The machining of metals. Englewood cliffs. Prentice - hall, INC; 1969.
- [41] - KAZINCZY, M. - Tool life criterium of single point tools when cutting with NC machine tools. Mechanical Engineering (Hungria), 1 (3): 342-347, 1971

- [42] - MACHINING DATA HANDBOOK. - Machinability data center Metcut research associates INC, Cincinnati, Ohio, 1972
- [43] - ARMAREGO, E.J.A. et al - The machining of metals. Prentice hall, INC, U.S.A., 1969.
- [44] - Tool Engineers Hand Book. - McGraw-Hill book company, INC New York, 1956
- [45] - Comunicação pessoal ao orientador.
- [46] - ARMAREGO, E.J.A. et al - Maximum profit rate as a criterion for the selection of machining conditions, International journal of machine tool design and research. 6 15-23, 1966
- [47] - HEARN, A.C. - Reduce user's manual. The rand corporation, Santa Mônica, U.S.A. 1984.
- [48] - LUENBERGER, DAVID G. - Introduction to linear and non linear programming. Massachussets, Addison - Wesley Publishing company, 1973.
- [49] - SANDVIK - Catálogo de Fabricante C-1000: 3 - Eng., 1990.
- [50] - HALD, A. - Statistical theory with engineering applications New York, John Wiley & sons, INC. 1952.
- [51] - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Conceitos da técnica de usinagem. Movimentos e relações geométricas. NBR 6162, Maio/89.
- [52] - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Conceitos da técnica de usinagem. Movimentos e relações geométricas NBR 6163, Maio/89.

[53]. D.S.ERMER et.al._ THE EFFECT OF EXPERIMENTAL ERROR ON THE DETERMINATION OF THE OPTIMUM METAL- CUTTING CONDITIONS. JOURNAL OF ENGINEERING FOR INDUSTRY. TRANSACTIONS OF THE ASME. pg 315-321,MAIO 1967.

[54]. D.S.ERMER et.al._ ANALYTICAL SENSITIVITY STUDIES OF THE OPTIMUM MACHINING CONDITIONS FOR MILLING,DRILLING,REAMING, AND TAPPING.JOURNAL OF ENGINEERING FOR INDUSTRY. TRANSACTIONS OF THE ASME.pg 312-316,FEVEREIRO 1973.

[55]. G.L.RAVIGNANI._ A CONTRIBUTION TO MACHINING ECONOMICS.ANNALS OF THE CIRP,pg 619-621,FEVEREIRO 1978.

[56]. BREWER,R.C._ ON THE ECONOMICS OF THE BASIC TURNING OPERATION.TRANSACTIONS OF THE ASME,PG 1479-1489,JANEIRO,1958.

[57]. KRONENBERG,M. et.al._ COMPUTERIZED DETERMINATION AND ANALYSIS OF COST AND PRODUCTION RATES FOR MACHINING OPERATIONS: PART 2 _ MILLING,DRILLING,REAMING,AND TAPPING. JOURNAL OF ENGINEERING FOR INDUSTRY, TRANSACTIONS OF THE ASME,PG 585-596-,AGOSTO,1969.

[58]. KONIG,W. et.al._ VALIDITY OF THE TAYLOR EQUATION IN METAL CUTTING.ANNALS OF THE CIRP,pg 793-812- SETEMBRO,1971.

[59]. ZOMPI,A._ TOOL LIFE DISTRIBUTIONS IN PROCESS OPTIMIZATION;PARAMETER IDENTIFICATION AND APPLICATIONS.ANNALS OF THE CIRP,pg 371-375-JANEIRO,1979.

[60]. CROOKALL,J.R._ MAXIMISING RATE OF RETURN ON INVESTMENT IN BATCH MANUFACTURE.ANNALS OF THE CIRP,pg 329-332_ JANEIRO, 1980.

[61]. BOEHS LOURIVAL et.al._ SELEÇÃO DE CONDIÇÕES OTIMIZADAS DE CORTE "SOFTWARE" APOIADO POR BANCO DE DADOS.GRUCON/UFSC,pg 1-16.

[62]. ROUMESY,B._ COMPUTING PROGRAM FOR OBTAINING OPTIMAL CUTTING CONDITIONS IN MULTI-TOOL OPTIMIZATION.ANNALS OF THE CIRP,pg 549-552,FEVEREIRO 1984.