

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA

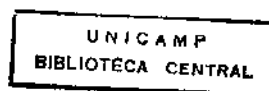
Departamento de Engenharia Mecânica

Formulação de um método geral de análise
das condições econômicas de usinagem

Engº Carlos Amadeu Pallerosi

01/73

* Tese apresentada para a obtenção do
título de "Doutor Engenheiro"



Campinas

1973



R E S U M O

Determinação das condições de mínimo custo e máxima produção, nas operações gerais de usinagem executadas por várias ferramentas de corte (monocortantes ou multicortantes), em vários estágios. Aplicação do novo método geral às operações de corte realizadas com rotação constante do eixo-árvore, ou velocidade de corte mantida constante. Extensão aos casos gerais, onde as Equações de Taylor das ferramentas são válidas apenas em definidos intervalos de validade. Utilização de programa de computação. Aplicações práticas.

A B S T R A C T S

Minimum cost and maximum production determination on the generalised cutting operations, made by single tools and multitools, in several machining stages. Application of the new method at operations executed under constant spindle rotation, and constant cutting speed conditions. Extension at the generalised cases, where Taylor's Equations of the tools are valid only definite ranges. Utilization of computers programs. Practical applications.

PREFÁCIO

A presente tese foi iniciada na Escola de Engenharia. de São Carlos da Universidade de São Paulo, e concluída na Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Campinas, sempre sob a orientação do Professor Dino Ferraresi.

Expresso aqui os meus agradecimentos:

- * Ao Dr. Eng. Dino Ferraresi, pela orientação deste trabalho, cujo constante contato ao longo de vários anos, sempre nos encaminhou na pesquisa e na procura da verdade científica.
- * Ao Eng. Fausto Rodrigues Filho e ao aluno-monitor Minoru Oda, pela execução dos programas de computação.
- * Ao Dr. Eng. Rosalvo Tiago Ruffino e Dr. Odelar Leite Linhares, pelas sugestões recebidas.
- * Ao Sr. Raul dos Santos, pela sua dedicação na confecção dos originais deste trabalho.
- * Em especial, agradecemos a colaboração prestada pelas firmas Sandvik do Brasil S.A., e Equipamentos Clark S.A., que permitiram a apresentação dos exemplos práticos de aplicação.

DEDICATÓRIA

* Aos meus pais,

Gesualdo Pallerosi
Alda Saraiva Pallerosi,
pelo exemplo de conduta e
dedicação.

* A minha espôsa,
Maria Erlinda C. Pallerosi,
companheira de todos os mo-
mentos.

* Aos meus filhos,
Artur e Carolina,
um pequeno exemplo de trabalho.

INDICE

1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - COMPLEMENTOS ÀS NORMAS BRASILEIRAS.....	7
2.1 - Pontos de referência nas ferramentas de corte.....	7
2.2 - Movimentos nas Máquinas-ferramentas.....	9
2.3 - Movimentos relativos entre a peça e a ferramenta.....	11
2.4 - Direções e Sentidos dos movimentos.....	14
2.5 - Conceitos auxiliares.....	14
2.5.1 - Plano Principal de Trabalho.....	14
2.5.2 - Plano Transversal de Trabalho.....	14
2.5.3 - Plano Resultante de Trabalho.....	14
2.6 - Terminologia dos processos mecânicos de usinagem.....	15
2.7 - Tempos e métodos de avaliação.....	19
3 - PERCURSOS.....	24
3.1 - Percursos de avanço da ferramenta em relação à peça... 24	24
3.1.1 - Aproximação da ferramenta.....	24
3.1.2 - Corte do material da peça.....	25
3.1.3 - Retirada da ferramenta.....	28
3.1.4 - Total de avanço da ferramenta.....	29
3.2 - Percursos de avanço do carro ou mesa móvel.....	29
3.2.1 - Aproximação da ferramenta.....	30
3.2.2 - Corte do material da peça.....	30
3.2.3 - Retirada da ferramenta.....	31
3.2.4 - Total de avanço do carro ou mesa móvel.....	32
3.3 - Relações Geométricas entre os percursos da ferramenta e do carro ou mesa móvel.....	32
3.3.1 - Determinação do Percorso de avanço do carro ou mesa móvel.....	32
3.3.2 - Ângulo total de Rampa do perfil usinado.....	33
3.3.3 - Coeficiente de correlação entre os percursos de avanço da ferramenta e do carro ou mesa mó vel.....	34
3.3.4 - Percursos de avanço e tempos.....	35
4 - VELOCIDADE DE AVANÇO.....	37
4.1 - Velocidade de avanço do carro ou mesa móvel, em rela- ção à Máquina-ferramenta.....	37
4.2 - Velocidade de avanço da ferramenta em relação à peça..	37

4.2.1 - Velocidade principal de avanço da ferramenta..	37
4.2.2 - Velocidade tangencial de avanço da ferramenta..	37
4.2.3 - Velocidade de avanço da ferramenta segundo o eixo de inclinação do Copiador.....	37
4.2.4 - Velocidade transversal de avanço da ferramenta.....	39
4.3 - Relações entre as velocidades de avanço.....	39
4.3.1 - Generalidades.....	39
4.3.2 - Velocidade de avanço da ferramenta em relação à velocidade de avanço do carro ou mesa móvel.	41
4.3.3 - Valor médio da velocidade principal de avanço da ferramenta.....	43
5 - AVANÇOS DA FERRAMENTA E DO CARRO OU MESA MÓVEL, POR VOLTA DO EIXO-ÁRVORE.....	49
5.1 - Avanço do carro ou mesa móvel.....	49
5.2 - Avanços da ferramenta.....	49
5.2.1 - Avanço principal da ferramenta.....	49
5.2.2 - Avanço da ferramenta segundo o eixo de inclinação do Copiador.....	49
5.2.4 - Avanço transversal da ferramenta.....	50
5.3 - Relações entre os avanços da ferramenta e do carro ou mesa móvel.....	50
5.4 - Avanço básico.....	51
6 - VELOCIDADES DE CORTE.....	52
6.1 - Generalidades.....	52
6.2 - Dependência ou não, da velocidade de corte em relação ao perfil usinado.....	52
7 - TEMPO DE CORTE.....	55
7.1 - Generalidades.....	55
7.2 - Cada ferramenta atua isoladamente.....	57
7.2.1 - Caso geral.....	57
7.2.2 - A velocidade de avanço do carro ou mesa móvel é dependente da velocidade de corte.....	58
7.2.2.1 - Rotação constante do eixo-árvore.....	59
7.2.2.1 - Velocidade de corte constante.....	62
7.2.3 - A velocidade de avanço do carro ou mesa móvel é independente da velocidade de corte da ferramenta.....	66

7.3 - As ferramentas atuam simultaneamente.....	67
7.3.1 - Rotação constante do eixo-árvore.....	67
7.3.2 - Velocidade de corte constante.....	69
7.4 - Conceito de ferramenta-padrão.....	71
7.4.1 - Coeficiente adimensional que correlaciona os tempos de corte.....	71
7.4.1.1 - Rotação constante do eixo-árvore.....	72
7.4.1.2 - Velocidade de corte constante.....	73
7.5 - Análise das equações obtidas.....	74
8 - EQUIVALÊNCIAS NAS OPERAÇÕES GERAIS DE USINAGEM.....	76
8.1 - Operação de corte equivalente.....	76
8.2 - Velocidade de corte equivalente.....	77
8.3 - Diâmetro-equivalente.....	78
8.4 - Rotação-equivalente do eixo-árvore.....	79
8.5 - Ferramenta-equivalente.....	79
9 - EQUAÇÃO DE TAYLOR EQUIVALENTE.....	82
9.1 - Generalidades.....	82
9.2 - Influência da posição do desgaste convencional no va- lor da velocidade de corte equivalente.....	84
9.3 - Equação de Taylor Equivalente.....	86
9.4 - Determinação dos parâmetros.....	88
9.4.1 - As ferramentas atuam em apenas um estágio.....	88
9.4.1.1 - Caso geral.....	88
9.4.1.2 - Rotação constante do eixo-árvore.....	89
9.4.1.3 - Velocidade de corte constante.....	89
9.4.2 - As ferramentas atuam em vários estágios.....	91
9.4.2.1 - Caso geral.....	91
9.4.2.2 - Rotação constante do eixo-árvore.....	94
9.4.2.3 - Velocidade de corte constante.....	94
9.4.2.4 - Valores corrigidos das rotações e do número médio de peças usinadas por vida.....	95
9.5 - Considerações sobre as equações propostas.....	96
10 - DIÂMETRO-EQUIVALENTE.....	98
10.1 - Rotação constante do eixo-árvore.....	98
10.1.1 - As ferramentas atuam isoladamente.....	98
10.1.1.1 - Um único avanço em cada estágio.....	98
10.1.1.2 - Mais de um avanço em cada estágio.....	105
10.1.2 - Várias ferramentas atuam simultaneamente.....	107

10.2 - Velocidade de corte constante.....	108
10.2.1 - As ferramentas atuam isoladamente.....	108
10.2.1.1 - Um único avanço em cada estágio.....	108
10.2.1.2 - Vários avanços em cada estágio.....	109
10.2.2 - As ferramentas atuam simultaneamente.....	111
11 - VELOCIDADE DE CORTE EQUIVALENTE.....	113
11.1 - Caso geral.....	112
11.2 - Rotação constante do eixo-árvore.....	113
11.2.1 - As ferramentas atuam isoladamente.....	113
11.2.1.1 - Equação geral.....	113
11.2.1.2 - Equações particulares.....	115
11.2.2 - As ferramentas atuam simultaneamente.....	118
11.3 - Velocidade de corte constante.....	119
11.3.1 - As ferramentas atuam isoladamente.....	119
11.3.1.1 - Equação geral.....	119
11.3.1.2 - Equações particulares.....	120
11.3.2 - As ferramentas atuam simultaneamente.....	120
12 - TEMPO DE REPOSIÇÃO.....	123
12.1 - Generalidades.....	123
12.2 - Determinação do tempo de troca.....	125
12.3 - Determinação do tempo total de reposição.....	127
12.4 - Tempo total de reposição para trocar individuais das ferramentas.....	129
12.4.1 - Caso geral.....	129
12.4.2 - Rotação constante do eixo-árvore.....	131
12.4.2.1 - Equação geral.....	131
12.4.2.2 - Equações particulares.....	133
12.4.3 - Velocidade de corte constante.....	138
12.4.3.1 - Equação geral.....	138
12.4.3.2 - Equação particulares.....	139
13 - TEMPOS TOTAL DE CONFECÇÃO.....	142
13.1 - Tempo de execução e fases.....	142
13.2 - Tempo total de confecção (caso geral).....	145
13.3 - Rotação constante do eixo-árvore.....	146
13.3.1 - Caso geral.....	146
13.3.2 - Casos particulares.....	148
13.4 - Velocidade de corte constante.....	150
13.4.1 - Caso geral.....	150

13.4.2 - Casos particulares.....	151
14 - CUSTOS DE USINAGEM.....	153
14.1 - Custo dos tempos improdutivos.....	153
14.2 - Custo do tempo de corte.....	154
14.2.1 - Caso geral.....	154
14.2.2 - Rotação constante do eixo-árvore.....	154
14.2.3 - Velocidade de corte constante.....	155
14.3 - Custo das ferramentas e suas trocas.....	155
14.3.1 - Caso geral.....	155
14.3.2 - Rotação constante do eixo-árvore.....	158
14.3.2.1 - Equação geral.....	158
14.3.2.2 - Equações particulares.....	160
14.3.3 - Velocidade de corte constante.....	160
14.3.3.1 - Equação geral.....	160
14.3.3.2 - Equações particulares.....	162
14.4 - Custo total de confecção.....	162
14.4.1 - Caso geral.....	162
14.4.2 - Rotação constante do eixo-árvore.....	162
14.4.3 - Velocidade de corte constante.....	164
15 - OTIMIZAÇÃO DAS FUNÇÕES TEMPO OU CUSTO TOTAL DE CONFECÇÃO...	165
15.1 - Valor mínimo de funções contínuas.....	165
15.2 - Extensão às operações de usinagem.....	166
16 - MÁXIMA PRODUÇÃO.....	167
16.1 - Rotação constante do eixo-árvore.....	167
16.1.1 - Caso geral.....	167
16.1.2 - Casos particulares.....	171
16.2 - Velocidade de corte constante.....	173
16.2.1 - Caso geral.....	173
16.2.2 - Casos particulares.....	175
17 - MÍNIMO CUSTO.....	177
17.1 - Rotação constante do eixo-árvore.....	177
17.1.1 - Caso geral.....	177
17.1.2 - Casos particulares.....	179
17.2 - Velocidade de corte constante.....	181
17.2.1 - Caso geral.....	181
17.2.2 - Casos particulares.....	182
18 - PROGRAMAS DE COMPUTAÇÃO.....	184
19 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	191
19.1 - Objetivos.....	191

19.2 - Torneamento de um eixo para rodeiro de vagão ferroviário (rotação constante).....	191
19.3 - Torneamento de um eixo-piloto de caixa de câmbio para autoveículo.....	214
19.4 - Torneamento de eixos para redutores de engrenagens.....	228
19.5 - Torneamento de eixos para rodeiros de vagões - ferroviários (velocidade de corte constante)....	240
20 - CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O MÉTODO E OS RESULTADOS OBTIDOS.....	248
Símbolos utilizados.....	250
Referências bibliográficas.....	259

1 - Introdução

Com o advento da revolução industrial, o trabalho individual e de artesanato, foi sendo progressivamente substituído pelo trabalho organizado em moldes mais produtivos e econômicos. Desde então, a fabricação de peças a partir dos processos mecânicos de usinagem, passou a exigir conhecimentos científicos profundos dos novos materiais para ferramentas de corte, especialmente em relação ao aço rápido, que surgiu por volta de 1905.

No início do século, Frederick W. Taylor [1], em 1907, publica nos E.U.A. talvez o primeiro trabalho sobre as condições econômicas de usinagem. Estudioso dos problemas da organização racional do trabalho, procurou solucionar a questão básica das operações de usinagem, ou seja, com o progressivo aumento da velocidade de corte ou do avanço, o tempo de corte diminui, abaixando sensivelmente a parcela do tempo relativo à máquina, mas, por outro lado, acarreta uma maior frequência nas paradas para a troca das ferramentas. A procura do *balanceamento ótimo* dos tempos e custos de usinagem, passou a exigir um melhor conhecimento da vida da ferramenta sob diferentes condições de usinagem. Em homenagem ao seu descobridor, a equação básica que estabeleceu a correspondência entre vida da ferramenta e a velocidade de corte passou a ser denominada *Equação de Taylor* (ver § 9.1).

Em 1933, Leyensetter [2], Paasche [3], Wallichs e Schöpke [4] na Alemanha, formulam suas equações, baseadas principalmente no princípio da *maximização* do volume de cavaco removido, para um dado tempo de corte, procurando estabelecer as condições de *máxima produção*. Esta preocupação provavelmente foi estimulada pelo grande esforço então realizado por uma nação que se preparava para a guerra. O aparecimento do metal duro nesta época, passou a exigir maiores veloci

dades de corte, gerando a necessidade de novos aperfeiçoamentos nas máquinas-ferramentas, principalmente em relação aos mancais dos eixos-árvores.

Logo após a II Guerra Mundial, surgem os trabalhos de Whittoff [5 e 7] na Alemanha, Atalay [6] nos E.U.A., Lickley e Chisholm [8] na Inglaterra, dirigidos principalmente para as condições de mínimo custo, devido à economia de após-guerra, onde a concorrência de preços passa a ser o elemento predominante.

Na década de 50 ocorre um grande impulso das pesquisas no campo da usinagem dos metais. São produzidos em grande escala as novas classes de materiais para ferramentas de corte, como também são efetivados os grandes aperfeiçoamentos das máquinas-ferramentas. O estudo da usinabilidade dos metais, da geometria das ferramentas, das forças de corte, das vibrações, e da precisão de usinagem, adquirem uma grande importância. Nesta época, surgem principalmente os trabalhos de Gilbert [10 e 16] e Siekmann [17] nos E.U.A., Burmester [9], Whittoff [11, 12, 14 e 15], Eiselle [13], Vieregge [19] na Alemanha e Brewer [18] na Inglaterra.

A última década (1960-1969) é caracterizada principalmente por um exaustivo estudo dos desgastes das ferramentas, do processo de formação do cavaco e das vibrações auto-excitadas. Por meio de computadores, são calculados ou simulados uma grande quantidade de fatores que caracterizam as operações de usinagem, e avaliada a influência dos erros experimentais nos valores teoricamente calculados. Surgem também os primeiros trabalhos sobre a determinação das condições econômicas quando várias ferramentas atuam simultaneamente, e do máximo lucro. Dentre as principais contribuições, tem-se os trabalhos de Gilbert [21], Mc Cullough [23], Brierley e Siekmann [24], Ermer [26, 28, 29 e 36], Wu [26, 28 e 29], Hill [26], Taha [27], Taylor

[30], Field e Zatlín [31], e Morris [36] nos E.U.A, Optiz e Gappish [20], Degenhardt [32], Depiereux [33 e 37] e König [35 e 37] na Alemanha, Okushima e Fujii [38] no Japão, Oxford Jr [20] e Crookall [34] na Inglaterra, Pankine [25] na U.R.S.S..

Na atual década a preocupação predominante, ao que tudo indica, será na melhoria da usinabilidade dos metais, das ferramentas com insertos de fixação mecânica, na plena utilização dos computadores e dos métodos estatísticos na determinação das condições ótimas de corte, pesquisa dos fenômenos do atrito sólido com formação de óxidos nas zonas de contato ferramenta-peça-cavaco, e equacionamento das condições econômicas com multi-ferramentas, principalmente nas máquinas-ferramentas com comando numérico e máquinas "transfer". Um melhor conhecimento da força de usinagem e das vibrações auto-excitadas também poderá levar a um perfeito domínio das tolerâncias dimensionais, da rugosidade superficial e do projeto das máquinas-ferramentas. Dentre os principais trabalhos sobre as condições econômicas de usinagem, publicados a partir de 1970, sobressaem os de Bhattacharyya, Ghosh e Hann [39], Ermer [40 e 49], Típnis e Joseph [45], Wu e Dalal [46], Frost e Smith [47], Wager e Barash [48], Kops [50] nos E.U.A., Schaumann [41] e Kronenberg [51] na Alemanha, Kazińczy [52] na Hungria, Arschinov e Alekseev [43] na U.R.S.S., e Ferraresi, no Brasil.

A importância da determinação das condições econômicas de usinagem (máxima produção, mínimo custo e máximo lucro) é justificada pela considerável quantidade e valor dos capitais em jogo. Somente nos E.U.A, mais de 100 bilhões de dólares são gastos anualmente pelas indústrias de transformação, para produzir aproximadamente 160 bilhões de dólares em produtos acabados [24]. Durante os processos de fabricação, cerca de 15 milhões de toneladas de metal são removidos como cavacos, a um custo aproximado de 10 bilhões de dólares.

Em nosso país, para uma ~~produção~~ anual de 1,2 milhões de toneladas [63], poder-se admitir que aproximadamente 190 milhões de cruzeiros são gastos em operações de usinagem, pois cerca de 4% em peso do material é transformado em cavaco [25].

Nota-se portanto, que a correta formulação e determinação das condições econômicas de usinagem é extremamente importante para a economia de um país, motivo pelo qual tanto se pesquisa no mundo inteiro. Pela própria condição de líderes da economia dos países ocidentais, é nos E.U.A. e na Alemanha que se concentram a maior parte das pesquisas, muitas vezes realizadas por pesquisadores de outras nacionalidades, principalmente japoneses e hindus que para lá afluem em busca de especialização, ou motivados por melhores condições de trabalho e salários.

O sucesso na redução dos tempos ou custos de usinagem é dependente de dois diferentes aspectos do problema, quais sejam:

- a) *balanceamento ótimo dos tempos e custos de usinagem.*
- b) *aplicação dos melhores métodos e técnicas de usinagem.*

Neste trabalho será dado ênfase fundamental ao *balanceamento ótimo dos tempos e custos de usinagem* (máxima produção e mínimo-custo), admitindo-se que já se tenha os melhores métodos de execução, ferramentas e máquinas, ou seja, que a operação já esteja "racionalizada". Para uma melhor compreensão das parcelas dos tempos e dos custos, envolvidos na determinação das condições econômicas, a figura 1.1 mostra a sua composição e correlação, bem como o método adotado na sua formulação.

A originalidade do método a seguir desenvolvido baseia-se numa sequência de novos conceitos, cuja introdução proporcionou a obtenção de equações gerais para as várias parcelas envolvidas na determinação das condições econômicas, válidas para todas as operações de usinagem.

Na determinação do tempo ou custo total de corte, serão

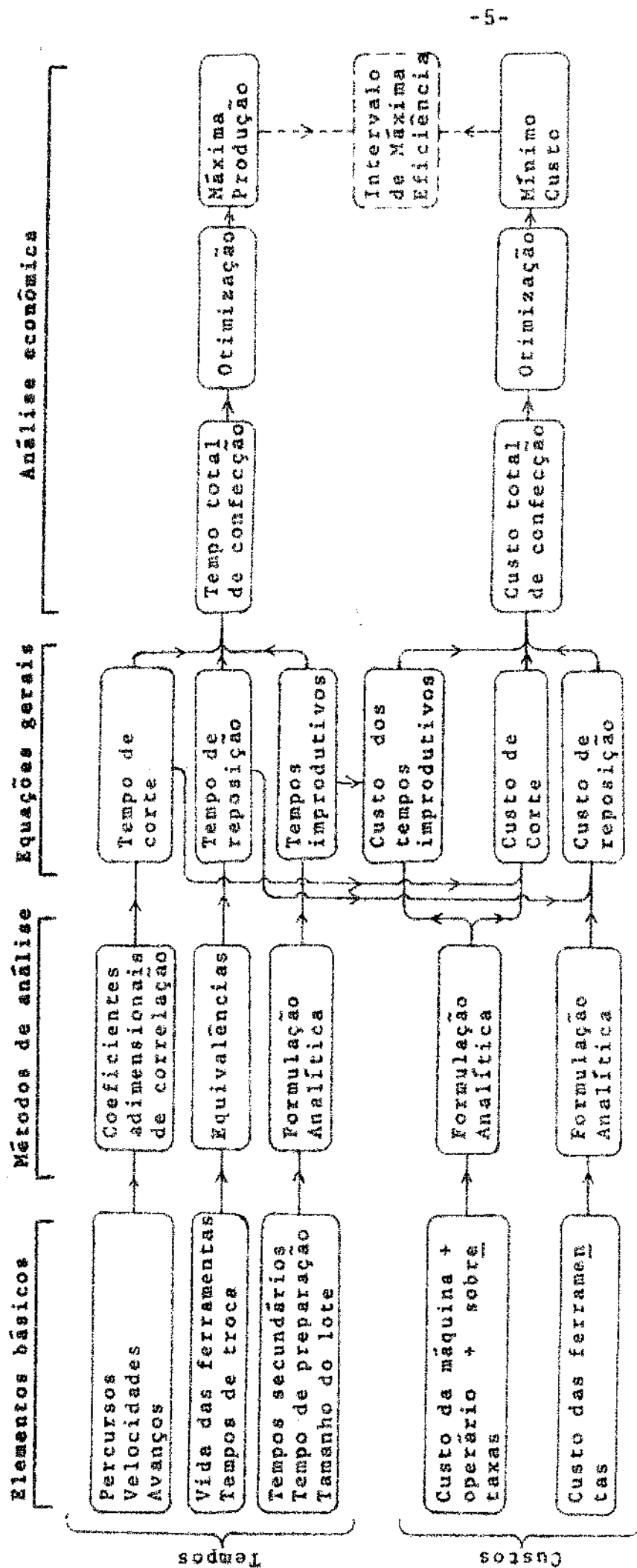


Fig. 1.1 - Composição e correlação entre os tempos e custos de usinagem, para a análise e determinação das condições de Máxima Produção e Mínimo Custo.

utilizados *coeficientes adimensionais de correlação* entre os *percurso*s de avanço da ferramenta e do carro ou mesa móvel, o que *permi*ti rá a obtenção de uma única equação. Quando as ferramentas atuam *si*-multaneamente, assumirá particular significado o conceito de *perfil*-base da operação. O conceito de *ferramenta-padrão*, com a nova *for*-mulação perderá sua importância, pois limita a generalidade das *e*-quações obtidas.

Na determinação do tempo ou custo total de *reposição*, a proposição de novas *equivalências* nas operações de usinagem, *permi*ti rá a obtenção de uma única equação, mesmo quando a ferramenta atua com diferentes condições de corte (avanço, profundidade e *velocida*-de de corte), em vários estágios.

A validade da Equação de Taylor será discutida, tendo-se *por base* que sua representação por uma função exponencial nem sempre satisfaz as condições limites do intervalo de validade no campo *real* de trabalho das ferramentas de corte. Isto implicará na *formulação*-da *Equação de Taylor Equivalente*, baseada na determinação *experimen*tal do número médio de peças usinadas por vida de ferramenta, (para cada particular condição de corte adotada), plenamente satisfeita em sucessivos intervalos de validade, para todo o campo de trabalho da ferramenta.

2 - COMPLEMENTOS ÀS NORMAS BRASILEIRAS

A formulação de um método geral de cálculo das condições econômicas de usinagem exige uma correta fixação dos conceitos básicos sobre os movimentos, direções, percursos, velocidades e avanços entre a peça e as ferramentas envolvidas na operação. Estes conceitos básicos devem permitir uma avaliação precisa do tempo de corte e dos tempos secundários relativos à aproximação, entrada e saída das ferramentas em operação.

As Normas Brasileiras P-NB-204 [53] (baseada na Norma DIN6580 [54]) e P-NB-205 [55] se apresentam incompletas quanto à formulação de conceitos aplicáveis às operações gerais de copiagem, principalmente torneamento e fresamento curvelíneo. Os conceitos a seguir formulados não restringem os apresentados naquelas Normas, apenas as completam.

2.1 - PONTOS DE REFERÊNCIA NAS FERRAMENTAS DE CORTE

O ponto da ferramenta, em relação ao qual são referidos os movimentos, direções, sentidos e percursos de avanço da ferramenta em relação à peça, diretamente ou indiretamente relacionados com o tempo de corte da ferramenta, denomina-se ponto principal de referência P_0 . Para ferramentas monocortantes (operações de torneamento, mandrilamento ou apainamento) entende-se como sendo o ponto da aresta cortante cujo plano principal de trabalho (ver § 2.5.1), por ele passante, contém apenas um ponto da cunha cortante, ou seja, constitui um plano tangente à ponta da ferramenta (fig.2.1). No caso hipotético de ferramentas sem arredondamento da ponta, em operações de corte não ortogonal, o ponto principal de referência - P_0 seria definido pelo ponto de intersecção das arestas principal e lateral de corte [62].

Para ferramentas multicortantes (operações de fresa-
mento, furação, etc), o ponto principal de referência P_0 localiza-
se no eixo de rotação da ferramenta, como mostra a figura 2.3. Em
brocas helicoidais, por exemplo, localiza-se no centro da aresta -
transversal de corte.

Como o movimento principal de avanço (ver § 2.3) apre-
senta direção fixa em praticamente tôdas as operações de usinagem,
o ponto principal de referência P_0 pode ser considerado como um pon-
to fixo da ferramenta.

O ponto da aresta cortante de uma ferramenta, defini-
do pela Norma P-NB-204 [53], denomina-se ponto de referência P .
Apresenta particular importância o ponto de referência da ferramen-
ta onde a velocidade de corte é máxima, como mostra a fig. 2.1.

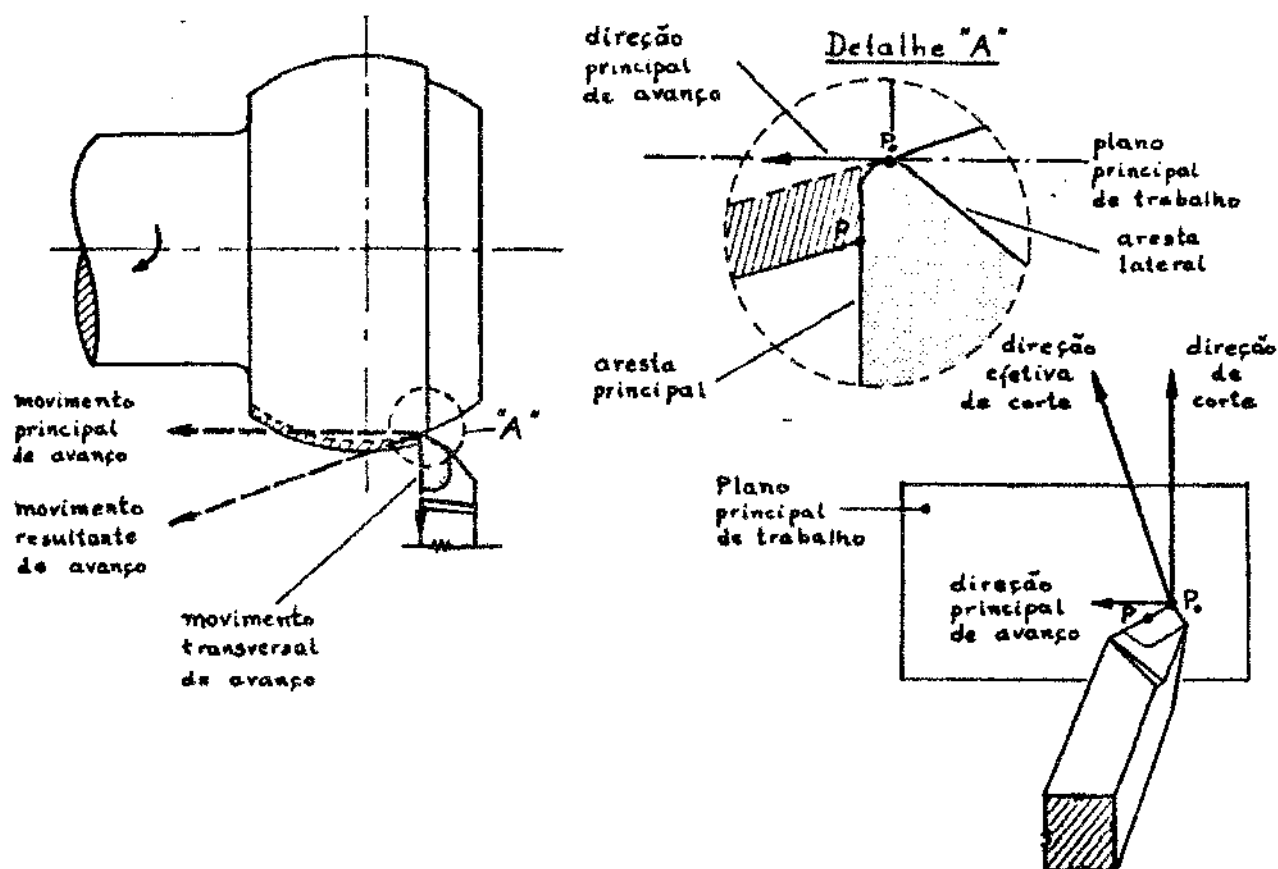


Fig. 2.1 - Copiagem de um tronco de esfera, mostrando as compo-
nentes do movimento de avanço, plano principal de trabalho
e ponto de referência.

2.2 - MOVIMENTOS NAS MÁQUINAS-FERRAMENTAS

Entende-se por movimentos básicos nas máquinas-ferramentas os que originam o movimento de corte, ou seja, "o movimento entre a peça e a ferramenta, o qual, sem o movimento de avanço, origina somente uma única remoção de cavaco, durante uma volta ou um curso [53]".

Os movimentos básicos, proporcionados pelas máquinas-ferramentas empregadas em processos mecânicos de usinagem, podem ser agrupados em dois grandes grupos, ambos relativos à peça ou à ferramenta:

Grupo I: rotação ao redor de um eixo.

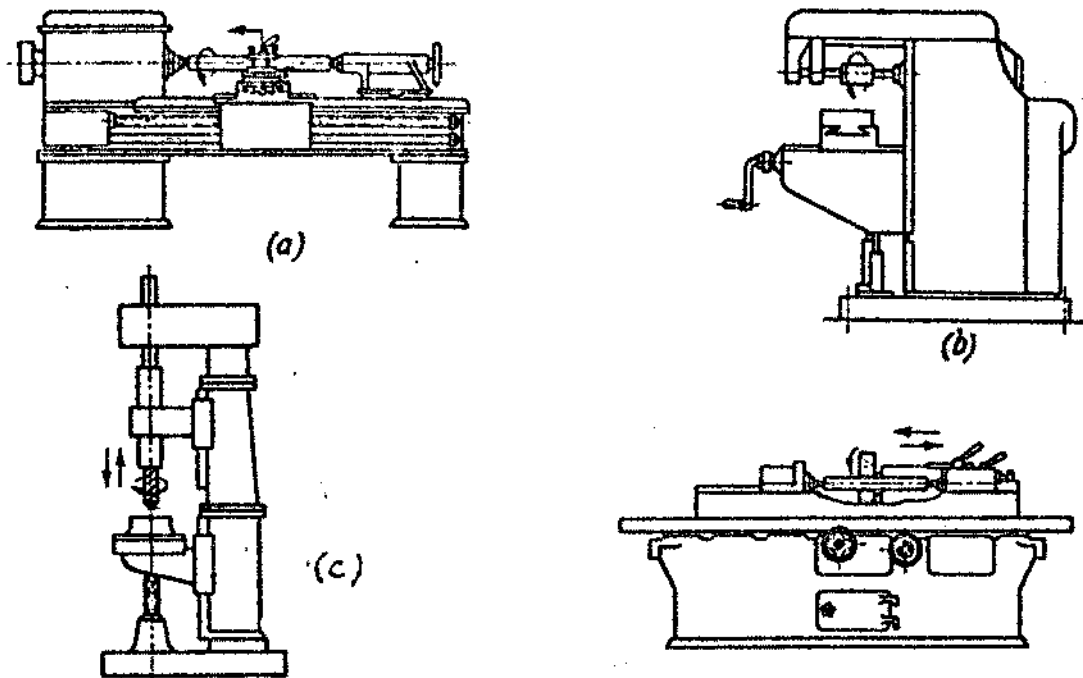
Grupo II: translação ao longo de guias.

Nas operações gerais de usinagem, os movimentos relativos entre a peça e a ferramenta podem ser complexos, mas sempre se apresentam como uma combinação dos dois movimentos básicos.

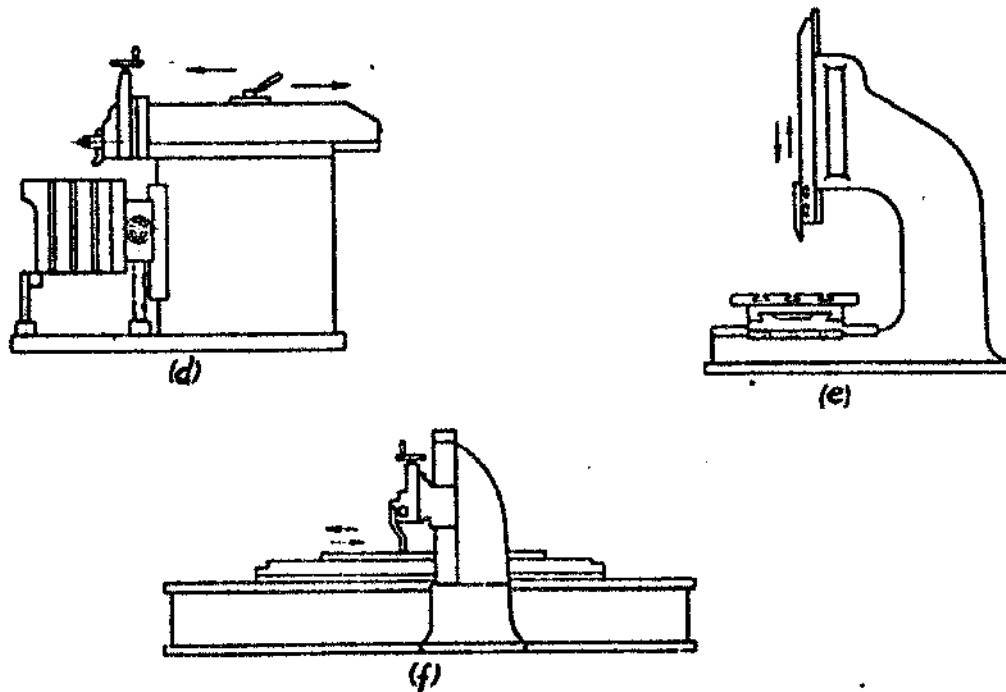
O movimento básico de rotação ao redor de um eixo pode ser transmitido à peça, tal como o proporcionado pelo torneamento (fig. 2.2.a), ou à ferramenta, como o fresamento (fig. 2.2.b), furação (fig. 2.2.c), ou outras máquinas.

O movimento básico de translação pode ser transmitido à ferramenta, como ocorre nas plainas limadoras (fig. 2.2.d) e plainas verticais (fig. 2.2.e), ou à peça, tais como nas plainas de mesa (fig. 2.2.f). Nestes casos o movimento é alternativo, com o trabalho de corte executado no percurso de ida, e um percurso de volta para retorno à posição inicial. Para reduzir os tempos não-produtivos, o movimento de retorno normalmente é realizado com uma veloci-

dade de translação maior.



Grupo I: movimento básico de rotação



Grupo II: movimento básico de translação

Fig. 2.2 - Movimentos básicos (indicado pelas setas) em alguns tipos de máquinas-ferramentas [58].

Por outro lado entende-se como movimentos complementares das máquinas-ferramentas os que originam o movimento de avanço, ou seja, "o movimento entre a peça e a ferramenta, que, juntamente com o movimento de corte, origina uma remoção repetida ou contínua de cavaco, durante várias revoluções ou cursos [53]" .

Os movimentos complementares podem ser agrupados em dois grandes grupos:

Grupo I: translação simples;

Grupo II: translação e rotação conjugadas.

O movimento complementar de translação simples (Grupo I) ocorre na maioria dos processos de usinagem. Os movimentos complementares do Grupo II ocorrem principalmente nas seguintes operações:

- a) confecção de engrenagens helicoidais ;
- b) fresamento de fusos ;
- c) brochamento de canais helicoidais;
- d) abertura de canais de lubrificação nas superfícies internas de mancais de escorregamento;
- e) retificação cilíndrica.

2.3 - MOVIMENTOS RELATIVOS ENTRE A PEÇA E A FERRAMENTA

No sistema de referência dos movimentos relativos entre a peça e a ferramenta, será sempre considerado a peça como parada.

Básicamente, deve-se considerar a existência de três espécies de movimentos relativos entre a peça e a ferramenta:

- a) os que não tomam parte direta na formação do cavaco, tais como: 1) movimento de aproximação da ferramenta à peça (posicionamento e profundidade); 2) movimento de retorno da ferramenta à posição inicial do ciclo de usi

nagem; 3) movimento de ajuste [53].

b) os que permitem a entrada ou saída do regime normal de corte, definidos pelo movimento de entrada e movimento de saída da ferramenta (fig. 2.3), onde a quantidade de cavaco retirado é respectivamente crescente e decrescente, em relação ao regime normal de usinagem.

c) os que causam diretamente a saída de cavacos. Neste caso o movimento responsável é o movimento efetivo de corte, resultante do movimento de corte e do movimento de avanço [53]. Quanto ao movimento de avanço temos a considerar os seguintes movimentos componentes:

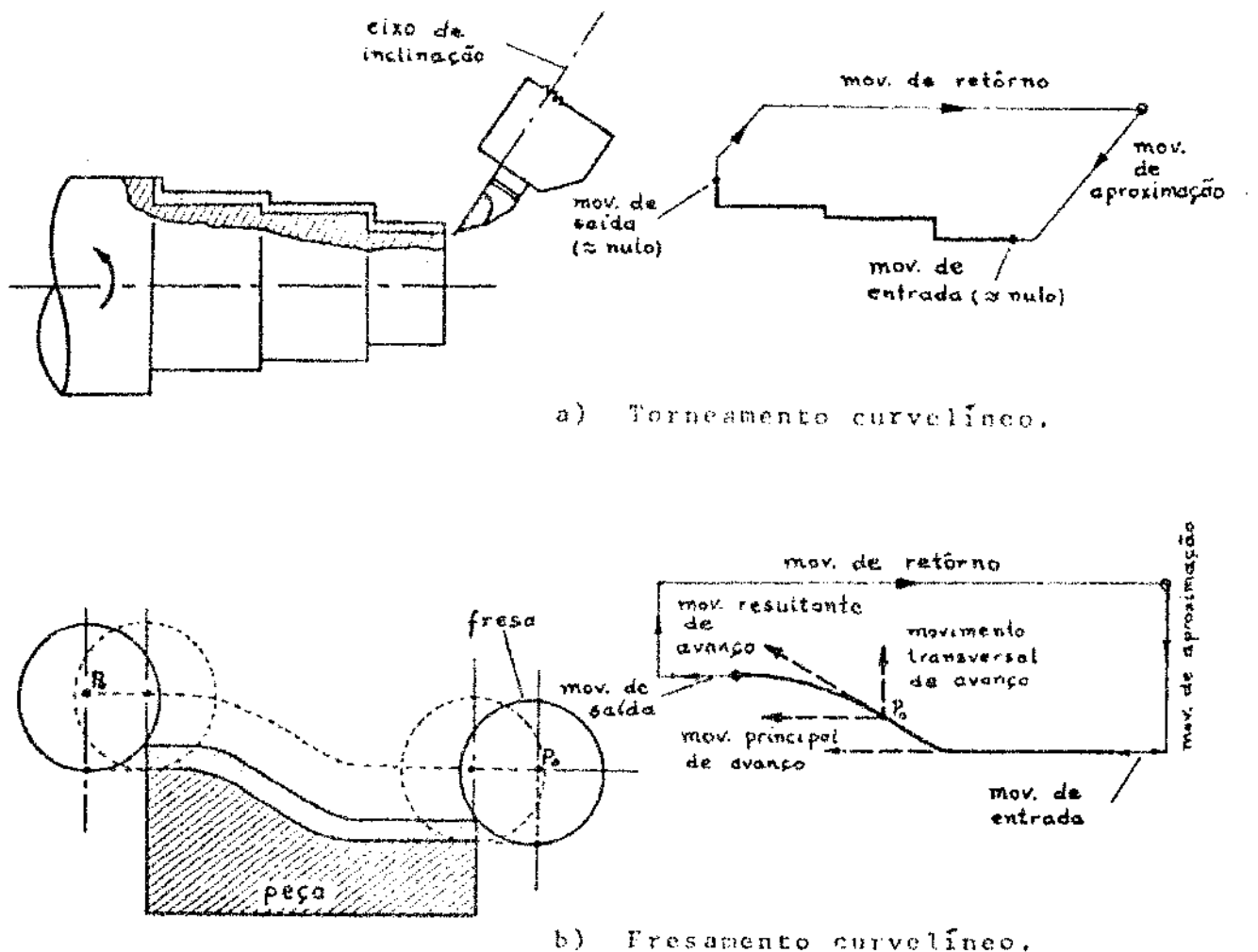


Fig. 2.3 - Movimentos da ferramenta em relação à peça.

- 1) movimento principal de avanço, na direção do movimento-retilíneo longitudinal do carro ou mesa móvel, sôbre as guias do barramento (figs. 2.1, 2.3 e 2.4).
- 2) movimento resultante de avanço, na direção tangencial - ao perfil usinado (figs. 2.1, 2.3 e 2.4). No caso de usinagem de superfícies cilíndricas retas (torneamento, -mandrilamento) ou planas (fresamento, splainamento), o movimento de avanço resultante (tangencial) coincide com o movimento principal de avanço.
- 3) movimento segundo o eixo de inclinação do copiador, ou seja, movimento ao longo de suas guias retílineas (fig. 2.4), que podem estar inclinadas em relação ao movimento principal de avanço.
- 4) movimento transversal de avanço, na direção perpendicular ao movimento principal de avanço (fig. 2.1, 2.3 e 2.4).

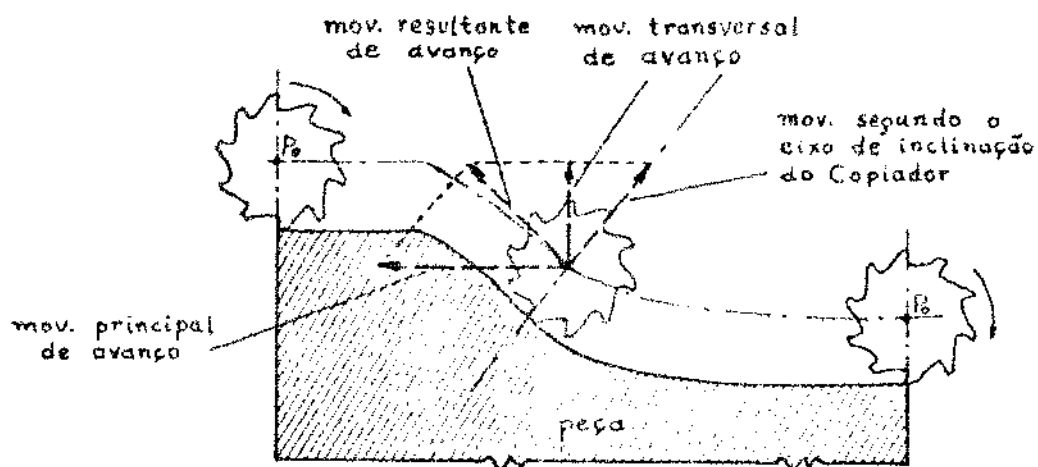


Fig. 2.4 - Componentes do movimento de avanço da ferramenta (operação de fresamento curvelíneo cilíndrico tangencial).

2.4 - DIREÇÕES E SENTIDOS DOS MOVIMENTOS

Direções dos movimentos: são as direções instantâneas dos movimentos relativos. Assumem particular importância a direção de corte, a direção principal de avanço, a direção transversal de avanço e a direção resultante de avanço. Nas operações em que a ferramenta reproduz um perfil curvelíneo, por meio de um dispositivo - copiador, tem-se também a direção de avanço segundo o eixo de inclinação do copiador (ver figs. 4.1 e 4.2).

Sentido dos movimentos: é o sentido instantâneo dos movimentos. O sentido é positivo ou negativo conforme seja concorde ou discordante com o sistema de referência adotado. Para o sistema adotado nas figs. 4.1 e 4.2 (ver § 4.2) o sentido é positivo - quando coincide com o adotado para os vetores unitários.

2.5 - CONCEITOS AUXILIARES

2.5.1 - Plano Principal de trabalho

O plano principal de trabalho é o plano que contém as direções de corte [53] e principal de avanço, passando pelo ponto principal de referência da aresra cortante (fig. 2.5). Neste plano-se realizam os principais movimentos que tomam parte no processo de formação do cavaco.

2.5.2 - Plano Transversal de Trabalho

O plano transversal de trabalho é o plano que contém as direções de corte e transversal de avanço, passando pelo ponto de referência da ferramenta (fig. 2.5). Neste plano se realizam os movimentos secundários (em geral desprezíveis) que tomam parte no processo de formação do cavaco.

2.5.3 - Plano Resultante de Trabalho

O plano resultante de trabalho é o plano que contém as direções de corte e resultante de avanço, passando pelo ponto de referência da ferramenta (fig. 2.5).

Neste plano se realizam todos os movimentos que tomam parte na formação do cavaco.

Além destes, temos os planos efetivos de trabalho - (principal, transversal e resultante), que contém a direção efetiva de corte.

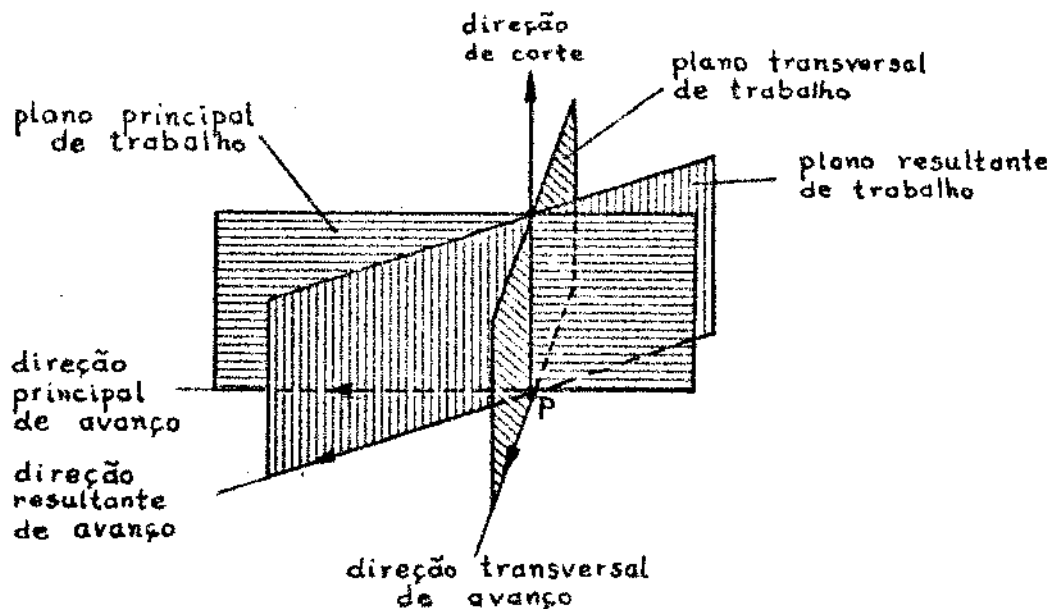


Fig. 2.5 - Direções de avanço e planos de trabalho.

2.6 - TERMINOLOGIA DOS PROCESSOS MECÂNICOS DE USINAGEM

A identificação dos diferentes métodos, sistemas e trabalhos executados nas máquinas-ferramentas exige uma correta terminologia, principalmente quando atuam varias ferramentas de corte. Para tanto, será adotada a Norma Brasileira P-NB-205 [55], complementada com a seguinte nomenclatura e classificação:

- sub-operação de corte - é o trabalho de remoção de cavacos, executado por uma dada ferramenta (monocortante ou multicortante), segundo uma dada trajetória (contínua ou

interrompida), por meio de movimentos relativos entre a peça e a ferramenta. Cada sub-operação de corte é realizada com uma condição de usinagem (rotação do eixo-arvore e avanço), invariável durante todo o tempo em que há remoção de cavacos. Na figura 2.6, o torneamento é executado por meio de duas sub-operações, cada uma delas realizadas com uma dada rotação e avanço.

- operação de corte é o conjunto de todas as sub-operações de corte executadas pela ferramenta. Na figura 2.6, a operação de corte corresponde à geração da forma final da peça, por meio de duas sub-operações.
- operação total de corte - é o conjunto de todas as operações de corte realizadas por todas as ferramentas. Na figura 2.7, cada operação de corte define uma forma intermediária da peça e a operação total de corte a sua forma final.

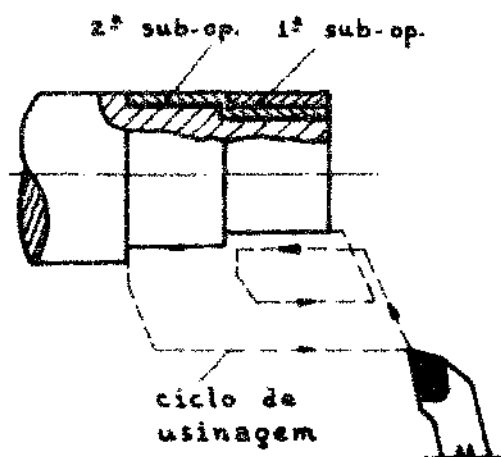


Fig. 2.6 - Torneamento curvelíneo, no qual a ferramenta executa duas sub-operações de corte.

- Ciclo de usinagem - corresponde aos trabalhos manuais, manuais-máquina ou máquina, que possibilitam a execução de uma dada operação de corte (figuras 2.3 e 2.6) Um ciclo de usinagem geralmente envolve um ou mais dos seguin

tes movimentos (ver capítulo 2.3):

- a) aproximação da ferramenta à peça;
- b) entrada da ferramenta na peça;
- c) corte do material;
- d) saída da ferramenta da peça;
- e) retorno da ferramenta à sua posição inicial.

- Estágio de usinagem - é aquele que engloba um ou mais ciclos de usinagem, executados por uma ou mais ferramentas, com uma determinada condição de usinagem, principalmente a rotação do eixo-arvore. Em um estágio as ferramentas podem atuar individualmente (figura 7.1) ou simultânea - mente (figura 7.2).

Nas máquinas-ferramentas monoarvores, cada nova condição de corte (em geral a mudança da rotação do eixo-árvore), implica no surgimento de um novo estágio. Na figura 2.7, o primeiro estágio corresponde à operação de corte reali - zada pela ferramenta nº 1 com uma rotação n_1 (torneamen - to longitudinal de desbaste), o segundo à ferramenta nº 1 com uma rotação n_2 (torneamento curvelíneo de acabamen - to) e o terceiro estágio à ferramenta nº 2 com uma rota - ção n_3 (sangramento radial). Se é utilizada uma única ro - tação para todas as operações de corte realizadas pelas - ferramentas, tem-se um único estágio.

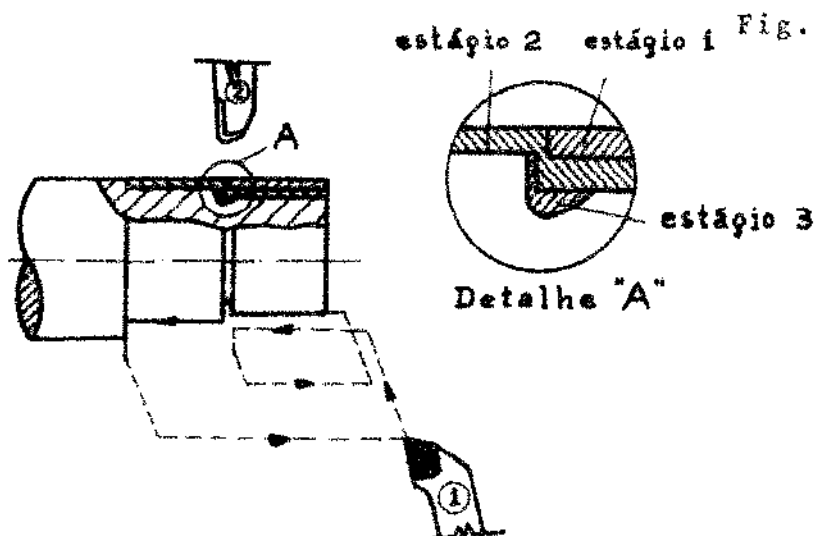


Fig. 2.7 - Torneamento com três estágios de usinagem, executados por duas ferramentas de corte.

Nas máquinas-ferramentas multiarvores, onde cada eixo-arvore trabalha sempre com uma dada rotação, o número de estágios será definido pela quantidade de eixos-arvores da máquina onde são executadas as operações de corte.

- fases de usinagem: correspondem a cada trabalho executado antes, durante e após cada ciclo de usinagem, perfeitamente individualizadas das demais, de acordo com as conveniências quanto à determinação dos tempos correspondentes. Um ciclo de usinagem geralmente apresenta as seguintes fases:

- a) transporte, posicionamento, fixação da peça (ou peças) 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 (troca e ajustagem inicial) que não mais satisfazem as condições desejadas na peça ou na ferramenta. Nas operações de desbaste - tem-se como fator delimitante a possibilidade da perda da capacidade de corte ou quebra das ferramentas. Nas operações de acabamento os fatores delimitadores são principalmente as tolerâncias dimensionais e a rugosidade superficial;

- h) desfixação, transporte e posicionamento da peça (ou peças) acabada; acionamento dos comandos para para da da máquina ou alimentação de nova peça.
- Grupo de ferramentas (ou pacote) - é aquele constituído por duas ou mais ferramentas, fixadas em um mesmo porta-ferramentas (figuras 7.2, 12.2 e 12.4).

2.7 - TEMPOS E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

A formulação de equações gerais para o cálculo das condições econômicas de usinagem, exige uma correta conceituação das parcelas de tempo envolvidas. Como não existem normas nacionais sobre o assunto, serão expostos a seguir os critérios adotados neste trabalho. Basicamente, correspondem aos critérios normalmente utilizados pela indústria e a maioria das obras publicadas sobre o assunto.

A exatidão na determinação dos tempos envolvidos nos processos mecânicos de usinagem dependerá do correto conhecimento das grandezas envolvidas.

2.7.1 - TEMPOS

Quanto à sua composição e determinação, os tempos envolvidos nos processos de fabricação podem ser apresentados na forma de tempo-base, tempo-padrão, tempo-corrigido e tempo-global.

2.7.1.1 - TEMPO-BASE (t_b)

Denomina-se tempo-base t_b (ou normalizado) ao tempo necessário para que um operário qualificado ou máquina, trabalhando em ritmo normal, execute todas as fases de uma operação de usinagem, segundo um método previamente estabelecido. Corresponde ao tempo

ideal de execução da operação, isto é, aquele que teoricamente seria imutável, por representar um valor médio de um grande número de medidas.

2.7.1.2 - TEMPO-PADRÃO (t_e)

Denomina-se tempo-padrão t_e , ao tempo resultante da soma dos tempos-suplementares ao tempo-base.

Os tempos-suplementares são aqueles que compensam todas as eventuais variações das condições de trabalho, normalmente expressas em tolerâncias (porcentuais) acrescidas ao tempo-base. As tolerâncias são:

- a) tolerância para necessidades pessoais;
- b) tolerância para fadiga física e mental;
- c) tolerância para demoras;
- d) tolerância para fator de aprendizagem;

2.7.1.3 - TEMPO-CORRIGIDO (t_t)

Denomina-se tempo-corrigido t_t , ao tempo resultante do acréscimo ao tempo padrão da parcela de tempo correspondente ao tempo de preparação para o início da operação, relativo a uma dada quantidade Z de peças (lote), ou seja,

$$t_t = t_e + \frac{t_p}{Z} \quad (2.1)$$

2.7.1.4 - TEMPO-GLOBAL

Denomina-se tempo-global ao tempo-corrigido acrescido do fator de correção relativo ao tempo da efetiva utilização da máquina ou do operário, isto é, do tempo efetivamente disponível para a execução da operação, dado por:

$$t_g = \sum_{k=1}^G \eta_k \cdot t_{tk} \quad (2.2)$$

onde:

G = número total de operações

η_k = rendimento operacional em cada k ésima operação ,
dado pela relação:

$$\eta_k = \frac{\text{tempo efetivamente trabalhado}}{\text{tempo disponível}}$$

Este coeficiente representa os tempos complementares, tais como os tempos perdidos em manutenção de máquinas, faltas de energia elétrica ou do operário, limpeza e lubrificação não previstas no tempo-padrão, experimentação de novos métodos de trabalho, paradas injustificadas da máquina ou do operário, etc. Estas parcelas dependem sobretudo do estado organizacional da empresa, da sua administração e mesmo de fatores aleatórios.

t_{tk} = tempo-corrigido de cada operação.

Substituindo-se o valor de t_c dado pela equação (2.1) na equação (2.2), tem-se:

$$t_g = \sum_{k=1}^G \eta_k \cdot \left(\frac{t_{pk}}{Z_k} + t_{tk} \right) \quad (2.3)$$

onde o número de peças do lote em cada operação (Z_k) será função da existência ou não de peças refugadas nas operações anteriores, ou seja, $Z_k \leq Z_{k-1}$.

2.7.2 - MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

A determinação dos tempos envolvidos nas operações gerais de usinagem pode ser feita por um dos seguintes métodos:

- a) por simples estimativa, tendo por base apenas a experiência do avaliador. Obviamente, este método po

de conduzir a grandes erros, não apresentando nenhum valor científico. Neste método o avaliador apela à sua memória ou a tabelas, aplicando seu bom senso para fixar valores que lhe parecem corretos. Embora seja simples e rápido, geralmente conduz a previsões incorretas, principalmente quando há grande ocorrência de operações manuais. Seu uso é justificado apenas para pequenas quantidades de peças, ou cujo custo de uma avaliação mais precisa não seria compensador.

- b) por comparação com operações semelhantes (método comparativo), baseado na previsão da duração dos tempos manuais e manuais-máquina, em relação a uma ou mais operações semelhantes, cujos tempos são conhecidos com suficiente precisão. Este método é particularmente vantajoso para lotes constituídos por poucas peças, sendo os resultados obtidos apenas aproximados. O grau de aproximação (ou erro) depende da experiência acumulada, estado de organização e planejamento da produção, bem como de uma conveniente codificação e controle das peças e operações executadas.
- c) por cálculo a partir de tabelas de tempos elementares (método sintético), baseado nos tempos elementares pré-determinados ou nos tempos elementares simplificados, particularmente aplicável na determinação dos tempos manuais. Constitue o método que potencialmente melhores vantagens oferece quanto à precisão obtida. Para lotes pequenos ou médios são comumente utilizados os tempos elementares simpli-

ficados, obtidos por cronometragens ou dados estatísticos. Nos lotes grandes geralmente são utilizados os tempos elementares prē-determinados, como por exemplo o MTM (Methods-Time Measurements).

- d) por cronometragens (mētodo experimental), que implica na necessidade da existência física das operações cujos tempos devem ser avaliados.
- e) por cálculo a partir de equações (mētodo analítico) particularmente aplicável à determinação dos tempos de corte (capítulo VII) e de reposição (capítulo XII).

Neste trabalho assumirão particular importância a avaliação dos tempos por meio do mētodo analítico. O estudo dos demais métodos não será feito neste trabalho. Porém, a precisão com que são conhecidas as parcelas de tempo componentes do tempo total de confecção, irá influir diretamente no valor calculado das condições econômicas de usinagem (mínimo custo e máxima produção).

3 - PERCURSOS

Na Norma P-NB-204 [53] são definidos os *percursos de corte* ℓ_c , *efetivo de corte* ℓ_e e *avanço* ℓ_a . Complementando esta Norma, para sua aplicação aos casos gerais de usinagem, será feita a divisão entre os percursos da ferramenta e do carro ou mesa móvel, tendo em vista uma correta formulação para o tempo de corte.

3.1 - PERCURSOS DE AVANÇO DA FERRAMENTA EM RELAÇÃO À PEÇA

A cada movimento corresponde um dado percurso, que é o espaço percorrido pelo ponto principal de referência da ferramenta.

Resultam de particular interesse os percursos da ferramenta na *direção principal de avanço*, definidos pela abscissa z , de acordo com o sistema de coordenadas, mostrados nas figuras 3.1 e 3.2, denominados *percursos principais de avanço*, normalmente dados em milímetros (mm).

No parágrafo 3.3 serão deduzidas as relações geométricas entre os percursos de avanço da ferramenta e do carro ou mesa móvel, tendo-se em vista a necessidade, em algumas aplicações práticas, de mudança de sistemas de referência. Isto se prende à maior facilidade de obtenção de dados experimentais ou geométricos da peça, conforme a operação de usinagem.

3.1.1 - APROXIMAÇÃO DA FERRAMENTA ℓ_{aa}

O *percurso principal de aproximação* da ferramenta ℓ_{aa} é o espaço percorrido pelo ponto principal de referência, na *direção principal de avanço*, desde o instante em que a ferramenta foi corretamente posicionada para o início da operação de usinagem (no torneamento, fixação da profundidade de corte p [53]) até o instante em que a mesma inicia a formação de cavacos (figs. 3.1 e 3.2). Como os percursos ℓ_{aa} correspondem a tempos não-produtivos, eles devem apre

sentar o mínimo valor permitido pelas características operacionais da máquina e tolerâncias dimensionais da peça. Para o sistema de referência mostrado nas figuras 3.1 e 3.2, tem-se:

$$\ell_{aa} = z_0$$

3.1.2 - CORTE DE MATERIAL DA PEÇA ℓ_a

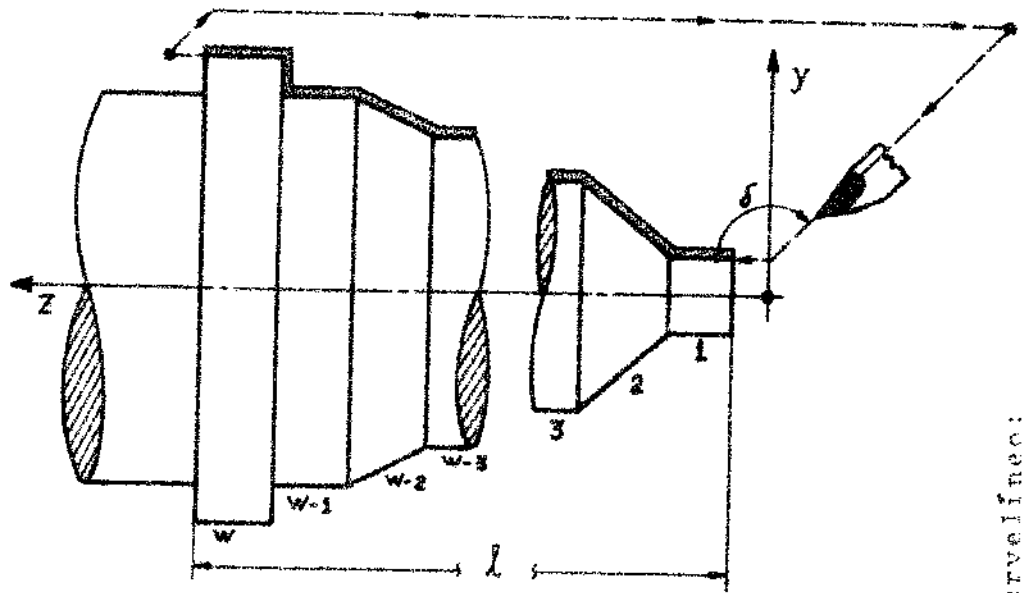
O percurso principal de avanço de corte da ferramenta ℓ_a é o espaço percorrido pelo ponto principal de referência da ferramenta, na direção principal de avanço, definido pelos instantes em que se inicia e termina a formação de cavacos.

Como a penetração ou saída da ferramenta ocorre de modo gradual e progressivo, é conveniente dividir o percurso ℓ_a nas seguintes parcelas:

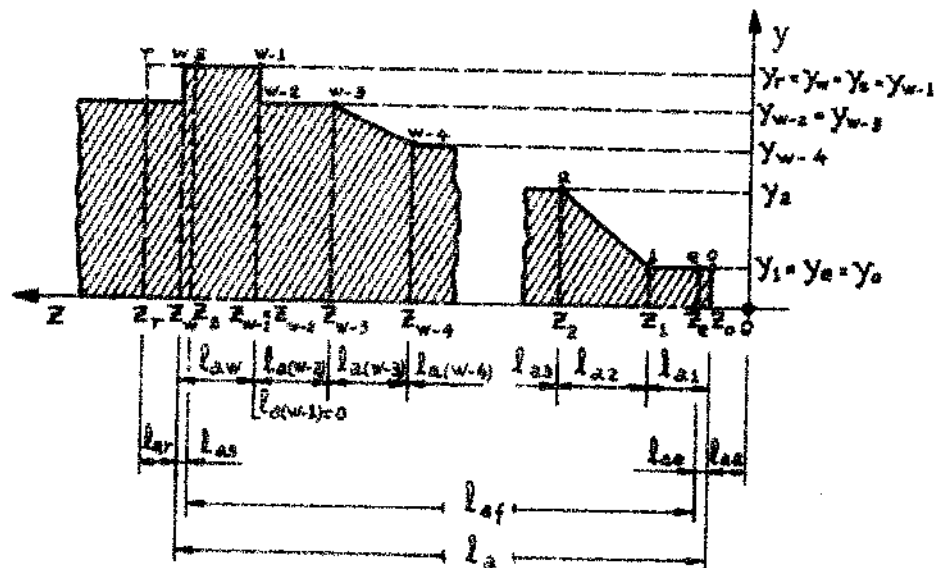
- a) Percurso principal de entrada da ferramenta na peça, ℓ_{ae} - é o espaço percorrido pelo ponto principal de referência, desde o instante em que a ferramenta começa a penetrar na peça, até o instante da entrada em regime normal de usinagem (figs. 3.1 e 3.2). Os valores mais significativos de ℓ_{ae} ocorrem nas operações de fresamento e furação com brocas helicoidais. No torneamento ele é praticamente desprezível na maioria das operações. Como mostrado nas figuras 3.1 e 3.2, tem-se:

$$\ell_{ae} = z_e - z_0$$

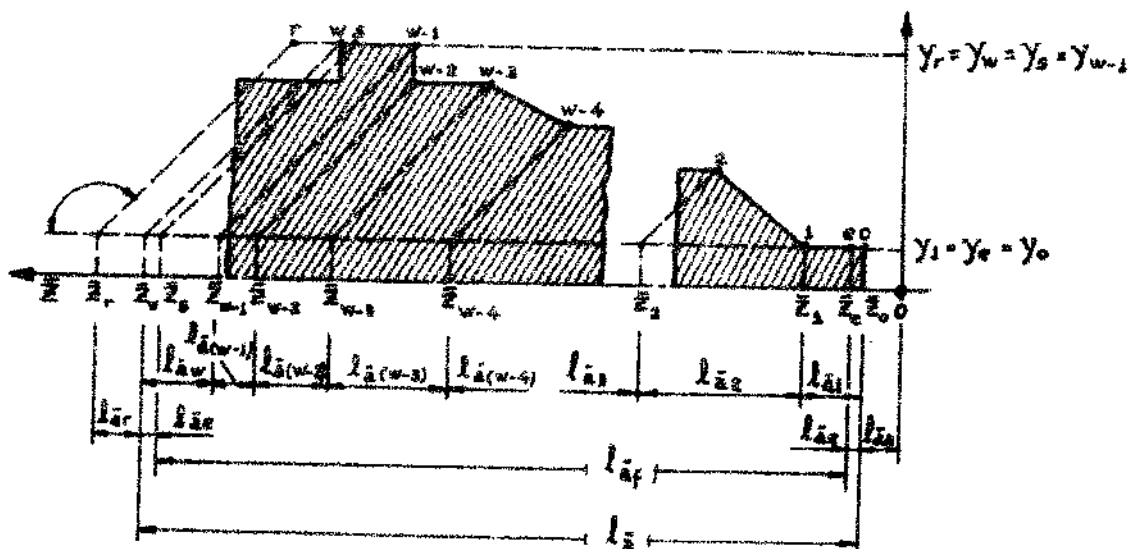
- b) Percurso principal de avanço de corte da ferramenta ℓ_{af} é o espaço percorrido pelo ponto principal de referência da ferramenta, segundo a direção principal de avanço, durante o qual se realiza a operação de corte propriamente dita. Por definição, este percurso coincide com a dimensão ℓ da peça (figs. 3.1 e 3.2). Para uma pe



TOPEAMENTO CURVELINEO

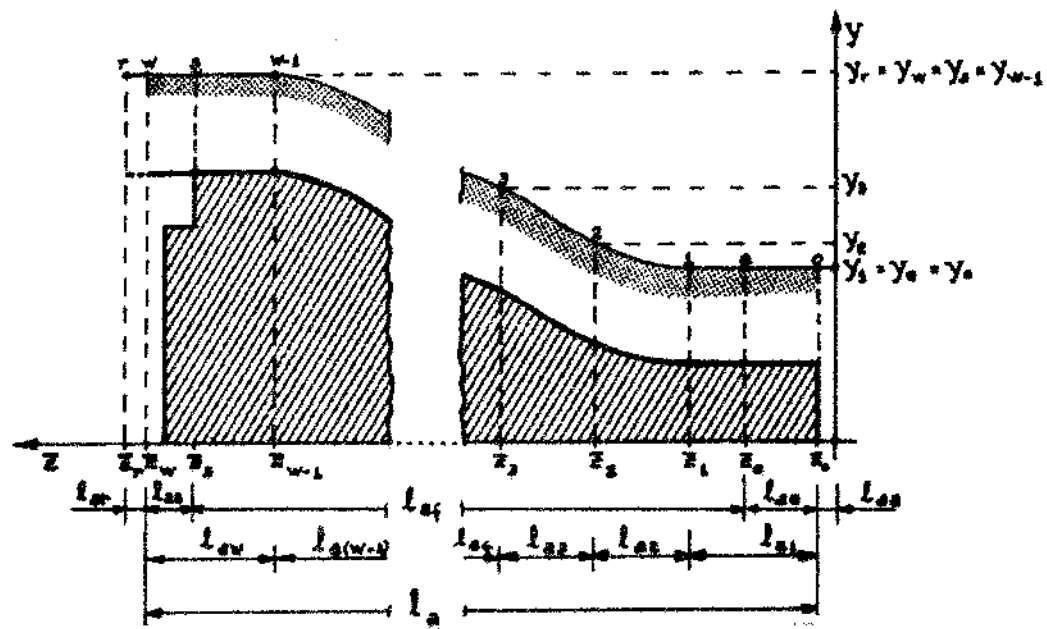
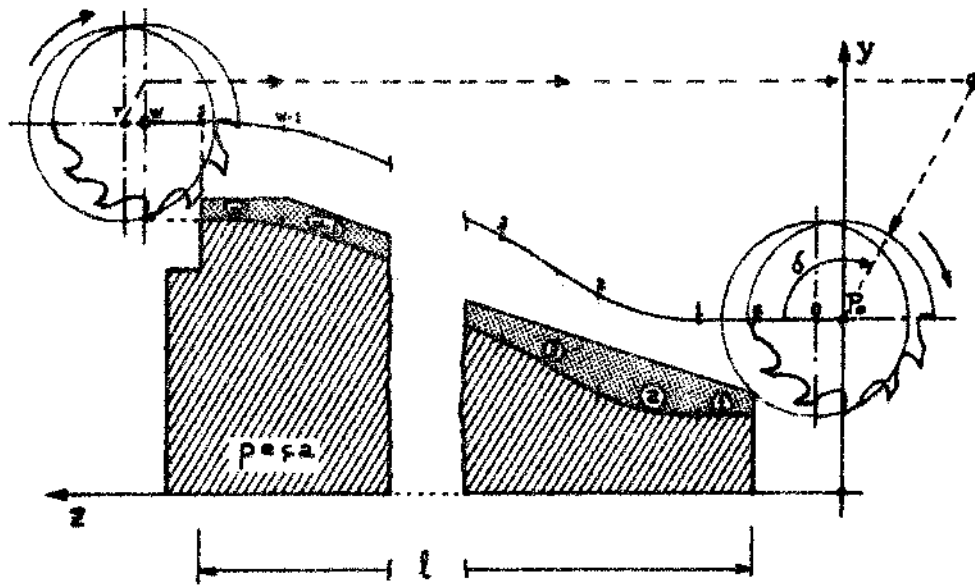


a) Deslocamentos da ferramenta em relação à peça.

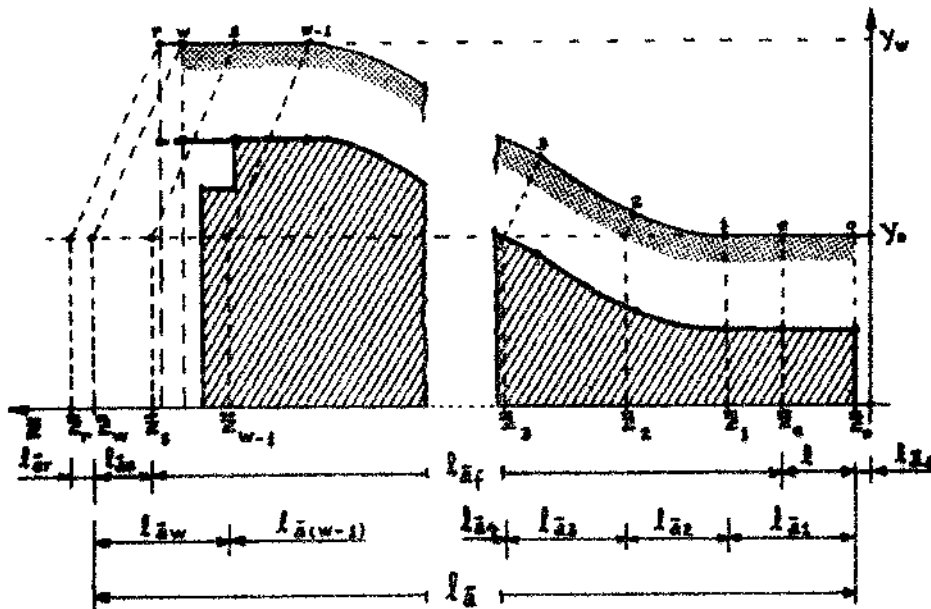


b) Deslocamentos do carro longitudinal (carro do banco).

Fig. 3.1 - Sistemas de referência utilizados no torneamento curvelíneo:
a) da ferramenta; b) do carro longitudinal do torno.



a) Deslocamentos da ferramenta em relação à peça.



b) Deslocamentos da mesa da Fresadora.

Fig. 3.2- Sistemas de referência utilizados no fresamento curvelíneo:
a) da ferramenta; b) da mesa da fresadora.

ça constituída de w perfis usinados, é a soma de todas as dimensões l_{ai} , descontados os percursos principais de entrada e saída da ferramenta. Para o percurso l_{af} (figs. 3.1 e 3.2), tem-se:

$$l_{af} = l_a - (l_{ae} + l_{as}) = z_s - z_e$$

- c) *Percurso principal de saída da ferramenta l_{as}* é o espaço percorrido pelo ponto principal de referência da ferramenta, segundo a *direção principal de avanço*, desde o instante em que se inicia o regime de corte variável (saída do regime normal) até o instante em que cessa a formação de cavacos. Em algumas operações de usinagem, tais como, torneamento, mandrilamento e furação, o percurso l_{as} é praticamente desprezível, enquanto que nas operações de fresamento ele em geral é significativo.

De acordo com o sistema de referência adotado (figs. 3.1 e 3.2), tem-se:

$$l_{as} = z_w - z_s$$

Das definições correspondentes aos percursos componentes do percurso principal de avanço da ferramenta l_a , para um perfil usinado constituído de w partes, como mostram as figuras 3.1 e 3.2, resulta:

$$l_a = l_{ae} + l_{af} + l_{as} = \sum_{p=1}^w l_{ap} = \sum_{p=1}^w (z_p - z_{p-1}) = z_w - z_o \quad (3.1)$$

3.1.3 - RETIRADA DA FERRAMENTA l_{ar}

O *percurso principal de retirada da ferramenta l_{ar}* é o espaço percorrido pelo ponto principal de referência da ferramenta, segundo a *direção principal de avanço*, desde o instante em que ces-

sa a formação do cavaco, até o instante em que se inicia o movimento de retorno da ferramenta à sua posição inicial.

Das figuras 3.1 e 3.2, tem-se:

$$l_{ar} = z_r - z_w$$

Como o percurso l_{ar} corresponde a um tempo não-produtivo, deve-se sempre procurar seu valor mínimo, de acordo com as características operacionais da máquina e as tolerâncias dimensionais da peça. Em algumas operações de usinagem, tais como furação de furos não-passantes, escareamento, sangramento (radial e axial) com bedame, o percurso l_{ar} é nulo.

3.1.4 - TOTAL DE AVANÇO DA FERRAMENTA l_{at}

O percurso total de avanço da ferramenta l_{at} , é o espaço percorrido pelo ponto principal de referência da ferramenta, segundo a direção principal de avanço, desde o instante em que a ferramenta foi posicionada para o início da operação de usinagem, até o instante em que se inicia o movimento de retorno da ferramenta à sua posição inicial. Do anteriormente exposto (§ 3.1.1 a § 3.1.3), resulta:

$$l_{at} = l_{aa} + l_a + l_{ar} = l_{aa} + l_{ae} + l_{af} + l_{as} + l_{ar} \quad (3.2)$$

De acordo com o sistema de coordenadas adotado (figuras 3.1 e 3.2), tem-se:

$$l_{at} = z_r$$

3.2 - PERCURSOS DE AVANÇO DO CARRO OU MESA MÓVEL

Nas operações gerais de usinagem, principalmente torneamento e fresamento curvelíneo, como mostram as figuras 3.1 e 3.2, - nem sempre os percursos da ferramenta na direção principal de avanço coincidem com os do carro ou mesa móvel, sobre o qual está presa-

a ferramenta (torneamento) ou a peça (mandrilamento, fresamento, etc.). Nestes casos, o carro sôbre o qual está montada a ferramenta, ou a mesa móvel sôbre a qual está a peça, terá um percurso $\bar{l}_a$ maior ou menor que o percurso $\bar{l}_a$ da ferramenta em relação à peça.

Os percursos do carro ou mesa móvel, são referidos às suas guias e portanto a direção dos deslocamentos $\underline{z}$, por definição coincide com a direção principal de avanço.

3.2.1 - APROXIMAÇÃO DA FERRAMENTA $\bar{l}_{aa}$

O percurso do carro ou mesa móvel $\bar{l}_{aa}$ é o espaço percorrido pelo carro ou mesa móvel, durante o percurso principal de aproximação da ferramenta $\bar{l}_{aa}$. Referindo-se às figuras 3.1 e 3.2, tem-se:

$$\bar{l}_{aa} = \bar{z}_0$$

Na maioria das operações de usinagem o ponto de referência da ferramenta descreve uma trajetória retilínea durante o movimento de aproximação, e portanto $\bar{l}_{aa} = \bar{l}_{aa}$.

3.2.2 - CORTE DO MATERIAL DA PEÇA $\bar{l}_a$

O percurso do carro ou mesa móvel $\bar{l}_a$, é o espaço percorrido pelo carro ou mesa móvel durante o percurso principal de avanço de corte da ferramenta $\bar{l}_a$. Para um perfil usinado constituído de w partes, como mostram as figuras 3.1 e 3.2, tem-se:

$$\bar{l}_a = \sum_{p=1}^w \bar{l}_{ap} = \sum_{p=1}^w (\bar{z}_p - \bar{z}_{p-1}) = \bar{z}_w - \bar{z}_0 \quad (3.3)$$

Devido aos movimentos de entrada e saída da ferramenta, pode-se dividir o percurso $\bar{l}_a$ nas seguintes parcelas:

$$\bar{l}_a = \bar{l}_{ae} + \bar{l}_{af} + \bar{l}_{as} \quad (3.4)$$

onde:

l_{ae}^- : percurso do carro ou mesa móvel, correspondente ao percurso l_{ae} da ferramenta (§ 3.1.2).

l_{af}^- : percurso do carro ou mesa móvel, correspondente ao percurso l_{af} .

l_{as}^- : percurso do carro ou mesa móvel, correspondente ao percurso l_{as} .

Referindo-se às figuras 3.1 e 3.2, tem-se:

$$l_{ae}^- = \bar{z}_e$$

$$l_{af}^- = \bar{z}_s - \bar{z}_e$$

$$l_{as}^- = \bar{z}_w - \bar{z}_s$$

Conforme será visto no parágrafo 3.3, o percurso l_a^- pode ser decomposto nas parcelas:

$$l_a^- = l_a + l_{ac}^-$$

onde l_{ac}^- é o percurso complementar do carro ou mesa móvel (ver parágrafo 3.3.3), para mais ou para menos, em relação ao percurso de avanço l_a da ferramenta, devido à posição do eixo de inclinação do copiador e a forma geométrica do perfil usinado. Introduzindo-se o coeficiente de correlacionamento φ_t entre os deslocamentos do carro ou mesa móvel e os da ferramenta (ver § 3.3.3), resulta:

$$l_a^- = \varphi_t \cdot l_a$$

3.2.3 - RETIRADA DA FERRAMENTA l_{ar}^-

O percurso do carro ou mesa móvel l_{ar}^- , é o espaço percorrido pelo carro ou mesa móvel durante o percurso de retirada da ferramenta l_{ar} . De acordo com as figuras 3.1 e 3.2, tem-se:

$$l_{ar}^- = \bar{z}_r - \bar{z}_s$$

Como na maioria das operações de usinagem o ponto principal de referência da ferramenta descreve uma trajetória retilínea - durante o movimento de retirada da ferramenta, resulta nestes casos $l_{ar}^- = l_{ar}$.

3.2.4 - TOTAL DE AVANÇO DO CARRO OU MESA MÓVEL, l_{at}^-

O percurso total de avanço do carro ou mesa móvel l_{at}^- , é o espaço percorrido pelo carro ou mesa móvel durante o percurso total de avanço da ferramenta l_{at} . O percurso l_{at}^- é portanto a soma de todos os percursos envolvidos, ou seja:

$$l_{at}^- = l_{aa}^- + l_a^- + l_{ar}^- = l_{aa}^- + l_{ae}^- + l_{af}^- + l_{as}^- + l_{ar}^- \quad (3.5)$$

Referindo-se ao sistema de coordenadas adotado (figuras 3.1 e 3.2), tem-se:

$$l_{at}^- = \bar{z}_r$$

pois a ferramenta inicia o seu movimento na direção principal de avanço na abscissa $z = 0$.

3.3 - RELAÇÕES GEOMÉTRICAS ENTRE OS PERCURSOS DA FERRAMENTA E DO CARRO OU MESA MÓVEL

3.3.1 - DETERMINAÇÃO DO PERCURSO DE AVANÇO DO CARRO OU MESA MÓVEL l_a^-

Considerando-se uma das p ésimas partes componentes de um perfil usinado constituído de w partes, como mostra a figura 3.3, sendo $y = f(z)$ a trajetória do ponto principal de referência da ferramenta, tem-se:

$$d\bar{z} = dz - \cotg \delta . dy$$

onde δ é o ângulo de inclinação do eixo do copiador em relação à direção principal de avanço.

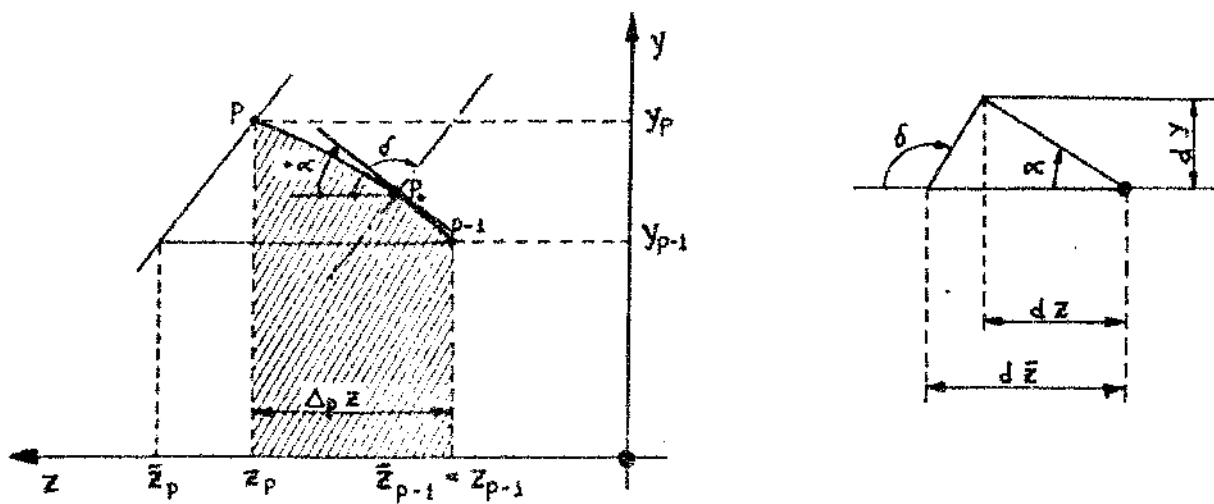


Fig. 3.3 - Deslocamentos da ferramenta e do carro ou mesa móvel.

Integrando-se entre os pontos (p, p-1) resulta:

$$\bar{z}_p - \bar{z}_{p-1} = z_p - z_{p-1} - \cotg \delta \cdot (y_p - y_{p-1})$$

ou seja,

$$\bar{z}_{ap} = \bar{z}_{ap} - \cotg \delta \cdot (y_p - y_{p-1}) \quad (3.6)$$

Para todo o perfil usinado (w partes) tem-se:

$$\sum_{p=1}^w (\bar{z}_p - \bar{z}_{p-1}) = \sum_{p=1}^w (z_p - z_{p-1}) - \cotg \delta \cdot \sum_{p=1}^w (y_p - y_{p-1})$$

ou seja,

$$\bar{z}_w - \bar{z}_0 = (z_w - z_0) - \cotg \delta \cdot (y_w - y_0)$$

De acordo com as equações (3.1) e (3.3) segue que:

$$\bar{z}_a = \bar{z}_a - \cotg \delta \cdot (y_w - y_0) \quad (3.7)$$

3.3.2 - ÂNGULO TOTAL DE RAMPA DO PERFIL USINADO α_t

Chamando-se α_t o ângulo total de rampa (fig. 3.4), tem-se:

$$\tg \alpha_t = \frac{y_w - y_0}{z_w - z_0} = \frac{\Delta y}{\bar{z}_a} \quad (3.8)$$

Substituindo-se, resulta:

$$\ell_a^- = (1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha_t) \cdot \ell_a \quad (3.9)$$

Quando $\ell_a = 0$ e $\alpha_t = 90^\circ$ (operações de faceamento), o percurso ℓ_a^- resulta indeterminado ($0, \infty$). Passando-se ao limite obtém-se a equação (3.7) que deve ser utilizada nestes casos.

3.3.3 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE OS PERCURSOS DE AVANÇO DA FERRAMENTA E DO CARRO OU MESA MÓVEL

Chamando-se:

$$\varphi_t = 1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha_t \quad (3.10)$$

onde φ_t significa o coeficiente de correlação entre os percursos de avanço da ferramenta ℓ_a e do carro ou mesa móvel ℓ_a^- , resulta:

$$\ell_a^- = \varphi_t \cdot \ell_a \quad (3.11)$$

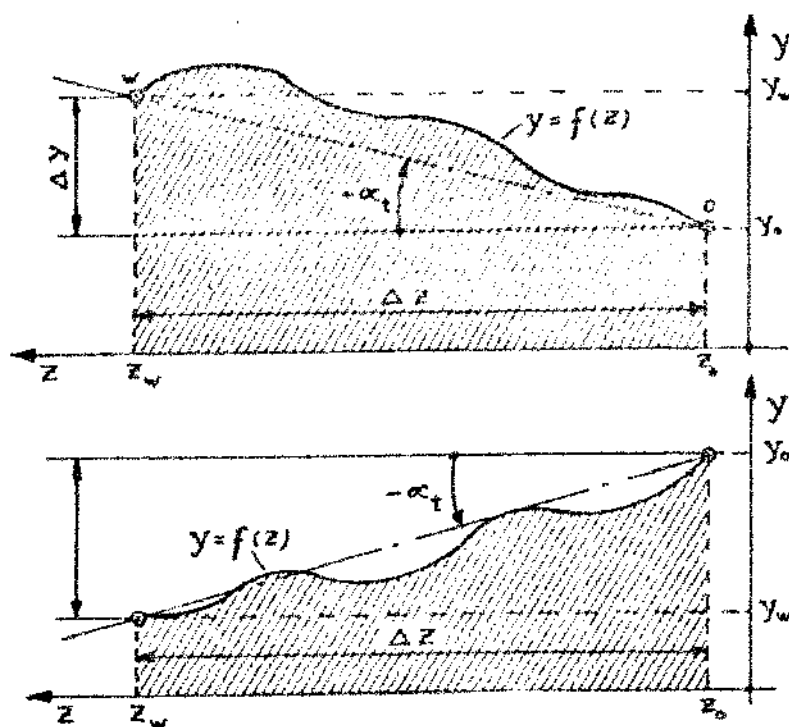


Fig. 3.4 - Ângulo total de rampa α_t na usinagem de um dado perfil $y = f(z)$ na peça.

O âbaco mostrado na figura 3.5, permite uma rápida avaliação do coeficiente de correlação φ_t .

Por outro lado, a equação (3.4) fornece:

$$l_a^- = l_a - l_a \cdot \cotg \delta \cdot \tg \alpha_t = (1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha_t) l_a$$

Denominando-se $l_{ac}^- = - l_a \cdot \cotg \delta \cdot \tg \alpha_t$ o percurso complementar de avanço do carro ou mesa móvel, tem-se:

$$l_a^- = l_a + l_{ac}^- \quad (3.12)$$

É interessante notar-se que l_{ac}^- pode ser positivo ou negativo, conforme o ângulo total de rampa α_t seja positivo ou negativo. Nos casos particulares em que $\delta = 90^\circ$ ou $\alpha_t = 0^\circ$ resulta $l_a^- = l_a$.

3.3.4 - PERCURSOS DE AVANÇO E TEMPOS

A cada parcela componente do percurso total de avanço do carro ou mesa móvel l_{at}^- corresponde uma dada parcela do tempo total de confecção da peça. Assim, os percursos l_{aa}^- e l_{ar}^- correspondem a tempos improdutivos da operação, porém são diretamente dependentes da velocidade de rotação do eixo-árvore n e do avanço do carro ou mesa móvel por volta do eixo-árvore, $\bar{a}$.

O percurso l_a^- do carro ou mesa móvel corresponde a tempos produtivos, pertencendo portanto ao tempo de corte t_c da operação.

A dedução analítica das equações do tempo de corte, em função dos percursos principais de avanço e das características da operação de usinagem, será feita no capítulo VII.

Nas operações de usinagem onde atuam simultaneamente várias ferramentas, o tempo total de corte da operação deve ser calculado em base ao conceito de "ferramenta-base", como será visto no parágrafo 7.2.3.

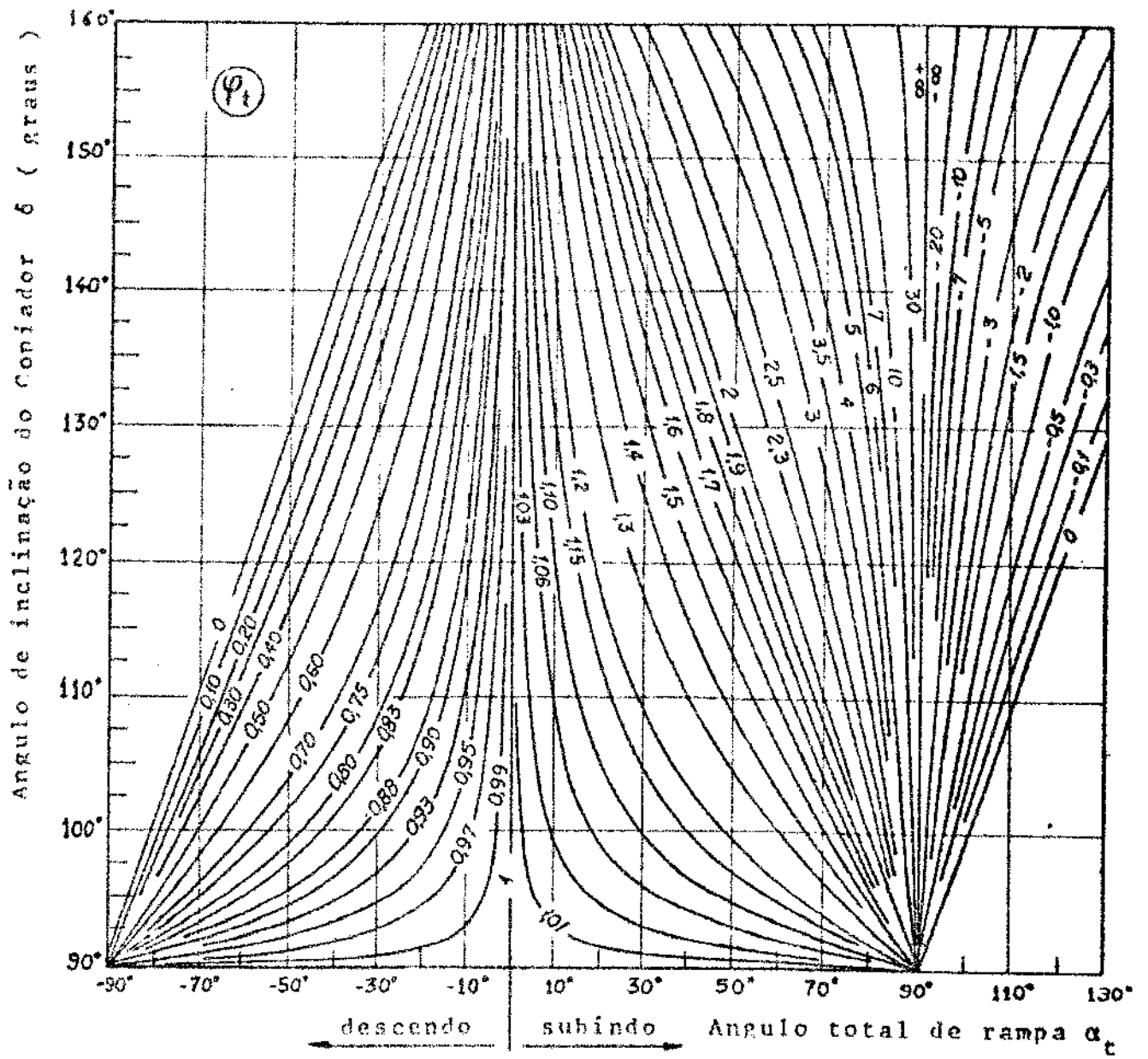


Fig. 3.5 - Abaco para determinação do coeficiente de correção ϕ_t .

4 - VELOCIDADES DE AVANÇO

Admitindo-se que a ferramenta se desloca em um plano, e que sua forma geométrica permita a reprodução de um dado perfil da peça, assumem particular importância, além das definidas pela Norma P-NB-204 [53], as velocidades de avanço diretamente relacionadas com o tempo de corte da operação.

4.1 - Velocidade de Avanço do Carro ou Mesa Móvel, em Relação à Máquina-Ferramenta, v_a

A velocidade de avanço do carro ou mesa móvel v_a é a velocidade instantânea do carro ou mesa móvel, durante o movimento de translação ao longo de suas guias (figs. 4.1 e 4.2). Por definição (§ 2.4), a direção deste movimento coincide com a direção principal de avanço.

4.2 - Velocidades de Avanço da Ferramenta em Relação à Peça.

4.2.1 - Velocidade Principal de Avanço da Ferramenta, v_a

A velocidade principal de avanço da ferramenta v_a é a velocidade instantânea do ponto principal de referência da ferramenta, segundo a direção e sentido do movimento principal de avanço (figuras 4.1 e 4.2).

4.2.2 - Velocidade Tangencial de Avanço da Ferramenta, v_{at}

A velocidade tangencial de avanço da ferramenta v_{at} é a velocidade instantânea do ponto principal de referência da ferramenta, segundo a direção e sentido do movimento resultante de avanço (figuras 4.1 e 4.2).

4.2.3 - Velocidade de Avanço da Ferramenta segundo o Eixo de Inclinação do Copiador, v_{au}

A velocidade de avanço da ferramenta segundo o eixo de inclinação do copiador v_{au} é a velocidade instantânea do ponto principal de referência da ferramenta, na direção e sentido do movimento da ferramenta segundo o eixo de inclinação do copiador (figuras 4.1 e 4.2). Neste caso, ambas as velocidades, da ferramenta e do copiador coincidem, pois não há movimento relativo.

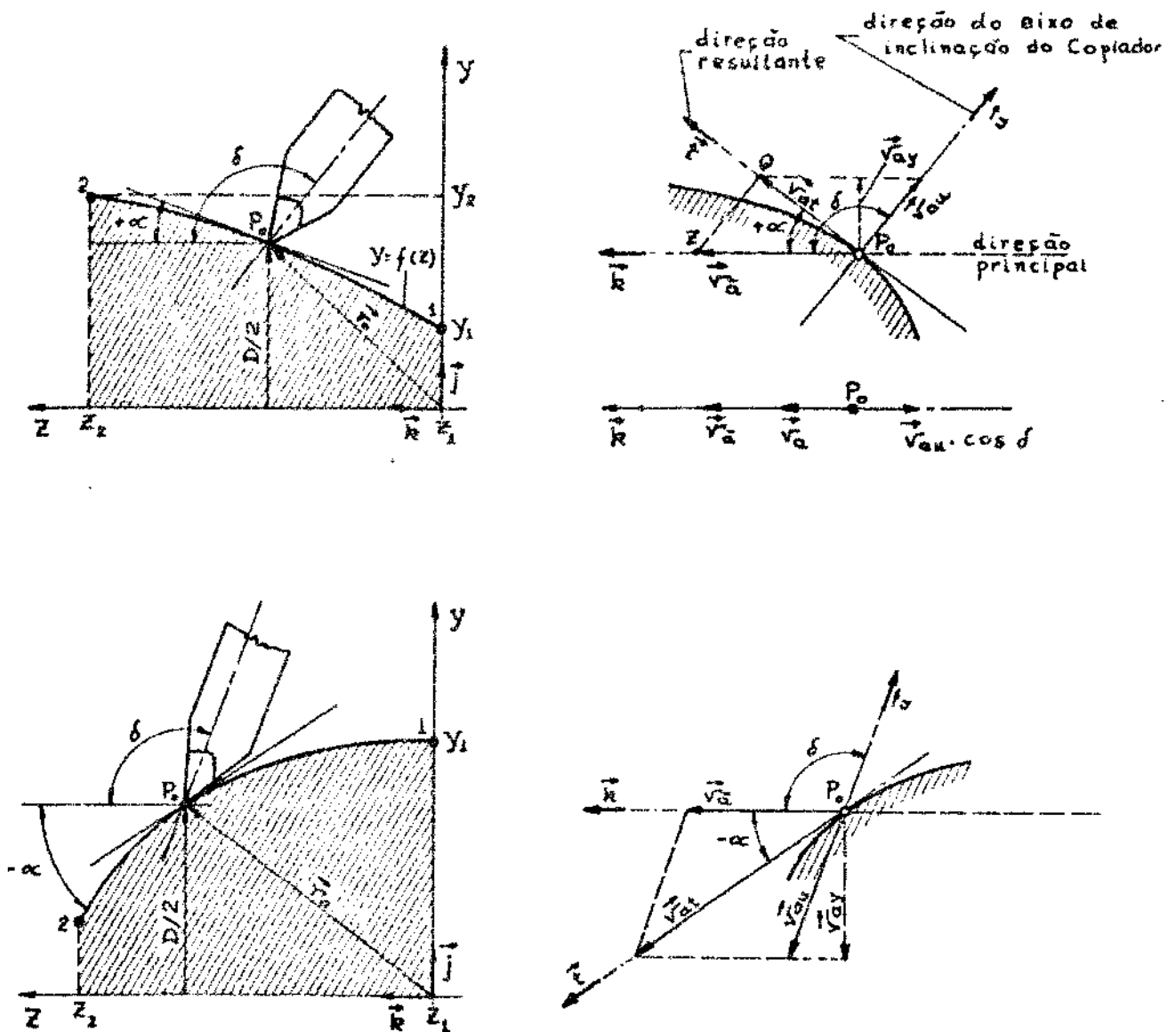


Fig. 4.1 - Direções e sentidos das velocidades de avanço no torneamento curvelíneo.

4.2.4 - Velocidade Transversal de Avanço da Ferramenta, v_{ay}

A velocidade transversal de avanço da ferramenta v_{ay} é a velocidade instantânea do ponto principal de referência da ferramenta, segundo a direção e sentido do movimento transversal de avanço (figuras 4.1 e 4.2).

4.3 - RELAÇÕES ENTRE AS VELOCIDADES DE AVANÇO

4.3.1 - Generalidades

Admitindo-se que a ferramenta desloca-se num plano, e que sua geometria permita a copiagem de um dado perfil $y = f(z)$, as coordenadas do ponto principal de referência P_0 , no sistema de referência mostrado nas figuras 4.1 e 4.2 serão dadas por:

$$P_0 \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = f(z)$$

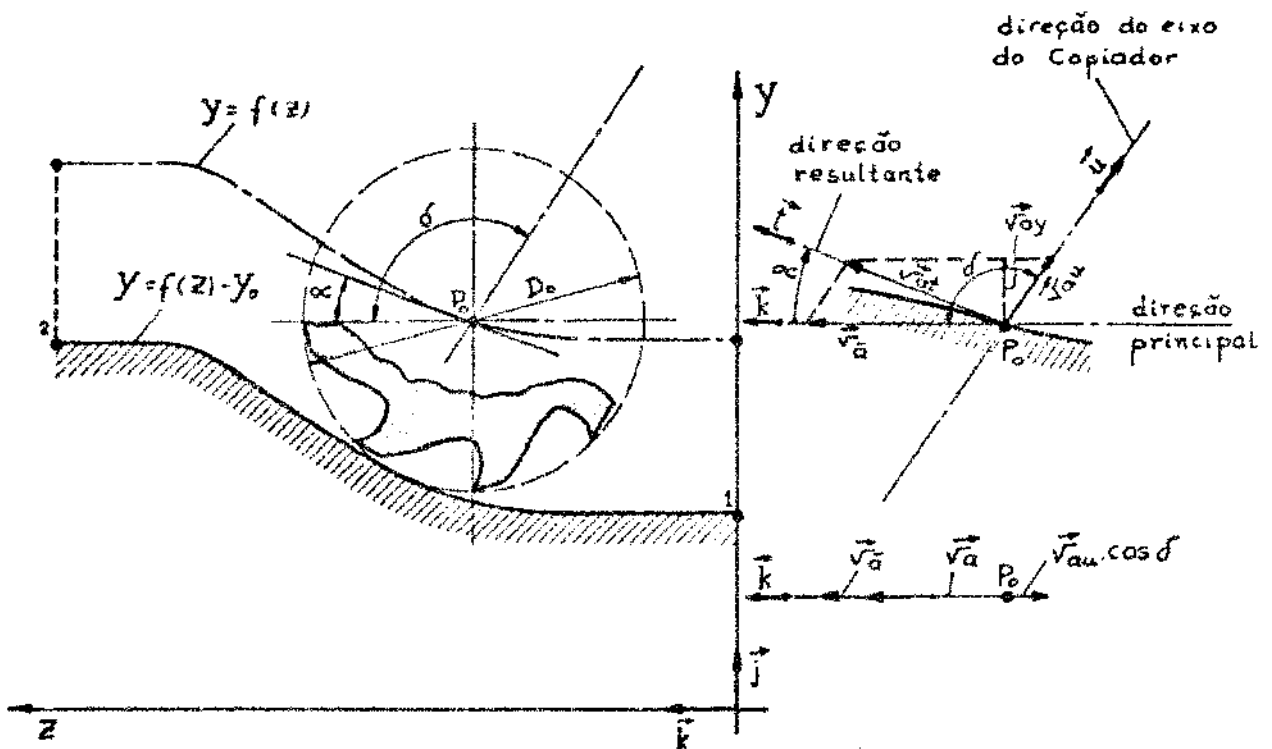


Fig. 4.2 - Direções e sentidos das velocidades de avanço, no fresamento curvelíneo por meio de fresa cilíndrica tangencial.

Chamando-se $\vec{j}$ e $\vec{k}$ os vetores unitários associados aos eixos y e z respectivamente, o vetor posição do ponto P_0 será:

$$\vec{r}_0 = y.\vec{j} + z.\vec{k}$$

Por outro lado, os vetores associados às direções de avanço serão:

$$\text{- direção resultante (tangencial): } \vec{t} = \sin \alpha.\vec{j} + \cos \alpha.\vec{k} \quad (4.1)$$

onde o ângulo de rampa α , no caso geral é dado por:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{dy}{dz} \right) \quad (4.2)$$

$$\text{- direção do eixo copiador: } \vec{u} = \sin \delta.\vec{j} + \cos \delta.\vec{k} \quad (4.3)$$

Na subida ou descida de rampas, num certo instante de tempo t , vale a seguinte relação entre as velocidades de avanço:

$$\vec{v}_{at} = \vec{v}_a^- + \vec{v}_{au} \quad (4.4)$$

Admitindo-se que o avanço $\vec{a}$ do carro ou mesa móvel da máquina-ferramenta (ver parágrafo 5.1) seja diretamente dependente do giro do eixo-árvore, tem-se:

$$\vec{v}_a^- = v_a^- . \vec{k} = \frac{\vec{a}}{2\pi} . \frac{d\theta}{dt} . \vec{k} \quad (4.5)$$

ou em módulo,

$$v_a^- = \frac{\vec{a}}{2\pi} . \frac{d\theta}{dt} \quad (4.6)$$

onde $\frac{d\theta}{dt}$ é a velocidade angular do movimento de rotação do eixo-árvore (onde está fixada a peça ou a ferramenta). Em função da velocidade de rotação n do eixo-árvore (em rpm), a equação (4.6) simplifica-se para:

$$v_a^- = \vec{a}.n \quad (4.7)$$

Os valores assumidos pelo avanço $\vec{a}$ dependem de cada particular operação de usinagem. No caso de percursos retilíneos da ferramenta, com y constante ou $\delta = 90^\circ$ tem-se:

$$\vec{a} = a, \quad v_a^- = v_a$$

Os valores assumidos pelo ângulo de rampa α são positivos ou negativos quando a ferramenta sobe ou desce a rampa, como mostra a figura 4.1.

A velocidade principal de avanço da ferramenta v_a será dada por:

$$\vec{v}_a = v_a \cdot \vec{k} = \frac{dz}{dt} \cdot \vec{k}$$

Para a velocidade de avanço do copiador v_{au} , tem-se:

$$\vec{v}_{au} = v_{au} \cdot \sin \delta \cdot \vec{j} + v_{au} \cdot \cos \delta \cdot \vec{k} \quad (4.8)$$

Para a velocidade resultante de avanço v_{at} , tem-se:

$$\vec{v}_{at} = v_{at} \cdot \sin \alpha \cdot \vec{j} + v_{at} \cdot \cos \alpha \cdot \vec{k} \quad (4.9)$$

Para a velocidade transversal de avanço v_{ay} , tem-se:

$$\vec{v}_{ay} = v_{ay} \cdot \vec{j} = \frac{dy}{dt} \cdot \vec{j} \quad (4.10)$$

4.3.2 - Velocidade de Avanço da Ferramenta em Relação à Velocidade de Avanço do Carro ou Mesa Móvel.

Substituindo-se os valores de $\vec{v}_a$, $\vec{v}_{au}$ e $\vec{v}_{at}$ dados pelas equações (4.5), (4.8) e (4.9) respectivamente, na equação (4.4) resulta em módulo:

$$v_{at} \cdot \cos \alpha = v_a + v_{au} \cdot \cos \delta$$

$$v_{at} \cdot \sin \alpha = v_{au} \cdot \sin \delta$$

e consequentemente as relações:

$$v_{at} = \frac{\sin \delta}{\sin (\delta - \alpha)} \cdot v_a = \xi_t \cdot v_a \quad (4.11)$$

$$v_{au} = \frac{\sin \alpha}{\sin (\delta - \alpha)} \cdot v_a = \xi_u \cdot v_a \quad (4.12)$$

onde:

$$\xi_t = \frac{\sin \delta}{\sin (\delta - \alpha)} \quad (4.13)$$

$$\xi_u = \frac{\sin \alpha}{\sin (\delta - \alpha)} \quad (4.14)$$

Para a velocidade transversal de avanço v_{ay} , de acordo com as figuras 4.1 e 4.2, tem-se:

$$v_{ay} = v_{at} \cdot \sin \alpha \quad (4.15)$$

Substituindo-se o valor de v_{at} dado pela equação (4.11) na equação (4.15), resulta:

$$v_{ay} = \frac{\sin \delta \cdot \sin \alpha}{\sin (\delta - \alpha)} \cdot v_a = \xi_y \cdot v_a \quad (4.16)$$

onde

$$\xi_y = \frac{\sin \delta \cdot \sin \alpha}{\sin (\delta - \alpha)} \quad (4.17)$$

Para uma dada velocidade de avanço do carro ou mesa móvel v_a , quando ξ_y assume valores elevados, corresponderão grandes velocidades de avanço resultante v_{at} , o que poderá originar grandes forças de usinagem, piorar o acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais da peça usinada.

Quanto à velocidade de avanço segundo o eixo de inclinação do copiador v_{au} , sua variação depende do tempo de resposta e sensibilidade do copiador, o que poderá prejudicar principalmente as tolerâncias dimensionais e o acabamento superficial da peça usinada. Por isso, na solução de problemas práticos deve-se escolher um conveniente valor do ângulo de inclinação do copiador δ , para um determinado intervalo de variação do ângulo de rampa α entre dois pontos do perfil usinado.

A determinação do coeficiente ξ_y apresenta interesse principalmente nas operações de faceamento, com ferramenta montada sobre copiador, cuja direção de avanço coincide com a direção principal de avanço.

Para a velocidade principal de avanço da ferramenta v_a tem-se:

$$v_a = v_a + v_{au} \cdot \cos \delta = v_{at} \cdot \cos \alpha \quad (4.18)$$

Substituindo-se o valor de v_{at} dado pela equação (4.11) na equação (4.18) resulta:

$$v_a = \frac{\text{sen } \delta \cdot \cos \alpha}{\text{sen } (\delta - \alpha)} \cdot v_a^- = \xi_a \cdot v_a^- \quad (4.19)$$

ou seja:

$$\xi_a = \frac{\text{sen } \delta \cdot \cos \alpha}{\text{sen } (\delta - \alpha)} = \frac{1}{1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha} = \frac{1}{\varphi} \quad (4.20)$$

onde φ representa o coeficiente de correlação para um particular valor do ângulo de inclinação da rampa α .

Valores elevados de ξ_a corresponderão a grandes valores de v_a , o que ocorre principalmente na descida de rampas (ângulo α negativo), o que poderá originar grandes forças de usinagem, prejudicar o acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais da peça.

Os ábacos mostrados nas figuras 4.3 a 4.6, permitem uma rápida avaliação dos coeficientes ξ_t , ξ_u , ξ_y e ξ_a .

Na maioria dos problemas práticos deseja-se calcular o ângulo δ de inclinação do copiador, sendo conhecidos os ângulos α das rampas a serem usinadas, (definidos pela forma geométrica da peça) e os valores admissíveis dos coeficientes ξ .

4.3.3 - Valor Médio da Velocidade Principal de Avanço da Ferramenta

Considerando-se o ângulo total de rampa α_t (figura 3.4), - das equações (3.11) e 4.20) resulta:

$$\xi_{at} = \frac{1}{1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha_t} = \frac{1}{\varphi_t} \quad (4.21)$$

Introduzindo-se este particular valor na equação (4.19), - se a velocidade de avanço do carro ou mesa móvel v_a^- é constante (o que ocorre quando a velocidade de rotação do eixo-árvore é constante), o valor resultante para a velocidade de avanço da ferramenta - v_a tem o significado de *velocidade principal de avanço médio da ferramenta* v_{am} , dada por:

$$v_{am} = \frac{1}{\varphi_t} \cdot v_a^- \quad (4.22)$$

onde φ_t é dado pela equação (3.10) ou pelo gráfico da figura 3.5.

É interessante notar-se que quando $\alpha_t = 0^\circ$, $\varphi_t = 1$ e portanto $v_{am} = v_a^-$, o que era de se esperar, pois na subida de rampas (α positivo) $v_a < v_a^-$ e na descida de rampas (α negativo) $v_a > v_a^-$.

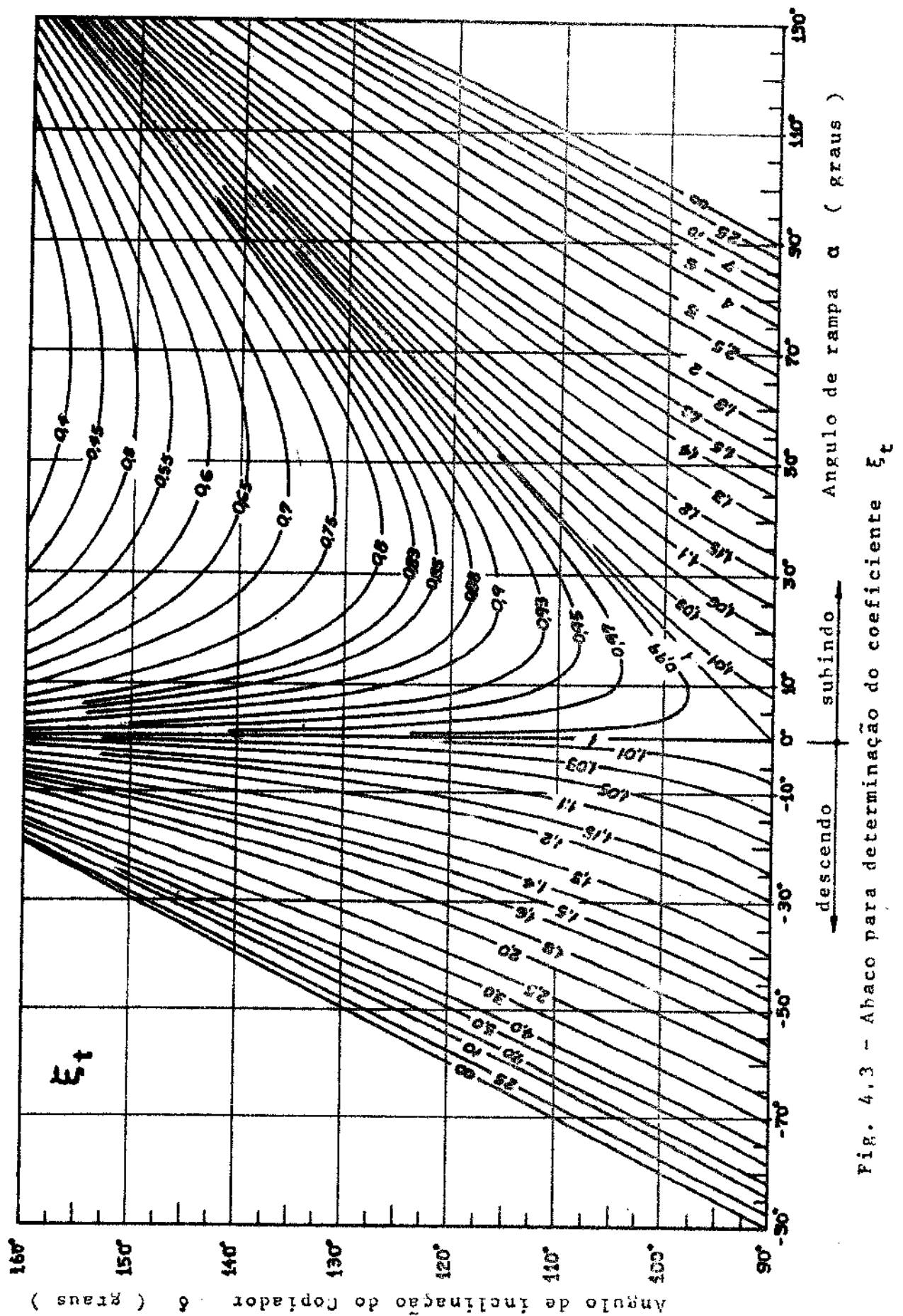
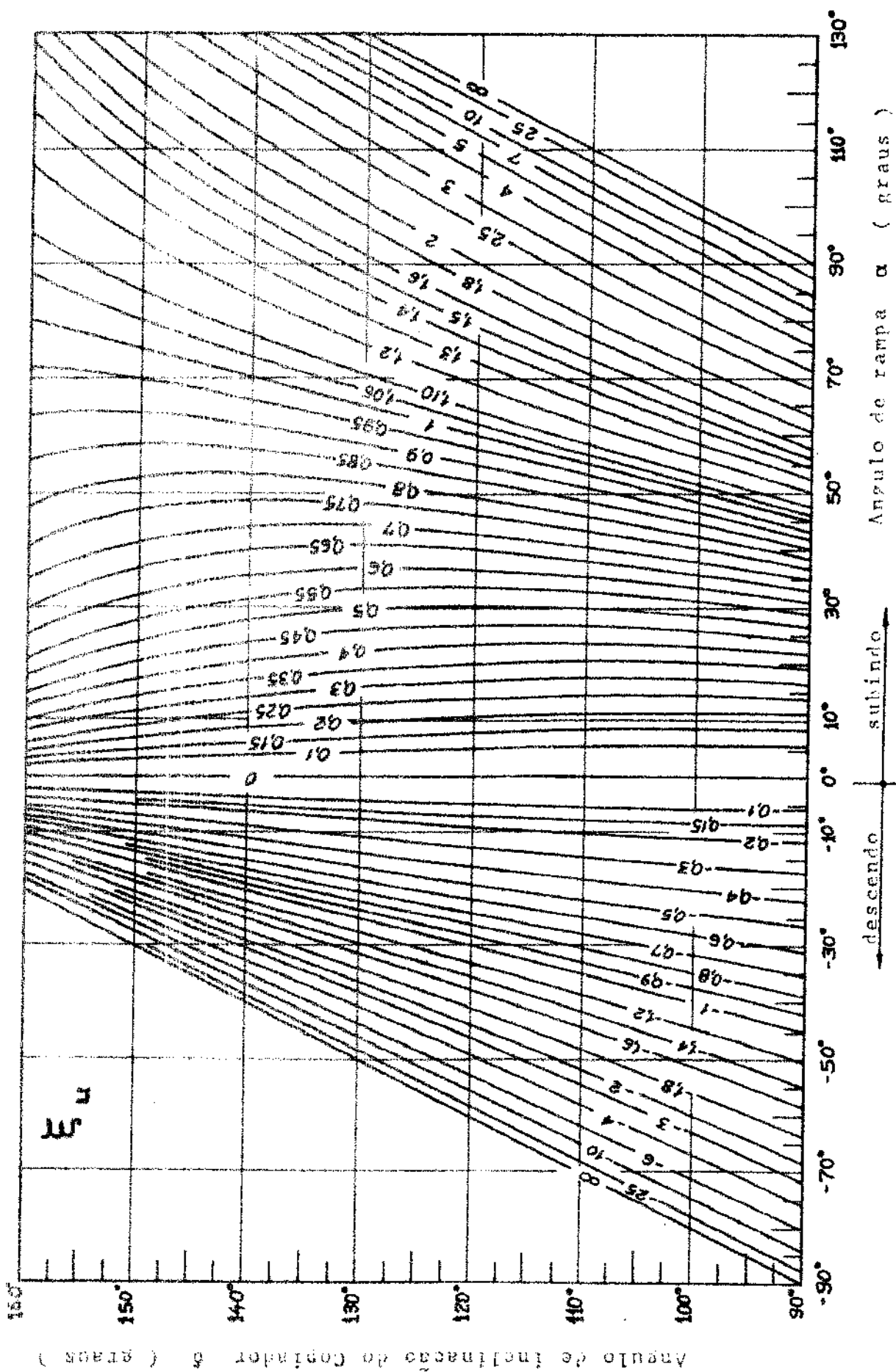


Fig. 4.3 - Abaco para determinação do coeficiente ξ_t



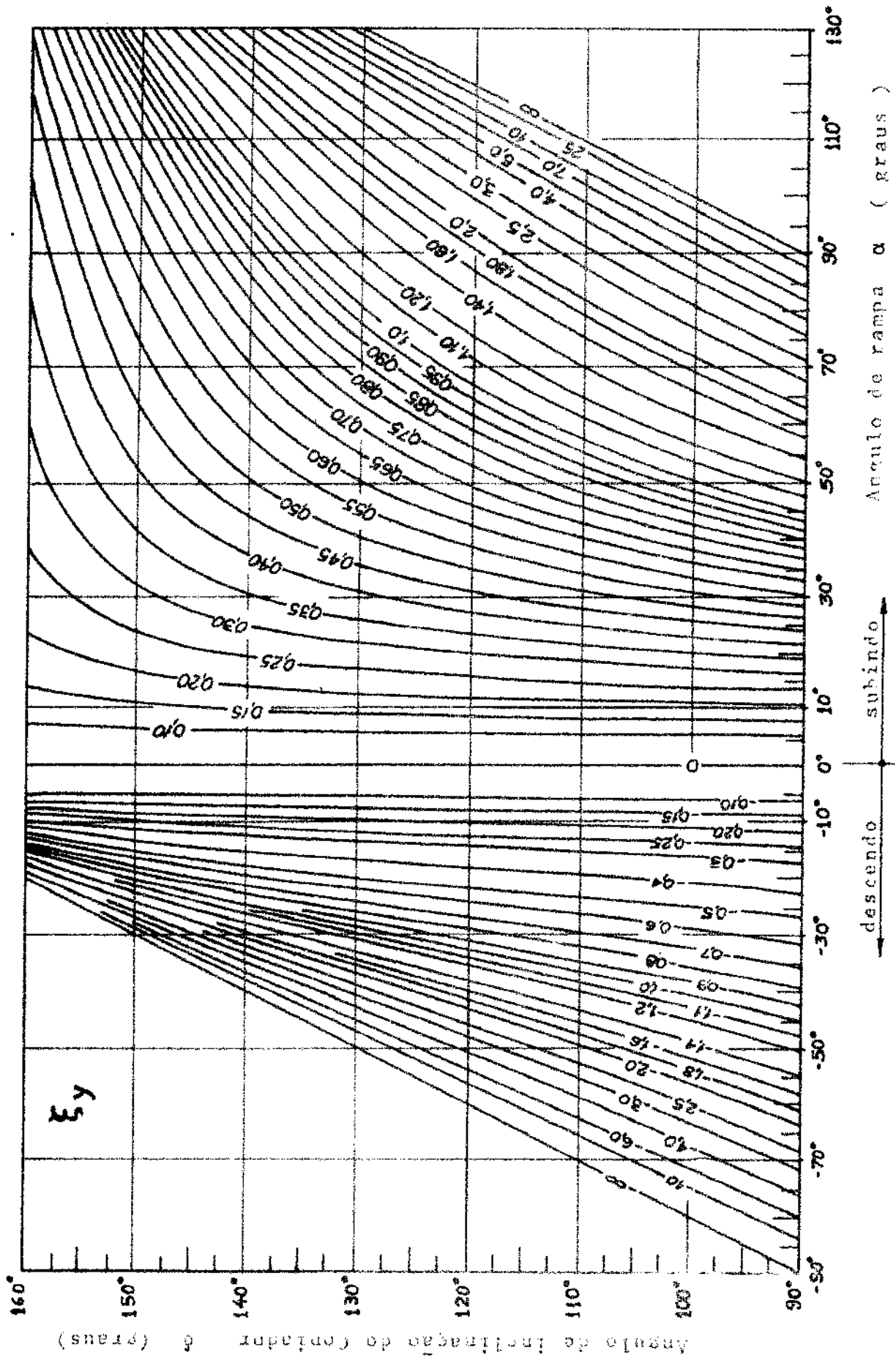
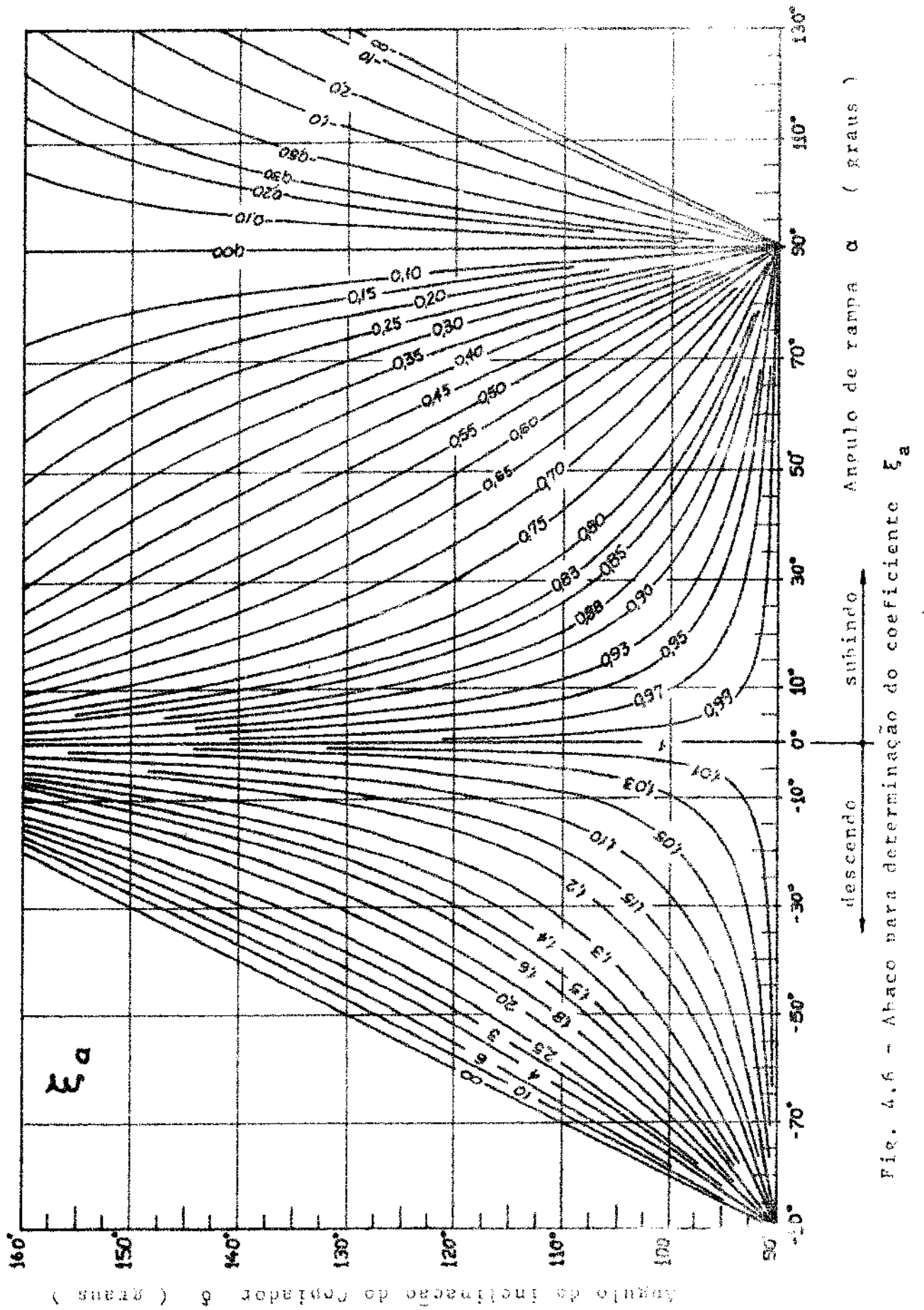


Fig. 4.5 - Abaco para determinação do coeficiente ξ_y



5 - AVANÇOS

Nas operações gerais de usinagem, principalmente nas de torneamento e fresamento curvelíneo, assumem particular importância os seguintes avanços, não definidos pela Norma P-NB-204 [53], normalmente dados em mm/volta do eixo-árvore:

5.1 - Avanço do Carro ou Mesa Móvel, $\bar{a}$

O avanço do carro ou mesa móvel $\bar{a}$, é o espaço percorrido - pelo carro ou mesa móvel por volta do eixo-árvore, durante o movimento de translação ao longo de suas guias, por definição na direção - principal de avanço.

5.2 - Avanços da Ferramenta

Segundo as direções do movimento da ferramenta em relação - à peça, definidos no parágrafo 2.3, tem-se os seguintes avanços:

5.2.1 - Avanço Principal da Ferramenta, a

O avanço principal da ferramenta a é o percurso do ponto principal de referência da ferramenta, por volta do eixo-árvore, segundo a direção e o sentido do movimento principal de avanço.

5.2.2 - Avanço Tangencial da Ferramenta, a_t

O avanço tangencial da ferramenta a_t é o percurso do ponto principal de referência da ferramenta, por volta do eixo-árvore, segundo a direção e o sentido do movimento resultante de avanço, por definição (parágrafo 2.3) tangencial ao perfil usinado.

5.2.3 - Avanço da Ferramenta Segundo o Eixo de Inclinação do Copiador, a_u

O avanço da ferramenta segundo o eixo de inclinação do Copiador a_u é o percurso do ponto principal de referência da ferramenta, por volta do eixo-árvore, segundo a direção e o sentido do movi

mento da ferramenta segundo o eixo de inclinação do copiador (parágrafo 2.3).

5.2.4 - Avanço Transversal da Ferramenta, a_y

O avanço transversal da ferramenta a_y é o percurso do ponto principal de referência, por volta do eixo-árvore, segundo a direção e o sentido do movimento transversal de avanço (parágrafo 2.3).

5.3 - Relações Entre os Avanços da Ferramenta e do Carro ou Mesa Móvel

Da definição de avanço por volta do eixo-árvore, segue -
que:

$$v_{at} = \frac{a_t}{2\pi} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

$$v_{au} = \frac{a_u}{2\pi} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

$$v_{ay} = \frac{a_y}{2\pi} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

$$v_a = \frac{a}{2\pi} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

onde θ é o ângulo de giro do eixo-árvore.

Das equações (4.5), (4.11), (4.12), (4.16) e (4.19) resulta:

$$a_t = \frac{\text{sen } \delta}{\text{sen } (\delta - \alpha)} \cdot \bar{a} = \xi_t \cdot \bar{a} \quad (5.1)$$

$$a_u = \frac{\text{sen } \delta}{\text{sen } (\delta - \alpha)} \cdot \bar{a} = \xi_u \cdot \bar{a} \quad (5.2)$$

$$a_y = \frac{\text{sen } \delta \cdot \text{sen } \alpha}{\text{sen } (\delta - \alpha)} \cdot \bar{a} = \xi_y \cdot \bar{a} \quad (5.3)$$

$$a = \frac{\text{sen } \delta \cdot \cos \alpha}{\text{sen } (\delta - \alpha)} \cdot \bar{a} = \xi_a \cdot \bar{a} \quad (5.4)$$

Para as relações entre os avanços $\bar{a}$, a_t , a_u , a_y e a valem

as mesmas observações feitas anteriormente para as velocidades de avanço, pois os avanços são diretamente proporcionais aos coeficientes ξ .

Em função do ângulo total de rampa α_t (figura 3.3), pode-se definir o avanço principal médio da ferramenta a_m , dado por:

$$a_m = \frac{\text{sen } \delta \cdot \cos \alpha_t}{\text{sen } (\delta - \alpha_t)} \cdot \bar{a} = \frac{\bar{a}}{1 - \cotg \delta \cdot \text{tg } \alpha_t} = \frac{\bar{a}}{\varphi_t} \quad (5.5)$$

Quando $\text{tg } \alpha_t = 0^\circ$, ou seja $y_w = y_o$, resulta $a_m = \bar{a}$.

5.4 - Avanço básico

Conceituação

Quando as sub-operações de corte (ver § 2.) de uma ferramenta, no j ésimο estágio, são realizadas com diferentes avanços $\bar{a}_{j,p}$, onde p é o número de partes (perfis) usinadas, o tempo total de corte será função dos percursos $\ell_{aj,p}^-$ em cada parte usinada, como mostrado na figura 10.3.

Como formulado no § 7.2.2.1 e § 7.2.2.2, define-se como avanço básico do carro ou mesa móvel $\bar{a}_{b,j}$, ao avanço que satisfaça a relação

$$\bar{a}_{b,j} = \frac{\ell_{ab,j}^-}{\sum_{p=1}^W \frac{\ell_{aj,p}^-}{\bar{a}_{j,p}}} \quad (5.6)$$

onde $\ell_{ab,j}^-$ é o percurso total de avanço em cada estágio, dado por

$$\ell_{ab}^- = \sum_{p=1}^W \ell_{aj,p}^- \quad (5.7)$$

de tal modo que o tempo de corte da operação para o avanço básico $\bar{a}_{b,j}$ seja igual ao da operação onde tem-se vários avanços.

6 - VELOCIDADES DE CORTE

6.1 - Generalidades

A *velocidade de corte* v é a velocidade instantânea do ponto de referência P da aresta cortante, segundo a direção e o sentido de corte [53]. Considerando-se a *velocidade de avanço da ferramenta*, tem-se a velocidade efetiva de corte v_e , que é a velocidade instantânea do ponto de referência P da aresta cortante, segundo a *direção efetiva de corte* [53].

Ao percorrer uma determinada trajetória (perfil usinado) - $y = f(z)$, nas operações gerais de usinagem, onde a ferramenta ou a peça possuem um movimento de revolução ao redor de um eixo, como - mostrado nas figuras 4.1 e 4.2, a cada posição do ponto principal - de referência P_o da ferramenta corresponderá uma velocidade instantânea de corte v_o da ferramenta, dada por:

$$v_o = \frac{D_o}{2} \cdot \omega = \frac{D_o}{2} \cdot \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \quad (6.1)$$

onde:

D_o = *diâmetro de giro* da peça (torneamento) ou da ferramenta (mandrilamento, furação, fresamento, etc.), referido à posição instantânea do ponto principal de referência P_o .

ω = *velocidade angular* do eixo-árvore, sobre o qual está fixa a peça ou a ferramenta.

θ = *ângulo de giro* (rotação) do eixo-árvore.

6.2 - Dependência ou não da Velocidade de Corte em Relação ao Perfil Usinado

Se a máquina-ferramenta proporciona uma dependência direta entre o giro do eixo-árvore e o avanço do carro ou mesa móvel, ou seja, uma dependência entre as velocidades de corte (na ferramenta) e de avanço (no carro ou mesa móvel), tem-se através das equações

(4.6) , (4.7) e (6.1):

$$v_o = \frac{\pi \cdot D_o}{a} \cdot v_a \quad (6.2)$$

Quando o diâmetro D é dependente do perfil usinado $y = f(z)$, o que ocorre principalmente no torneamento (figura 4.1), tem-se:

$$v_o = \frac{2 \pi \cdot f(z)}{a} \cdot v_a \quad (6.3)$$

Para as operações de usinagem onde D independe do perfil usinado $y = f(z)$, o que ocorre principalmente nas operações de fresamento (figura 4.2) e furação, tem-se:

$$v_o = \frac{\pi \cdot D_o}{a} \cdot v_a \quad (6.4)$$

onde D_o é o diâmetro nominal da ferramenta.

Em função da velocidade de rotação n , tem-se:

$$\left. \begin{array}{l} D_o \text{ dependente do perfil usinado} \\ \text{e da rotação do eixo-árvore.} \\ v_o: \text{ m/min ; } D_o: \text{ mm ; } n: \text{ rpm} \end{array} \right\} v_o = \frac{2 \pi \cdot f(z) \cdot n}{1000} \quad (6.5)$$

$$\left. \begin{array}{l} D_o \text{ independente do perfil usina} \\ \text{do.} \\ v_o: \text{ m/min ; } D_o: \text{ mm ; } n: \text{ rpm} \end{array} \right\} v_o = \frac{\pi \cdot D_o \cdot n}{1000} \quad (6.6)$$

Na quasi totalidade das operações de usinagem, a velocidade instantânea de corte v_o sempre satisfaz uma das seguintes condições prévias:

- a) - a velocidade de rotação do eixo-árvore n é constante e portanto a velocidade de corte é função de D_o , ou seja, $v_o = f(n, y, z)$.
- b) - a velocidade de corte v_o é mantida constante por meio de uma conveniente variação de n em função de D_o , ou seja, $n = f(v_o, y, z)$.

O estudo dêstes casos particulares, tendo por objetivo o cálculo do tempo de corte da ferramenta será visto no capítulo VII.

Para maior clareza e melhor identificação, quando a velocidade de corte é mantida constante por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore ela será acrescida do símbolo ($\hat{v}$) e indicada por $\hat{v}_0$.

7 - TEMPO DE CORTE

7.1 - Generalidades

Entende-se por *tempo de corte* de uma operação de usinagem ao espaço de tempo em que as ferramentas efetivamente trabalham, removendo cavacos da peça. Para cada ferramenta envolvida na operação, o tempo de corte está diretamente ligado ao percurso de avanço do carro ou mesa móvel l_a (parágrafo 3.2.2), e correspondentemente ao percurso l_f da ferramenta (parágrafo 3.1.2).

Os dois principais métodos de determinação do *tempo de corte* de uma operação são:

- a) - *método analítico*, no qual o tempo de corte é calculado por meio de equações matemáticas, como será visto a seguir. Sua maior aplicação é no planejamento de operações de usinagem a serem executadas.
- b) - *método experimental*, no qual o tempo de corte, é avaliado por meio de cronometragem e calculado pelos processos estatísticos usuais.

Este método implica na existência ou necessidade de execução da operação.

O conhecimento do valor assumido pelo tempo de corte em uma operação de usinagem é de fundamental importância na determinação do tempo ou custo total de confecção por peça.

O *método experimental* não será analisado neste trabalho, - pois sua aplicação é baseada unicamente na técnica de medida e avaliação de tempos.

O *método analítico* pode ser subdividido em duas partes distintas, conforme o tipo da operação, ou seja:

- a) - as ferramentas atuam isoladamente, não havendo sobreposição dos tempos de corte, como mostra a figura 7.1.

- b) - as ferramentas atuam simultaneamente, havendo sobreposição dos tempos de corte, como mostra a figura 7.2.

Por outro lado, o método analítico pode ser baseado:

- a) - nas dimensões usinadas da peça, referidas aos percursos de avanço da ferramenta em relação à peça, como mostrado nas figuras 4.1 e 4.2.

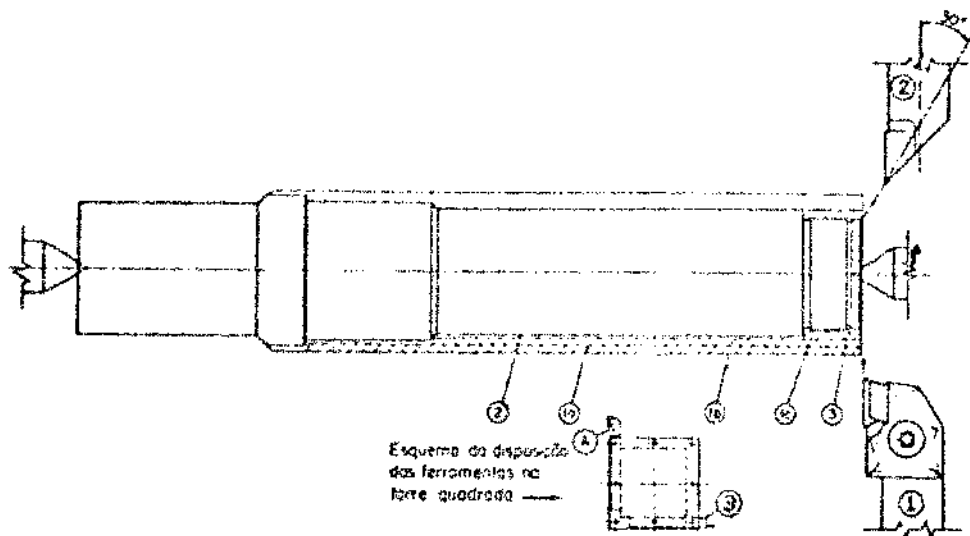


Fig. 7.1 - Operação de torneamento, com as ferramentas atuando isoladamente [60].

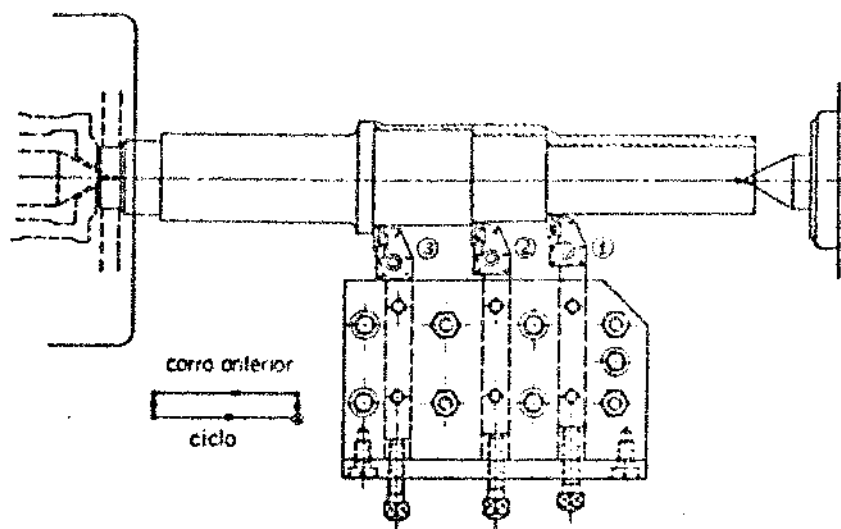


Fig. 7.2 - Operação de torneamento, com as ferramentas atuando simultaneamente [60].

- b) - nos percursos de avanço do carro ou mesa móvel, como mostra do nas figuras 4.1 e 4.2.

O estudo analítico será feito inicialmente para as operações em que as ferramentas atuam isoladamente (devido ao seu aspecto fundamental), e a seguir, o estudo analítico para várias ferramentas atuando simultaneamente.

7.2 - Cada Ferramenta Atua Isoladamente

7.2.1 - Caso Geral

Ao percorrer uma trajetória $y = f(z)$ constituída de w partes distintas $y = f_p(z)$, como mostrado nas figuras 4.1 e 4.2, o ponto principal de referência P_0 da ferramenta, durante a operação de corte, executada entre os pontos o e w da sua trajetória, gastará um tempo total de corte t_c , por definição dado por:

$$t_c = \int_{t_o}^{t_w} dt = \sum_{p=1}^w \int_{z_{p-1}}^{z_p} v_a^{-1} \cdot dz \quad (7.1)$$

Substituindo-se o valor da velocidade instantânea de avanço da ferramenta v_a , dado pela equação (4.18), tem-se:

$$t_c = \sum_{p=1}^w \int_{z_{p-1}}^{z_p} (\xi_a \cdot v_a)^{-1} \cdot dz \quad (7.2)$$

onde v_a é a velocidade instantânea do carro ou mesa móvel (parágrafo 4.1).

Nas aplicações práticas pode-se ter uma das seguintes situações:

- a) - a velocidade de avanço do carro ou mesa móvel da máquina - ferramenta é dependente da velocidade de corte v_o da ferramenta.
- b) - a velocidade de avanço do carro ou mesa móvel é independente da velocidade de corte v_o .

A seguir, será feita a determinação analítica do tempo de corte para estas duas situações.

7.2.2 - A Velocidade de Avanço do Carro ou Mesa Móvel É Dependente da Velocidade de Corte.

Esta situação ocorre principalmente nas operações de torneamento, onde a velocidade de corte v_o é dependente do perfil usinado $y = f(z)$.

Neste caso, substituindo-se os valores de v_a dado pela equação (6.3) e ξ_a pela equação (4.20), na equação geral (7.2), tem-se:

$$t_c = \frac{2\pi}{a} \cdot \sum_{p=1}^W \left[\int_{z_{p-1}}^{z_p} (1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha) \cdot f_p(z) \cdot v_o^{-1} dz \right]$$

Como $\tg \alpha = dy/dz$ resulta:

$$t_c = \frac{2\pi}{a} \cdot \sum_{p=1}^W \left[\int_{z_{p-1}}^{z_p} f_p(z) \cdot v_o \cdot dz - \cotg \delta \cdot \int_{y_{p-1}}^{y_p} v_o^{-1} \cdot dy \right] \quad (7.3)$$

que é a equação geral para o cálculo do tempo de corte, quando a velocidade de corte é dependente do perfil usinado $y = f(z)$.

Os termos entre colchetes, cuja soma algébrica corresponde ao tempo total de corte t_c , apresentam significado físico bem definido. Nota-se que a primeira integral da equação 7.3 independe do ângulo δ de inclinação do Copiador e os limites de integração referem-se ao eixo z , isto é, à direção principal de avanço. Obviamente, isto nos leva a concluir que o tempo de corte t_c pode ser dividido em duas parcelas bem distintas. Separando-se as parcelas da equação 7.3 resulta:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{ca} = \frac{2\pi}{\bar{a}} \cdot \sum_{p=1}^w \int_{z_{p-1}}^{z_p} f_p(z) \cdot v_o^{-1} \cdot dz \end{array} \right. \quad (7.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{cc} = - \frac{2\pi \cdot \cotg \delta}{\bar{a}} \cdot \sum_{p=1}^w \int_{y_{p-1}}^{y_p} v_o^{-1} \cdot y \cdot dy \end{array} \right. \quad (7.5)$$

ou seja:

$$t_c = t_{ca} + t_{cc} \quad (7.6)$$

onde:

t_{ca} = tempo principal de corte, independente do ângulo δ de inclinação do copiador.

t_{cc} = tempo corretivo de corte, dependente do ângulo δ de inclinação do Copiador. Esta parcela pode ser positiva ou negativa, conforme os valores assumidos pelas ordenadas inicial (y_o) e final (y_w) do perfil usinado $y = f(z)$.

CASOS PARTICULARES

7.2.2.1 - Rotação Constante do Eixo-Árvore

Substituindo-se o valor de v_o dado pela equação (6.5) nas equações (7.4) e (7.5), cuja soma resulta no tempo total de corte t_c , tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{ca} = \frac{1}{\bar{a} \cdot n} \cdot \sum_{p=1}^w \int_{z_{p-1}}^{z_p} dz = \frac{z_w - z_o}{\bar{a} \cdot n} = \frac{l_a}{v \bar{a}} \end{array} \right. \quad (7.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{cc} = - \frac{\cotg \delta}{\bar{a} \cdot n} \cdot \sum_{p=1}^w \int_{y_{p-1}}^{y_p} dy = - \frac{\cotg \delta}{v \bar{a}} \cdot (y_w - y_o) \end{array} \right. \quad (7.8)$$

Da equação (3.8) resulta: $y_w - y_o = l_a \cdot \tg \alpha_t$. Substituindo-se este valor na equação (7.8) segue que:

$$t_{cc} = - \frac{\cotg \delta \cdot \tg \alpha_t}{v \bar{a}} \cdot l_a \quad (7.9)$$

Portanto, o tempo de corte referido às dimensões da peça e ao ângulo δ de inclinação do Copiador será dado por:

$$t_c = t_{ca} + t_{cc} = (1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha_t) \cdot \frac{l_a}{v_a} = \varphi_t \cdot \frac{l_a}{v_a} = \frac{l_a^-}{a \cdot n} \quad (7.10)$$

com φ_t obtido da equação (3.10) ou pelo ábaco da figura 3.5,

$l_a^- = \varphi_t \cdot l_a$ como foi visto no § 3.3.3, e v_a^- dado pela equação (4.7).

Referindo-se a cada j éximo estágio (ver § 2.6) a equação (7.10) torna-se

$$t_{cj} = \frac{l_{aj}^-}{a_{j,nj}} \quad (7.11)$$

Na tabela X.1 do capítulo X são fornecidas as equações para o cálculo do tempo de corte t_c quando a rotação do eixo-árvore é mantida constante, para as principais operações de torneamento.

Nas operações de corte executadas por uma única ferramenta, com diferentes avanços, em um mesmo estágio (rotação constante), a equação (7.12) torna-se

$$t_{cj} = \frac{1}{n_j} \cdot \sum_{p=1}^P \frac{l_{aj,p}^-}{a_{j,p}} \quad (7.12)$$

onde:

$l_{aj,p}^-$ = percurso de avanço do carro, no j éximo estágio, - na usinagem do perfil de ordem p .

$a_{j,p}$ = avanço do carro por volta do eixo-árvore, na usinagem do perfil de ordem p .

Por outro lado, a equação (7.12) pode ser posta na forma

$$t_{cj} = \frac{l_{abj}^-}{a_{bj} \cdot n_j} \quad (7.13)$$

com

$$l_{abj}^- = \sum_{p=1}^P l_{aj,p}^- = l_{aj,1}^- + l_{aj,2}^- + l_{aj,3}^- + \dots \quad (7.14)$$

$$\bar{a}_{bj} = \frac{l_{abj}}{\sum_{p=1}^N \frac{l_{aj,p}}{\bar{a}_{j,p}}} \quad (7.15)$$

onde:

l_{abj} = percurso básico de avanço do carro, no j éximo estágio.

$\bar{a}_{bj}$ = avanço básico do carro, por volta do eixo-árvore, equivalente à operação real, executada com avanços variáveis.

Estas grandezas (l_{ab} e $\bar{a}_b$) apresentam o mesmo significado admitido para as operações onde as ferramentas atuam simultâneamente (ver § 7.3.1).

Para uma operação que envolva N estágios, cada um deles executado com uma rotação n_j e um avanço $\bar{a}_j$, tem-se:

$$t_{tc} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N t_{cj} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{l_{abj}}{\bar{a}_{bj} \cdot n_j} \quad (7.16)$$

onde:

t_{tc} = tempo total de corte, por peça.

q = número de peças executadas por operação.

$l_{ab,j}$ = percurso total de avanço do carro ou mesa móvel, em cada j éximo estágio. Como foi visto no § 3.2.2, este percurso corresponde àqueles em que as ferramentas efetivamente atuam, removendo cavacos.

Colocando-se a equação (7.16) na forma:

$$t_{tc} = \frac{1}{q} \sum \mu_j \cdot \frac{1}{n_j}$$

onde $\mu_j = \frac{l_{abj}}{\bar{a}_{bj}}$ é constante em cada estágio, verifica-se -

que o tempo total de corte t_{tc} varia inversamente com a rotação n

do eixo-árvore. Portanto, a representação gráfica da equação (7.16) será da forma mostrada na figura 7.3, onde foi admitido que a operação total é executada em três estágios.

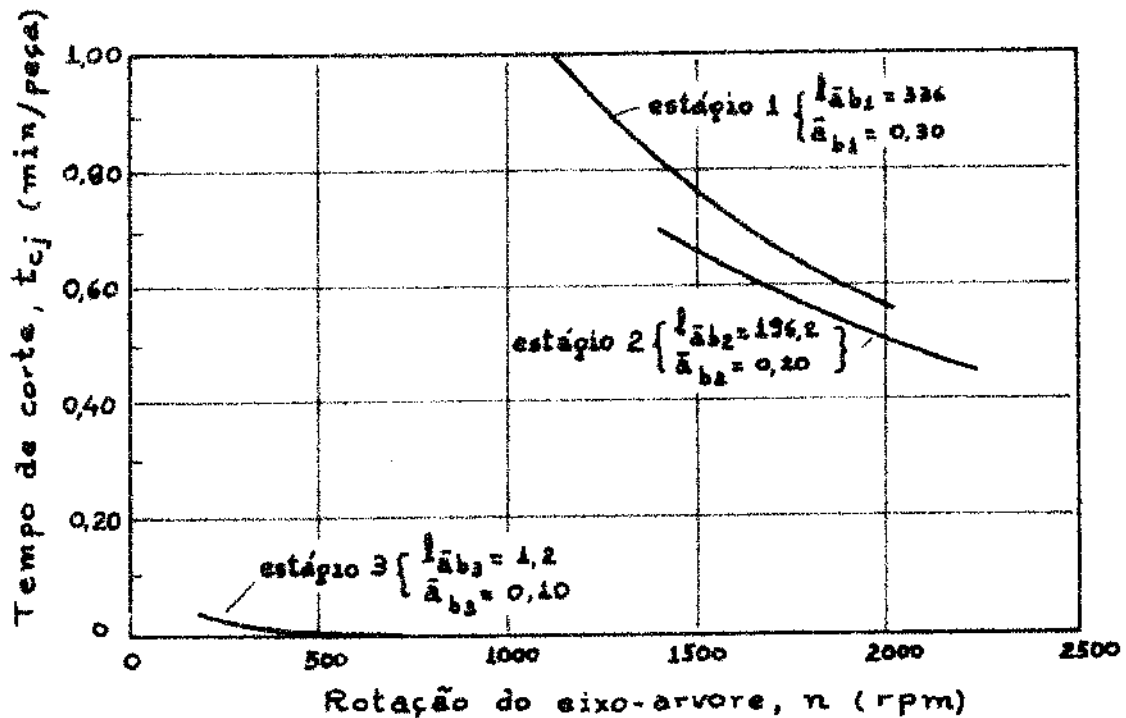


Fig. 7.3 - Variação dos tempos de corte em função da rotação do eixo-árvore, em cada estágio, para a peça da figura 7.1

No §19.2.5 é dado um exemplo prático de cálculo do tempo de corte, quando a rotação do eixo-árvore é constante, na copiagem de um eixo para rodeiro de vagão ferroviário.

7.2.2.2 - Velocidade de Corte Constante

Quando a velocidade de corte é mantida constante e portanto a rotação do eixo-árvore é dependente do perfil usinado, resulta das equações (7.4) e (7.5):

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{ca} = \frac{2\pi}{\bar{a} \cdot \hat{v}_o} \cdot \sum_{p=1}^W \int_{z_{p-1}}^{z_p} f(z) \cdot dz \end{array} \right. \quad (7.17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{cc} = - \frac{2\pi \cdot \cotg \delta}{\bar{a} \cdot \hat{v}_o} \cdot \sum_{p=1}^W \int_{y_{p-1}}^y y \cdot dy = - \frac{\pi \cdot \cotg \delta}{\bar{a} \cdot \hat{v}_o} \cdot (y_w^2 - y_o^2) \end{array} \right. \quad (7.18)$$

onde o símbolo ($\sim$) significa que a velocidade de corte é mantida constante.

Estas equações podem ser simplificadas tornando-as de mais fácil aplicação prática.

Nota-se que a integral:

$$\int_{z_{p-1}}^{z_p} f_p(z) \cdot dz = A_p$$

representa a área sob a curva $y = f_p(z)$ (perfil usinado), como mostra a figura 7.4. Para o perfil total $y = f(z)$, resulta:

$$A = \sum_{p=1}^W A_p = \sum_{p=1}^W \int_{z_{p-1}}^{z_p} f_p(z) \cdot dz \quad (7.19)$$

onde A é aqui denominada *área principal*. Pelo teorema do valor intermediário [61], segue que:

$$y_m = \frac{A}{l_a} \quad (7.20)$$

na qual y_m representa o *valor intermediário* das ordenadas do perfil total $y = f(z)$ que satisfaz a relação (7.20), como mostrado na figura 7.4.

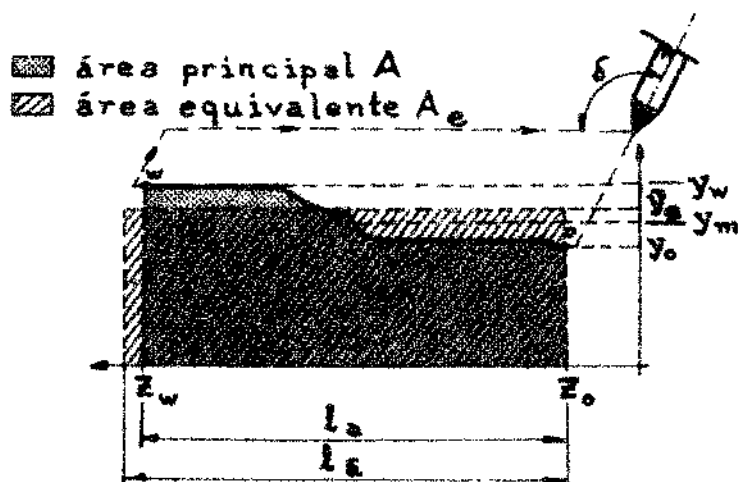


Fig. 7.4 - Grandezas utilizadas na determinação do tempo de corte quando a velocidade de corte é mantida constante.

Das equações (7.17) , (7.19) e (7.20), resulta para o tempo principal de corte a relação:

$$t_{ca} = \frac{2\pi \cdot \bar{l}_a \cdot y_m}{1000 \cdot \bar{a} \cdot \hat{v}_o} \quad (7.21)$$

Por outro lado, para o tempo corretivo de corte, dado pela equação (7.18) tem-se:

$$t_{cc} = - \frac{\pi \cdot \cotg \delta}{\bar{a} \cdot \hat{v}_o} \cdot (y_w^2 - y_o^2) = \frac{\pi \cdot \bar{l}_a}{\bar{a} \cdot \hat{v}_o} (\varphi_t - 1) \cdot (y_w + y_o) \quad (7.22)$$

Substituindo-se os valores de t_{ca} e t_{cc} , dados respectivamente pelas equações (7.21) e (7.22) na equação (7.6), resulta:

$$t_c = \frac{2\pi \cdot \bar{l}_a}{1000 \cdot \bar{a} \cdot \hat{v}_o} \left[y_m + (\varphi_t - 1) \cdot \frac{y_w + y_o}{2} \right] \quad (7.23)$$

Esta equação pode ser colocada em uma forma análoga à equação (7.11), ou seja:

$$t_c = \frac{2\pi \cdot \bar{l}_a \cdot \bar{y}_e}{1000 \cdot \bar{a} \cdot \hat{v}_o} \quad (7.24)$$

com

$$\bar{y}_e = \frac{1}{\varphi_t} \cdot \left[y_m + (\varphi_t - 1) \cdot \frac{y_w + y_o}{2} \right] = y_p + y_c \quad (7.25)$$

onde:

$\bar{y}_e$ = ordenada equivalente do perfil usinado.

y_p = ordenada principal.

y_c = ordenada corretiva.

Pelo conceito de rotação-equivalente n_e do eixo-árvore (ver § 8.4), a equação (7.24) pode ser posta na forma

$$t_c = \frac{\bar{l}_a}{\bar{a} \cdot n_e} = \frac{\pi \cdot \bar{l}_a \cdot d_e}{1000 \cdot \bar{a} \cdot \hat{v}_o} \quad (7.26)$$

onde:

$$n_e = \frac{1000 \cdot \hat{v}_o}{2\pi \cdot \bar{y}_e} = \frac{1000 \cdot \hat{v}_o}{\pi \cdot d_e} \quad (7.27)$$

com $d_e = 2 \cdot \bar{y}_e$ é o *diâmetro-equivalente* da operação, como será visto no § 8.4 e capítulo X.

Ao produto $\bar{l}_a \cdot \bar{y}_e$ denomina-se *área-equivalente* A_e do perfil usinado, ou seja,

$$A_e = \bar{l}_a \cdot \bar{y}_e \quad (7.28)$$

Se a ferramenta trabalha com diferentes avanços em um mesmo estágio, de maneira análoga à feita para a equação (7.13), a equação (7.26) torna-se

$$t_{cj} = \frac{\bar{l}_{ab,j}}{\bar{a}_{bj} \cdot n_{ej}} = \frac{\pi \cdot \bar{l}_{ab,j} \cdot d_{ej}}{1000 \cdot \bar{a}_{bj} \cdot \hat{v}_{oj}} \quad (7.29)$$

com $\bar{l}_{ab,j}$ e $\bar{a}_{bj}$ dados respectivamente pelas equações (7.14) e (7.15).

Para uma operação que envolva N estágios, cada um deles executado com uma velocidade de corte $\hat{v}_{oj}$ e um avanço básico $\bar{a}_{bj}$, mantidos constantes em cada estágio, tem-se:

$$t_{tc} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^N t_{cj} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\bar{l}_{ab,j}}{\bar{a}_{bj} \cdot n_{ej}} = \frac{\pi}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\bar{l}_{ab,j} \cdot d_{ej}}{\bar{a}_{bj} \cdot \hat{v}_{oj}} \quad (7.30)$$

onde:

t_{tc} = tempo total de corte, por peça.

q = número de peças executadas por operação.

t_{cj} = tempo de corte em cada j ésimο estágio.

d_{ej} = diâmetro-equivalente em cada j ésimο estágio

(ver capítulo X).

Analizando-se a equação (7.30) verifica-se que o tempo total de corte t_{tc} varia *inversamente* com a velocidade de corte, e portanto ela terá uma representação gráfica análoga à da fig. 7.3.

Como um exemplo de aplicação prática do cálculo do tempo

de corte pelo método proposto, no paragr. 19.2 é estudada a cópia de um eixo para rodeiro de vagão ferroviário, quando a velocidade de corte é mantida constante. Como complementação, é feita a comparação dos resultados obtidos com os do paragr. 19.5 (para a condição de rotação constante do eixo-árvore)

7.2.3 - A Velocidade de Avanço do Carro ou Mesa Móvel é Independente da Velocidade de Corte da Ferramenta

Esta situação corresponde principalmente às operações de fresamento. Substituindo-se o valor da velocidade de avanço da ferramenta v_a , dado pela equação (4.19), na equação (7.1) tem-se:

$$t_c = \sum_{p=1}^w \int_{z_{p-1}}^{z_p} \left(\frac{1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha}{v_a} \right) \cdot dz \quad (7.31)$$

Como $\tg \alpha = dy/dz$, quando a velocidade de avanço do carro ou mesa móvel v_a é constante, o que normalmente ocorre nas aplicações práticas, resulta:

$$t_c = \frac{1}{v_a} \cdot \sum_{p=1}^w \left[\int_{z_{p-1}}^{z_p} dz - \cotg \delta \cdot dy \right] = \frac{l_a - \cotg \delta \cdot (y_w - y_o)}{v_a} \quad (7.32)$$

Pela definição do coeficiente φ_t (ver § 3.3.3), tem-se:

$$t_c = \frac{\varphi_t \cdot l_a}{v_a} = \frac{l_a}{v_a} \quad (7.33)$$

que é a equação geral para o cálculo do tempo de corte quando a velocidade de avanço do carro ou mesa móvel v_a independe da velocidade de corte v_o , ou seja, do perfil usinado $y = f(z)$.

Quando o ângulo de inclinação do Copiador assume o valor $\delta = 90^\circ$ ou então $y_w = y_o$, tem-se $l_a = l_a$, isto é, o percurso de avanço do carro ou mesa móvel, coincide com o percurso de avanço da ferramenta na direção principal de avanço.

7.3 - As Ferramentas Atuam Simultaneamente

Quando várias ferramentas atuam simultaneamente com a mesma velocidade de avanço v_a , como mostrado nas figuras 7.2 e 7.5, a formulação analítica do tempo de corte t_c da operação será feita pelo conceito de *perfil-base*.

Entende-se como *perfil-base* à trajetória descrita pelo ponto principal de referência da ferramenta (ver § 2.1), escolhida como base de referência dos deslocamentos do carro ou mesa móvel, durante os períodos de tempo em que pelo menos uma das ferramentas do grupo executa uma operação de corte. A ferramenta que gera o *perfil-base* denomina-se *ferramenta-base*.

O método a seguir exposto *independe do conceito de ferramenta-padrão*, como proposto por Mc Cullough [23] e Ferraresi [56], pois a introdução dos percursos de avanço do carro ou mesa móvel elimina a necessidade daquele conceito para a formulação das equações gerais.

7.3.1 - Rotação constante do eixo-árvore

De acordo com a definição de percurso de avanço do carro ou mesa móvel (§ 3.2.2), estendida agora para as operações de usinagem onde um grupo de ferramentas atua simultaneamente, como mostra a figura 7.5, para cada estágio, tem-se:

$$t_{cj} = \frac{l_{ab,j}}{\bar{a}_{bj} n_j} \quad (7.34)$$

onde l_{ab} e $\bar{a}_b$ são respectivamente o *avanço* e o *percurso básico* (normalmente $\bar{a}_b = \bar{a}$) do carro ou mesa móvel, para todas as ferramentas envolvidas na operação. Como mostra a figura 7.5, o percurso l_{ab} corresponde ao *perfil-base* da operação.

Para uma operação executada em N estágios, o tempo total de corte t_{tc} será dado por:

$$t_{tc} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{i=1}^N t_{cj} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{l_{ab,j}^-}{\bar{a}_{bj} \cdot n_j} \quad (7.35)$$

Nota-se que esta equação apresenta uma forma idêntica à equação (7.16), referente ao caso de atuação individual das ferramentas. Portanto, a representação gráfica desta função assume a mesma forma mostrada na figura 7.3.

De acordo com o exposto no § 3.3.3, segue que

$$l_{ab,j}^- = \varphi_{tb,j} \cdot l_{ab,j} = (1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha_{tb,j}) \cdot l_{ab,j} \quad (7.36)$$

onde, para cada j éximo estágio, tem-se:

$l_{ab,j}^-$ = percurso total de avanço do carro ou mesa móvel, correspondente ao perfil-base da operação.

$\varphi_{tb,j}$ = coeficiente de correlação correspondente ao perfil-base.

$\alpha_{tb,j}$ = ângulo total de rampa do perfil-fase.

δ = ângulo de inclinação do copiador, normalmente constante em todos os estágios.

O valor calculado de t_c independe da ferramenta escolhida como *ferramenta-base* em cada estágio.

É interessante notar-se que, na atuação simultânea de várias ferramentas, o avanço do carro por volta do eixo-árvore normalmente é mantido constante em cada estágio, ou seja, $\bar{a}_{bj} = \bar{a}_j$. Portanto, a equação (7.35) torna-se

$$t_{tc} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N t_{cj} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{l_{ab,j}^-}{\bar{a}_j \cdot n_j} \quad (7.37)$$

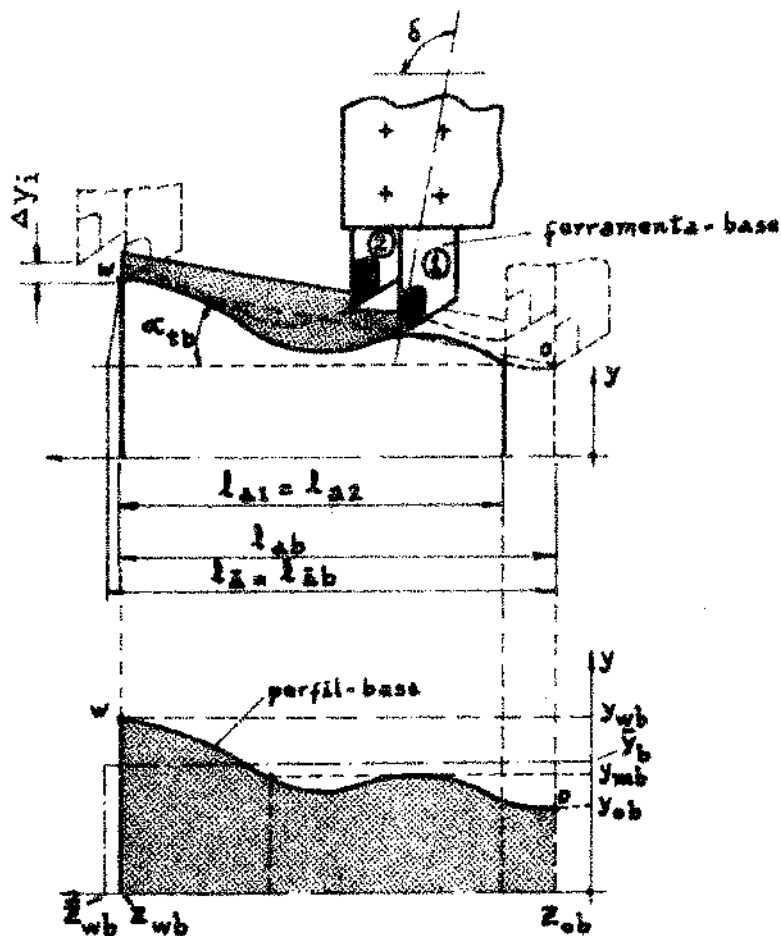


Fig. 7.5 - Percursos de avanço e áreas utilizadas na determinação do tempo total de corte, quando atuam grupos de ferramentas, nas operações de copiagem.

7.3.2 - Velocidade de corte constante

Quando várias ferramentas atuam simultaneamente, como mostrado na figura 7.5, só é possível manter-se a velocidade de corte constante para a ferramenta-base. Para as demais ferramentas a velocidade de corte será variável, a menos que o perfil-base seja retilíneo.

Como formulado no § 7.2.2.2, relativo a apenas uma ferramenta, estendido agora para as operações onde atuam grupos de ferramentas, o tempo de corte da operação será dado por

$$t_c = \frac{2\pi \cdot \bar{\ell}_{ab} \cdot \bar{y}_{eb}}{1000 \cdot \bar{a}_b \cdot \bar{v}_b} \quad (7.38)$$

com

$$\bar{y}_{eb} = \frac{1}{\varphi_{tb}} \left[y_{mb} + (\varphi_{tb} - 1) \cdot \left(\frac{y_{wb} + y_{ob}}{2} \right) \right] \quad (7.39)$$

onde o índice b refere-se à ferramenta-base do grupo de ferramentas.

Com as mesmas considerações anteriores, segue que

$$t_c = \frac{\pi \cdot \bar{\ell}_{ab} \cdot d_{eb}}{1000 \cdot \bar{a}_b \cdot \hat{v}_b} \quad (7.40)$$

ou ainda, para cada estágio,

$$t_{cj} = \frac{\bar{\ell}_{ab,j}}{\bar{a}_{bj} \cdot n_{ej}} \quad (7.41)$$

onde:

d_{eb} = diâmetro-equivalente da ferramenta-base.

n_{ej} = rotação-equivalente do eixo-árvore (constante),

dada por

$$n_{ej} = \frac{1000 \cdot \hat{v}_{bj}}{\pi \cdot d_{eb,j}} \quad (7.42)$$

Para as operações executadas em N estágios, resulta para o tempo total de corte, por peça, a equação

$$\begin{aligned} t_{tc} &= \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N t_{cj} = \frac{\pi}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\bar{\ell}_{ab,j} \cdot d_{eb,j}}{\bar{a}_{bj} \cdot \hat{v}_{b,j}} = \\ &= \frac{\pi}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\bar{\ell}_{ab,j}}{\bar{a}_{bj} \cdot n_{ej}} \end{aligned} \quad (7.43)$$

cuja representação gráfica é análoga à mostrada na figura 7.3.

Se o avanço básico do carro por volta do eixo-árvore ($\bar{a}_{bj}$) é mantido constante em cada estágio, resulta $\bar{a}_{bj} = \bar{a}_j$, e portanto, a equação (7.43) torna-se

$$t_{tc} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N t_{cj} = \frac{\pi}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\bar{\ell}_{ab,j} \cdot d_{eb,j}}{\bar{a}_j \cdot \hat{v}_{b,j}} \quad (7.44)$$

7.4 - Conceito de Ferramenta-Padrão

Entende-se por *ferramenta-padrão* como sendo "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", como proposto por Mc Cullough [23] e Ferraresi [56].

Tôdas as grandezas relativas à *ferramenta-padrão* serão indicadas pelo símbolo * (asterísco). A escolha de qualquer uma das ferramentas envolvidas como padrão de referência dos respectivos tempos de corte, não afeta a validade matemática das equações a serem deduzidas, porém influi na precisão dos resultados obtidos. Isto se deve ao fato de que o coeficiente adimensional R (ver § 7.4.1) depende da exatidão com que é conhecido o tempo de corte da *ferramenta-padrão* t_{c*} .

7.4.1 - Coeficiente Adimensional que Correlaciona os Tempos de Corte

Seja a relação:

$$R = \frac{t_{c*}}{t_c} \quad (7.45)$$

onde:

R = coeficiente adimensional;

t_{c*} = tempo de corte correspondente à *ferramenta-padrão*;

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

A determinação dos tempos de corte t_{c*} (*ferramenta-padrão*) e t_c (total da operação) pode ser feita:

a) - experimentalmente, por meio de cronometragens.

b) - analiticamente, relacionando-se os percursos de avanço das ferramentas envolvidas e as características da

operação. Neste caso, o tempo de corte relativo à ferramenta-padrão pode ser calculado pelas equações deduzidas no § 7.2.

É interessante notar-se que o coeficiente adimensional R é independente da velocidade de corte, como pode ser notado das equações (7.37) e (7.39), correspondentes às condições de rotação constante do eixo-árvore e velocidade de corte mantida constante, deduzidas a seguir.

Nestes casos, o coeficiente adimensional R é dependente dos seguintes fatores:

- a) - disposição das m ferramentas em relação à peça e ordem de atuação na operação de corte;
- b) - ângulo δ de inclinação do Copiador, nas operações de copiagem;
- c) - percurso principal de avanço das ferramentas envolvidas;
- d) - ferramenta escolhida como ferramenta-padrão.

Por definição, o coeficiente adimensional R sempre terá um valor numérico compreendido no intervalo $0 < R \leq 1$.

7.4.1.1 - Rotação constante do eixo-árvore

Substituindo-se os valores de t_{c*} e t_c , dados pelas equações (7.11) e (7.34) na equação (7.42), tem-se:

$$R = \frac{\ell_{a*} \cdot \bar{a}_b}{\ell_{ab} \cdot \bar{a}_*} = \frac{\varphi_{t*} \cdot \ell_{a*}}{\varphi_{tb} \cdot \ell_{ab}} \cdot \frac{\bar{a}_b}{\bar{a}_*}$$

onde:

ℓ_{a*} = percurso de avanço do carro ou mesa móvel correspondente à ferramenta-padrão.

ℓ_{ab} = percurso de avanço do carro ou mesa móvel correspondente à ferramenta-base.

φ_{t*} = coeficiente de correlação da ferramenta-padrão (ver § 3.3.3).

φ_{tb} = coeficiente de correlação da ferramenta-base (ver § 7.3.1).

Por razões econômicas, sempre é desejável reduzir-se os tempos improdutivos. 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 principal de avanço ℓ_a . Como mostrado na figura 7.2, a ferramenta nº 1 define o tempo de corte da operação, pois $\ell_{a1} > \ell_{a2} > \ell_{a3}$. Escolhendo-se como ferramenta-padrão a de nº1, resulta $R = 1$, ou seja $t_c = t_{c*} = t_{c1}$. Verifica-se portanto que este procedimento simplifica sobremaneira o cálculo do tempo de corte da operação.

Se o avanço do carro por volta do eixo-árvore é mantido constante durante a atuação de todas as ferramentas envolvidas na operação, tem-se $\bar{a}_{bj} = \bar{a}_j$, e portanto a equação (7.46) simplifica-se para

$$R = \frac{\ell_{a*}}{\ell_{ab}} = \frac{\varphi_{t*} \cdot \ell_{a*}}{\varphi_{tb} \cdot \ell_{ab}} \quad (7.47)$$

Por outro lado, se todas as ferramentas envolvidas no j -ésimo estágio apresentam movimento retilíneo apenas na direção principal de avanço, tem-se $\varphi_{t*,j} = \varphi_{tb,j} = 1$, o que resulta na equação simplificada para o tempo de corte em cada estágio

$$t_{cj} = \frac{\ell_{a*,j}}{R_j \cdot \bar{v}_{aj}} = \frac{\ell_{a*,j}}{R_j \cdot \bar{a}_j \cdot n_j} \quad (7.48)$$

7.4.1.2 - Velocidade de corte constante

Nas operações de copiagem em que duas ou mais ferramentas atuam simultaneamente, como mostra a figura 7.5, e a velocidade de

corte é mantida constante por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore, o coeficiente adimensional R, de acordo com as equações (7.21) e (7.45) será dado por:

$$R = \frac{t_{c*}}{t_c} = \frac{\ell_{a*}^- \cdot \bar{a}_b}{\ell_{ab}^- \cdot \bar{a}} \quad (7.49)$$

pois a rotação-equivalente n_e é a mesma para todas as ferramentas do grupo.

Comparando-se as equações (7.46) e (7.49) verifica-se que elas são idênticas, o que prova a independência do coeficiente adimensional R em relação à velocidade de corte. Se o avanço é constante, o que normalmente ocorre na prática, resulta $\bar{a}_b = \bar{a}$.

7.5 - Análise das equações obtidas

Comparando-se as equações (7.13), (7.29), (7.35) e (7.41), deduzidas para as condições de rotação ou velocidade de corte constante, ferramentas atuando isoladamente ou simultaneamente, verifica-se que o tempo de corte, em cada estágio, pode ser sempre colocado na forma geral

$$t_{cj} = \frac{\ell_{ab,j}^-}{\bar{a}_{b,j} \cdot n_{ej}} \quad (7.50)$$

válida para todas as operações de usinagem.

É interessante notar-se que a rotação-equivalente do eixo-árvore (ver § 8.4) nas operações onde a ferramenta apresenta um movimento retilíneo alternativo (aplainamento, denteamento pelo processo Fellows, etc), deve ser entendida como o número de ciclos (ou golpes) numa dada unidade de tempo, acrescido da relação entre o tempo de ida e retorno do carro. No processo de brochamento, o percurso ℓ_{ab}^- e o avanço $\bar{a}_b$ são independentes da velocidade de translação da brocha, valendo portanto as considerações formuladas no § 7.2.3. Neste último caso, a equação (7.50) não pode ser diretamente aplicada, pois o

percurso e o avanço são definidos pela geometria da ferramenta. Para as operações normais de brochamento, o tempo de corte pode ser facilmente calculado, para o que sugere-se consultar a referência bibliográfica [43] .

Quando utiliza-se um único avanço e ferramenta em cada estágio, a equação (7.50) assumirá a forma

$$t_{cj} = \frac{\ell_{aj}}{\bar{a}_j \cdot n_{ej}} \quad (7.51)$$

Se a rotação do eixo-árvore é constante, a equação (7.51) torna-se

$$t_{cj} = \frac{\ell_{aj}}{\bar{a}_j \cdot n_j} \quad (7.52)$$

Se o percurso de avanço da ferramenta (ℓ_a) é igual ao percurso de avanço do carro ou mesa imóvel (ℓ_{aj}), a equação (7.52) será dada por

$$t_{cj} = \frac{\ell_{aj}}{\bar{a}_j \cdot n_j} \quad (7.53)$$

Tratando-se de operações com uma única trajetória retilínea das ferramentas (torneamento e mandrilamento cilíndrico, furação, etc.), resulta $\bar{a}_j = a_j$, isto é o avanço por volta do eixo-árvore do carro coincide com o da ferramenta, a equação (7.53) simplifica-se para

$$t_{cj} = \frac{\ell_{aj}}{a_j \cdot n_j}$$

que tem sido utilizada como equação básica para o cálculo do tempo de corte.

8 - EQUIVALÊNCIA NAS OPERAÇÕES DE USINAGEM

Os estudos realizados por Sauer, Draghici e Chiriacescu [57], complementados por Ferraresi [56], levaram à formulação de equações aproximadas para a velocidade de corte equivalente e para o diâmetro-equivalente, em algumas particulares operações de torneamento curvelíneo e torneamento com grupos de ferramentas. Estes estudos abriram caminho para a formulação, neste trabalho, de novas equivalências, que muito ajudarão na solução das mais complexas operações de copiagem, principalmente quando o ângulo δ de inclinação do copiador é diferente de 90°.

Os conceitos a seguir formulados valem para todas as operações de usinagem (torneamento, mandrilamento, furação, roscamento, alargamento, fresamento, etc.), com exceção das ferramentas abrasivas, para as quais será feito um estudo posterior, pois faltam dados experimentais relativos às grandezas envolvidas.

8.1 - Operação de Corte Equivalente

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

A igualdade dos tempos de corte obviamente implica na igualdade dos percursos principais de avanço, na operação real e na equivalente. Esta propriedade só pode ser satisfeita, quando o percurso de avanço da ferramenta, na operação de corte equivalente, for igual ao do carro ou mesa móvel na operação real, isto é, se

$$l_{pe} = l_a$$

onde l_{pe} é o percurso principal de avanço equivalente da ferramenta, como mostrado na figura 8.1. Como por definição a operação equiva-

lente é realizada a diâmetro constante, decorre daí a existência do perfil-retilíneo-equivalente, como mostrado na figura 8.1.

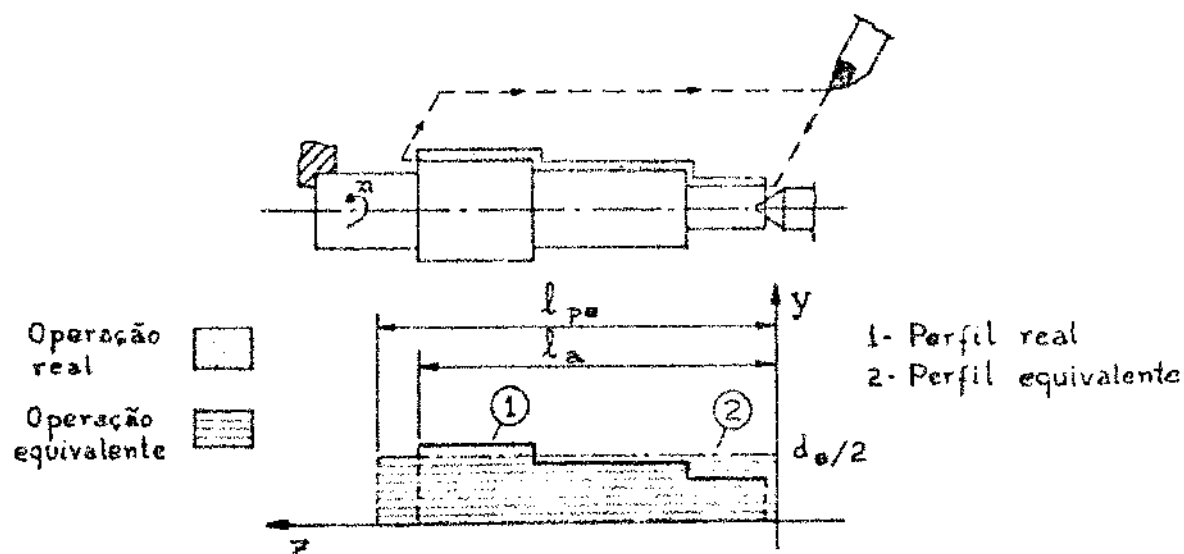


Fig. 8.1 - Equivalência de uma operação com velocidade de corte variável a uma operação a velocidade de corte constante.

8.2 - Velocidade de corte equivalente

Como demonstrado por Ferraresi [56], cujos estudos foram baseados na correspondência biunívoca entre o desgaste convencionais e o valor da constante K , e provados experimentalmente por Kazinczy [52], tem-se:

$$v_{eo}^x = \frac{1}{t_c} \cdot \int_0^{t_c} v_o^x \cdot dt_c \quad (8.1)$$

onde:

v_{eo} = velocidade de corte equivalente, para usinagem a diâmetro constante.

x = expoente da Equação de Taylor Simplificada, (ver §. 9.1).

v_o = velocidade de corte da ferramenta, na usinagem a diâmetro variável,

Analisando-se a equação (8.1) verifica-se que ela representa a igualdade da parcela da vida da ferramenta consumida por peça usinada, na operação real e na equivalente.

No capítulo XI será feito um estudo detalhado da velocidade de corte equivalente.

8.3 - Diâmetro-Equivalente

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

$$d_{eo} = \frac{1000 \cdot v_{eo}}{\pi \cdot n} \quad (8.2)$$

onde:

d_e = diâmetro equivalente.

n = rotação constante do eixo-árvore.

Como será demonstrado no cap. X, o diâmetro-equivalente assume particular importância na formulação da operação de corte equivalente a uma dada operação de usinagem.

Definindo-se Δd_{eo} como sendo o acréscimo do diâmetro-equivalente d_{eo} , devido à posição $\Delta y'$ do desgaste convencional na aresta cortante (que define a vida da ferramenta), tem-se:

$$\left. \begin{aligned} d_e &= d_{eo} + \Delta d_{eo} \\ \Delta d_{eo} &= 2 \cdot \Delta y' \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

onde $\Delta d_{eo} \leq 2 \cdot p_{max}$, como será visto no § 9.1. Neste caso, resulta a equação:

$$d_e = \frac{1000 \cdot v_e}{\pi \cdot n} \quad (8.4)$$

na qual o diâmetro-equivalente (d_e) e a velocidade de corte equivalente (v_e), referem-se ao ponto de referência da ferramenta onde ocorre o desgaste convencional que define a sua vida.

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

$$d_{eo} = \frac{1000 \cdot \hat{v}_o}{\pi \cdot n_e} \quad (8.5)$$

onde:

$\hat{v}_o$ = velocidade de corte constante

n_e = rotação-equivalente do eixo-árvore, dada pela equação (7.22).

No capítulo X será feito um estudo detalhado do diâmetro-equivalente, resumido na tabela X.1, relativa às principais operações de torneamento. No §.10.1.2 será feita a determinação do diâmetro-equivalente para as operações nas quais um grupo de ferramentas atuam simultaneamente.

8.4 - Rotação-Equivalente do Eixo-Árvore

Nas operações à velocidade de corte constante, obtida por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore, resulta da definição de operação de corte equivalente que

$$n_e = \frac{l_a}{a \cdot t_c} = \frac{1000 \cdot \hat{v}_o}{\pi \cdot d_{eo}} \quad (8.4)$$

onde n_e é a velocidade de rotação equivalente do eixo-árvore.

Neste caso, o tempo de corte t_c pode ser determinado pela equação (7.24).

8.5 - Ferramenta-Equivalente

Entende-se por ferramenta-equivalente à um grupo de ferramentas monocortantes, (figura 8.2), à ferramenta hipotética que matematicamente reproduz as condições operacionais da operação real, originando uma operação-equivalente.

Na operação real e na equivalente deve-se ter as seguintes igualdades:

- a) - do perfil-equivalente e do percurso de avanço do carro ou mesa móvel.
- a) - mesma Equação de Taylor para as n ferramentas envolvidas, que também será a da ferramenta-equivalente.
- b) - do tempo de corte da operação real e da ferramenta-equivalente.

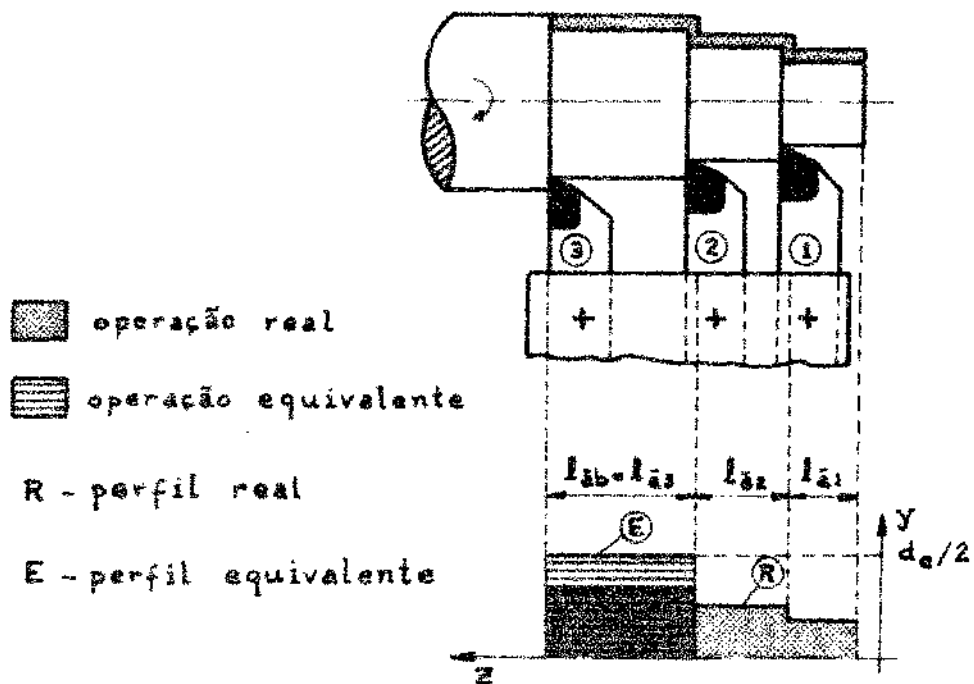


Fig.8.2 - Equivalências nas operações de usinagem onde várias ferramentas atuam simultaneamente.

O conceito de ferramenta-equivalente aplica-se às operações de copiagem, ou então, a qualquer grupo de ferramentas que apresentem mesma Equação de Taylor (ver cap. IX), rotação e avanço, como por exemplo nas furadeiras multi-árvores (figura 8.3).

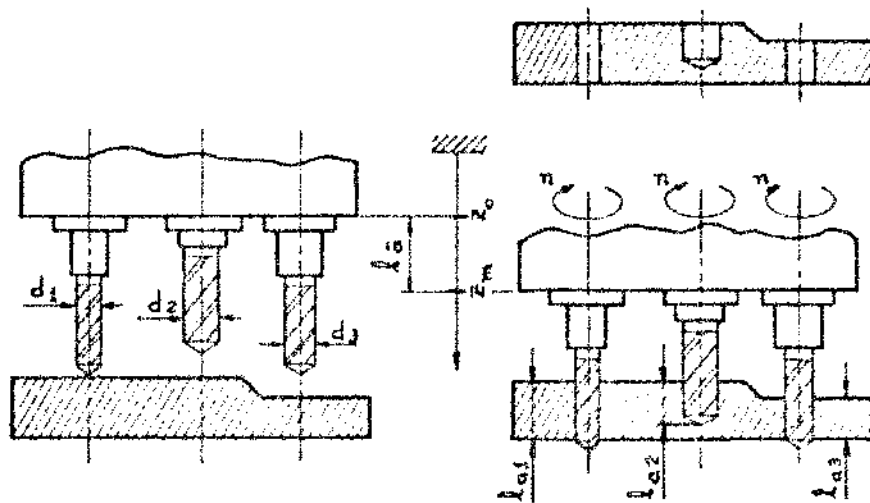


Fig. 8.3 - Execução simultânea de três furos por meio de furadeira multi-árvore. No exemplo, as brocas possuem a mesma rotação e a mesma velocidade de avanço, porém diferentes diâmetros.

Na operação de furação mostrada na figura 8.3, tem-se uma broca-equivalente, cujo diâmetro-equivalente é dado por:

$$d_e = \left[\frac{l_{a1} \cdot d_1^x + l_{a2} \cdot d_2^x + l_{a3} \cdot d_3^x}{l} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (8.6)$$

como será demonstrado no capítulo X, onde $d_e = d_{eo}$, pois nas brocas-helicoidais normalmente o desgaste que define a vida localiza-se no diâmetro nominal ($\Delta d_{eo} = 0$) e $l_{ab} = l_{a1}$ (a ferramenta-base no caso, é a broca nº 1).

9 - EQUAÇÃO DE TAYLOR EQUIVALENTE

9.1 - Generalidades

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

$$T \cdot v^x = K \quad (9.1)$$

onde:

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

v = velocidade de corte da ferramenta (admitida como constante).

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

Quando uma ferramenta monocortante executa uma operação de corte em vários diâmetros, como mostram as figuras 9.1.a) e 9.1.b), os desgastes que determinam a vida da ferramenta serão influenciados pelas particulares variações das velocidades, avanços e profundidades de corte. Nestes casos, a equação de Taylor Simplificada (equação 9.1) não poderá ser aplicada se os parâmetros x e K foram determinados em uma operação à velocidade, avanço e profundidade de corte constantes. Isto implica na necessidade da determinação experimental dos parâmetros x e K da Equação de Taylor, a partir do número de peças usinadas por vida da ferramenta e do tempo de corte por peça usinada, para as particulares condições de usinagem da operação em análise.

Esta condição justifica-se devido principalmente aos seguintes fatores:

a) - durante a operação de corte de uma peça, a variação

da velocidade de corte, devido à variação dos diâmetros da peça, origina desgastes variáveis.

- b) - a vida da ferramenta é afetada pelo número de vezes - em que a ferramenta penetra e sai da peça.
- c) - a ferramenta é submetida a periódicos aquecimentos e resfriamentos.
- d) - a geometria da cunha e da ponta da ferramenta, bem como a variação da profundidade de corte e do avanço, - influem na localização das áreas onde instantaneamente a taxa de desgaste é maior.

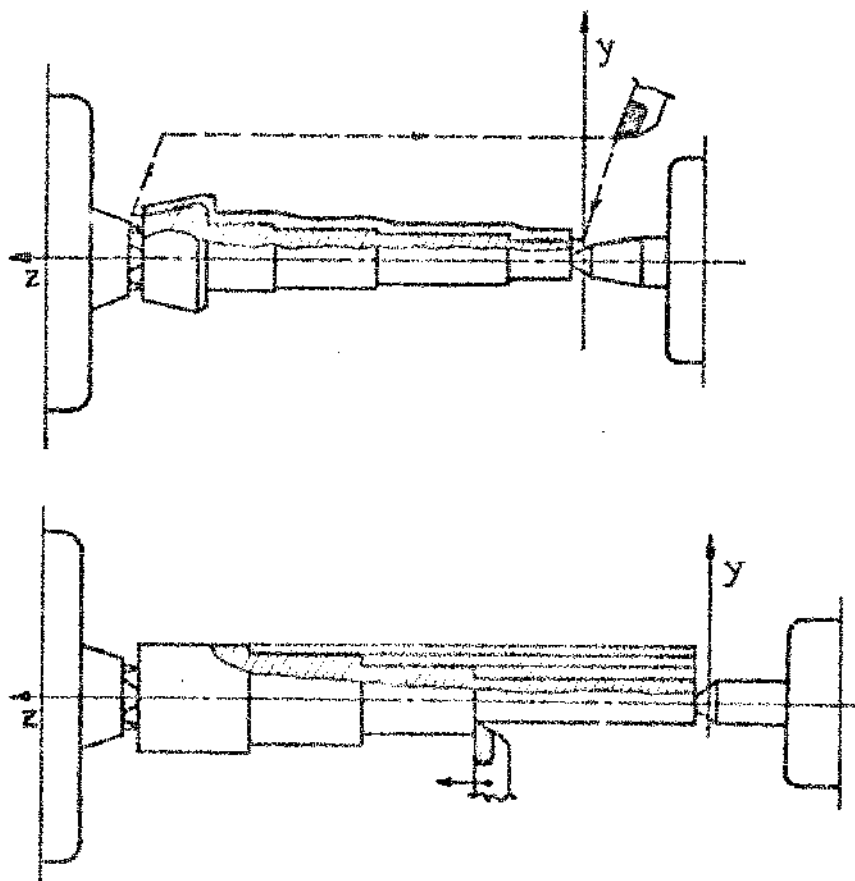


Fig. 9.1 - Exemplos de operações de torneamento onde a velocidade, o avanço e a profundidade de corte da ferramenta são variáveis.

- e) - nas operações de copiagem a ferramenta é submetida a vibrações de amplitude e frequências variáveis.
- f) - nas operações onde são utilizados fluidos de corte, po

dem ocorrer variações bruscas de temperatura (choques térmicos).

Quanto ao tipo das operações de corte, pode-se classificá-las em dois grupos:

- a) - a rotação do eixo-árvore, sobre o qual está fixa a peça ou a ferramenta, é mantida constante.
- b) - a velocidade de corte é mantida constante, por meio de uma conveniente variação da velocidade de rotação do eixo-árvore.

Em ambos os casos, a velocidade de corte a ser considerada refere-se ao ponto da aresta cortante onde ocorre o desgaste convencional [56] que define a vida da ferramenta, como será visto a seguir.

9.2 - Influência da posição do desgaste convencional no valor da velocidade de corte equivalente

Como nem sempre o desgaste convencional [56] que define a vida da ferramenta localiza-se no ponto principal de referência (ver § 2.1), como mostra a figura 9.2, para a k ésima condição de usinagem adotada (ou seja, rotação n_k do eixo-árvore ou velocidade de corte v_k), tem-se:

$$v_k = v_{ok} + \Delta v_{ok} \quad (9.2)$$

onde:

v_k = velocidade de corte, correspondente ao diâmetro da peça, dado por:

$$v_k = \frac{\pi \cdot d \cdot n_k}{1000}$$

referida ao ponto da aresta cortante onde ocorre o desgaste mais significativo da vida da ferramenta.

v_{ok} = velocidade de corte, referida ao ponto principal de referência da ferramenta.

Δv_{ok} = acréscimo da velocidade de corte equivalente v_{ok} , referida ao ponto principal de referência da ferramenta P_o .

Referindo-se à figura 9.2, para a k-ésima condição de usinagem, tem-se:

$$v_{ok} = \frac{2\pi \cdot n_k \cdot y}{1000} \quad (9.3)$$

$$\Delta v_{ok} = \frac{2\pi \cdot n_k \cdot \Delta y'}{1000} \quad (9.4)$$

onde $\Delta y'$ é o acréscimo da ordenada y_o devido à localização do ponto da aresta cortante que define a vida da ferramenta.

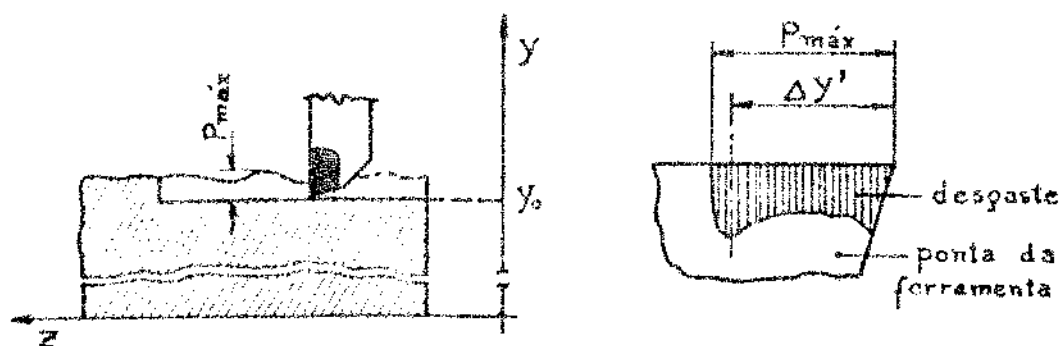


Fig. 9.2 - Variação da profundidade de corte ao longo do perfil usinado e desgastes da ferramenta.

Para qualquer ferramenta e operação de usinagem, tem-se sempre $\Delta y' \leq p_{máx}$, onde $p_{máx}$ é o valor máximo da profundidade de corte p .

De acordo com as equações (9.2), (9.3) e (9.4), para a velocidade de corte resulta:

$$v_k = \frac{\pi \cdot (d + \Delta d) \cdot n_k}{1000} \quad (9.5)$$

onde $d = 2y$ e $0 \leq \Delta d \leq 2 \cdot p_{máx}$, como mostrado na figura 9.3, que apresenta a variação da forma dos desgastes em função do valor do

raio da ponta da ferramenta.

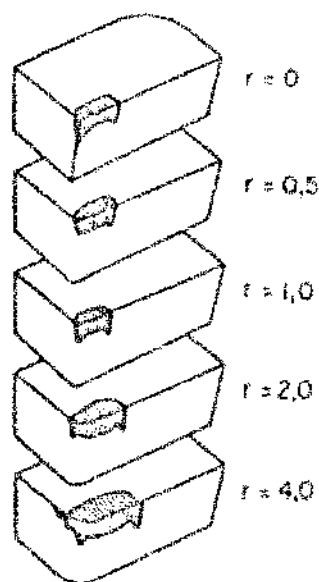


Fig. 9.3 - Variação da forma dos desgastes da ferramenta em função do raio de curvatura da ponta [56].

9.3 - Equação de Taylor Equivalente

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

$$T_k = Z_{Tk} \cdot t_{ck} \quad (9.6)$$

onde:

T_k = vida da ferramenta correspondente à k-ésima condição de corte.

Z_{Tk} = número médio de peças usinadas por vida da ferramenta.

t_{ck} = tempo de corte por peça.

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

Como a qualquer operação de usinagem (torneamento, mandrilamento, furacão, alargamento, fresamento, roscamento, etc.) pode-se associar uma velocidade de corte equivalente e um diâmetro-equiva-

lente (ver § 8.3 e § 8.4), a equação (9.1) pode ser posta na forma:

$$\left. \begin{aligned} T \cdot v_e^x &= K_e \\ \text{ou então,} \\ T_{k-1} \cdot v_{e(k-1)}^{x_k} &= T_k \cdot v_{e,k}^{x_k} = K_{e,k} \end{aligned} \right\} \quad (9.7)$$

aqui denominada *Equação de Taylor Equivalente*, representada num gráfico dilogarítmico por uma reta, pelo menos no intervalo $[v_{e,k-1}, v_{e,k}]$, no qual tem-se as grandezas x_k e $K_{e,k}$, como mostra a figura 8.4.a. Quando o produto $T_k \cdot v_{e,k}^{x_k}$ não é constante, ou seja, quando x e K não são constantes, pode-se sempre tomar um intervalo onde a equação (9.7) é satisfeita dentro de uma razoável aproximação, como mostra a figura 9.4.b.

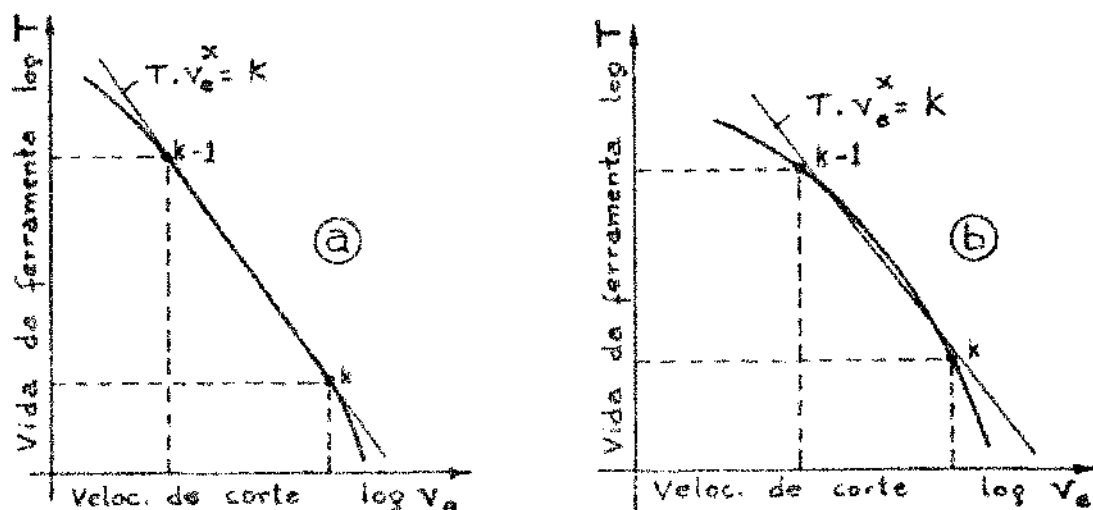


Fig. 9.4 - Representação da Equação de Taylor Equivalente (eq.9.7)- em gráfico dilogarítmico, e correspondentes intervalos - de validade: a) plenamente válida no intervalo $[k-1,k]$; b) válida por aproximação.

A prova experimental de que a equação (9.7) nem sempre pode ser representada por uma reta, foi realizada por Kronenberg [51], que estudou vários casos particulares.

9.4 - Determinação dos parâmetros

A seguir, serão deduzidas as equações que permitem a determinação do expoente x e da constante K_e da Equação de Taylor Equivalente (equação 9.7), em base aos dados obtidos experimentalmente. Devido à facilidade de obtenção e controle dos dados experimentais, o método aqui proposto utiliza o número de peças usinadas por vida (Z_T) ao invés da vida da ferramenta (T).

9.4.1 - As ferramentas atuam em apenas um estágio

9.4.1.1 - Caso geral

Substituindo-se o valor de T (vida da ferramenta) dado pela equação (9.6) na equação (9.7), dado por

$$t_c = \frac{\ell_{ab}}{\bar{a}_b \cdot n_e} \quad , \quad v_e = \frac{\pi \cdot d_e \cdot n_e}{1000}$$

segue que

$$Z_{T,k-1} \cdot n_{e,k-1}^{x_k-1} = Z_{T,k} \cdot n_{e,k}^{x_k-1} \quad (9.8)$$

e portanto, para cada k ésimas condições de usinagem, resulta

$$x_k = \frac{\log [Z_{T,k-1} / Z_{T,k}]}{\log [n_{e,k} / n_{e,k-1}]} + 1 \quad (9.9)$$

onde o expoente x_k refere-se ao intervalo de validade $[n_{e,k-1} , n_{e,k}]$

Por outro lado, a equação (9.8) torna-se

$$Z_T \cdot \frac{\ell_{ab}}{\bar{a}_b} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{e,k}}{1000} \right)^{x_k} \cdot n_e^{x_k-1} = K_{e,k}$$

o que permite colocar a Equação de Taylor Equivalente, referida ao número de peças usinadas por vida, na forma

$$Z_T \cdot n_e^{x_k-1} = K_{m,k} \quad (9.10)$$

válida no intervalo $[n_{e,k-1} , n_{e,k}]$, onde:

$$K_{m,k} = K_{e,k} \cdot \frac{\bar{a}_b}{\ell_{ab}} \cdot \left(\frac{1000}{\pi \cdot d_{e,k}} \right)^{x_k} \quad (9.11)$$

ou ainda,

$$K_{e,k} = \left(\frac{\pi \cdot d_{e,k}}{1000} \right)^{x_k} \cdot \frac{\ell_{ab}^-}{\bar{a}_b} \cdot Z_{T,k} \cdot n_{e,k}^{x_k-1} \quad (9.12)$$

9.4.1.2 - Potência constante do eixo-árvore

Neste caso resulta $n_e = n$ e portanto as equações (9.9) e (9.10) serão dadas por:

$$x_k = \frac{\log [Z_{T,k-1} / Z_{T,k}]}{\log [n_k / n_{k-1}]} + 1 \quad (9.13)$$

$$Z_{T,k-1} \cdot n_{k-1}^{x_k-1} = Z_{T,k} \cdot n_k^{x_k-1} = K_{n,k} \quad (9.14)$$

onde, para cada intervalo de rotações $[n_{k-1}, n_k]$, é válido um dado expoente x_k , como mostra a figura 9.5.a, que pode ser rapidamente calculado pelo ábaco da figura 9.6. Para as constantes $K_{e,k}$ e $K_{n,k}$ resulta:

$$K_{e,k} = \left(\frac{\pi \cdot d_{e,k}}{1000} \right)^{x_k} \cdot \frac{\ell_{ab}^-}{\bar{a}_b} \cdot Z_{T,k} \cdot n_k^{x_k-1} \quad (9.15)$$

$$K_{n,k} = K_{e,k} \cdot \left(\frac{1000}{\pi \cdot d_{e,k}} \right)^{x_k} \cdot \frac{\bar{a}_b}{\ell_{ab}^-} \quad (9.16)$$

No capítulo XIX serão fornecidos alguns exemplos de cálculo das grandezas x_k e $K_{e,k}$.

9.4.1.3 - Velocidade de corte constante

Mantendo-se a velocidade de corte constante, das equações (7.21) e (7.22) segue que

$$t_c = \frac{\ell_{ab}^-}{\bar{a}_b \cdot n_e} = \frac{\pi \cdot \ell_{ab}^- \cdot d_e}{1000 \cdot \bar{a}_b \cdot \bar{v}} \quad (9.17)$$

$$n_e = \frac{1000 \cdot \bar{v}}{\pi \cdot d_e} \quad (9.18)$$

Substituindo-se estes valores nas equações (9.9) e (9.10), resulta:

$$x_k = \frac{\log [Z_{T,k-1} / Z_{T,k}]}{[\log \hat{v}_k / \hat{v}_{k-1}]} + 1 \quad (9.19)$$

$$Z_{T,k-1} \cdot (\hat{v}_{k-1})^{x_k-1} = Z_{T,k} \cdot (\hat{v}_k)^{x_k-1} = K_{v,k} \quad (9.20)$$

válidas no intervalo $[\hat{v}_{k-1}, \hat{v}_k]$, como mostra a figura 9.5.b. Por outro lado, as constantes $K_{e,k}$ e $K_{v,k}$ serão dadas por:

$$K_{e,k} = \left(\frac{\pi \cdot d}{1000} \right) \cdot \frac{\ell_{ab}}{a_b} \cdot Z_{T,k} \cdot (\hat{v}_k)^{x_k-1} \quad (9.21)$$

$$K_{v,k} = K_{e,k} \cdot \left(\frac{1000}{\pi \cdot d} \right) \cdot \frac{a_b}{\ell_{ab}} \quad (9.22)$$

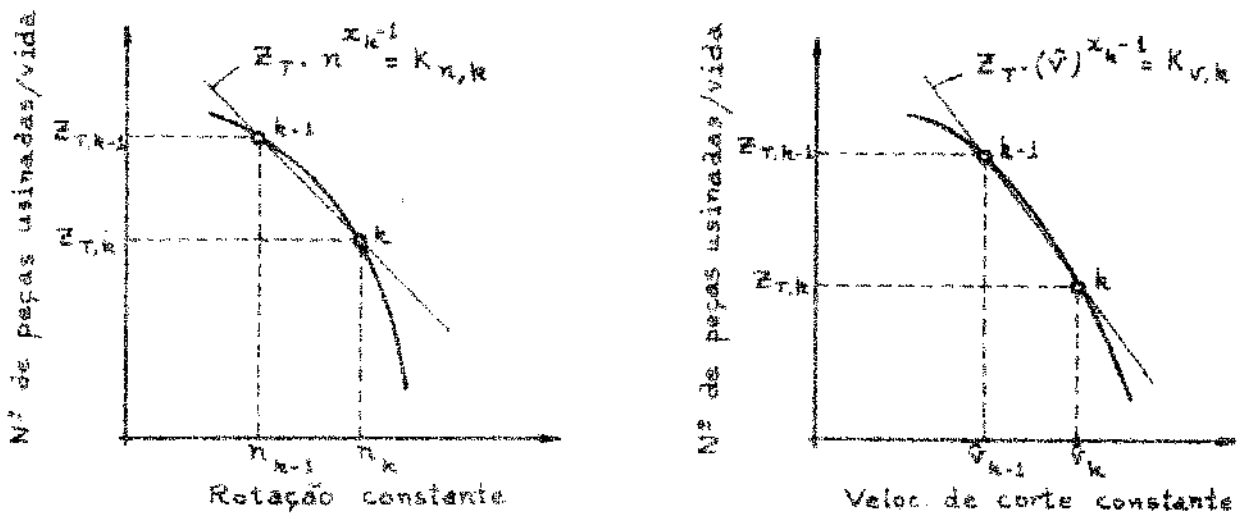


Fig. 9.5 - Representação da Equação de Taylor Equivalente e correspondentes intervalos de validade: a) rotação constante do eixo-árvore; b) velocidade de corte constante.

O gráfico da figura 9.6 permite uma rápida avaliação do expoente x_k , para cada intervalo de validade, quando a velocidade de corte é mantida constante

No capítulo XIX serão fornecidos exemplos de cálculo das

grandezas $\underline{x}$ e K_e , quando a velocidade de corte é mantida constante.

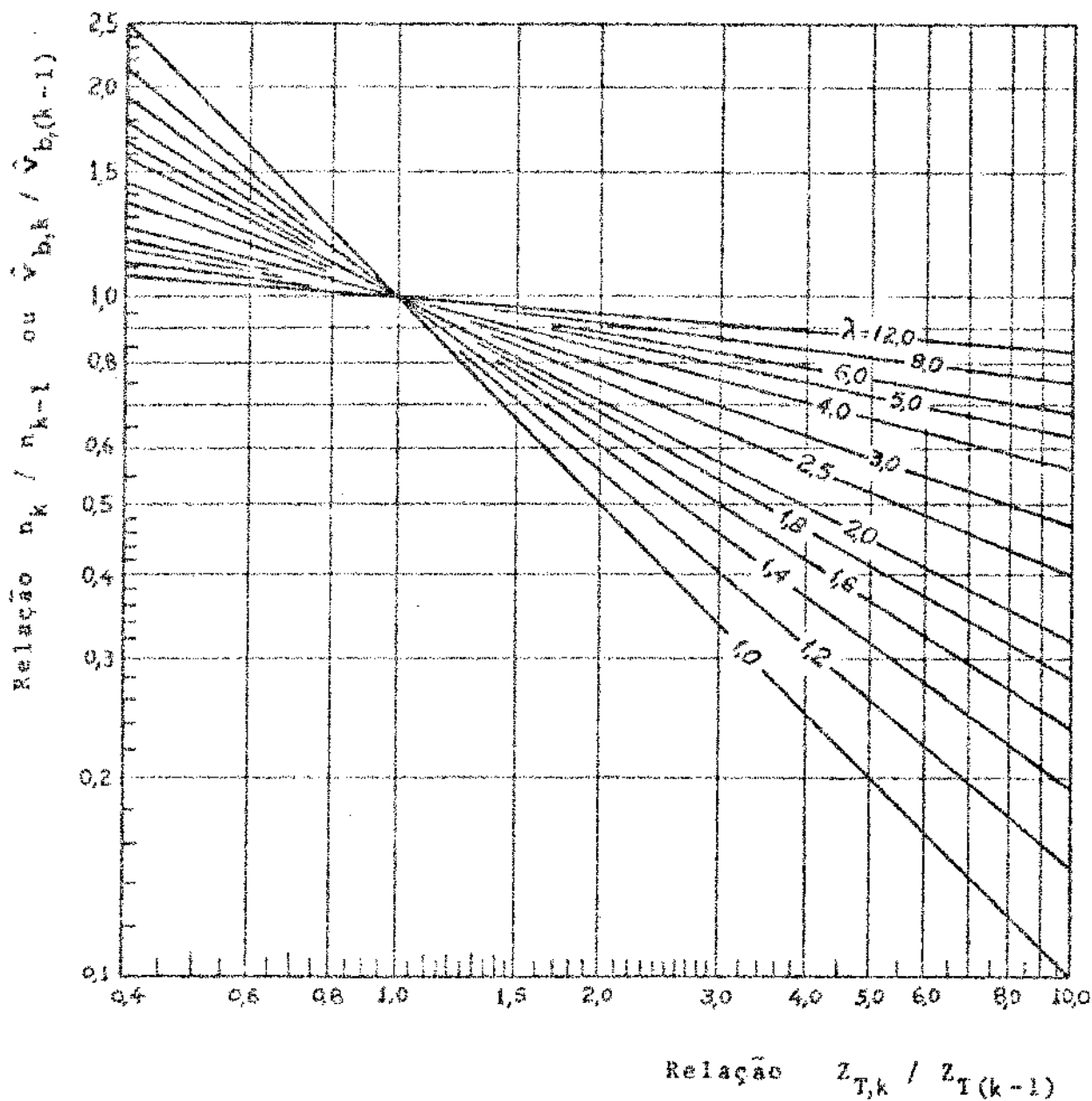


Fig. 9.6 - Abaco para determinação do expoente x_k a partir do número de peças usinadas por vida.

9.4.2 - As ferramentas atuam em vários estágios

9.4.2.1 - Caso geral

Quando uma ferramenta atua em várias sub-operações de corte, realizadas em determinados estágios, como mostrado na fig.11.1,

de acordo com o conceito de velocidade de corte equivalente e rotação-equivalente do eixo-árvore, a equação (8.1) pode ser posta na forma

$$v_e^x = \frac{1}{t_c} \cdot \sum_{j=\beta}^N v_{ej}^x \cdot t_{cj} \quad (9.23)$$

onde:

t_c = tempo total de corte da ferramenta, ao atuar em vários estágios;

t_{cj} = tempo de corte no j ésimio estágio;

v_{ej} = velocidade de corte equivalente, no j ésimio estágio;

N = número total de estágios em que a ferramenta atua;

β = número de ordem dos estágios em que a ferramenta atua.

Substituindo-se este valor de v_e na equação geral (9.7), -

resulta

$$Z_T \cdot \sum_{j=\beta}^N v_{ej}^x \cdot t_{cj} = K_e \quad (9.24)$$

Introduzindo-se o valor do tempo de corte da ferramenta e da sua velocidade de corte equivalente, em cada estágio, dados por

$$t_{cj} = \frac{\ell_{ab,j}}{\bar{a}_{bj} \cdot n_{ej}} \quad (9.25)$$

$$v_{ej} = \frac{\pi \cdot d_{ej} \cdot n_{ej}}{1000} \quad (9.26)$$

onde,

n_{ej} = rotação-equivalente do eixo-árvore, no j ésimio estágio;

d_{ej} = diâmetro-equivalente no j ésimio estágio;

na equação (9.20), segue que:

$$Z_{T,k-1} \cdot \sum_{j=\beta}^N \delta_j \cdot n_{ej,k-1}^{x_k-1} = Z_{Tk} \cdot \sum_{j=\beta}^N \delta_j \cdot n_{ej,k}^{x_k-1} = K_{e,k} \quad (9.27)$$

com

$$\delta_j = \frac{\ell_{ab,j}}{\bar{a}_{bj}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{ej,k}}{1000} \right)^{x_k} \quad (9.28)$$

É importante notar-se que a equação (9.29) só pode ser satisfeita para a (k-1) ou k-ésima condição de usinagem, desde que seja observada a seguinte condição de validade da Equação de Taylor Equivalente:

Ao estabelecer-se k-ésimas condições de usinagem, as rotações-equivalentes utilizadas devem satisfazer a seguinte propriedade:

$$\frac{n_{e1,k}}{n_{e1,k-1}} = \frac{n_{e2,k}}{n_{e2,k-1}} = \dots = \frac{n_{ej,k}}{n_{ej,k-1}} = \Omega \quad (9.29)$$

onde Ω é constante se as rotações do eixo-árvore estão em progressão geométrica.

A prova desta condição é imediata. Colocando-se a equação (9.27) na forma

$$\sum_{j=\beta}^N \delta_j \cdot (Z_{T,k-1} \cdot n_{ej,k-1}^{x_k-1} - Z_{T,k} \cdot n_{ej,k}^{x_k-1}) = 0$$

e como $\delta_j \neq 0$, a condição necessária e suficiente para que o somatório seja nulo é que todos os seus termos sejam nulos, isto é,

$$\frac{Z_{T,k-1}}{Z_{T,k}} = \left(\frac{n_{ej,k}}{n_{ej,k-1}} \right)^{x_k-1} = (\Omega)^{x_k-1} \quad (9.30)$$

ou então

$$Z_{T,k-1} \cdot n_{ej,k-1}^{x_k-1} = Z_{T,k} \cdot n_{ej,k}^{x_k-1} \quad (9.31)$$

Portanto, se a condição de validade dada pela equação (9.30), é satisfeita (o que normalmente ocorre na prática, pois as rotações disponíveis no eixo-árvore geralmente estão em progressão geométrica), o expoente x_k , no intervalo de validade $[n_{k-1}, n_k]$, será dado por

$$x_k = \frac{\log [Z_{T,k-1} / Z_{T,k}]}{\log [n_{ej,k} / n_{ej,k-1}]} + 1 \quad (9.32)$$

podendo ser facilmente determinado com o auxílio do âbaco da figura 9.6.

9.4.2.2 - Rotação constante do eixo-árvore

Sendo $n_{ej} = n_j$ constante em cada j ésimio estágio, das equações gerais (9.31) e 9.32), resulta,

$$z_{T,k-1} \cdot n_{j,k-1}^{x_k-1} = z_{T,k} \cdot n_{j,k}^{x_k-1} = K_{n,k} \quad (9.33)$$

$$x_k = \frac{\log[z_{T,k-1} / z_{T,k}]}{\log[n_k / n_{k-1}]} + 1 \quad (9.34)$$

satisfazendo a condição

$$\frac{n_k}{n_{k-1}} = \frac{n_{j,k}}{n_{j,k-1}} = \Omega = \text{constante} \quad (9.35)$$

em todos os estágios que a ferramenta atua, normalmente satisfeita pelas máquinas-ferramentas cujas rotações do eixo-árvore estão em progressão geométrica. Nestes casos, a constante $K_{e,k}$ será dada por

$$K_{e,k} = z_{T,k} \cdot \sum_{j=\beta}^N \left(\frac{\pi \cdot d_{ej}}{1000} \right)^{x_k} \cdot \frac{L_{ab,j}}{a_{b,j}} \cdot n_{j,k}^{x_k-1} \quad (9.36)$$

onde:

β = número de ordem dos estágios onde a ferramenta atua;

N = número total de estágios.

9.4.2.3 - Velocidade de Corte Constante

Mantendo-se a velocidade de corte constante em cada j ésimio estágio, substituindo-se o valor de n_e dado pela equação (9.18) nas equações gerais (9.31) e (9.32), resulta:

$$z_{T,k-1} \cdot (\hat{v}_{bj,k-1})^{x_k-1} = z_{T,k} \cdot (\hat{v}_{bj,k})^{x_k-1} = K_{v,k} \quad (9.37)$$

$$x_k = \frac{\log[z_{T,k-1} / z_{T,k}]}{\log[\hat{v}_{bj,k} / \hat{v}_{bj,k-1}]} + 1 \quad (9.38)$$

$$K_{e,k} = Z_{T,k} \cdot \frac{(C)^{x_k-1}}{q} \cdot \prod_{j=6}^N \left(\frac{\pi \cdot d_{e,j}}{1000} \right) \cdot \frac{l_{ab,j}}{a_{bj}} \cdot (\hat{v}_{bj,k})^{x_k-1} \quad (9.39)$$

onde C é a diferença de diâmetro entre a ferramenta considerada e a ferramenta-base do j ésimo estágio (ver § 11.3.2) . As equações (9.37), (9.38) e (9.39) são válidas no intervalo $[\hat{v}_{bj,k-1}, \hat{v}_{bj,k}]$, satisfazendo a condição de validade $\hat{v}_{bj,k}/\hat{v}_{bj,k-1} = \Omega =$ constante, como foi visto no § 9.4.2.1.

9.4.2.4 - Valores corrigidos das rotações e do número médio de peças usinadas por vida

Nas máquinas-ferramentas, por razões construtivas, nem sempre as rotações do eixo-árvore apresentam um escalonamento em progressão geométrica de razão Ω perfeitamente constante. Por isso, os valores experimentais do número médio de peças usinadas por vida, de cada ferramenta, devem ser corrigidos (ajustados) para as rotações exatas em cada estágio, dentro de cada intervalo de validade da Equação de Taylor Equivalente. De acordo com as equações gerais (9.33) e (9.37), segue que

$$\text{rotação constante: } Z_{T,k} = Z'_{T,k} \cdot \left(\frac{n'_{j,k}}{n_{j,k}} \right)^{x_k-1} \quad (9.40)$$

$$\text{velocidade corte constante: } Z_{T,k} = Z'_{T,k} \cdot \left(\frac{\hat{v}_{bj,k}}{\hat{v}_{bj,k}} \right)^{x_k-1} \quad (9.41)$$

onde:

$Z'_{T,k}$ = valor experimental do número médio de peças usinadas por vida;

$Z_{T,k}$ = valor corrigido do número médio de peças usinadas por vida;

$n'_{j,k}$ = valor real da rotação do eixo-árvore;

$n_{j,k}$ = valor calculado da rotação, para a progressão geométrica de razão Ω constante;

$\hat{v}'_{bj,k}$ = valor real da velocidade de corte mantida constante;

$\hat{v}_{bj,k}$ = valor calculado da velocidade de corte mantida constante, para a progressão geométrica de razão Ω constante.

Os valores calculados de $n_{j,k}$ e $\hat{v}_{bj,k}$ constam de tabelas dos números normais, como por exemplo a da Norma Brasileira ABNT, - NB71, o que poderá possibilitar uma escolha rápida e direta dos termos da progressão geométrica, para uma dada razão Ω .

No § 19.2.6 é apresentado um exemplo de cálculo dos valores corrigidos do número médio de peças usinadas por vida, para a condição de rotação constante do eixo-árvore.

9.5. - Considerações sobre as equações propostas

A fixação de um intervalo de validade para a Equação de Taylor Equivalente, implica numa maior precisão na determinação do expoente x e da constante K , pois na prática é bastante comum não ocorrer uma reta no diagrama logarítmico mostrado na figura 9.4.

No método proposto, a determinação experimental da Equação de Taylor Equivalente pode ser facilmente realizada, fixando-se as rotações do eixo-árvore ou velocidades de corte a serem mantidas -

constantes, e registrando-se o número médio de peças usinadas por vida da ferramenta. Quando uma mesma ferramenta atua em vários estágios, deve-se verificar a condição de validade.

As vantagens de se estabelecer a Equação de Taylor Equivalente, a partir do número médio de peças usinadas por vida, são evidentes, pois a reposição das ferramentas, na prática, é normalmente baseada em várias condições que devem ser satisfeitas simultaneamente, e não em base ao desgaste convencional limite. Dentre as principais condições que alertam o operador da máquina para a necessidade da reposição, tem-se principalmente as tolerâncias dimensionais, a rugosidade superficial, aparecimento de vibrações indesejáveis, ruídos característicos, forma do cavaco, troca da ferramentas em grupos, etc. O estabelecimento do expoente x e da constante K_e a partir de tabelas ou gráficos, deve ser encarado com bastante reserva, pois poderá conduzir a erros crassos na determinação das condições econômicas de usinagem. Por outro lado, é praticamente impossível medir-se quantitativamente o desgaste da ferramenta sem retirá-la do seu suporte. Adicionalmente, a retirada periódica da ferramenta, para medida dos desgastes convencionais, modifica as condições térmicas a que ela estava solicitada, pois com o resfriamento ela voltará à operação de corte com temperatura diferente à de regime.

Finalizando, o controle e registro do número médio de peças usinadas por vida é de fácil execução, não exigindo técnicos especializados, sendo em geral um procedimento utilizado também para outros objetivos, tais como controle do consumo de ferramentas, verificação da qualidade da afiação, do material da ferramenta, e da usinabilidade do material da peça.

No cap. XVIII será apresentado um programa de computação, no qual é verificada a correspondência biunívoca entre os parâmetros calculados (x, K_e) e o intervalo de validade adotado $[n_{k-1}, n_k]$ para o cálculo do diâmetro-equivalente.

10 - DIAMETRO-EQUIVALENTE

Os conceitos a seguir formulados valerão para as operações gerais de torneamento e mandrilamento, tal como se apresentam em seus aspectos práticos, e não apenas para os casos anteriormente estudados por Ferraresi [56], Saueh, Draghici e Chiriacescu [57], que adotaram o caso particular em que o eixo de inclinação do Copiador apresenta ângulo $\delta = 90^\circ$. As soluções serão apresentadas para as operações gerais, realizadas numa das seguintes situações:

- rotação do eixo-árvore constante,
- velocidade de corte constante.

10.1 - Rotação Constante do Eixo-Árvore

10.1.1 - As ferramentas atuam isoladamente

10.1.1.1 - Um único avanço em cada estágio

Substituindo-se o valor de v_{e0} dado pela equação (8.1) na equação (8.2), resulta para o diâmetro-equivalente a expressão:

$$d_e = \left[\left(\frac{1000}{\pi \cdot n} \right)^x \cdot \frac{1}{t_c} \cdot \int_0^{t_c} v_o^x \cdot dt_c \right]^{\frac{1}{x}} \quad (10.1)$$

Como mostrado na figura 10.1, na usinagem de todas as p - ésimas partes que constituem o perfil total usinado, formado de y partes, a velocidade instantânea de corte (equação 6.5) será:

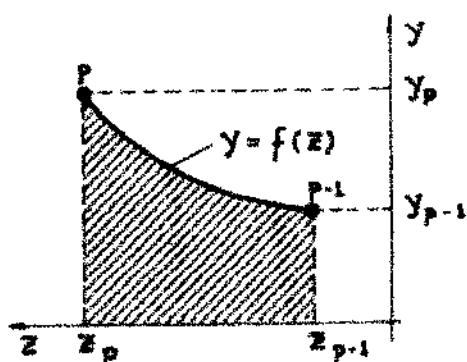


Fig. 10.1 - Perfil de ordem p , pertencente a um perfil total constituído de w partes.

$$v_o = \frac{2\pi \cdot y \cdot n}{1000} = \frac{2\pi \cdot f(z) \cdot n}{1000}$$

Para o tempo de corte em cada p-ésima parte usinada, quando o avanço do carro e a rotação do eixo-árvore são constantes, tem-se que

$$t_{c,p} = \frac{\ell_{a,p}}{\bar{a} \cdot n}$$

Substituindo-se, resulta:

$$d_{eo}^x = \frac{\bar{a} \cdot n}{\ell_{a,p}} \cdot 2^x \cdot \int_0^{t_{c,p}} y_p^x \cdot dt_c$$

Referindo-se aos deslocamentos do carro ou mesa móvel, segue que:

$$dt_c = \frac{d\bar{z}}{\bar{a} \cdot n}$$

Como foi visto no § 3.3.1 tem-se:

$$d\bar{z} = dz - \cotg \delta \cdot dy$$

Levando-se o valor de dt_c e $d\bar{z}$ na expressão de d_{eo} , para o perfil $y_p = f_p(z)$ tem-se:

$$d_{eo} = 2 \cdot \left[\frac{1}{\ell_{a,p}} \cdot \left(\int_{z_{p-1}}^{z_p} f_p(z)^x \cdot dz - \cotg \delta \cdot \int_{y_{p-1}}^{y_p} y_p^x \cdot dy \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (10.2)$$

Extendendo-se o mesmo procedimento para o perfil total $y = f(z)$, constituído de w partes, como mostrado nas figuras 4.1 e 4.2, resulta:

$$d_{eo} = 2 \cdot \left[\frac{1}{\ell_{a,p}} \cdot \sum_{p=1}^w \left(\int_{z_{p-1}}^{z_p} f_p(z)^x \cdot dz - \cotg \delta \cdot \int_{y_{p-1}}^{y_p} y_p^x \cdot dy \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (10.3)$$

que permite a determinação do diâmetro-equivalente no caso de rota-

ção do eixo-árvore constante, na usinagem de um dado perfil constituído de w partes, cada uma satisfazendo uma função $y_p = f_p(z)$.

Analisando-se a equação (10.3), verifica-se que ela pode ser dividida em duas parcelas, dadas por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ia. parcela:} \quad Z_p = \int_{z_{p-1}}^{z_p} f_p(z)^x \cdot dz \end{array} \right. \quad (10.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{IIa. parcela:} \quad Y_p = -\cotg \delta \cdot \int_{y_{p-1}}^{y_p} y_p^x \cdot dy \end{array} \right. \quad (10.5)$$

Logo,

$$d_{eo} = 2 \cdot \left[\frac{1}{\ell - a} \cdot \sum_{p=1}^w (Z_p + Y_p) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (10.6)$$

As parcelas Z e Y apresentam distintos significados, quais sejam:

Z_p = parcela principal, correspondente à parte independente do ângulo δ de inclinação do Copiador e dependente principalmente:

- a) da forma geométrica dos perfis usinados;
- b) do expoente x da Equação de Taylor Equivalente, para o par ferramenta-peça considerado.

Y_p = parcela corretiva, correspondente à parte dependente do ângulo δ de inclinação do Copiador, e principalmente:

- a) das ordenadas y em cada p ésimas parte usinada;
- b) do expoente x da Equação de Taylor Equivalente, para o par ferramenta-peça considerado.

Quando $\delta = 90^\circ$, isto é, o eixo de inclinação do Copiador é perpendicular ao eixo de rotação da peça (direção principal de avanço) resulta $Y_p = 0$, o que foi admitido por Ferraresi [56], Sauer, -

Draghici e Chiriacescu [57] em seus trabalhos.

Para o perfil total usinado $y = f(z)$, resulta:

$$d_{eo} = 2 \cdot \left[\frac{1}{\ell_a} \cdot (Z + Y) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (10.7)$$

onde:

$$\begin{cases} Z = \sum_{p=1}^w Z_p \\ Y = \sum_{p=1}^w Y_p \end{cases}$$

Neste caso as parcelas Z e Y apresentam os seguintes significados:

Z = parcela equivalente principal, correspondente à parcela do diâmetro-equivalente independente do ângulo δ de inclinação do Copiador.

Y = parcela equivalente corretiva, correspondente à parcela do diâmetro-equivalente dependente do ângulo δ de inclinação do Copiador

casos particulares

Aplicando-se a equação geral (10.6) às operações de torneamento mais comuns na prática, obtêm-se as equações para cálculo do diâmetro-equivalente mostradas na tabela X.1. Estas equações podem ser também aplicadas às operações de mandrilamento, admitindo-se agora como diâmetros internos os apresentados na tabela. Para facilitar o cálculo do diâmetro-equivalente na copiagem de esferas, os termos do desenvolvimento em série podem ser facilmente determinados com o auxílio do abaco mostrado na figura 10.2.

Tabela X.1 - Equações para o cálculo do tempo total de corte t_c e do diâmetro-equivalente d_{eo} nas operações de torneamento.

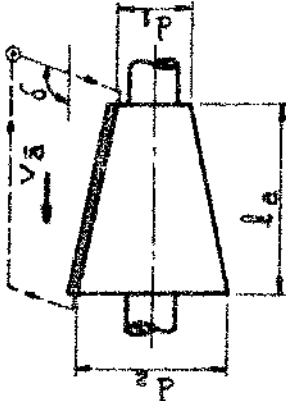
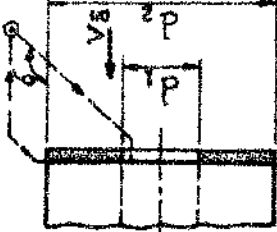
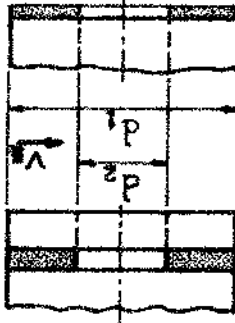
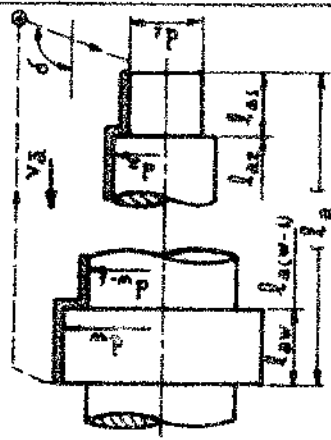
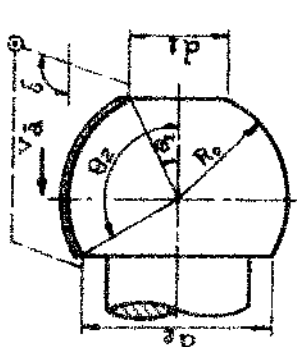
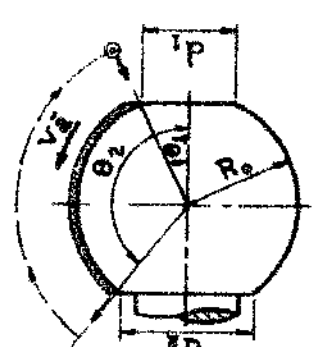
Tipo da operação	Tempo total de corte: $t_c = t_{ca} + t_{cc}$		Diâmetro-equivalente d_{eo}
	Rotação constante	Veloc. de corte constante	
Torneamento Cônico	 $t_{ca} = \frac{l_a}{\bar{a} \cdot n}$ $t_{cc} = \frac{\cotg \phi}{2 \cdot \bar{a} \cdot n} \cdot (d_1 - d_2)$	$t_{ca} = \frac{\pi \cdot l_a}{2 \cdot \bar{a} \cdot V_c} \cdot (d_2 + d_1)$ $t_{cc} = \frac{\pi \cdot \cotg \phi}{4 \cdot \bar{a} \cdot V_c} \cdot (d_1^2 - d_2^2)$	$d_{eo} = \left[\frac{d_2^{x+1} - d_1^{x+1}}{(x+1) \cdot (d_2 - d_1)} \right]^{\frac{1}{x}}$
	$t_{ca} = 0$ $t_{cc} = \frac{\cotg \phi}{2 \cdot \bar{a} \cdot n} \cdot (d_1 - d_2)$	$t_{ca} = 0$ $t_{cc} = \frac{\pi \cdot \cotg \phi}{4 \cdot \bar{a} \cdot V_c} \cdot (d_1^2 - d_2^2)$	$d_{eo} = \frac{d_1 + d_2}{2}$
Faseamento (avanco longitudinal)	 $t_{ca} = 0$ $t_{cc} = \frac{\cotg \phi}{2 \cdot \bar{a} \cdot n} \cdot (d_1 - d_2)$	$t_{ca} = 0$ $t_{cc} = \frac{\pi \cdot \cotg \phi}{4 \cdot \bar{a} \cdot V_c} \cdot (d_1^2 - d_2^2)$	$d_{eo} = \left[\frac{d_2^{x+1} - d_1^{x+1}}{(x+1) \cdot (d_2 - d_1)} \right]^{\frac{1}{x}}$
	$t_c = \frac{d_2 - d_1}{2 \cdot \bar{a} \cdot n}$	$t_c = \frac{\pi}{4 \cdot \bar{a} \cdot V_c} \cdot (d_1^2 - d_2^2)$	$d_{eo} = \frac{d_1 + d_2}{2}$
Faseamento e Sangramento radial (avanco transversal)	 $t_{ca} = 0$ $t_{cc} = \frac{\cotg \phi}{2 \cdot \bar{a} \cdot n} \cdot (d_1 - d_2)$	$t_{ca} = 0$ $t_{cc} = \frac{\pi \cdot \cotg \phi}{4 \cdot \bar{a} \cdot V_c} \cdot (d_1^2 - d_2^2)$	$d_{eo} = \left[\frac{d_2^{x+1} - d_1^{x+1}}{(x+1) \cdot (d_2 - d_1)} \right]^{\frac{1}{x}}$
Sangramento radial			$d_{eo} = \frac{d_1 + d_2}{2}$

Tabela X.1 - (continuação)

Tipo da operação	Tempo total de corte: $t_c = t_{ca} + t_{cc}$		Diâmetro - equivalente d_{eo}	
	Rotação constante	Veloc. de corte constante	Rotação constante	Veloc. de corte constante
	$t_{ca} = \frac{l_a}{\bar{a} \cdot n}$ $t_{cc} = \frac{\cotg \delta \cdot (d_1 - d_w)}{2 \cdot \bar{a} \cdot n}$	$t_{ca} = \frac{\pi}{\bar{a} \cdot v_c} \cdot \sum_{i=1}^n l_{ai} \cdot d_i$ $t_{cc} = \frac{\pi \cdot \cotg \delta \cdot (d_1^2 - d_w^2)}{\bar{a} \cdot v_c}$	$d_{eo} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{x-1} l_{ai} \cdot d_i^x - \cotg \delta \cdot \left(\frac{d_w^x - d_1^x}{x} \right)}{(x+1) \cdot \left[l_a - \cotg \delta \cdot \left(\frac{d_w - d_1}{2} \right) \right]} \right\}^{\frac{1}{x}}$	$d_{eo} = \frac{\sum_{i=1}^x l_{ai} \cdot d_i + \cotg \delta \cdot (d_1^2 - d_w^2)}{l_a - \cotg \delta \cdot \frac{d_w - d_1}{2}}$
	$t_{ca} = \frac{R_0 (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}{\bar{a} \cdot n}$ $t_{cc} = \frac{\cotg \delta \cdot (d_1 - d_2)}{2 \bar{a} \cdot n}$	$t_{ca} = \frac{\pi \cdot R_0^2}{\bar{a} \cdot v_c} \cdot [(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1)]$ $t_{cc} = \frac{\pi \cdot \cotg \delta \cdot (d_1^2 - d_2^2)}{4 \cdot \bar{a} \cdot v_c}$	$d_{eo} = D_0 \cdot \left[\frac{\sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \cdot \eta_j \cdot [\cos \theta_1^{2j+1} - \cos \theta_2^{2j+1}]}{(\cos \theta_2 - \cos \theta_1) - \cotg \delta \cdot (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)} \right]^{\frac{1}{x}}$ com $\eta_j = \frac{2^j}{2^j \cdot (2j+1) \cdot (x-2j) \cdot j!}$	$d_{eo} = \frac{R_0 \cdot [(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) + \cotg \delta \cdot (d_1^2 - d_2^2)]}{(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) - \cotg \delta \cdot (\sin \theta_1 - \sin \theta_2)}$
	$t_c = \frac{R_0 \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{\bar{a}_t \cdot n}$	$t_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_0^2}{\bar{a}_t \cdot v_c} \cdot (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$	$d_{eo} = D_0 \cdot \left[\frac{\sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \cdot \eta_j \cdot [\cos \theta_1^{2j+1} - \cos \theta_2^{2j+1}]}{\theta_2 - \theta_1} \cdot \frac{\sum_{j=0}^{\infty} \frac{2^j}{j!} (x-2j-1)}{2^j \cdot (2j+1) \cdot (x-2j-1) \cdot j!} \right]^{\frac{1}{x}}$ com $\eta_j = \frac{2^j}{j!} (x-2j-1)$	$d_{eo} = 2 R_0 \cdot \frac{\cos \theta_1 - \cos \theta_2}{\theta_2 - \theta_1}$

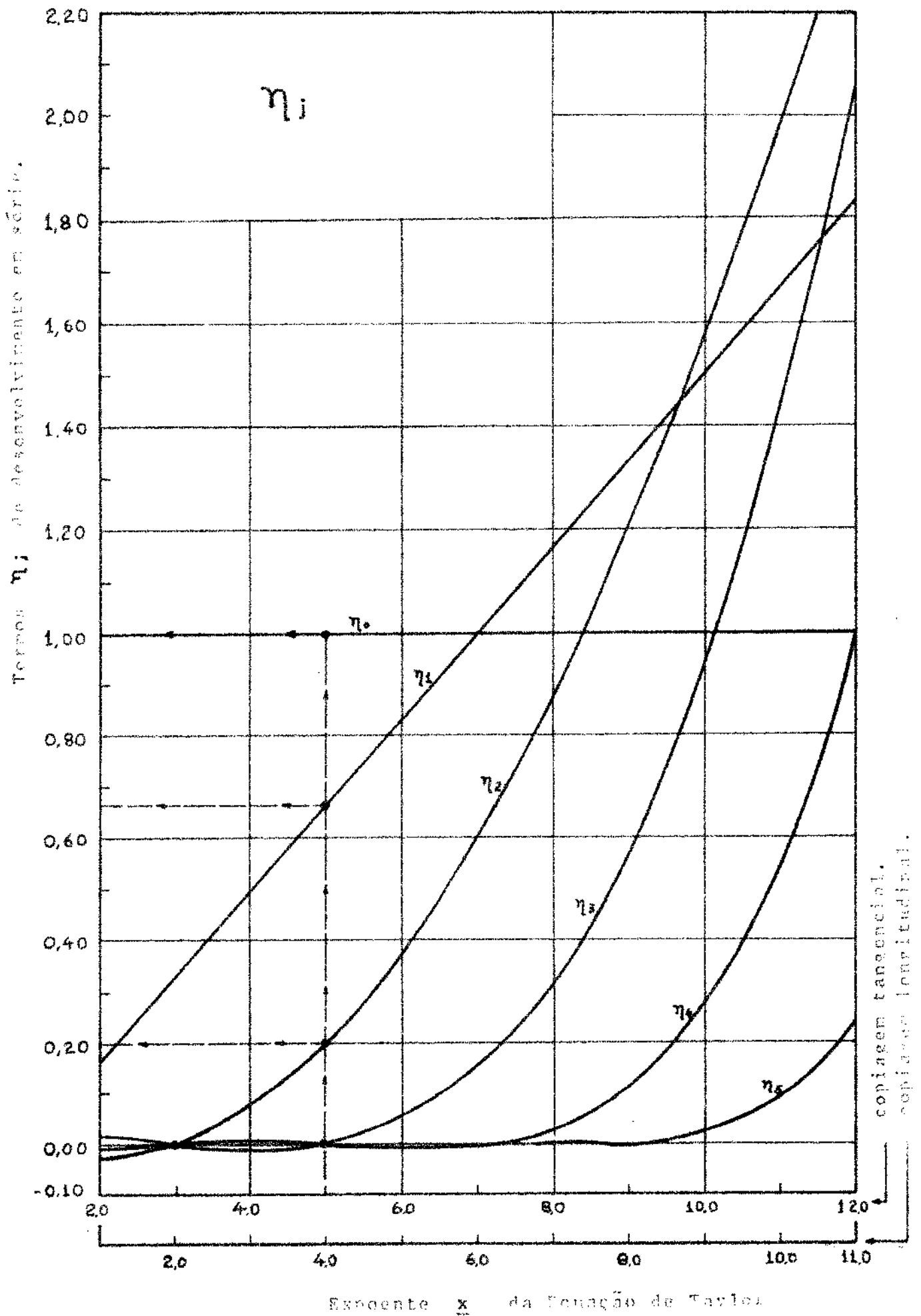


Fig. 10.2 - Abaco para determinação dos termos η_i do

10.1.1.2 - Mais de um avanço em cada estágio

Quando a i ésimas ferramenta atua no j ésimos estágio, a equação (10.1) pode ser posta na forma

$$d_{eoi,j}^{x_i} = \left(\frac{1000}{\pi \cdot n_j} \right)^{x_i} \frac{1}{t_{ci,j}} \int_0^{t_{ci,j}} v_o^x \cdot dt_c \quad (10.8)$$

onde:

$d_{eoi,j}$ = diâmetro-equivalente da i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio.

$t_{ci,j}$ = tempo de corte da i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio.

n_j = rotação do eixo-árvore no j ésimos estágio.

Se o avanço do carro por volta do eixo-árvore assume diferentes valores, em algumas partes do perfil usinado, tem-se que

$$t_{ci,j} = \frac{\ell_{abi,j}^-}{\bar{a}_{bi,j} \cdot n_j} = \sum_{p=1}^w \frac{\ell_{api,j}^-}{\bar{a}_{pi,j} \cdot n_j}$$

$$\int_0^{t_{ci,j}} v_o^{x_i} \cdot dt_c = \sum_{p=1}^w \int_{p-1}^p \left(\frac{\pi \cdot d_{o,p} \cdot n_j}{1000} \right)^{x_i} \cdot \frac{d_z^-}{\bar{a}_{pi,j} \cdot n_j}$$

Substituindo-se estes valores na equação (10.7), segue que

$$d_{eoi,j} = \frac{\bar{a}_{bi,j}^-}{\ell_{abi,j}^-} \cdot \sum_{p=1}^w \int_{p-1}^p d_{op}^z \cdot d_z^- \quad (10.9)$$

Admitindo-se que todos os perfis usinados são *retilíneos* - (pelo menos por aproximação), como mostra a figura 10.3, tem-se para cada p ésimos perfil usinado, as relações:

$$d_z^- = \varphi_t \cdot d_z$$

$$d_y = d_z \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$d_{eoi,j} = \left\{ \frac{\bar{a}_{bi,j}}{\bar{\ell}_{abi,j}} \cdot \sum_{p=1}^w \frac{\bar{\ell}_{api,j}}{\bar{a}_{pi,j}} \cdot \frac{d_p^{x_i} [1 - (d_{p-1} / d_p)^{x_i+1}]}{(x_i+1) \cdot (1 - d_{p-1} / d_p)} \right\}^{\frac{1}{x_i}} \quad (10.10)$$

que é a equação geral para o cálculo do diâmetro-equivalente de cada ferramenta, em cada estágio.

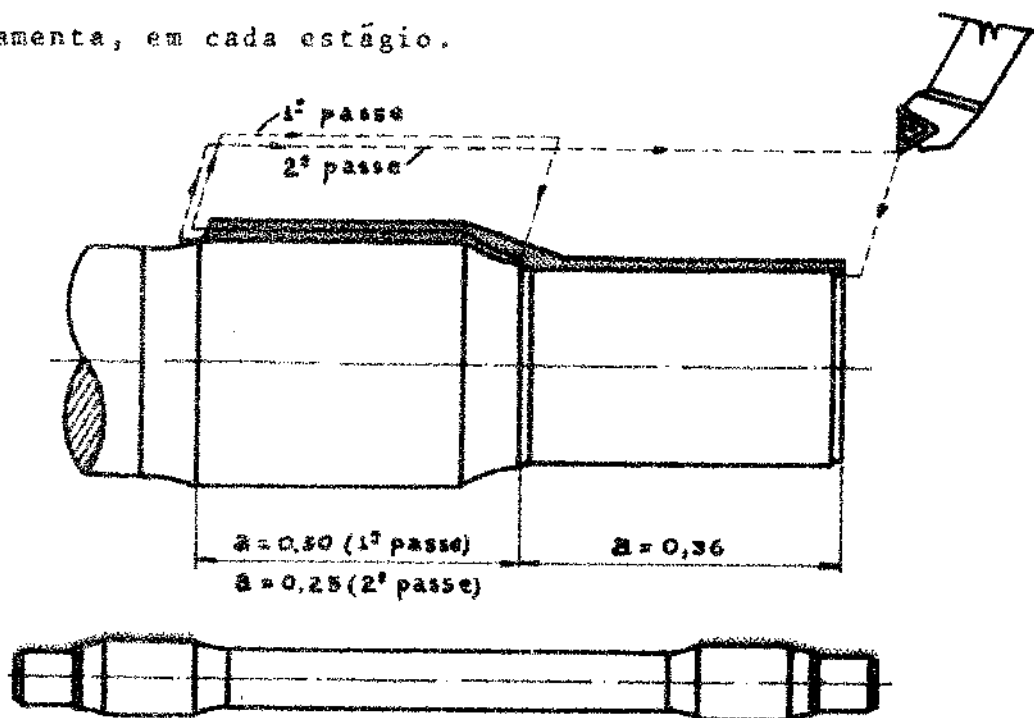


Fig. 10.3 - Copiagem longitudinal de um eixo para rodeiro de vagão ferroviário, onde utilizam-se três diferentes avanços, em um único estágio.

A equação (10.10) apresenta particular importância, porque com ela pode-se calcular o valor do diâmetro-equivalente, com suficiente aproximação do valor real, de qualquer forma de perfil usado. Para tanto, basta dividir-se o perfil em tantas partes retangulares, quanto a precisão desejada. A aplicação desta simplificação, principalmente com o uso do programa para computação fornecido a seguir (ver § 18.2.1), evitará o uso das expressões exatas, porém bastante complexas, para o cálculo do diâmetro-equivalente dos perfis curvilíneos, como pode ser notado na tabela X.1.

Quando tratar-se de torneamento cilíndrico longitudinal,

onde $d_p = d_{p-1}$, os termos de ordem p do somatório da equação (10.10) resultam indeterminados. Neste caso, passando-se ao limite, pela regra de L'Hopital, resulta

$$\lim_{d_p \rightarrow d_{p-1}} \frac{\ell_{api,j}^-}{\bar{a}_{pi,j}} \cdot \frac{d_p^{x_i} [1 - (d_{p-1}/d_p)^{x_i+1}]}{(x_i+1)(1 - d_{p-1}/d_p)} = \frac{\ell_{api,j}^-}{\bar{a}_{pi,j}} \cdot d_p^{x_i} \quad (10.11)$$

No programa de computação para o cálculo de $d_{eoi,j}$ (ver § 18.2) já está prevista esta ocorrência.

10.1.2 - Várias ferramentas atuam simultaneamente

Quando um grupo de ferramentas realiza uma operação de corte, na qual cada ferramenta envolvida realiza uma dada sub-operação de corte, como mostrado na figura 7.4, do conceito de ferramenta-equivalente, tem-se que

$$v_{eo}^x = \frac{1}{t_c} \cdot \sum_{i=1}^m v_{eoi}^x \cdot t_{ci} \quad (10.12)$$

Se o avanço é o mesmo para todas as ferramentas atuantes, resulta

$$v_{eo} = \frac{\pi \cdot n}{1000} \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^m d_{eoi}^x \cdot \ell_{ai}^-}{\ell_{ab}^-} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (10.13)$$

com d_{eoi} , em cada estágio, dado pelas equações gerais (10.6) e (10.8). Da definição de velocidade de corte equivalente, segue que

$$d_{eo} = \left[\frac{\sum_{i=1}^m d_{eoi} \cdot \ell_{ai}^-}{\ell_{ab}^-} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (10.14)$$

Se a operação de corte se dá unicamente na direção principal de avanço, como mostra a figura 10.4, resulta

$$d_{eo} = \left[\frac{\sum_{i=1}^m d_{oi}^x \cdot \ell_{ai}^-}{\ell_{ab}^-} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (10.15)$$

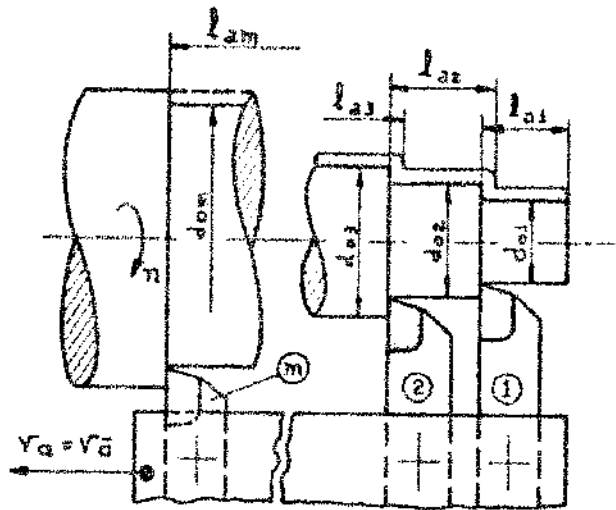


Fig. 10.4 - Torneamento cilíndrico, com um grupo de m ferramentas que atuam simultaneamente.

10.2 - Velocidade de Corte Constante

10.2.1 - As ferramentas atuam isoladamente

10.2.1.1 - Um único avanço em cada estágio

Quando a velocidade de corte é mantida constante por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore, o diâmetro-equivalente d_e corresponderá ao valor assumido pela rotação-equivalente n_e , como foi visto no § 8.4. Nestes casos, para cada perfil usinado, com um avanço constante, tem-se

$$d_{eo} = \frac{1000 \cdot \bar{v}_o}{\pi \cdot n_e} = \frac{1000 \cdot \bar{v}_o \cdot \bar{a} \cdot t_c}{\pi \cdot \bar{l}_a} \quad (10.16)$$

onde para cada particular tipo de operação de corte, o tempo de corte t_c e o percurso de avanço do carro $\bar{l}_a$, podem ser determinados pelos métodos anteriormente fornecidos.

Substituindo-se o tempo de corte dado pela equação (7.24) - na equação (10.15), resulta:

$$d_{eo} = 2 \cdot \bar{y}_e = \frac{1}{\varphi_t} \left[2 \cdot y_m + (\varphi_t - 1) \cdot (y_w + y_o) \right] \quad (10.17)$$

É interessante notar-se que o diâmetro-equivalente, na condição de velocidade de corte constante, independe do expoente x da Equação de Taylor Equivalente, quando a ferramenta atua em apenas um estágio, com uma única velocidade de corte $\hat{v}_o$.

10.2.1.2 - Vários avanços em cada estágio

Neste caso, a equação (10.15), relativa à i ésimas ferramenta, que atua no j ésimos estágio, de modo análogo ao feito no § 10.8, pode ser posta na forma

$$d_{eoi,j} = \frac{1000}{\pi} \cdot \hat{v}_{oj} \cdot \frac{\bar{a}_{bi,j}}{\ell_{abi,j}} \cdot \sum_{p=1}^p t_{cpi,j} \quad (10.18)$$

onde:

$d_{eoi,j}$ = diâmetro-equivalente da i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio;

$\hat{v}_{oj}$ = velocidade de corte (mantida constante) no j ésimos estágio.

p = número de perfis componentes do perfil total usinado.

$\bar{a}_{bi,j}$ = avanço básico por volta do eixo-árvore, na usinagem do perfil de ordem p , da i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio, dado pela equação (5.6).

$\ell_{abi,j}$ = percurso básico de avanço do carro, na usinagem do perfil de ordem p , dado pela equação (5.7).

$t_{cpi,j}$ = tempo de corte, na usinagem do perfil de ordem p .

De acordo com a equação (7.23) o tempo de corte $t_{cpi,j}$, na usinagem de cada p ésimos perfil usinado, é dado por

$$t_{cpi,j} = \frac{2\pi \cdot \ell_{api,j} \cdot \bar{v}_{epi,j}}{1000 \cdot \bar{a}_{pi,j} \cdot \hat{v}_{oj}} \quad (10.19)$$

onde:

$\ell_{api,j}^-$ = percurso de avanço do carro, na usinagem do perfil de ordem p, relativo à i-ésima ferramenta, no j-ésimo estágio.

$\bar{a}_{pi,j}$ = avanço do carro, correspondente à i-ésima ferramenta, j-ésimo estágio e perfil de ordem p.

$\bar{y}_{epi,j}$ = ordenada-equivalente relativa ao p-ésimo perfil usinado, i-ésima ferramenta e j-ésimo estágio, dada por (ver § 7.2.2.2):

$$\bar{y}_{epi,j} = \frac{1}{\varphi_{tp}} \cdot \left[y_{mp} + (\varphi_{tp-1}) \frac{d_p - d_{p-1}}{4} \right]$$

onde φ_{tp} e y_{mp} podem ser calculados pelas equações (3.10) e (7.20), respectivamente.

Substituindo-se o valor de $t_{cpi,j}$ dado pela equação (10.19) na equação (10.18), resulta

$$d_{eoi,j} = \frac{\bar{a}_{bi,j}}{\ell_{abi,j}^-} \cdot \sum_{p=1}^P \frac{\ell_{api,j}^- \cdot 2 \bar{y}_{epi,j}}{\bar{a}_{pi,j}} \quad (10.20)$$

que é a equação geral para o cálculo do diâmetro equivalente, quando a velocidade de corte é mantida constante e são utilizados vários avanços no decorrer da operação de corte.

Se o ângulo de inclinação do Copiador assume o valor $\delta = 90^\circ$, ou então, o ângulo total de rampa é nulo ($\alpha_t = 0^\circ$), resulta $\varphi_t = 1$ e portanto tem-se a equação particular:

$$d_{eo} = 2 \cdot y_m = 2 \cdot \frac{A}{\ell_a} \quad (10.11)$$

Para as aplicações de maior interesse prático foram deduzidas as equações apresentadas na tabela X.1.

10.2.2 - As ferramentas atuam simultaneamente

Nestes casos, só é possível manter-se constante a velocidade de corte da ferramenta-base. Como demonstrado no parágrafo 11.3.2, o diâmetro-equivalente, de um grupo de ferramentas que apresentem uma mesma Equação de Taylor Equivalente, é dado por

$$d_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^m d_{ei} \cdot l_{ai}}{l_{ab}} \right]$$

onde:

- d_e = diâmetro-equivalente do grupo de m ferramentas.
- d_{ei} = diâmetro-equivalente de cada i ésimas ferramenta.
- l_{ai} = percurso de avanço do carro em mesa móvel de cada ferramenta.
- l_{ab} = percurso básico de avanço do carro.

11 - VELOCIDADE DE CORTE EQUIVALENTE

O estudo da velocidade de corte equivalente, será feito para as operações gerais de usinagem, realizadas a rotação constante do eixo-árvore de velocidade de corte constante, em cada i ésimo estágio que a ferramenta atua. O método é particularmente aplicável às operações de corte onde uma mesma ferramenta executa vários ^{passes} consecutivos, por exemplo, de desbaste e de acabamento. A precisão do método aqui proposto está ligada à determinação experimental do expoente x , a partir da equação de Taylor Equivalente (ver cap. IX).

11.1 - Caso geral

Quando uma ferramenta trabalha em várias sub-operações de corte, em diferentes estágios de usinagem (§ 2.6), como mostra a figura 11.1, do conceito de velocidade de corte equivalente, estendido agora para vários N passes consecutivos, resulta:

$$v_{eq} = \frac{1}{t_{eq}} \sum_{j=\beta}^N \frac{x_i}{v_{ci,j}} = t_{ci,j} \quad (11.1)$$

onde:

v_{eq} = velocidade de corte equivalente da i ésima ferramenta, ao atuar em vários estágios.

$v_{ci,j}$ = velocidade de corte equivalente da i ésima ferramenta, no j ésimo estágio.

$t_{ci,j}$ = tempo de corte da i ésima ferramenta, relativo à sub-operação de corte executada no j ésimo estágio.

β = número do ordinal dos estágios em que a i ésima ferramenta atua.

$\sum_{j=\beta}^N$ = somatório, aplicado apenas aos j ésimos estágios em que a i ésima ferramenta executa sub-operações de corte.

n_j = expoente da Equação de Taylor Equivalente (equação 2.7), da j ésima ferramenta.

t_{ci} = tempo total de corte da i ésima ferramenta, relativo a todos os j ésimos estágios em que ela atua, dado por:

$$t_{ci} = \sum_{j=1}^N t_{ci,j} \quad (11.2)$$

Nos parágrafos seguintes serão formuladas as equações gerais que definem a velocidade de corte equivalente, para as condições:

- rotação constante do eixo-árvore em cada estágio.
- velocidade de corte mantida constante em cada estágio.

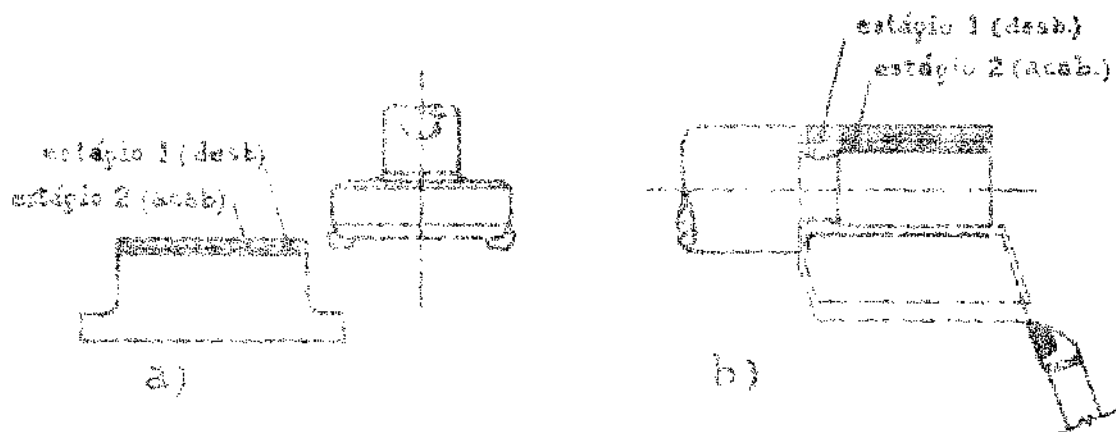


Fig. 11.3 - Operações de desbaste (1ª sub-operação de corte) e de acabamento (2ª sub-operação de corte) executadas por uma mesma ferramenta, em diferentes condições de usinagem (rotação e avanço por volta do eixo-árvore): a) fresamento frontal; b) torneamento curvilíneo.

11.2 - Rotação constante do eixo-árvore

11.2.1 - As ferramentas atuam isoladamente

11.2.1.1 - Equação Geral

Se a rotação do eixo-árvore é mantida constante em cada j -

Assim estágio de usinagem, as que são executadas as suboperações - de corte da i-ésima ferramenta, segue que

$$v_{ei,j} = \frac{v_{ei,j} \cdot 1000}{1000} \quad (11.3)$$

$$t_{ei,j} = \frac{t_{ei,j}}{a_{ei,j}} \quad (11.4)$$

$$t_{ei} = \sum_{j=1}^N \frac{t_{ei,j}}{a_{ei,j} \cdot n_j} \quad (11.5)$$

onde:

$d_{ei,j}$ = diâmetro equivalente da i-ésima ferramenta, no j-ésimo estágio.

$k_{v_{ei,j}}$ = percurso básico de avanço do carro, correspondente ao j-ésimo estágio e i-ésima ferramenta (ver § 7.2.2.1).

$a_{ei,j}$ = avanço básico do carro por volta de eixo-árvore, no j-ésimo estágio (ver § 7.2.2.1), para a i-ésima ferramenta.

n_j = rotação do eixo-árvore no j-ésimo estágio.

Substituindo-se os valores de $v_{ei,j}$, $t_{ei,j}$ e t_{ei} na equação (11.1), resulta:

$$v_{ei} = \frac{1000}{1000} \left[\frac{\sum_{j=1}^N \frac{d_{ei,j} \cdot a_{ei,j}}{k_{v_{ei,j}}} \cdot \frac{1}{a_{ei,j}}}{\sum_{j=1}^N \frac{t_{ei,j}}{a_{ei,j} \cdot n_j}} \right] \cdot \frac{1}{x_i} \quad (11.6)$$

que é a equação geral para o cálculo da velocidade de corte equivalente, quando a rotação do eixo-árvore é constante em cada j-ésimo estágio de usinagem.

11.2.1.2 - Equações particulares

a) no início de cada estação

Se em cada estação o veículo principal em cada estação é utilizado no início avanço, resulta $\bar{a}_{0i,j} = \bar{a}_{0i,j}$ e $\bar{a}_{0i,j} = \bar{a}_j$. Considerando - se estes valores na equação geral (11.6), segue que

$$v_{0i} = \frac{v \cdot n}{1000} \cdot \left[\begin{array}{c|c} \sum_{j=1}^n \frac{1}{x_j} \cdot \bar{a}_{0i,j} \cdot x_j^{-1} & \frac{\bar{a}_{0i,j}}{\bar{a}_j} \\ \hline \sum_{j=1}^n \frac{\bar{a}_{0i,j}}{\bar{a}_j} \cdot x_j \cdot n_j \end{array} \right] \quad (11.7)$$

b) no início de cada estação

Como neste caso $v_{0i} = v_{0i}$ e $\bar{a}_{0i,j} = \bar{a}_j$, da equação (11.7) - resulta

$$v_{0i} = \frac{v \cdot \bar{a}_{0i,j} \cdot n}{1000} \cdot \left[\begin{array}{c|c} \sum_{j=1}^n \frac{1}{x_j} \cdot \bar{a}_{0i,j} \cdot x_j^{-1} & \frac{\bar{a}_{0i,j}}{\bar{a}_j} \\ \hline \sum_{j=1}^n \frac{\bar{a}_{0i,j}}{\bar{a}_j} \cdot x_j \cdot n_j \end{array} \right] \quad (11.8)$$

c) no início de cada estação

Se a rede e o avanço de cada veículo são mantidos

em todas as estações, por que a mesma ferramenta ex - ce utilizada em todas as estações, resulta $\bar{a} = \bar{a}_j$ e $\bar{a}_j$, e portanto:

$$v_{0i} = \frac{v \cdot n}{1000} \cdot \left[\begin{array}{c|c} \sum_{j=1}^n \frac{1}{x_j} \cdot \bar{a}_{0i,j} \cdot x_j^{-1} & \frac{1}{x_j} \\ \hline \sum_{j=1}^n \bar{a}_{0i,j} \cdot x_j \cdot n_j \end{array} \right] = \frac{v \cdot \bar{a}_{0i,j} \cdot n}{1000} \quad (11.9)$$

$$v_{ci} = \frac{1}{1000} \left[\frac{C_1}{d_{ci}} \left(\frac{C_2}{d_{ci}} \right)^{n_1} \left(\frac{C_3}{d_{ci}} \right)^{n_2} \right] \quad (11.10)$$

onde d_{ci} = diâmetro equivalente da i -ésima ferramenta.

Além disso, se os diâmetros usinados são constantes ($d_e = d$), como mostra a figura 11.2, a velocidade de corte equivalente será dada por:

$$v_{ce} = \frac{1}{1000} \left[\frac{C_1}{d} \left(\frac{C_2}{d} \right)^{n_1} \left(\frac{C_3}{d} \right)^{n_2} \right] \quad (11.11)$$

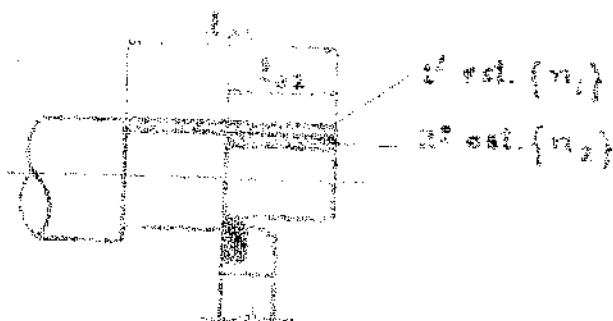


Fig. 11.2 - Torneamento cilíndrico, no qual a ferramenta trabalha em dois estágios.

d) um único estágio

Quando a i -ésima ferramenta atua em um único estágio, como mostra a figura 11.1, a equação geral (11.6) simplifica-se para

$$v_{ci} = \frac{1}{1000} \left[\frac{C_1}{d_{ci}} \right] \quad (11.12)$$

onde o diâmetro equivalente d_{ci} pode ser determinado com as equações

processos de variação.

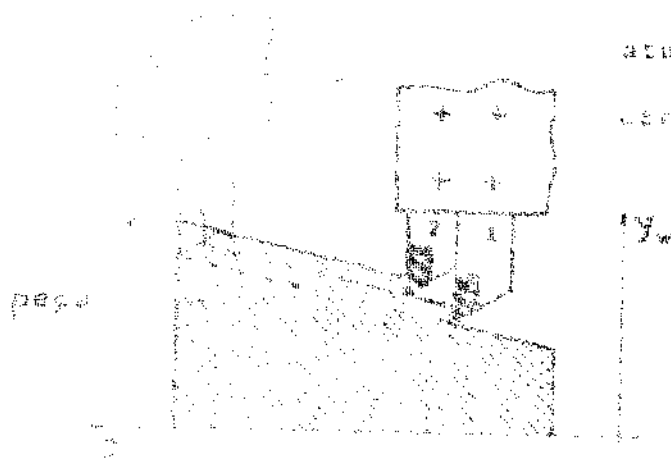


Fig. 11.3 - Cópiagem longitudinal - de um cone, na qual duas ferramentas atuam simultaneamente, em um único avanço.

Admitindo-se duas ferramentas, como se mostra na figura 11.3, e considerando a operação de faceamento com rotação e avanço simultâneos, de acordo com a tabela 2.1, segue que

$$v_c = \frac{v_r \cdot n}{1000} \cdot \left[\frac{(x+1) - d_1^{s+1}}{(x+1) \cdot (d_2 - d_1)} \right]^{\frac{1}{s}}$$

ou seja,

$$v_c = \frac{v_r \cdot n}{1000} \cdot \left[\frac{(x+1) - d_1^{s+1}}{(x+1) \cdot (d_2 - d_1)} \right]^{\frac{1}{s}} = \frac{v_r \cdot d_1 \cdot n}{1000} \cdot B \quad (11.13)$$

deduzido por Freitas, e [56], a partir do estudo da particular operação de faceamento, que apresenta uma tabela prática para cálculo do coeficiente B.

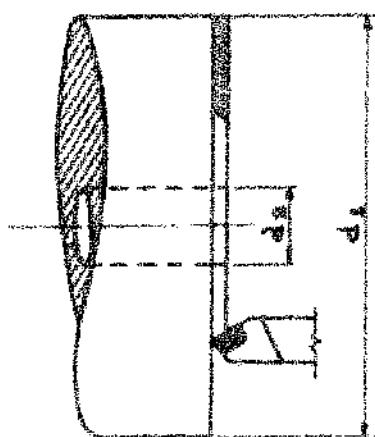


fig. 11.4 - Faceamento de uma peça, com avanço e rotação constantes.

11.2.2 - As ferramentas atuam simultaneamente

Quando um grupo de ferramentas que apresentam uma mesma Equação de Taylor Equivalente (equação 9.7), atuam no j ésimο estágio com um único avanço *) e rotação constante do eixo-árvore, como mostrado nas figuras 7.5 e 11.3, da definição de ferramenta-equivalente (§ 8.5), tem-se:

$$v_{ej}^{x_j} = \frac{1}{t_{cj}} \cdot \sum_{i=\alpha}^m v_{ei,j}^{x_j} \cdot t_{ci,j} \quad (11.14)$$

onde:

v_{ej} = velocidade de corte equivalente, correspondente à operação de corte equivalente das i ésimas ferramentas que atuam no j ésimο estágio;

α = número de ordem das ferramentas que atuam no j ésimο estágio;

m = número total de ferramentas que atuam em todos os estágios;

x_j = expoente da Equação de Taylor Equivalente (equação 9.7), correspondente a todas as ferramentas que atuam no j ésimο estágio;

$\sum_{i=\alpha}^m$ = somatório, aplicado apenas às i ésimas ferramentas que atuam no j ésimο estágio.

*) as operações com vários avanços, em um mesmo estágio, não apresentam significado prático.

Substituindo-se os valores de t_{ej} , $v_{ei,j}$ e $t_{ei,j}$, dados respectivamente pelas equações (7.34), (11.3) e (11.4), na equação (11.4), resulta:

$$v_{ej} = \frac{\pi \cdot n_j}{1000} \left[\frac{\sum_{i=1}^n d_{ei,j} \cdot \ell_{ai,j}^{-1}}{\ell_{ab,j}^{-1}} \right] \frac{1}{x_j} = \frac{\pi \cdot n_j \cdot d_{ej}}{1000} \quad (11.15)$$

onde ℓ_{aj}^{-1} é o percurso total de avanço do carro ou mesa móvel, no j ésimo estágio. A parte entre parêntesis da equação (11.15) representa o diâmetro-equivalente do j ésimo estágio, ou seja,

$$d_{ej} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n d_{ei,j} \cdot \ell_{ai,j}^{-1}}{\ell_{ab,j}^{-1}} \right] \frac{1}{x_j} \quad (11.16)$$

11.3 - Velocidade de corte constante

11.3.1 - As ferramentas atuam isoladamente

11.3.1.1 - Equação Geral

Se a velocidade de corte da i ésima ferramenta é mantida constante em cada j ésimo estágio, resulta $v_{ei,j} = \bar{v}_{i,j}$. De acordo com o exposto no § 7.2.2.2, tem-se:

$$t_{ei,j} = \frac{\ell_{abi,j}^{-1}}{\bar{a}_{bi,j} \cdot n_{ej}} = \frac{\pi \cdot d_{ei,j} \cdot \ell_{abi,j}^{-1}}{1000 \cdot \bar{a}_{bi,j} \cdot \bar{v}_{i,j}} \quad (11.17)$$

$$t_{ei} = \frac{\pi}{1000} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{d_{ei,j} \cdot \ell_{abi,j}^{-1}}{\bar{a}_{bi,j} \cdot \bar{v}_{i,j}} \quad (11.18)$$

Substituindo-se estes valores na equação geral (11.1), resulta:

$$v_{ei} = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \frac{d_{ei,j} \cdot \ell_{abi,j}^{-1} \cdot \bar{v}_{i,j}^{x_i-1}}{\bar{a}_{bi,j}}}{\sum_{j=1}^n \frac{d_{ei,j} \cdot \ell_{abi,j}^{-1}}{\bar{a}_{bi,j} \cdot \bar{v}_{i,j}}} \right] \frac{1}{x_i} \quad (11.19)$$

que é a equação geral para o cálculo da velocidade de corte equivalente, quando uma mesma ferramenta atua em vários estágios, nos quais a velocidade de corte é mantida constante. No caso de um único avanço em cada estágio, tem-se que $\bar{a}_{bi,j} = \bar{a}_{si,j}$ e $\bar{a}_{bi,j} = \bar{a}_j$.

11.3.1.2 - Equações particulares

a) mesmo avanço em todos os estágios

sendo $\bar{a}_j$ constante em todos os estágios em que a i -ésima ferramenta atua, da equação (11.19) resulta:

$$v_{ei} = \left[\frac{\sum_{j=2}^N d_{ei,j} \cdot \bar{a}_{si,j} \cdot \bar{v}_{i,j}^{x_i-1}}{\sum_{j=2}^N d_{ei,j} \cdot \frac{\bar{a}_{si,j}}{\bar{v}_{i,j}}} \right]^{\frac{1}{x_i}} \quad (11.20)$$

b) mesma velocidade de corte e avanço em todos os estágios

Da equação (11.20), para $\bar{v}_{i,j} = \bar{v}_i$ constante em todos os estágios, segue que $v_{ei} = \bar{v}_i$, ou seja, a velocidade de corte equivalente é a própria velocidade de corte, como era de se esperar.

11.3.2 - As ferramentas atuam simultaneamente

Quando várias ferramentas atuam simultaneamente, como mostrado na figura 7.5, só é possível manter-se constante a velocidade de corte da ferramenta-base. Para as demais ferramentas, em cada instante de tempo, tem-se uma velocidade de corte em cada estágio dada por

$$v_{i,j} = \left(\frac{d_{i,j}}{d_{b,j}} \right) \cdot \bar{v}_{b,j}$$

onde $d_{i,j}$ e $d_{b,j}$ são os diâmetros usinados pela i -ésima ferramenta e pela ferramenta-base no j -ésimo estágio. Chamando-se Δy_i a diferença de diâmetros, como mostrado na figura 7.5, segue que:

$$v_{ei,j} = \left(1 + \frac{2\Delta y_i}{d_{b,j}}\right) \cdot \bar{v}_{b,j}$$

Como o diâmetro $d_{b,j}$ é variável ao longo do perfil-base, conclui-se que $v_{ei,j}$ também é variável, pois Δy_i é constante. Esta in determinação pode ser facilmente eliminada, substituindo-se $d_{b,j}$ pe-
lo diâmetro-equivalente $d_{eb,j}$ da ferramenta-base no j ésimο estágio,
ou seja

$$v_{ei,j} = \left(1 + \frac{2\Delta y_i}{d_{eb,j}}\right) \cdot \bar{v}_{b,j} = c_i \cdot \bar{v}_{b,j} \quad (11.21)$$

com

$$c_i = 1 + \frac{2\Delta y_i}{d_{eb,j}} \quad (11.22)$$

onde:

c_i = constante, dada pela diferença de diâmetros (ver figu-
ra 7.5);

$v_{ei,j}$ = velocidade de corte equivalente do i ésimο ferramenta
(ver § 8.4) no j ésimο estágio (constante pois sua prô
pria definição), dada por:

$$v_{ei,j} = \frac{\pi \cdot d_{ei,j} \cdot n_{ei}}{1000} \quad (11.23)$$

Por outro lado, do conceito de ferramenta-equivalente, pa-
ra cada j ésimο estágio em que as ferramentas envolvidas apresentam
uma mesma Equação de Taylor Equivalente, segue que

$$\frac{x_j}{v_{ej}} = \frac{1}{T_{ej}} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{v_{ei,j}} \cdot c_{ei,j}$$

Substituindo-se os valores de T_{ei} e $T_{ei,j}$ dados pela equa-
ção (7.41), e $v_{ei,j}$ dado pela equação (11.23), resulta para um único
avanço em cada estágio, que

$$v_{ej} = \frac{\pi \cdot n_{ej}}{1000} \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^m d_{ei,j} \cdot T_{ei,j}^{1/2}}{T_{eb,j}^{1/2}} \right]^{1/2} = \frac{\pi \cdot n_{ej} \cdot c_{ej}}{1000} \cdot \frac{d_{ej}}{d_{eb,j}} = \bar{v}_{bj} \cdot c_{ej} \quad (11.24)$$

com

$$d_{ej} = \left[\frac{\sum_{i=a}^n d_{ei,j} \cdot c_{ai,j}}{c_{ab,j}} \right]^{\frac{1}{z_j}} \quad (11.25)$$

onde:

d_{ej} = diâmetro-equivalente do j-ésimo estágio;

$d_{eb,j}$ = diâmetro-equivalente da ferramenta-base no j-ésimo estágio;

c_{ej} = diferença-equivalente dos diâmetros usinados no j-ésimo estágio, dada por:

$$c_{ej} = \frac{d_{ei}}{d_{eb,j}} \quad (11.26)$$

TEMPO DE REPOSIÇÃO

12.1 - Generalidades

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. Para cada ferramenta, o tempo de reposição está diretamente ligado ao número de peças usinadas por vida (2_T), pois este define a frequência das paradas da máquina para a troca e ajuste da ferramenta.

O conhecimento da variação do tempo de reposição em função da rotação do eixo árvore (ou da velocidade de corte) é de fundamental importância no balanceamento dos tempos envolvidos nas operações de usinagem, para a obtenção das condições econômicas (máxima produção e mínimo custo).

Em geral, o tempo de troca e ajuste envolve as seguintes fases:

- a) posicionamento dos comandos (manual ou automático) para a parada da máquina, do fluxo do fluido de corte, etc..
- b) desfixação da ferramenta e sua retirada do suporte. No caso de insertos de fixação mecânica, corresponde à troca, giro ou reversão (uso da outra face) do inserto.
- c) afiação da ferramenta. Esta fase normalmente deve ser evitada, deixando-se sempre de espera uma ferramenta já afiada.
- d) fixação da ferramenta já afiada no seu suporte, ou do inserto (ou insertos) no seu encaixe.
- e) ajuste das dimensões usinadas na peça, por meio da regulação de fim de curso (stop) ou, se necessário, por meio

de uma fixação da ferramenta. Em algumas operações de usinagem não é necessário o ajuste das ferramentas, tais como as que empregam inserções de fixação mecânica (qualidade normal) ou de pressão ou suportes de troca rápida com precisão de posicionamento.

f) colocação de máquina novamente na região normal de usinagem.

Geralmente, o procedimento de troca das ferramentas pode ser esquadrado num dos seguintes tipos:

- a) as ferramentas são trocadas individualmente, na ordem natural de sua ocorrência, quando elas não mais satisfazem as condições exigidas, como mostra a figura 12.1.a. Cada ferramenta apresenta uma certa quantidade média de peças usinadas por lote, com um correspondente desvio-padrão.
- b) todas as ferramentas são trocadas em um só grupo, após a usinagem de um pré-determinado quantidade de peças (lote-padrão), sem considerar a ocorrência de trocas imprevistas (utilização prematura) de ferramentas no lote anterior. Este caso é mostrado na figura 12.1.b.
- c) as ferramentas são trocadas em grupos adicionados, - após a usinagem de um lote-padrão de peças, de tal modo que as ferramentas que atingiram uma troca devido a utilização prematura serão novamente trocadas para a usinagem do lote-padrão seguinte. Como mostra a figura 12.1.c, uma dada ferramenta poderá pertencer a um ou mais grupos.

12.2 - Determinação do tempo de troca

Quando as ferramentas são trocadas *individualmente* (caso a), o tempo de troca e ajuste (tempo-padrão) pode ser obtido diretamente, por meio de um dos métodos fornecidos no § 2.7.2.

Para a troca prevista das ferramentas em um *só grupo* (caso b), tem-se

$$t_{ft_i} = \bar{G}_i \cdot \frac{t_{ft}}{m} \quad (12.1)$$

onde

t_{ft} = tempo total de troca e ajuste;

t_{ft_i} = tempo de troca e ajuste, correspondente a cada i ésim^a ferramenta do grupo;

m = número total de ferramenta do grupo;

$\bar{G}_i$ = coeficiente de inutilização prematura da i ésim^a ferramenta. Pode ser calculado por meio das equações propostas por Brewer [18] e Ferraresi [56].

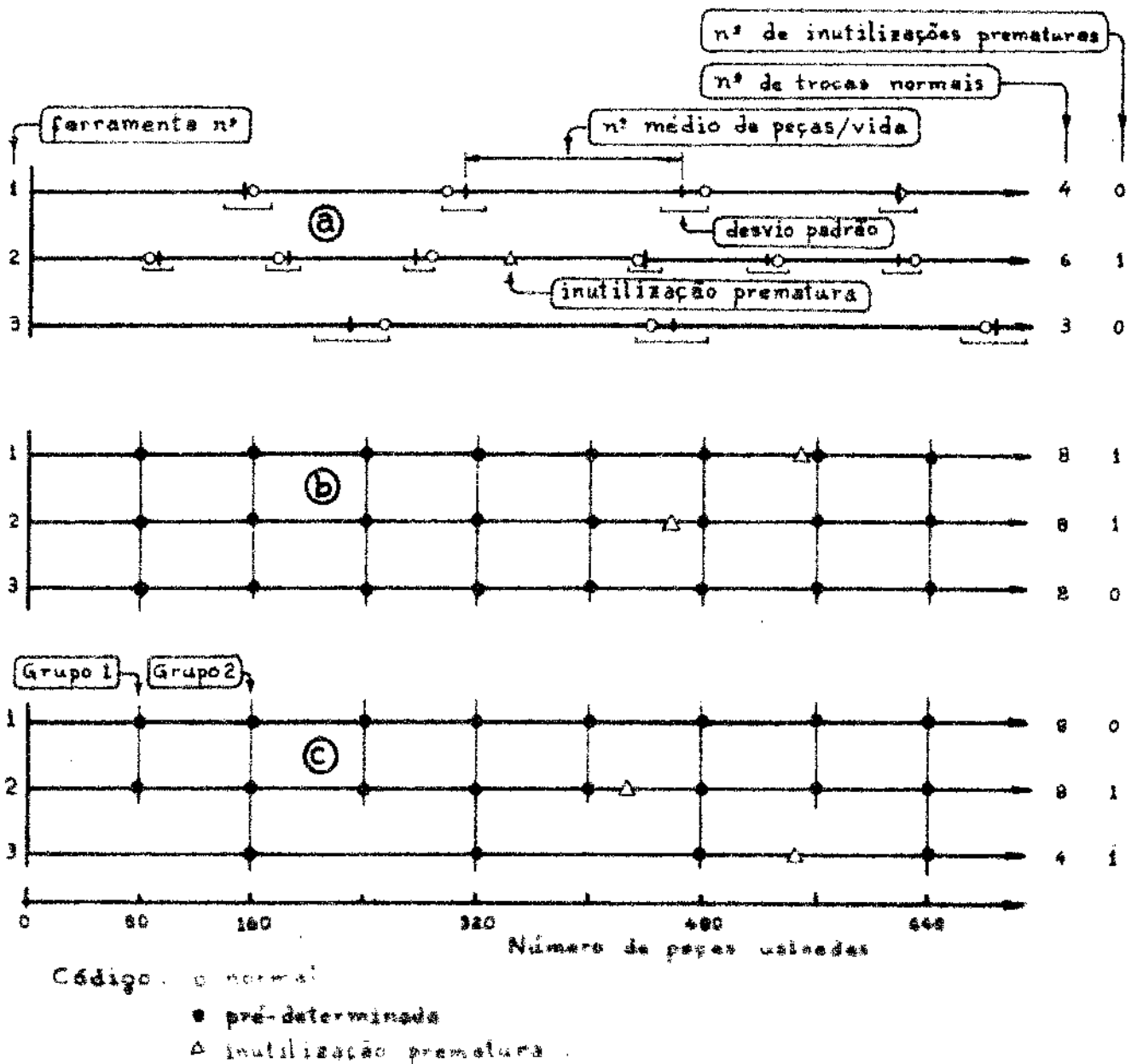


Fig. 12.1 - Procedimentos normais de troca das ferramentas: a) individual ; b) um só grupo; c) grupos seleccionados.

Trocando-se as ferramentas em grupos seleccionados (caso c), tem-se

$$t_{ft,i} = \sigma_i \cdot \sum_{g=1}^G S_{i,g} \cdot t_{ft,g} \quad (12.2)$$

onde:

$t_{ft,i}$ = tempo de troca de cada ferramenta, pertencente a um ou mais grupos de troca;

$t_{ft,g}$ = tempo de troca em conjunto, de todas as ferramentas do g ésimo grupo.

$S_{i,g}$ = coeficiente de participação de cada i ésim^a ferramenta, no tempo de troca do g ésim^o grupo ($t_{ft,g}$). Estes coeficientes podem ser dados em porcentagens de $t_{ft,g}$.

σ_i = coeficiente de inutilização prematura da ferramenta [18 e 56]

G = número total de grupos de ferramentas trocadas em conjunto.

12.3 - Determinação do tempo total de reposição

O estudo a seguir desenvolvido, aplica-se a qualquer tipo de operação de usinagem (torneamento, mandrilamento, furação, alargamento, roscamento, fresamento, serramento, brochamento, corte de engrenagens, etc.), com excessão das operações de usinagem com ferramentas abrasivas.

Admitindo-se que a máquina-ferramenta é inicialmente preparada com m ferramentas já afiadas, segue que

$$Z = (Q_{ri} + 1) \cdot Z_{Ti}$$

ou seja,

$$Q_{ri} = \frac{Z}{Z_{Ti}} - 1$$

onde:

Z = número total de peças do lote, para cada preparação da máquina;

Q_{ri} = número total de trocas da i ésim^a ferramenta, na usinagem de um lote com Z peças;

Z_{Ti} = número médio de peças usinadas por cada vida da i ésim^a ferramenta. Nas operações de desbaste, onde a ferramenta é trocada antes do término da operação de corte, Z_{Ti} não é um número inteiro. Na usinagem de grandes pe

ças, onde são consumidas mais do que uma ferramenta por peça usinada, tem-se $Z_{Ti} < 1$.

Se as trocas são realizadas na ordem natural de sua ocorrência (*individual* ou em *grupos*), numa operação de usinagem que envolve m ferramentas, tem-se que

$$t_{tr} = \sum_{i=1}^m t_{ri} = \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^m Q_{ri} \cdot t_{fti}$$

onde:

t_{tr} = tempo total de reposição, por peça, relativo a todas as ferramentas envolvidas na operação;

t_{fti} = tempo de troca para a i ésimas ferramenta (ver § 12.2)

Substituindo-se o valor de Q_{ri} na equação acima, resulta

$$t_{tr} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{Z_{Ti}} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_{fti} \quad (12.3)$$

que é a equação geral para o cálculo do tempo total de reposição, por peça, para a troca individual das ferramentas.

Quando as ferramentas são trocadas em um só grupo (caso b do § 12.2), apenas uma das ferramentas define o intervalo de troca (lote-padrão), podendo ser considerada como ferramenta-padrão da operação (ver § 7.4). Neste caso, as $(m-1)$ ferramentas restantes apresentarão um mesmo número de peças usinadas por vida, e portanto, a equação (12.3) pode ser posta na forma

$$t_{tr} = \left(\frac{1}{Z_{T*}} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_{ft} \quad (12.4)$$

onde:

t_{ft} = tempo de troca das m ferramentas em um só grupo, em cujo valor já estão incluídas as correções devidas à inutilização prematura das ferramentas;

Z_{T*} = número de peças usinadas por vida pela ferramenta-padrão.

Se as trocas são realizadas em grupos seleccionados, segue que

$$t_{tr} = \sum_{g=1}^G \left(\frac{1}{Z_{T^*,g}} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_{ft,g} \quad (12.5)$$

onde:

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

$t_{ft,g}$ = tempo de troca do conjunto de ferramentas que constituem o lote-padrão.

Conclui-se das equações (12.4) e (12.5), que a troca das ferramentas em grupos pode ser analisada como casos particulares da equação (12.3), relativa a trocas individuais das ferramentas.

Devido ao seu carater básico, neste trabalho será estudado apenas a troca individual das ferramentas. Para a troca em grupos, sugere-se consultar os trabalhos de Okushima e Fujii [38], baseados em simulação de trocas, utilizando o método de Monte Carlo.

12.4 - Tempo total de reposição para trocas individuais das ferramentas

12.4.1 - Caso geral

Neste caso, admite-se que todas as ferramentas são trocadas na sua ordem natural, quando não mais satisfazem as condições de usinagem exigidas.

Considerando-se a equação (8.6) e a Equação de Taylor Equivalente (equação 9.7), referida à i ésima ferramenta, na equação geral (12.3), resulta:

$$t_{tr} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{t_{ci} \cdot v_{ei}^{x_i}}{q \cdot K_{ei}} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_{fti} \quad (12.4)$$

onde:

t_{tr} = tempo total de reposição, por peça, para as m ferramentas envolvidas na operação de usinagem;

q = número de peças executadas por operação de usinagem.

Substituindo-se o valor da velocidade de corte equivalente da i ésimas ferramenta (v_{ei}), dado pela equação geral (11.1), o tempo total de reposição, por peça, será dado por:

$$t_{tr} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=\beta}^N v_{ei,j}^{x_i} \cdot t_{ci,j} \right] \cdot \frac{t_{fti}}{K_{ei}} - \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^m t_{fti} \quad (12.5)$$

onde:

$v_{ei,j}$ = velocidade de corte equivalente da i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio;

$t_{ci,j}$ = tempo de corte da i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio;

β = número de ordem dos estágios onde atua a i ésimas ferramenta;

N = número de estágios (ver § 2.6);

$\sum_{j=\beta}^N$ = somatório relativo aos j ésimos estágios em que atua a i ésimas ferramenta.

Como é de interesse o conhecimento do tempo de reposição relativo a cada estágio, pode-se colocar a equação (12.5) na forma;

$$t_{tr} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=\alpha}^m \frac{v_{ei,j}^{x_i}}{K_{ei}} \cdot t_{ci,j} \cdot t_{fti} \right] - \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^m t_{fti} \quad (12.6)$$

ou seja,

$$t_{tr} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^N t_{rj} - \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^m t_{fti}$$

onde:

α = número de ordem das i ésimas ferramentas que atuam no j ésimos estágio.

$\sum_{i=\alpha}^m j$ = somatório relativo às i ésimas ferramentas que atuam no j éximo estágio.

t_{rj} = tempo de reposição em cada estágio, para todas as ferramentas que nele atuam.

A equação (12.6) é a equação geral para o cálculo do tempo total de reposição, por peça, quando as ferramentas são trocadas individualmente, na sua ordem natural de ocorrência.

Serão deduzidas a seguir, as equações que definem o tempo total de reposição, nas operações gerais de usinagem que constituem as aplicações práticas mais significativas da equação geral (12.6). O estudo será dividido em dois tipos básicos de operações de corte:

- a) a rotação do eixo-árvore é constante em cada estágio, nos quais são executadas as operações de usinagem.
- b) a velocidade de corte é mantida constante em cada sub-
-operação de usinagem.

12.4.2 - Rotação constante do eixo-árvore

12.4.2.1 - Equação geral

Quando as rotações do eixo-árvore são mantidas constantes em cada j éximo estágio, das equações gerais (11.3), (11.4) e (12.6) segue que

$$t_{tr} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=\alpha}^m \left(\frac{\pi \cdot d_{ei,j}}{1000} \right)^{x_i} \cdot \frac{n_j^{x_i-1} \cdot \bar{a}_{bi,j}}{K_{ei} \cdot \bar{a}_{bj}} \cdot t_{fti} \right] - \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^m t_{fti} \quad (12.7)$$

ou então,

$$t_{tr} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N t_{rj} - \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^m t_{fti} \quad (12.8)$$

com

$$t_{rj} = \left[\sum_{i=\alpha}^m \frac{\bar{a}_{i,j} \cdot n_j^{x_i-1}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{bi,j}} \right] \quad (12.9)$$

$$\gamma_{i,j} = (x_i - 1) \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{ei,j}}{1000} \right)^{x_i} \cdot \frac{\ell_{abi,j}}{K_{ei}} \cdot t_{fti} \quad (12.10)$$

onde:

$\gamma_{i,j}$ = constante, correspondente aos termos independentes da variação da rotação do eixo-árvore, no intervalo de validade do expoente x_i ;

$d_{ei,j}$ = diâmetro-equivalente relativo à i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio;

$\ell_{abi,j}$ = percurso básico de avanço do carro ou mesa móvel, relativo à i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio (ver § 7.2.2.1);

$\bar{a}_{bi,j}$ = avanço básico do carro ou mesa móvel por volta do eixo-árvore, da i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio (ver § 7.2.2.1).

Quando o número de peças do lote $\bar{Z}$ é grande ($Z \rightarrow \infty$), resulta

$$t_{tr} = \lim_{Z \rightarrow \infty} t_{tr} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^M \left[\sum_{i=\alpha}^m \frac{\gamma_{i,j} \cdot n_j^{x_i-1}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{bi,j}} \right] \quad (12.11)$$

pois a segunda parcela anula-se para $Z \rightarrow \infty$.

Analisando-se as equações (12.8), (12.9) e (12.11), verifica-se que t_{tr} varia exponencialmente. Portanto, a equação geral (12.7) terá uma representação gráfica da forma mostrada na figura 12.2, onde foi admitido que a operação é executada em três diferentes estágios.

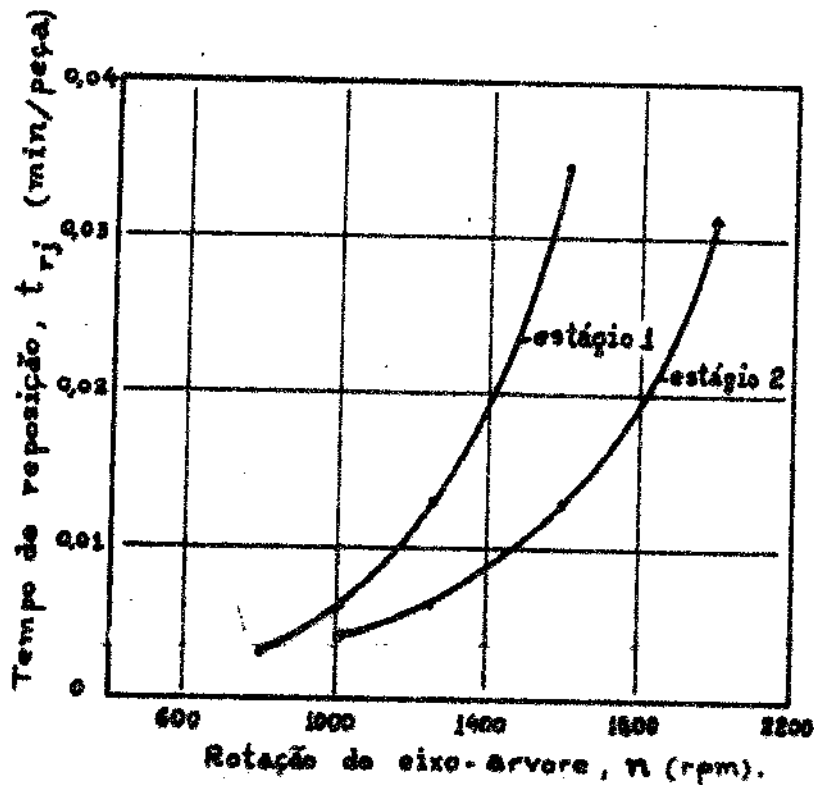


Fig. 12.2 - Variação dos tempos de reposição em função da rotação - do eixo-árvore, na usinagem de um eixo-piloto para câmbio de automóvel (ver § 19.3).

12.4.2.2 - Equações particulares

a) mesma Equação de Taylor e tempo de troca em cada estágio.

Quando todas as ferramentas que atuam no j ésimo estágio - apresentam uma mesma Equação de Taylor Equivalente, iguais tempos de troca e trabalham com um mesmo avanço ($\bar{l}_{abi,j} = \bar{l}_{ai,j}$ e $\bar{a}_{bi,j} = \bar{a}_j$), o tempo de reposição t_{rj} , será dado por

$$t_{er,j} = \frac{\gamma_{ej} \cdot n_j^{x_j-1}}{(x_j-1) \cdot \bar{a}_j} \quad (12.12)$$

com

$$\gamma_{ej} = \frac{(x_j-1) \cdot t_{ftj}}{K_{ej}} \cdot \left(\frac{\pi}{1000}\right)^{x_j} \cdot \sum_{i=\alpha}^m d_{ei,j}^{x_j} \cdot \bar{l}_{ai,j}$$

ou seja,

$$\gamma_{ej} = \frac{(x_j-1)}{K_{ej}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{ej}}{1000}\right)^{x_j} \cdot \bar{l}_{ab,j} \cdot t_{ftj} \quad (12.13)$$

onde:

$t_{ex,j}$ = tempo de reposição da ferramenta-equivalente do j é-simo estágio.

x_{ej} = constante equivalente do j é-simo estágio.

d_{ej} = diâmetro-equivalente das i é-simas ferramentas que atuam no j é-simo estágio, dado pela equação

$$d_{ej} = \left[\frac{\sum_{i=1}^m d_{ei,j}^{x_j} \cdot l_{ai,j}}{l_{ab,j}} \right]^{\frac{1}{x_j}} \quad (12.14)$$

Este caso particular geralmente ocorre nas operações onde várias ferramentas atuam simultaneamente, como mostrado nas figuras 12.3 e 12.4.

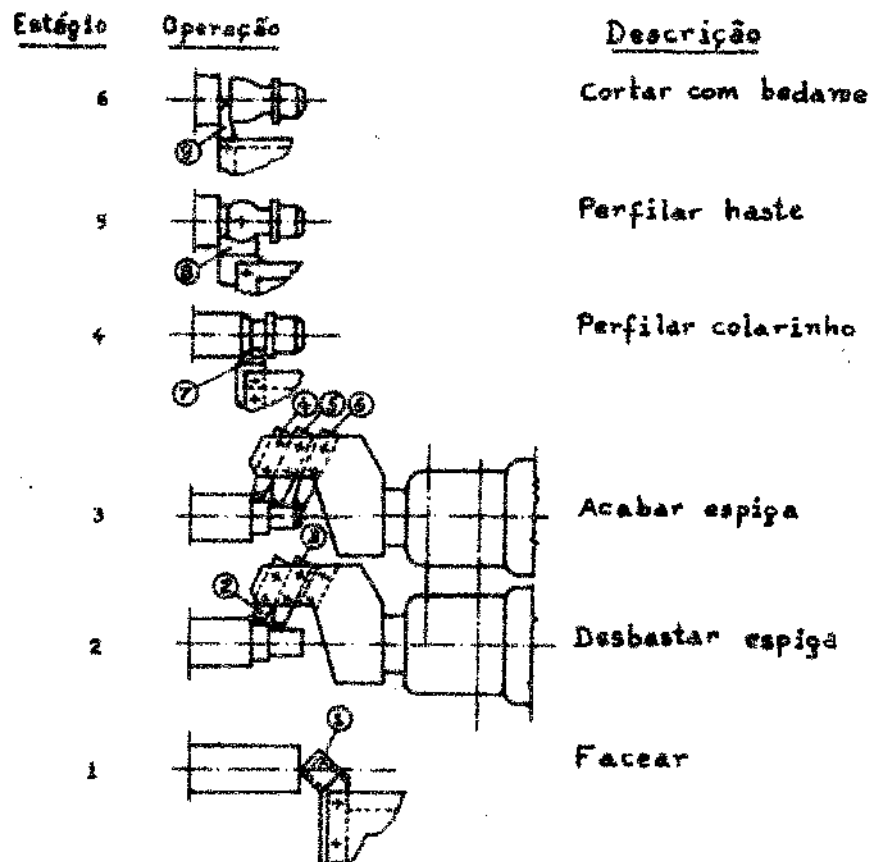


Fig. 12.3 - Usinagem de um manipulô, em torno revolver, por meio de 6 estágios e 9 ferramentas de corte; no 2º e 3º estágios as ferramentas atuam simultaneamente.

Nas operações de usinagem executadas em máquinas-ferramentas multiárvores, em que cada eixo-árvore apresenta rotação diferente, deve-se considerar cada eixo-árvore como um estágio, e portanto pode-se aplicar as equações (12.12) a (12.14).

Se a rotação do eixo-árvore é a mesma em todos os estágios, a equação geral (12.8) simplifica-se para

$$t_{tr} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\gamma_{ej} \cdot n_j^{x_j}}{(x_j-1) \cdot \bar{a}_j} - \frac{1}{Z} \cdot \sum_{i=1}^m t_{fti} \quad (12.15)$$

Particularizando-se para a operação de furação mostrada na figura 12.4, na qual o cabeçote de furar é constituído de dois eixos

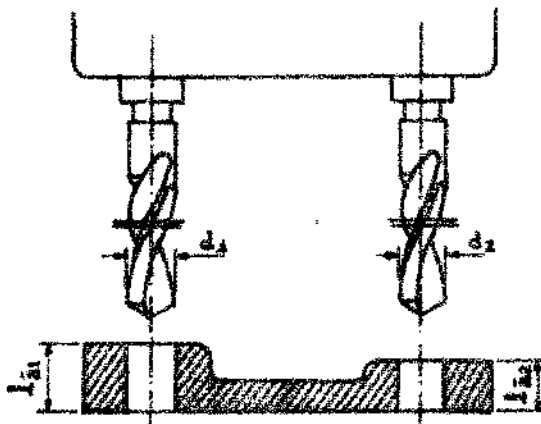


Fig. 12.4 - Execução de dois furos de uma alavanca, por meio da atuação simultânea de duas brocas helicoidais.

-árvores ($N = 2$), e executa-se apenas uma peça por operação ($q = 1$), das equações (12.13) a (12.15) resulta:

$$\gamma_{ej} = \frac{(x_j-1)}{K_{ej}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_j}{1000} \right)^{x_j} \cdot \ell_{aj} \cdot t_{ftj} \quad (12.16)$$

$$d_{ej} = d_j \quad (\text{diâmetro constante da broca}) \quad (12.17)$$

$$t_{tr} = \sum_{j=1}^2 \frac{\gamma_{ej} \cdot n_j^{x_j}}{(x_j-1) \cdot \bar{a}} - \frac{1}{Z} \sum_{j=1}^2 t_{ftj} \quad (12.18)$$

Se ambas as brocas trabalham com uma mesma rotação e, apresentam uma mesma Equação de Taylor Equivalente ($x_1=x_2, K_{e1}=K_{e2}$), e

iguais tempos de troca ($t_{ft1} = t_{ft2}$), segue que:

$$t_{tr} = \frac{\gamma_e \cdot n^x}{(x-1) \cdot \bar{a}} - \frac{2}{Z} \cdot t_{ft} \quad (12.19)$$

com

$$\gamma_e = \frac{(x-1)}{K_e} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_e}{1000} \right)^x \cdot \bar{l}_{ab} \cdot t_{ft}$$

$$d_e = d \cdot \left[\frac{\sum_{j=1}^K \bar{l}_{aj}}{\bar{l}_{ab}} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (12.20)$$

Para a particular operação mostrada na figura 12.4, onde $\bar{l}_{ab} = \bar{l}_{a1}$, tem-se

$$d_e = d \cdot \left[1 + \frac{\bar{l}_{a1}}{\bar{l}_{a2}} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (12.21)$$

b) Apenas uma ferramenta, atuando em vários estágios.

Sendo $m = 1$, a constante $\gamma_{i,j}$ dada pela equação geral (12.10) pode ser posta na forma

$$\gamma_j = (x-1) \cdot \left(\frac{d_{ej}}{1000} \right)^x \cdot \frac{\bar{l}_{aj}}{K_e} \cdot t_{ft} \quad (12.22)$$

e portanto,

$$t_{tr} = \frac{1}{q \cdot (x-1)} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\gamma_j}{\bar{a}_j} \cdot n_j^x \quad (12.23)$$

onde $\bar{l}_{ai,j} = \bar{l}_{aj}$, pois trata-se de uma única ferramenta.

Para a particular operação de torneamento mostrada na figura 12.5, na qual a ferramenta atua em duas sub-operações (desbaste e acabamento), em dois estágios, tem-se

$$\left\{ \begin{array}{l} 1^\circ \text{ estágio: } \gamma_1 = (x-1) \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{e1}}{1000} \right)^x \cdot \frac{\bar{l}_{a1}}{K_e} \cdot t_{ft} \\ 2^\circ \text{ estágio: } \gamma_2 = (x-1) \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{e2}}{1000} \right)^x \cdot \frac{\bar{l}_{a2}}{K_e} \cdot t_{ft} \end{array} \right\} \quad (12.24)$$

e portanto,

$$t_{cr} = \left[\frac{\delta_1 \cdot n_1^x}{(x-1) \cdot \bar{s}_1} + \frac{\delta_2 \cdot n_2^x}{(x-1) \cdot \bar{s}_1} \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot s_{12} \quad (12.25)$$

pois $q = 1$ (apenas uma peça usinada na operação de corte).

Quanto aos valores dos diâmetros-equivalentes, d_{e1} é o próprio diâmetro usinado (torçamento cilíndrico) e d_{e2} pode ser determinado pela tabela K.1

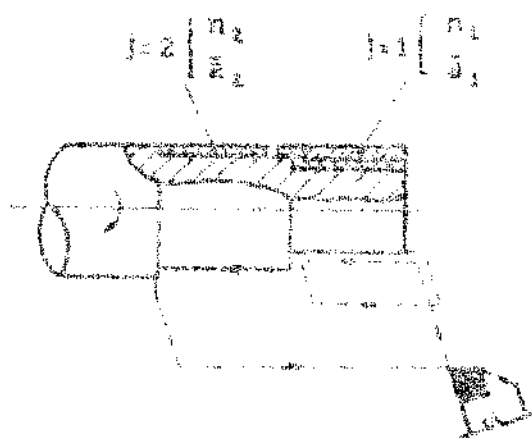


Fig. 12.5 - Torneamento curvelíneo de um eixo, no qual a ferramenta trabalha em duas sub-operações, com diferentes velocidades e avanços.

a) Apenas uma ferramenta, atuando em um único estágio.

Esta operação constitui o caso mais simples, onde $q = 1$, $m = 1$, $j = 1$, $i = 1$, e portanto, da equação geral (12.7) segue que

$$t_{cr} = \left[\frac{s \cdot d_0^x}{(1030)^x} + \frac{n \cdot l}{s_0} + \frac{s_0}{s} + \frac{s}{2} \right] \cdot \frac{11}{3} \quad (12.26)$$

Para a particular operação de fresamento mostrada na figura 12.6, onde $q = 2$, $s_0 = d =$ comprimento (diâmetro da fresa), tem-se

$$t_{cr} = \left[\frac{s \cdot d_0^x}{(1030)^x} + \frac{n \cdot x \cdot l}{s_0} + \frac{l_0}{s} + \frac{s}{2} \right] \cdot \frac{11}{3} \quad (12.27)$$

onde $t_0 = t_{s1} + t_{s2}$.

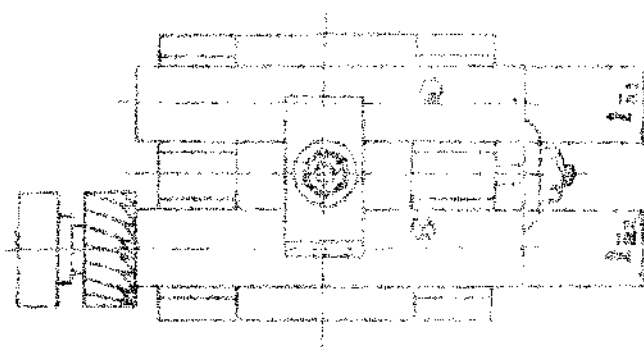


Fig. 12.5 - Trocamento de eixo de dois eixos (trocamento), - por meio de uma única fresa, - em um único eixo.

12.4.2 - Definição de corte constante

12.4.2.1 - Equação corte

Mantendo-se constante a velocidade de corte, por meio de uma conveniente variação da rotação elíptica, o tempo total de usinagem, por peça, de acordo com as equações (11.41), (11.21) e (12.6), será dado por

$$t_{tr} = \frac{\pi}{1000 \cdot v_c} \cdot \sum_{j=1}^n \left[\frac{a_j}{f_j} \cdot \frac{(c_{1,j} \cdot d_{1,j})^{\kappa_1-1}}{v_{c1,j}} \cdot \frac{(c_{2,j} \cdot d_{2,j})^{\kappa_2-1}}{v_{c2,j}} \cdot \frac{1}{n_{1,j}} \right] - \frac{1}{v_c} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{n_{1,j}} \quad (12.28)$$

ou então,

$$t_{tr} = \frac{1}{v_c} \cdot \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{c_{1,j}}{f_j} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{c_{2,j}}{f_j} \cdot \frac{1}{n_{1,j}} \right] \quad (12.29)$$

$$t_{tr} = \frac{\pi}{1000 \cdot v_c} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{a_j \cdot (c_{1,j} \cdot d_{1,j})^{\kappa_1-1} \cdot (c_{2,j} \cdot d_{2,j})^{\kappa_2-1}}{(f_j \cdot n_{1,j})^2} \quad (12.30)$$

com

$$\frac{a_j}{f_j} = \frac{(c_{1,j}-1)}{K_{c1}} \cdot c_{1,j}^{\kappa_1-1} \cdot \frac{(c_{2,j}-1)}{K_{c2}} \cdot c_{2,j}^{\kappa_2-1} \quad (12.31)$$

equivalência anteriormente fornecida, de onde conclui-se em fato no § 12.4.2.1 segue-se que:

$$t_{cr,j} = \frac{K_{aj} \cdot \bar{v}_j^{-1}}{(1000 \cdot (K_j^{-1}) \cdot \bar{v}_j)} \quad (12.33)$$

com

$$K_{aj} = \frac{(K_j - 1)}{K_{aj}} \cdot d_{aj} + t_{aj,j} + t_{tr,j} \quad (12.34)$$

$$d_{aj} = \frac{n}{l_j} \cdot \frac{c_j^{-1}}{K_{aj}} \cdot \frac{d_{aj,j} + d_{aj,j}}{K_{aj,j}} \quad (12.35)$$

onde $\bar{v}_j$ é a velocidade atendida em várias estações.

Destes como $j = 1$, a partir das equações (12.30) e (12.31) segue-se que:

$$t_{cr,1} = \frac{K_{a1}}{(1000 \cdot \bar{v}_1)} \cdot \frac{d_{a1,j}}{(K-1)} \quad (12.36)$$

$$K_{a1} = \frac{K-1}{K_{a1}} \cdot d_{a1,j} + t_{a1,j} + t_{tr,j} \quad (12.37)$$

Para a particular operação de corte, a equação (12.37) mostra-se na figura 1.7, executada por meio de duas sub-operações de corte, em dois estações, da equação (12.37) resulta:

$$\left. \begin{aligned} 1^a \text{ estação: } K_{a1} &= \frac{K-1}{K_{a1}} \cdot d_{a1,j} + t_{a1,j} + t_{tr,j} \\ 2^a \text{ estação: } K_{a1} &= \frac{K-1}{K_{a1}} \cdot d_{a1,j} + t_{a1,j} + t_{tr,j} \end{aligned} \right\} \quad (12.38)$$

e portanto,

$$t_{tr} = \frac{K}{(1000 \cdot \bar{v}_1)} \cdot \frac{d_{a1,j}}{(K-1) \cdot K_{a1}} \cdot \frac{d_{a1,j}}{(K-1) \cdot K_{a1}} + \frac{t_{tr,j}}{K} + t_{tr,j} \quad (12.39)$$

Se as velocidades de corte e de movimento são iguais nas duas sub-operações de corte, a equação (12.39) simplifica-se para

$$t_{tr} = \left[\frac{d_{a1,j} \cdot K}{(1000 \cdot \bar{v}_1 \cdot K_{a1} \cdot \bar{v}_1)} \cdot (t_{a1,j} \cdot d_{a1,j} + t_{a1,j} \cdot d_{a1,j}) + \frac{t_{tr,j}}{K} \right] \cdot t_{tr,j} \quad (12.40)$$

4 - uma única ferramenta, atuando em apenas um está-

gio.

Como $\lambda = 1$, $\frac{1}{\lambda} = 1$, de (12.40) resulta (12.41) de onde que

$$T_{\text{op}} = \left[\frac{2 \cdot F_{\text{a}} \cdot l}{1000 \cdot \pi} - \frac{1 \cdot d \cdot l}{2} - 1 \right] \cdot \frac{1 \cdot F_{\text{a}}}{9} \quad (12.41)$$

Por exemplo, o gráfico acima a ser utilizado está contido na figura 2.7, para o caso de copiar o perfil 3.41, com velocidade de corte constante constante por meio de uma conveniente variação da rotação do mandrão.

TEMPO TOTAL DE CONFECÇÃO

13.1 - Tempo de execução e tempo

Para as operações gerais de usinagem, na qual usam várias ferramentas de corte, de ar ou mais estáveis, o tempo total de execução (tempo-estável), por peça, para a execução de todas as fases (ver § 2.6), será dado por

$$t_c = \frac{1}{q} \cdot (t_{pi} + t_i + L_a + t_v) + c_{co} + t_{tr} \quad (13.1)$$

onde

t_{pi} = tempo inicial de usinagem, por peça (não inclui o tempo de preparação);

q = número de peças executadas em cada operação de usinagem;

t_v = tempo total de máquina, por operação, que varia de fase a fase $i = 1, 2, 3, 4, 5$ (ver § 2.6);

c_{co} = tempo total de corte, por peça, para todas as ferramentas correspondentes à fase i . Sua determinação foi dada no capítulo VII;

t_{tr} = tempo total de transição, por peça, entre a troca e a introdução das ferramentas, correspondente à fase i com a determinação da qual no capítulo VII;

t_i = tempo inicial de usinagem, por operação, relativo à fase i ;

L_a = tempo total de ajuste e inspeção produzida nas ferramentas em cada operação, correspondente à fase i ;

t_v = tempo relativo da influência de operações anteriores ou posteriores, variáveis possíveis no estado de ferramenta do sistema de peça, etc., em cada operação. Pode ser positivo ou negativo.

Quando se descrevem as etapas de corte de uma das fases acima citadas ocorre uma das seguintes situações: quando se descreve a etapa de corte, a velocidade é considerada como parâmetro fixo, correspondente aos dados tecnológicos (tempo morto). Estes tempos não influem no valor do tempo morto de execução t_{p0} .

Analisando-se a influência da velocidade de corte no tempo total de execução, verificamos que:

- a) o tempo total de corte t_{p0} e o tempo total de preparação t_{p1} são influenciados pela velocidade de corte. Como pode ser notado das equações gerais (7.1) e (7.2), t_{p0} e t_{p1} são funções da velocidade de corte. Logo, quanto maior a velocidade de corte, menor o tempo de corte; o tempo total de preparação varia inversamente, no caso oposto. Para uma dada velocidade de corte, o tempo total de corte t_{p0} é diretamente proporcional à velocidade de corte, e o tempo total de preparação t_{p1} é inversamente proporcional à velocidade de corte.
- b) o tempo total de corte t_{p0} , o tempo de preparação t_{p1} e o tempo total de execução $t_{p0} + t_{p1}$ são influenciados pela velocidade de corte.

Agrupando-se os tempos, segundo sua dependência com relação à velocidade de corte, a equação (11.1) pode ser escrita da seguinte forma:

$$t_{p0} = \frac{1}{v} (t_{p0} + t_{p1} + t_{p2}) + t_{p3} + t_{p4} \quad (11.2)$$

com

$$t_{p0} = t_{p0} + t_{p1} + t_{p2} \quad (11.3)$$

onde,

- t_{p0} = tempo necessário ao trabalho, referido a uma dada velocidade de referência v_{p0} , em cada estágio de usinagem;
- t_{p1} = função que exprime a dependência do tempo secundário t_{p1} em relação à variação das velocidades de referência em

cada operação. Pode ser positiva ou negativa, conforme as condições relativas à cada particular operação de usinagem.

A avaliação de C_p não é objetivo deste trabalho. Sua determinação só pode ser feita experimentalmente, devido à complexidade e multiplicidade dos fatores envolvidos, tais como:

- a) condições locais de trabalho;
- b) variação da qualidade do material da peça;
- c) estado e geometria da superfície de contato das ferramentas, inclusive influência da afiação, principalmente em ferramentas de metal duro e materiais cerâmicos;
- d) material das ferramentas, que apresentam variações em relação aos diversos fabricantes, ou mesmo para diferentes lotes de um mesmo fabricante;
- e) influência da velocidade de corte no acabamento superficial;
- f) possibilidade de ocorrência de variação das dimensões de greixa pastosa de corte;
- g) aumento ou diminuição da amplitude das vibrações, com a variação para mais ou para menos da velocidade de rotação principalmente no caso de peças desbalanceadas;
- h) aumento ou diminuição da capacidade de refrigeração e de lubrificação do fluido de corte utilizado.

O estudo e a determinação dos tempos secundários C_p é basicamente um problema de engenharia industrial, para análise de tempos e métodos, visando a economia de movimentos e a eliminação dos tempos envolvidos. Portanto, na aplicação do método proposto para a determinação das condições econômicas (mínimo custo e máxima produção), será sempre admitido que os tempos secundários C_p já estão minimizados para a operação de usinagem em estudo.

13.2 Tempo total de deposição (caso geral)

Considerando-se o intervalo de tempo de deposição t_p de uma operação de corte de um arx cução L_{ij} , deo pela equação (12.2), resulta:

$$t_p = t_{pv} + \frac{L}{Z} + \left(\frac{L}{Z} + t_{iv} \right) \quad t_{iv} = t_{ie} \quad (13.4)$$

com

$$t_{pv} = \frac{1}{4} (t_{pv} + t_{iv} + t_{ie}) \quad (13.5)$$

onde:

t_{pv} = tempo de deposição de deposição, por peça;
 L_{ij} = parcela de tempo total de corte, L_{ij} , praticando (independente das variáveis de corte em cada operação).

As operações gerais i , portanto, nas quais se fabricam as peças, o tempo total de corte será dado por:

$$t_{ic} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_{ij} \quad (13.6)$$

O tempo total de deposição, de acordo com a equação geral (12.3) é dado por:

$$t_{id} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_{ij} + \frac{1}{Z} + \frac{1}{Z} \sum_{j=1}^N t_{ij} \quad (13.7)$$

Substituindo-se estes valores de t_{ic} e t_{id} na equação (13.4), o tempo total de corte, por peça, será dado pela equação

$$t_p = t_{pv} + \frac{1}{Z} + \left(\frac{1}{Z} + t_{iv} \right) \quad (13.8)$$

onde

$$t_{pv} = t_{iv} + \frac{1}{Z} + \left(\frac{1}{Z} + t_{ie} \right) \quad (13.9)$$

é o tempo de deposição de deposição de deposição, isto é, a soma das parcelas componentes do tempo total de corte que não estão diretamente ligadas à deposição de deposição. Quando o número de peças do lote é grande ($N \rightarrow \infty$), segue que $t_{iv} = t_{ie}$.

A seguir, será feita a determinação de t_c pelo método analítico, nas operações gerais de usinagem, onde atuam p ferramentas, em p estágios, nas seguintes situações:

- a) a rotação do eixo-árvore $\bar{\omega}$ mantida constante durante as operações de usinagem. Esta situação corresponde, nas máquinas-ferramentas universais, a um total de N operações executadas numa certa sequência, com uma determinada rotação em cada operação; nas máquinas-ferramentas iniciadoras, corresponde $\bar{\omega}$ - rotações de cada uma das p ferramentas;
- b) a velocidade de corte $\bar{v}$ mantida constante durante a operação de corte. Esta situação corresponde às operações de rotação em torno, onde a velocidade de corte $\bar{v}$ é mantida constante por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore.

Em ambas as casos, será admitido que as ferramentas são trocadas individualmente, de um grupo.

11.2 - Rotação constante do eixo-árvore

11.2.1 - Caso Geral

Quando a rotação do eixo-árvore $\bar{\omega}$ mantida constante em cada j ésimº estágio de usinagem, em uma operação na qual atuam p ferramentas trocadas individualmente, de acordo com as equações gerais (7.35), (12.9) e (13.6) resulta que

$$t_c = t_{ip} + \frac{1}{q} \sum_{j=1}^p \frac{\bar{v}_j}{\bar{\omega}_j} + \frac{1}{q} \sum_{j=1}^p \left[\frac{\bar{v}_j^{1-n}}{(n-1) \bar{\omega}_j^{n-1}} \right] \quad (13.10)$$

ou então:

$$t_c = t_{ip} + t_{ic} + t_{cr}$$

Quanto à maior ou menor dependência de α das parâmetros constituintes da equação geral (13.16) em relação à rotação do eixo-árvore, tem-se:

- a) o tempo latente ($t_{L,p}$) é praticamente independente da rotação do eixo-árvore. Com o aumento da rotação gradualmente ocorre uma diminuição, devido principalmente aos tempos de aproximação, retirada e retorno das ferramentas, porém há um aumento, devido principalmente aos tempos de aproximação, tempos para elevação e iteração do eixo-árvore.
- b) tempo total de corte ($t_{C,p}$) precedere ao tempo latente, porém quando maior a rotação do eixo-árvore menor o seu valor.
- c) tempo total de rotação ($t_{R,p}$) dependente da taxa de corte, variando exponencialmente. A maior dependência ocorre nas operações de usinagem onde os tempos de corte e ajuste das ferramentas são como os expoentes α_1 e α_2 maiores.

Gratificando a variação das usinagens com os termos mostrada na figura 12.1, na qual consideramos a 3ª extensão. As rotações limites $\alpha_{L,p}$ e $\alpha_{H,p}$ significam as rotações mínima e máxima do eixo-árvore, permitindo a realização de pelas condições operacionais.

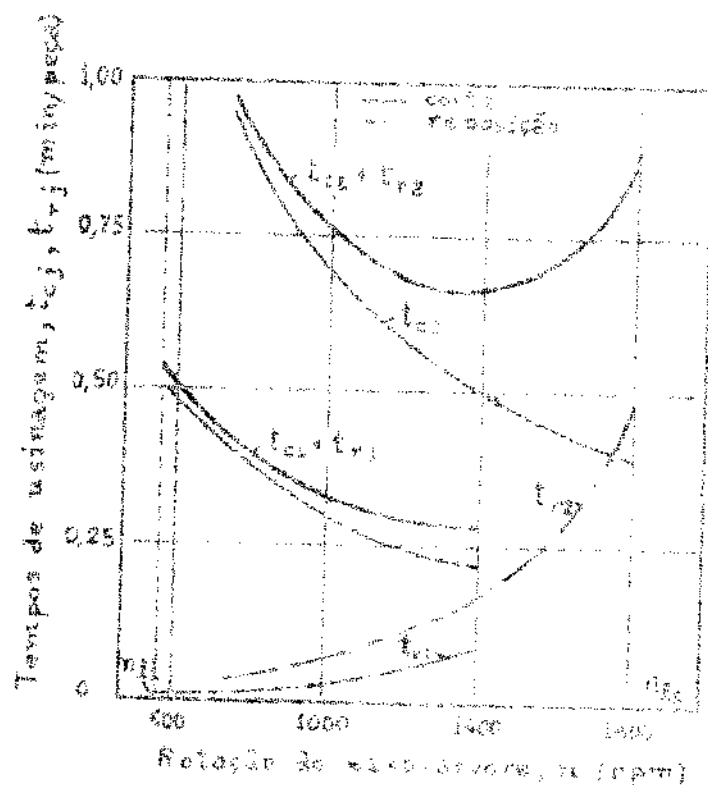


Fig. 13.1 - Variação das parcelas componentes do tempo total de confecção, em função da rotação do eixo-árvore, no torneamento de um eixo para redutor de engrenagem, executado em dois estágios (ver § 13.4).

13.3.1 - Casos particulares

a) Apenas uma ferramenta, atuando em vários estágios.

Quando $m=1$, as parcelas da equação geral (12.10) serão dadas por

$$t_{ip} = t_{iv} + \frac{1}{2} (t_p - t_{rc}) \quad (13.11)$$

$$t_{ec} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\bar{a}_{ab,j}}{\bar{a}_{bj} \cdot n_j} \quad (13.12)$$

$$t_{tr} = \frac{1}{q \cdot (x-1)} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\bar{a}_{ij} \cdot n_j^x}{\bar{a}_{bj}} \quad (13.13)$$

Exemplos práticos destes casos nas operações de copiagem, são mostrados nas figuras 2.7 e 12.4. Se o avanço é constante em cada estágio, resulta $\bar{a}_{bj} = \bar{a}_j$.

b) Várias ferramentas atuando em cada estágio.

Se as ferramentas atuam simultaneamente, em grupos, com um mesmo avanço, como nos 29 e 39 estágios da operação mostrada na fi-

para 12.2, para este estágio resulta:

$$L_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{\delta_{ik} \cdot a_{kj}}{(\lambda_i - 1) \cdot \bar{a}_j} \quad (13.14)$$

$$L_{ij} = \frac{1}{(\lambda_i - 1) \cdot \bar{a}_j} \sum_{k=1}^n \delta_{ik} \cdot a_{kj} \quad (13.15)$$

Quando todas as ferramentas que entram no j estão estágio i aproximadas inicialmente expondo x_j a tempo 0, resolve a equação (13.15), de acordo com a equação (12.13), resulta:

$$r_{ij} = \frac{\delta_{ij} \cdot a_{ij}}{(\lambda_i - 1) \cdot \bar{a}_j} = \left(\frac{\delta_{ij} \cdot a_{ij}}{(\lambda_i - 1) \cdot \bar{a}_j} \right) \cdot \frac{1}{\delta_{ij} \cdot a_{ij}} \cdot \delta_{ij} \cdot a_{ij} \quad (13.16)$$

onde a_{ij} é a diferença equivalente das ferramentas, dado pela equação (12.14).

em estágio i inicial, cada ferramenta tem uma única ferramenta

o que caso $i=j$, resultando da equação geral (13.16) que

$$\left\{ \begin{aligned} r_{ip} &= r_{iv} + \frac{1}{\lambda_i - 1} \left(r_{ip} - \frac{1}{\lambda_i - 1} r_{iv} \right) \\ r_{tr} &= \frac{1}{\lambda_i - 1} \cdot \frac{\sum_{j=1}^n \delta_{ij} \cdot a_{ij}}{\sum_{j=1}^n \delta_{ij} \cdot a_{ij}} \\ r_{tr} &= \frac{1}{\lambda_i - 1} \cdot \frac{\sum_{j=1}^n \delta_{ij} \cdot a_{ij}}{\sum_{j=1}^n \delta_{ij} \cdot a_{ij}} \end{aligned} \right. \quad (13.17)$$

onde $a_{ij} = x_j$ e $\delta_{ij} = \delta_{ij}$, pois o número de ferramentas é igual ao de estações ($n = 5$).

Como exemplo prático, a figura 13.2 mostra uma operação de torneamento no qual algumas ferramentas são usinadas.

Estágio Operação

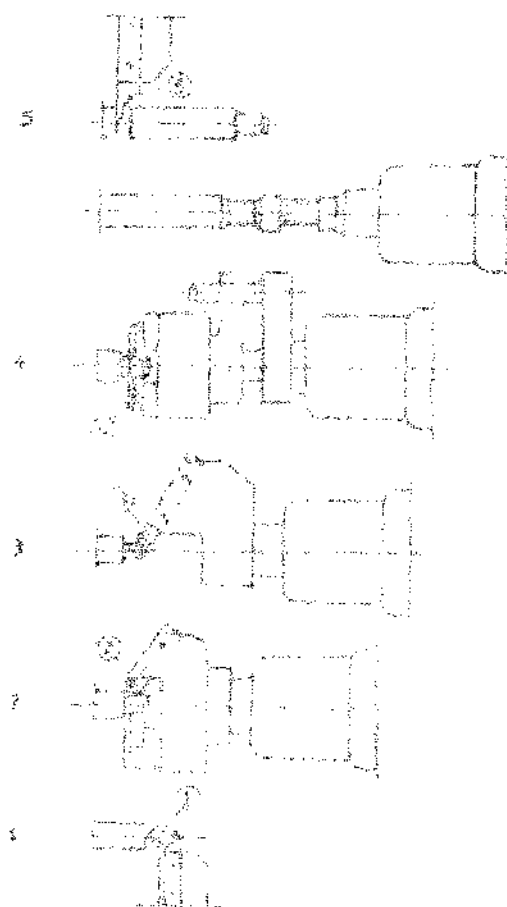


Fig. 13.2 - Torneamento de um pino torneado em torno revólver, no qual atua a-juntas uma ferramenta em cada estágio.

ou uma única ferramenta, atuando em um único estágio.

Seja $n = m + 1$, da equação geral (13.10) segue que

$$\left[\begin{aligned} E_{1,j} &= E_{1,0} + \frac{1}{2} (L_j - L_{FE}) \\ E_{1,0} &= \frac{E_j}{\sigma \cdot \bar{a} \cdot n} \end{aligned} \right. \quad (13.18)$$

$$\left[\begin{aligned} L_{FE} &= \left(\frac{\pi \cdot \bar{a}}{4 \cdot K_{1,j}} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{n^{n-1} \cdot L_j}{4 \cdot K_{1,j} \cdot \bar{a}} \cdot c_{fc} \end{aligned} \right. \quad (13.19)$$

13.4 - Velocidade corte constante

13.4.1 - Caso geral

Quando a velocidade de corte da ferramenta-base em cada j -ésimo estágio é mantida constante, substituindo-se as equações gerais (7.43) e (12.30) na equação geral (13.8), com $v_{ei,j}$ dado pela equação (11.21), o tempo total de fabricação, por peça, quando as fer-

ramentos são trocadas individualmente, será dado por

$$t_t = t_{ip} + \frac{\pi}{1000 \cdot g} \sum_{j=1}^N \frac{(\bar{a}_{b,j} \cdot d_{c,j})}{\bar{a}_{b,j} \cdot \bar{v}_{b,j}} + \frac{\pi}{1000 \cdot g} \cdot \sum_{j=1}^N \left[\frac{\sum_{i=1}^m \frac{\beta_{i,j} \cdot \bar{v}_{b,j}^{x_i-1}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{b,j}}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{b,j}} \right] \quad (13.20)$$

ou então,

$$t_t = t_{ip} + t_{tr} + t_{tr}$$

Na quasi totalidade das aplicações práticas, o avanço é mantido constante em cada estágio, ou seja, $\bar{a}_{b,i,j} = \bar{a}_j$.

Como foi visto no § 7.3.2 e no § 11.3.2, quando várias ferramentas atuam simultaneamente no j ésimo estágio, como foi mostrado na figura 7.5, só é possível manter-se a velocidade de corte constante para uma das ferramentas do grupo (ferramenta-base), ou seja, a velocidade $\bar{v}_{b,j}$.

Quanto à influência da variação da velocidade de corte nas três parcelas componentes da equação geral (13.20), valem as mesmas considerações formuladas no § 13.3.1.

A representação gráfica da equação (13.20) é análoga à mostrada na figura 13.1.

13.4.2 - Casos particulares

a) Uma única ferramenta, atuando em vários estágios.

Neste caso, $i = 1$ e portanto, da equação geral (13.20) resulta, para avanço constante em cada estágio

$$t_t = t_{ip} + \frac{\pi}{1000 \cdot g} \left[\sum_{j=1}^N \frac{(\bar{a}_j \cdot d_{c,j})}{\bar{a}_j \cdot \bar{v}_{b,j}} + \sum_{j=1}^N \frac{\beta_j \cdot \bar{v}_j^{x-1}}{(x-1) \cdot \bar{a}_j} \right] \quad (13.21)$$

com

$$t_{ip} = t_{iv} + \frac{1}{Z} \cdot (t_p - t_{fr}) \quad (13.22)$$

Um exemplo prático deste caso particular pode ser visto na figura 2.7 (12 e 13 estágios), no caso em que a velocidade de corte da ferramenta é mantida constante, em vez de uma conveniente variação da rotação da eixo-ferramenta.

b) Uma única ferramenta, atuando em um único estágio.

Como $j=1$ e $i=1$, da equação (13.21) resulta:

$$t_c = t_r + \frac{0.4 \cdot d}{1000 \cdot v_c \cdot \phi} \cdot \left(1 + \frac{Q^2}{K_c} \cdot t_{11} \right) \quad (13.23)$$

Na figura 2.7 (12 e 13 estágios da operação de usinagem) pode ser visto um exemplo deste caso particular.

14 - CUSTOS DE USINAGEM

Os custos envolvidos nas operações gerais de usinagem podem ser divididos em quatro parcelas, cuja soma resulta no custo total de confecção, por peça, dados por:

$$C_t = C_m + C_{ip} + C_{tc} + C_{tr} \quad (14.1)$$

onde:

C_t = custo total de confecção, por peça;

C_m = custo do material da peça, inclusive custos indiretos;

C_{ip} = custo devido aos tempos improdutivos, por peça, (ver § 13.2), ou seja, aquelas que não participam diretamente do processo de remoção do cavaco;

C_{tc} = custo total de preparação, por peça, correspondente à quantidade consumida, custos de afiação e tempos gastos para as trocas, quando as ferramentas perdem sua capacidade de corte;

C_{tr} = custo total de corte, por peça, relativo ao tempo geral gasto pela máquina para a execução das operações de corte.

Do estudo apresentado a seguir, serão formuladas as equações gerais correspondentes a cada uma das parcelas acima enumeradas, admitindo-se que as ferramentas são trocadas individualmente e não em grupos.

14.1 - Custo dos tempos improdutivos

Considerando-se todas as fases envolvidas na operação de usinagem, como foi visto nos § 2.6 e § 13.2, tem-se que

$$C_{ip} = t_{ip} \cdot S = \left[r_{iv} + \frac{1}{Z} \left(t_p - \sum_{i=1}^N r_{eti} \right) \right] \cdot S \quad (14.2)$$

onde:

1. custo do tempo introdutivo em Cr\$/peça.

S. custo de mais secretarias (overhead), correspondente à utilização da sala e do pessoal, - bem como das despesas indiretas de administração, com uma de energia, etc., em Cr\$/min. Para o cálculo de S, sugerem-se dois métodos propostos por Schaumann [41] e Peristiani [46].

Como visto anteriormente (§ 13.2), será admitido que o custo C_{ip} dependa da velocidade de corte, pois na faixa normal de trabalho sua influência é praticamente desprezível, como demonstrado por Witzl [25].

14.2 - Custo e tempo de corte

14.2.1 - Caso Geral

Para as operações de usinagem executadas em vários estágios, tem-se que

$$C_{tc} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^N C_{cj} = \frac{S}{q} \cdot \sum_{j=1}^N t_{cj} \quad (14.3)$$

onde:

C_{tc} = custo total dos tempos de corte em Cr\$/peça.

C_{cj} = custo do tempo de corte das j ferramentas utilizadas que atuam no j ésimο estágio, em Cr\$/peça.

t_{cj} = tempo de corte no j ésimο estágio, em min.

q = número de peças executadas em cada operação.

14.2.2 - Rotação constante do eixo-árvore

Quando a rotação do eixo-árvore é mantida constante em cada j ésimο estágio, de acordo com as equações gerais (7.16) e (7.35) o custo total de corte será dado por

$$C_{tc} = \frac{S}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{t_{ab,j}}{a_{bj} \cdot v_j} \quad (14.4)$$

Manter-se desta maneira, uma vez que o custo total de corte varia (inversamente) com a rotação do eixo-árvore, e portanto, sua representação gráfica será da forma mostrada na figura 14.1.

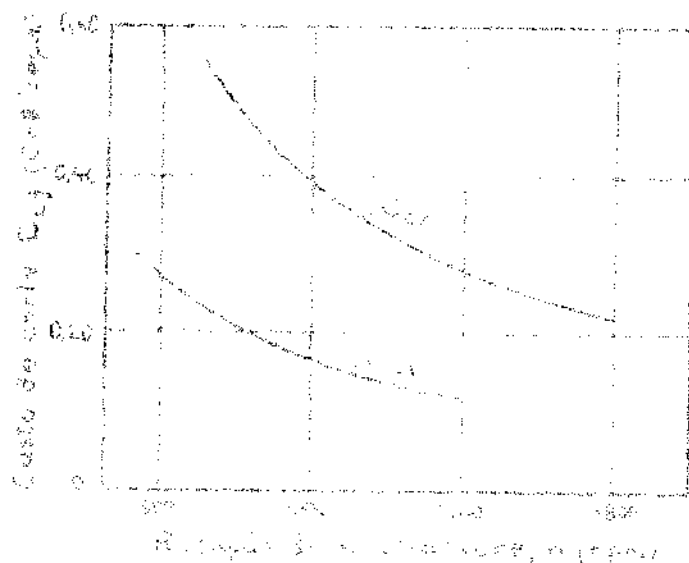


Fig. 14.1 - Variação dos custos de corte em função da rotação do eixo-árvore, no torneamento de um eixo, executado em dois estágios (ver § 19.6).

14.2.3 - Velocidade de corte constante

Mantendo-se a velocidade de corte constante em cada estágio, por meio de uma convencional variação da rotação do eixo-árvore, de acordo com as equações gerais (7.29), (7.43) e (14.3), o custo total de corte será dado por:

$$C_{ct} = \frac{S}{1000 \cdot \pi} \sum_{j=1}^n \frac{F_{c,j} \cdot l_j \cdot \pi \cdot d_{m,j}}{60 \cdot \frac{V_c}{1000} \cdot \pi \cdot d_{m,j}} \quad (14.5)$$

Verificamos nesta equação que o custo C_{ct} varia (inversamente) com a velocidade de corte, e portanto, sua representação gráfica terá uma forma idêntica à mostrada na figura 14.1.

14.3 - Custo das ferramentas e suas trocas

14.3.1 - Caso Geral

Quando um conjunto de n ferramentas, que atua em n estágios, são trocadas individualmente, o custo total devido ao consumo

das ferramentas e das peças de troca, como por

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^n C_{ijk} + \frac{1}{2} C_{ij} + \sum_{k=1}^n C_{ijk} \quad (14.6)$$

onde:

C_{ijk} - custo de troca de ferramentas devido ao consumo de ferramentas e tempo gasto em cada troca, em R/min ;

n_{ij} - número total de trocas de ferramentas em i para j com i peças da i -ésima ferramenta;

C_{ij} - custo total médio de troca de cada ferramenta - da i -ésima ferramenta - em R/min ;

e qualquer custo de ferramenta e troca de troca, para o custo C_{ij} em R/min .

$$C_{ij} = C_{ij} + C_{ij} \quad (14.7)$$

onde C_{ij} é o custo de troca de ferramentas para o cálculo de tempo, sugerindo a equação das equações por ferramentas C_{ij} , sua expressão as equações correspondentes às ferramentas e às ferramentas ou inserts de troca mecânica.

Como o número total de trocas de ferramentas é dado por

$$n_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{ij}} - 1 \quad (14.8)$$

(na qual admitiu-se que a equação foi inicialmente preparada com ferramentas já trocadas), substituído na equação (14.6), resulta

$$C_{ij} = \left(1 + \frac{1}{2} \right) C_{ij} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{C_{ijk}}{C_{ij}} + \frac{1}{2} \right) C_{ijk}$$

onde C_{ij} é o número de trocas de ferramentas em cada troca.

Substituindo o valor de C_{ij} na equação (14.8) e simplificando (equação 14.8), a equação de troca de ferramentas é dada por

temos para $\bar{C}_{ir}$ (14.8) e (14.9) resulta

$$\bar{C}_{ir} = \frac{1}{q} \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \right] \quad (14.9)$$

Reordenando os termos das equações (14.8) e (14.9) de maneira análoga à feita na equação (14.7), resulta

$$\bar{C}_{ir} = \frac{1}{q} \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \right] \quad (14.10)$$

ou então,

$$\bar{C}_{ir} = \frac{1}{q} \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \right] \quad (14.11)$$

que é a expressão geral para o cálculo do custo total das ferramentas para a fabricação de uma peça que (14.10) e (14.11) podem ser reescritas

$$\bar{C}_{ir} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \quad (14.12)$$

Substituindo agora o valor de $\bar{C}_{ir}$ na equação (14.6) nas equações (14.1) e (14.2) temos

$$\bar{C}_{ir} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \quad (14.13)$$

com

$$\bar{C}_{ir} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \quad (14.14)$$

$$\bar{C}_{ir} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \quad (14.15)$$

$$\bar{C}_{ir} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \left(\frac{1}{\lambda_{ij}} \right) \quad (14.16)$$

onde

$\bar{C}_{ir}$ = custo de fabricação das ferramentas consumidas para a fabricação de uma peça

$\bar{C}_{ir}$ = custo de fabricação das ferramentas consumidas para a fabricação de uma peça

a cada uma das j estâncias.

$Z_{fi,j}$ = percento do número médio de peças usinadas por lote, consumida pelo j ésimas ferramenta, no j é estágio.

A determinação dos custos $C_{fi,j}$ e $C_{rt,j}$ em cada estágio, permite uma avaliação dos custos mais significativos, isto é, se predomina o custo da ferramenta em si, ou então, as paradas para a troca das ferramentas.

Para a operação geral, resulta:

$$C_{tr} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N C_{rf,j} + \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N C_{rt,j} + \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N C_{fi} \quad (14.16)$$

14.3.2 - Relação constante de eixo-árvore

14.3.2.1 - Equação Geral

Substituindo-se os valores de $v_{ei,j} = x_{ei,j}$, dados respectivamente pelas equações (11.3) e (11.4) na equação geral (14.11), tem-se:

$$C_{tr} = C_{rf,j} + C_{rt,j} = \sum_{i=0}^m \left(\frac{x_{ei,j}}{1000} \right)^{x_i} \cdot \frac{n_i \cdot \bar{a}_{bi,j}}{x_{ei} \cdot \bar{a}_{bi,j}} \cdot C_{fi} \quad (14.17)$$

ou então, de acordo com a definição da constante $\delta_{i,j}$, dada pela equação (12.10), segue que

$$C_{tr} = \sum_{i=0}^m \frac{\delta_{i,j} \cdot x_i^{x_i-1}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{bi,j}} \cdot \frac{C_{fi}}{C_{fci}} \quad (14.18)$$

e portanto, da equação geral (14.10) resulta

$$C_{tr} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=0}^m \frac{\delta_{i,j} \cdot x_i^{x_i-1}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{bi,j}} \cdot \frac{C_{fi}}{C_{fci}} \right] + \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N C_{fi} \quad (14.19)$$

que é a equação geral para o cálculo do custo total de usinagem (y_i

das ferramentas consumidas na operação mais os custos de troca), quando a rotação do eixo-árvore é constante.

Substituindo-se o valor de C_{Ti} dado pela equação (14.7) nas equações (14.17) ou (14.18), segue que:

$$C_{rf,j} = \sum_{i=1}^m \frac{C_{fTi}}{Z_{Ti,j}} \quad (14.20)$$

$$C_{rt,j} = S \cdot \sum_{i=1}^m \frac{f_{Ti}}{Z_{Ti,j}} \quad (14.21)$$

com

$$C_{rj} = C_{rf,j} + C_{rt,j} = \sum_{i=1}^m \frac{C_{fTi}}{Z_{Ti,j}}$$

onde:

$$\frac{1}{Z_{Ti,j}} = \left(\frac{\pi \cdot d_{ef,j}}{1000} \right)^{x_i} \cdot \frac{n_j^{x_i-1} \cdot \bar{a}_{bi,j}}{K_{bi} \cdot \bar{a}_{bi,j}} = \frac{Y_{bi,j} \cdot n_j^{x_i-1}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{bi,j} \cdot t_{fri}} \quad (14.22)$$

Verifica-se da equação geral (14.10), que o custo total de reposição C_{tr} varia exponencialmente em função da rotação do eixo-árvore. Portanto, sua representação gráfica será da forma mostrada na figura 14.2, onde considerou-se uma operação realizada em dois estágios.

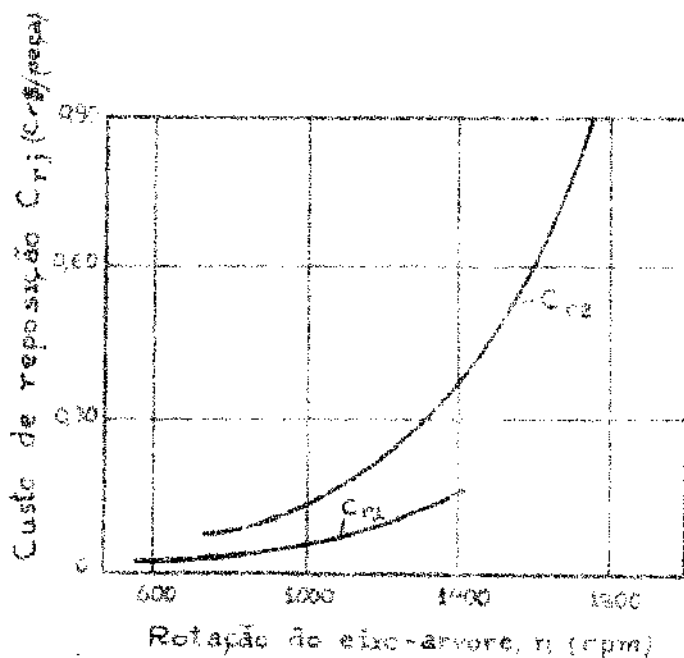


Fig. 14.2 - Variação - de custo de reposição - das ferramentas, em fun- ção da rotação do eixo -árvore, no torneamento de um eixo, executado em dois estágios (ver § 19.4).

14.3.2.2 - Equações particulares

Quando todas as ferramentas que atuam no j ésimο estágio a apresentam uma mesma Equação de Taylor Equivalente (equação 9.7), iguais custos C_{ri} (vida mais tempo de reposição) e um único avanço básico, a equação geral (14.18) torna-se:

$$C_{erj} = \frac{Y_{ej} \cdot n_j^{x_j-1}}{(x_j-1) \cdot \bar{a}_{bj}} \cdot \frac{C_{fi}}{t_{ftj}} = \frac{C_{fj}}{Z_{eT,j}} \quad (14.23)$$

onde:

$C_{er,j}$ = custo por vida mais tempo de reposição, da ferramenta-equivalente do j ésimο estágio;

δ_{ej} = constante equivalente para o j ésimο estágio, da da pela equação (12.13);

C_{fj} = custo por vida mais tempo de reposição, de cada ferramenta envolvida no j ésimο estágio;

t_{ftj} = tempo de reposição de cada ferramenta envolvida no j ésimο estágio.

$Z_{eT,j}$ = número médio de peças usinadas por vida, relativo à ferramenta-equivalente, no j ésimο estágio.

Nestes casos, o número de peças usinadas por vida da ferramenta-equivalente, de acordo com a equação (14.22), será dado por

$$Z_{eTj} = \frac{(x_j-1) \cdot \bar{a}_{bj} \cdot t_{ftj}}{\delta_{ej} \cdot n_j^{x_j-1}} \quad (14.24)$$

Se o avanço é constante em cada estágio, resulta $\bar{a}_{bj} = \bar{a}_j$.

14.3.3 - Velocidade de corte constante

14.3.3.1 - Equação Geral

Substituindo-se na equação geral (14.11) os valores de $t_{ci,j}$ e $v_{ei,j}$, dados pelas equações (11.17) e (11.21), segue que:

$$C_{rj} = \frac{\pi}{1000} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{(c_i \cdot \hat{v}_{b,j})^{x_i-1}}{K_{ei}} \cdot \frac{\ell_{ab,j} \cdot d_{ei,j}}{\bar{a}_{bi,j}} \cdot C_{fi} \quad (14.25)$$

ou então, de acordo com a definição da constante $\beta_{i,j}$, dada pela equação (12.31), tem-se:

$$C_{rj} = \frac{\pi}{1000} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{\beta_{i,j} \cdot \hat{v}_{b,j}^{x_i-1}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{bi,j}} \cdot \frac{C_{fi}}{t_{fti}} \quad (14.26)$$

e portanto, da equação (14.10) resulta

$$C_{tr} = \frac{\pi}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^m \frac{\beta_{i,j} \cdot \hat{v}_{b,j}^{x_i-1}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{bi,j}} \cdot \frac{C_{fi}}{t_{fti}} \right] - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^m C_{fi} \quad (14.27)$$

que é a equação geral para o cálculo do custo total de reposição - (custo da vida das ferramentas consumidas na operação mais os custos de troca), por peça, quando a velocidade de corte é mantida constante, por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore, e as ferramentas são trocadas individualmente.

Para as parcelas correspondentes ao consumo e às trocas das ferramentas, em cada j êsimo estágio, resulta:

$$C_{rj} = \sum_{i=1}^m \frac{C_{fi}}{Z_{Ti,j}} \quad (14.28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{vida :} \\ \end{array} \right. \quad C_{rf,j} = \sum_{i=1}^m \frac{C_{fi} T_i}{Z_{Ti,j}} \quad (14.29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{troca:} \\ \end{array} \right. \quad C_{rt,j} = S \cdot \sum_{i=1}^m \frac{t_{fti}}{Z_{Ti,j}} \quad (14.30)$$

onde

$$\frac{1}{Z_{Ti,j}} = \frac{\pi \cdot (c_i \cdot \hat{v}_{b,j})^{x_i-1}}{1000 \cdot K_{ei} \cdot \bar{a}_{bi,j}} \cdot \ell_{abi,j} \cdot d_{ei,j} = \frac{\pi \cdot \beta_{i,j} \cdot \hat{v}_{b,j}^{x_i-1}}{1000 \cdot (x_i-1) \cdot \bar{a}_{bi,j} \cdot t_{fti}} \quad (14.31)$$

De maneira análoga às anteriores, conclui-se que o custo

total de reposição C_{tr} varia exponencialmente com a velocidade de corte, em cada estágio. Portanto, a representação gráfica da equação (14.27) terá uma forma análoga à mostrada na figura 14.2. Se o avanço é constante em cada estágio, resulta $\bar{a}_{bj} = \bar{a}_j$.

14.3.3.2 - Equações particulares

De modo análogo ao feito no § 14.3.2.2 para a ferramenta equivalente, quando o avanço é constante em cada estágio, tem-se

$$C_{er,j} = \frac{\pi \cdot B_{ej} \cdot \bar{v}_{b,j}^{x_j-1}}{1000 \cdot (x_j-1) \cdot \bar{a}_j} \cdot \frac{C_{fj}}{C_{f,j}} = \frac{C_{fj}}{Z_{er,j}} \quad (14.32)$$

com

$$Z_{er,j} = \frac{1000 \cdot (x_j-1) \cdot \bar{a}_j \cdot t_{f,j}}{\pi \cdot B_{ej} \cdot \bar{v}_{b,j}^{x_j-1}} \quad (14.33)$$

14.4 - Custo total de confecção

14.4.1 - Caso geral

Para as operações gerais de usinagem, executadas por várias ferramentas em diferentes estágios, o custo total de confecção, por peça, de acordo com as equações (14.1) a (14.3) e (14.10), será da seguinte forma:

$$C_t = C_i + C_{tc} + C_{tf} = C_i + \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N C_{cj} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N C_{rj} \quad (14.34)$$

onde

$$C_i = C_m + C_{ip} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^m C_{fi} \quad (14.35)$$

significa a parcela do custo total de confecção, praticamente independente das condições de usinagem.

14.4.2 - Rotação constante do eixo-árvore

Substituindo-se os valores de C_{cj} e C_{rj} anteriormente cal-

culados na equação geral (14.26), tem-se

$$C_t = C_i + \frac{S}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\bar{a}_{b,j}}{\bar{a}_{b,j}^{q_j}} + \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \left[\frac{\sum_{i=1}^N \frac{\bar{a}_{b,i} \cdot R_i^{x_i-1}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{b,i}}}{\bar{a}_{b,i}} \cdot \frac{C_{fi}}{t_{fti}} \right] \quad (14.36)$$

Considerando-se o anteriormente exposto (cap. VII e XII), a representação gráfica da equação (14.36) será da forma mostrada na figura 14.3. Nesta figura nota-se que o custo total de confecção C_t passa por um valor mínimo, cuja determinação será vista no capí-

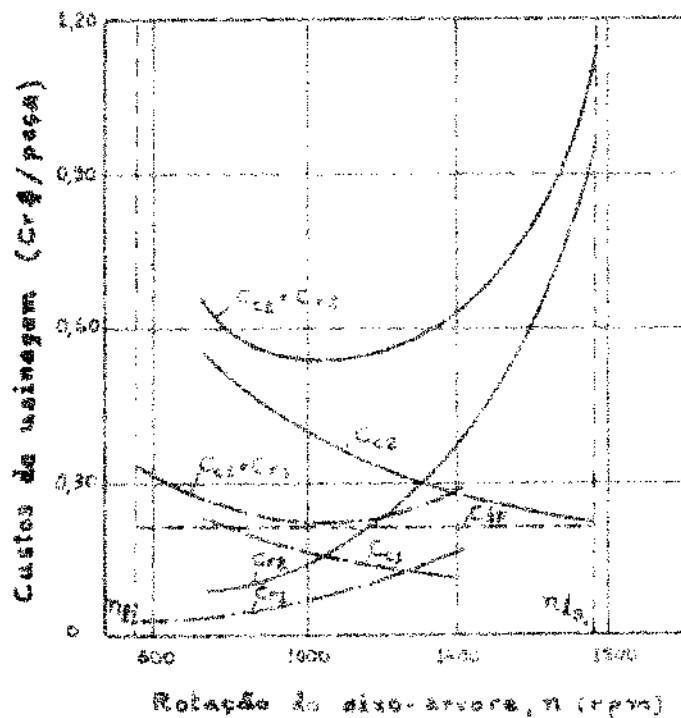


Fig. 14.3 - Variação dos custos de usinagem em função da rotação do eixo-árvore, no torneamento de um eixo, executado em dois estágios (ver § 19.4).

tulo seguinte (cap. XV). A rotação n_{fs} mostrada na figura 14.3 significa a rotação limite superior permitida pelas condições operacionais, tais como aparecimento de vibrações indesejáveis, velocidade de avanço máxima do carro ou mesa móvel, tempo de resposta do Copiador, possibilidade de desengate automático do movimento de avanço, etc.. Por outro lado, a rotação limite inferior n_{li} representa a rotação do eixo-árvore a partir da qual, o aparecimento de aresta postiça de corte (com um significativo aumento dos desgastes ou piora do acabamento superficial) não mais permite a validade da Equação de Tay

for Equivalente das ferramentas envolvidas na operação.

14.4.3 - Velocidade de corte constante

Substituindo-se os valores de C_{cj} e C_{rj} dados pelas equações (14.4) e (14.17) na equação geral (14.26), segue que

$$C_t = C_i + \frac{\pi \cdot S}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\bar{L}_{ab,j} \cdot d_{ebj}}{\bar{a}_{bj} \cdot \bar{v}_{b,j}} + \frac{\pi}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=1}^m \frac{\beta_{i,j} \cdot \bar{v}_{b,j}^{x_i-1}}{(x_i-1) \cdot \bar{a}_{bi,j}} \cdot \frac{C_{fi}}{t_{fti}} \right] \quad (14.37)$$

A representação gráfica desta equação terá uma forma análoga à mostrada na figura 14.3. Neste caso, valem as mesmas considerações formuladas no § 14.42 quanto ao valor mínimo do custo total de confecção C_t e das rotações limites n_{ls} e n_{li} .

15 - OTIMIZAÇÃO DAS FUNÇÕES TEMPO OU CUSTO TOTAL DA CON- FECCÃO

15-1 - Valor mínimo de funções contínuas

Seja $F(n)$ uma função real, da variável n , definida no inter-
valo $[n_a, n_b]$. Esta função é dita contínua em $[n_a, n_b]$, se ela for
contínua em todos os pontos do intervalo, e se existir $\lim_{n \rightarrow n_k} F(n)$,
onde n_k é um ponto qualquer do intervalo.

Por outro lado, se a função $F(n)$ é constituída de uma soma
de funções contínuas, para o mesmo intervalo $[n_a, n_b]$, ela também-
será contínua [61].

Para uma função da variável n , dada por:

$$F(n) = F_1 + F_c(n) + F_r(n) \quad (15.1)$$

onde F_1 é uma constante, $F_c(n)$ e $F_r(n)$ são contínuas no intervalo -
 $[n_a, n_b]$ desde que sejam deriváveis, o valor mínimo da função $F(n)$
no intervalo considerado, ocorrerá quando:

- a) sua derivada primeira em relação à variável n
é nula no ponto $n=n_m$, ou seja:

$$\frac{\partial}{\partial n} F(n) = \frac{\partial}{\partial n} F_c(n) + \frac{\partial}{\partial n} F_r(n) = 0 \quad (15.2)$$

onde $\frac{\partial}{\partial n} F_1 = 0$, pois F_1 é uma constante.

- b) para todo n vizinho do ponto de mínimo, a fun-
ção $F(n)$ é decrescente para valores à esquerda-
de n_m e crescente para valores à direita de n_m ,
isto é,

$$F(n_m) \leq F(n_m + \Omega)$$

para todo Ω vizinho de zero, o valor de $(n_m + \Omega)$
se avizinha de n_m [61].

15.2 - Extensão às operações de usinagem

Em nosso estudo, a variável n significa a rotação do eixo-árvore da máquina-ferramenta, e portanto a função $F(n)$ poderá re-
presentar o tempo ou custo total de confecção, por peça. Se as ope-
rações de usinagem são executadas em N estágios, as funções $F_c(n)$
e $F_r(n)$ podem ser postas na forma

$$F_c(n) = \sum_{j=1}^N F_{c,j}(n) \quad (15.3)$$

$$F_r(n) = \sum_{j=1}^N F_{r,j}(n)$$

e portanto, da equação (15.2) resulta

$$\sum_{j=1}^N \frac{\partial}{\partial n} F_{c,j}(n) = - \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_{r,j}}{\partial n}(n) \quad (15.4)$$

Por outro lado, as mesmas considerações podem ser extendi-
das para a função $F(v)$, onde a variável v (velocidade de corte) va-
ria linearmente com rotação do eixo-árvo^{re} n ($v = k.n$), ou seja,

$$\sum_{j=1}^N \frac{\partial}{\partial v} F_{c,j}(v) = - \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_{r,j}}{\partial v}(v) \quad (15.5)$$

É interessante notar-se que as funções $F(n)$ e $F(v)$ podem
representar o tempo ou custo total de confecção, para todos os pro-
cessos mecânicos de usinagem, tais como torneamento, mandrilamento,
aplainamento, furação, alargamento, rosamento, brochamento, serra-
mento, corte de engrenagens, etc., com exceção dos processos de reti-
ficação.

Em pesquisa que posteriormente pretendemos realizar, será
analisada a extensão do método aqui proposto para as operações de
usinagem com ferramentas abrasivas. Isso se deve ao escasso conheci-
mento atual da vida dos rebolos em relação à variação das condições
de usinagem.

16 - MÁXIMA PRODUÇÃO

Define-se como condição de máxima produção aquela em que o tempo total de confecção é mínimo.

A seguir, será feita a determinação da rotação do eixo-árvore ou da velocidade de corte (mantidas constantes), que satisfaz a condição de mínimo da função $F(n)$, como formulado no § 15.1.

No exposto anteriormente, verifica-se a seguintes identidades:

$F(n) = t_t$ = tempo total de confecção, por peça;

$F_1 = t_{1p}$ = tempo introdutivo da operação, por peça, independente das condições de usinagem;

$F_c(n) = t_{tc}$ = tempo total de corte, por peça;

$F_r(n) = t_{tr}$ = tempo total de reposição, por peça.

16.1 - Rotação constante do eixo-árvore

16.1.1 - Caso geral

No § 15.1 foram formuladas as condições para que a função $F(n) = t_t$ apresente um valor mínimo. Como as funções t_{tc} e t_{tr} são deriváveis, como demonstrado a seguir, e portanto contínuas num da do intervalo $[n_a, n_b]$, o valor mínimo de t_t ocorrerá quando sua de rivada primeira for nula.

Das equações gerais (7.35) e (12.9) resultam as derivadas-
primeiras

$$\frac{\partial}{\partial n} t_{tc}(n) = -\frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{f_{ab,j}}{a_{b,j} \cdot n_j^2} \quad (16.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} t_{tr}(n) = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=1}^m \frac{f_{i,j}}{a_{bi,j}} \cdot n_j^{x_i-2} \right] \quad (16.2)$$

De acordo com a equação (15.4) que estabelece a igualdade-
das derivadas primeiras, das equações (16.1) e (16.2) segue que

$$\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m \frac{\delta_{i,j}}{a_{bi,j}} \cdot n_{mt,j}^{x_i-2} \right] = \sum_{j=1}^m \frac{f_{ab,j}}{a_{bj} \cdot n_{mt,j}^2}$$

onde n_{mt} é a rotação do eixo-árvore para que o tempo total de confecção, por peça, seja mínimo, ou seja, obtenha-se a máxima produção de peças num dado intervalo de tempo.

Para que a igualdade dos j ésimos termos da equação acima seja satisfeita, é necessário e suficiente que os correspondentes termos da série sejam iguais, ou seja,

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_{i,j}}{a_{bi,j}} \cdot n_{mt,j}^{x_i-2} = \frac{f_{ab,j}}{a_{bj} \cdot n_{mt,j}^2}$$

e portanto,

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_{i,j}}{a_{bi,j}} \cdot n_{mt,j}^{x_i} = \frac{f_{ab,j}}{a_{bj}} \quad (16.3)$$

que é a equação geral para o cálculo da rotação do eixo-árvore para que se tenha a condição de máxima produção em cada estágio, quando as ferramentas são trocadas individualmente.

Para facilitar o cálculo da rotação do eixo-árvore ($n_{mt,j}$) em cada j ésimo estágio, principalmente nas operações de usinagem que envolvem grande número de ferramentas, foi elaborado um programa para computação, dado no capítulo XVIII. O método adotado foi o numérico dando-se valores sucessivamente crescentes para n_{mt} dentro de cada dado intervalo de validade da equação de Taylor Equivalente, e verificando-se em qual valor a igualdade é mais satisfeita. Refinando-se os intervalos de variação, obtêm-se valores cada vez mais próximos do valor real, dentro da precisão desejada.

Quando os expoentes x_i das Equações da Taylor Equivalente, das i ésimas ferramentas que atuam no j ésimos estágio, são constantes em um dado intervalo de validade, como formulado no § 9.3, a rotação $n_{mt,j}$ poderá cair fora do primeiro intervalo testado, como mostra a figura 10.1.

Nestes casos, não é satisfeita a correspondência biunívoca entre as grandezas x_i e $n_{mt,j}$, do primeiro intervalo de validade $[n_{j,1}, n_{j,2}]$. Portanto, no método proposto, o valor de $n_{mt,j}$ será calculado em base à minimização da diferença

$$d_{i,j} = \sum_{i=1}^m \frac{\gamma_{i,j} \cdot n_{i,j}^{x_i}}{\bar{\alpha}_{i,j}} - \frac{t_{aj,j}}{\bar{\alpha}_{a,j}}$$

calculada nos sucessivos intervalos de validade dos expoentes x_i .

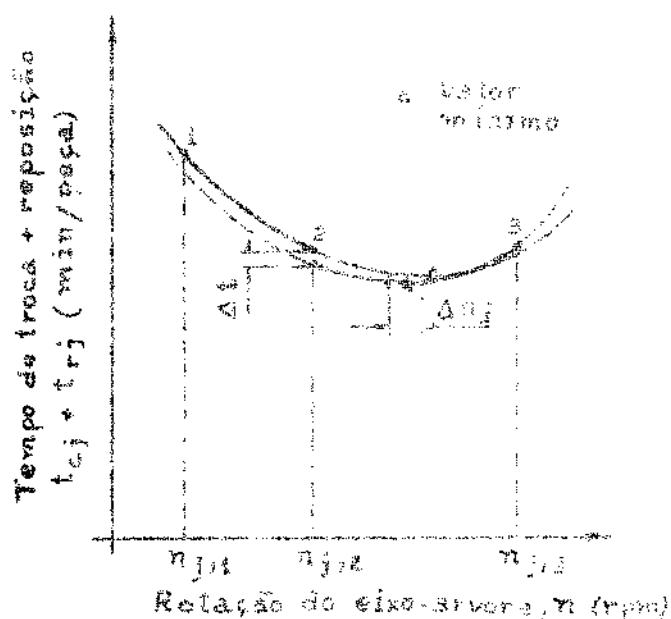


Fig. 10.1 : variação da soma dos tempos de corte e reposição $(t_{cj} + t_{rj})$, em função da rotação do eixo-arvore, para cada intervalo de validade dos expoentes x_i , das ferramentas que atuam no j ésimos estágio.

Para valores crescentes da rotação do eixo-árvore (acréscimo constante), a partir da rotação menor (inicial do campo de rotações a serem utilizadas), o valor da rotação para a condição de mínimo ocorrerá quando a diferença $D_{t,j}$ muda de sinal (negativa para positiva). Neste instante, pode-se interromper o acréscimo constante na rotação, sabendo-se então que os valores mínimos de $D_{t,j}$ estão nas vizinhanças do valor exato $D_{t,j}=0$.

Neste trabalho, a determinação do intervalo de rotações onde está localizado o valor da rotação correspondente ao mínimo tempo total de confecção, foi feita com o auxílio de um computador IBM/360, cujo programa de computação é apresentado no capítulo XVIII.

É interessante notar-se que, se logo no primeiro valor testado da rotação $n_{j,i}$ a diferença $D_{t,j}$ já é positiva, o valor procurado está abaixo do intervalo pesquisado. Analogamente, se após percorrer todo o campo de rotações, a diferença $D_{t,j}$ não troca de sinal, o valor procurado de $n_{mt,j}$ está acima dos intervalos pesquisados. Esta particular condição ocorre no exemplo de aplicação apresentado no § 12.2.

No programa de computação, são determinados:

- o intervalo de rotações onde se localiza a rotação $n_{mt,j}$
- a diferença de tempo $D_{t,j}$
- a localização da rotação em relação ao campo de rotações ou seja, abaixo, dentro, ou acima das rotações limites.

Estas situações podem ser observadas nos resultados obtidos nos exemplos de aplicação do capítulo XIX.

A diferença de tempo Δt , mostrada na figura 16.1, calculada para uma mesma coração $n_{j,k}$ ($k=1,2,\dots$) e expoentes $x_{i,k-1}, x_{i,k}$ nos intervalos de validade adjacentes, é praticamente desprezível, como pode ser notado nos resultados obtidos nos exemplos de aplicação do capítulo XIX.

16.1.2 - Casos Particulares

Quando é utilizado o único avanço em cada estágio, resulta $\bar{a}_{bi,j} = \bar{a}_j$ e $\bar{a}_{bi,j} = \bar{a}_{ti,j}$. Neste caso, a equação geral (16.3) torna-se

$$\sum_{i=1}^n \bar{a}_{ti,j} \cdot x_{i,j} = \bar{a}_{ab,j} \quad (16.4)$$

Denominando-se x_j e K_{ej} os parâmetros da Equação de Taylor Equivalente para todas as ferramentas que atuam no j ésimο estágio, das equações (12.19) e (16.4) resulta:

$$n_{mt,j} = \left[\frac{\bar{a}_{ab,j}}{\sum_{i=1}^n \bar{a}_{ti,j}} \right]^{\frac{1}{x_j}} = \frac{1000}{r} \cdot \left[\frac{\bar{a}_{ab,j}}{(\bar{a}_{ti,j})^{x_j-1} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{a}_{ti,j} \cdot \bar{a}_{ti,j}^{x_j}} \right] \quad (16.5)$$

Quando cada ferramenta envolvida na operação atua em apenas um estágio, substituindo-se o valor de K_{ej} referido à ferramenta-padrão (ver § 7.4) do j ésimο estágio, dado pela equação (9.7), ou seja,

$$T_{ej}^* = T_{ai,j}^* \cdot (v_{mt,j}^*)^{x_j} = T_{mt,j}^* \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{ej}^* \cdot n_{mt,ji}}{1000} \right)^{x_j} \quad (16.6)$$

na equação (16.6), a vida de ferramenta-pedida do j-ésimo estágio, referida à condição de máxima tempo total de confecção (máxima produção), será dada por

$$T_{mt,j}^* = (x_j - 1) \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{d_{ai,j}}{d_{ej}^*} \right)^{x_j} \cdot \frac{L_{ai,j}^-}{L_{ab,j}^-} \cdot t_{fti} \quad (16.7)$$

onde $d_{ei,j}$ é o diâmetro-equivalente das i-ésimas ferramentas que atuam no j-ésimo estágio.

Introduzindo-se nesta equação o valor do coeficiente adimensional R_j , referido ao j-ésimo estágio, dado pela equação (7.46), segue que

$$T_{mt,j}^* = (x_j - 1) \cdot R_j \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{d_{ai,j}}{d_{ej}^*} \right)^{x_j} \cdot \frac{L_{ai,j}^-}{L_{aj}^*} \cdot t_{fti} \quad (16.8)$$

Além disso, se todas as ferramentas envolvidas no j-ésimo estágio deslocam-se apenas na direção principal de avanço (ver 2.2.4), e executam um único ciclo de usinagem, como mostrado nas figuras 9.2 e 12.2 (2º e 3º estágios), resulta: $d_{ei,j} = d_i$ e $L_{ai,j}^- = L_{ai}$. Nestes casos, a equação (16.8) simplificar-se para

$$T_{mt,j}^* = (x_j - 1) \cdot R_j \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{d_i}{d_{ej}^*} \right)^{x_j} \cdot \frac{L_{ai}}{L_{aj}^*} \cdot t_{fti} \quad (16.9)$$

deduzidas a primeira vez por M_c Callaghan [23] e Texeiras [56], que utilizaram diferentes métodos de cálculo.

Se os tempos de troca são iguais para todas as ferramentas que atuam no j-ésimo estágio, as equações (16.3), (16.5) e (16.7) simplificam-se para

$$d_{ej}^* \cdot n_{mt}^{x_j} = L_{ab,j}^- \quad (16.10)$$

$$n_{mt,j} = \frac{1000}{\pi \cdot d_{ej}} \cdot \left[\frac{v_{ej}}{(x_j - 1) \cdot t_{tj}} \right]^{\frac{1}{x_j}} \quad (16.11)$$

$$t_{mt,j}^* = (x_j - 1) \cdot \left(\frac{d_{ej}}{d_{ej}^*} \right)^{x_j} \cdot t_{tj} \quad (16.12)$$

onde d_{ej} é o diâmetro-equivalente no j ésimο estágio, e t_{tj} o tempo de troca, das i ésimas ferramentas que atuam no j ésimο estágio.

Quando apenas uma ferramenta atua em cada estágio, resulta $N = n$ e $i = j$. Nestes casos, a equação (16.12) torna-se:

$$t_{mt,j} = (x_j - 1) \cdot t_{tj} \quad (16.13)$$

e a velocidade de corte para o mínimo tempo total de confecção ($v_{mt,j}$), em cada j ésimο estágio, será dada por:

$$v_{mt,j} = \left[\frac{k_{ej}}{(x_j - 1) \cdot t_{tj}} \right]^{\frac{1}{x_j}} \quad (16.14)$$

Quando se trata de diâmetro mantido constante (peça ou ferramenta), a equação (16.13) simplifica-se para

$$v_{mt,j} = \left[\frac{k_j}{(x_j - 1) \cdot t_{tj}} \right]^{\frac{1}{x_j}} \quad (16.15)$$

com uma notação de k um pouco mais simples:

$$n_{mt,j} = \frac{1000}{\pi \cdot d_j} \cdot \left[\frac{k_j}{(x_j - 1) \cdot t_{tj}} \right]^{\frac{1}{x_j}} \quad (16.17)$$

que constam na maioria dos manuais.

16.2 - Velocidade de corte constante

16.2.1 - Caso geral

Quando a velocidade de corte é mantida constante em cada j ésimο estágio, a determinação do valor mínimo da função $c_t(v)$, de a-

cõrdo com as condições anteriormente formuladas (§ 15.2), pode ser feita, pois as funções $t_{rc}(v)$ e $t_{tr}(v)$ são deriváveis.

Das equações gerais (7.43) e (11.30) resultam as derivadas primeiras:

$$\frac{\partial}{\partial v} t_{rc}(v) = - \frac{\pi}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{\frac{b_{ab,j}}{a_{ab,j}} \cdot d_{ab,j}}{a_{bj} \cdot v_{b,j}^2} \quad (16.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial v} t_{tr}(v) = \frac{\pi}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^N \left[\frac{\frac{b_{bi,j}}{a_{bi,j}}}{\frac{b_{bi,j}}{a_{bi,j}}} \cdot v_{bi,j}^{x_i-2} \right] \quad (16.19)$$

e de acôrdo com a igualdade estabelecida pela equação (15.4), tem-se:

$$\sum_{j=1}^N \frac{\frac{b_{ab,j}}{a_{ab,j}} \cdot d_{ab,j}}{a_{bj} \cdot v_{b,j}^2} = \sum_{j=1}^N \left[\frac{\frac{b_{bi,j}}{a_{bi,j}}}{\frac{b_{bi,j}}{a_{bi,j}}} \cdot v_{bi,j}^{x_i-2} \right]$$

onde $v_{mt,j}$ é a velocidade de corte da ferramenta-base para que o tempo total de confecção, em cada j ésimo estágio, assumo seu valor mínimo.

Para que a igualdade acima seja satisfeita, é necessário e suficiente que os termos correspondentes do desenvolvimento em série sejam iguais, isto é,

$$\frac{1}{v_{ab,j}^{x_i}} \cdot \left(\frac{b_{ab,j}}{a_{ab,j}} \cdot d_{ab,j} \right) = \frac{b_{bi,j}}{a_{bi,j}} \cdot v_{mt,j}^{x_i-2}$$

ou seja,

$$\boxed{\sum_{i=x}^m \frac{b_{bi,j}}{a_{bi,j}} \cdot v_{mt,j}^{x_i} = \frac{\frac{b_{ab,j}}{a_{ab,j}} \cdot d_{ab,j}}{a_{bj}}} \quad (16.20)$$

que é a equação geral para o cálculo da velocidade de corte ($v_{mt,j}$) para o mínimo tempo total de confecção (máxima produção), por peça, em cada estágio, quando as ferramentas são trocadas individualmente.

Comparando-se as equações gerais (16.3) e (16.20), relativas

As condições de rotação constante do eixo-ferramenta e velocidade de corte mantida constante, verifica-se que elas são da mesma forma, o que era de se esperar. Portanto o programa de computação fornecido no capítulo XVIII, aplicável à condição de velocidade de corte constante, segue as mesmas linhas básicas de relativo à rotação constante.

16.2.2 - Casos particulares

Quando é utilizado um único estágio em cada estágio, a equação geral (16.20) torna-se:

$$\sum_{i=1}^m \left[\frac{K_{ei}}{d_{et,i}^{x_j}} \right] = \left[\frac{K_{ej}}{d_{et,j}^{x_j}} \right] \quad (16.21)$$

Para os estágios onde todas as ferramentas envolvidas apresentam uma mesma equação de Taylor Equivalente, das equações (12.10) e (16.21), resulta

$$v_{et,j} = \left[\frac{\sum_{i=1}^m \left[\frac{K_{ei}}{d_{et,i}^{x_j}} \right]}{\sum_{i=1}^m \left[\frac{K_{ei}}{d_{et,i}^{x_j}} \right]} \right]^{\frac{1}{x_j}} = \left[\frac{K_{ej}}{\left[\frac{d_{et,j}}{d_{et,i}} \right]^{x_j} \cdot \left[\frac{K_{ei}}{d_{et,i}^{x_j}} \right]} \right]^{\frac{1}{x_j}} \quad (16.22)$$

Quando os tempos de troca são iguais para todas as ferramentas que atuam no j-ésimo estágio, tem-se:

$$v_{et,j} = \left[\frac{K_{ej}}{d_{et,j}^{x_j}} \right]^{\frac{1}{x_j}} = \left[\frac{K_{ej}}{d_{et,i}^{x_j}} \right]^{\frac{1}{x_j}} \quad (16.23)$$

pois K_{ei} é dado pela equação (11.23) e $d_{et,i}$ pela equação (11.20). Neste caso, a vida da ferramenta-talve será dada por:

$$T_{mtb,j} = (x_j - 1) \cdot t_{tj} + \left(\frac{d_{et,j}}{d_{et,i}} \right)^{x_j} \quad (16.24)$$

Se apenas uma ferramenta atua em cada estágio, segue que

$$T_{mt,j} = (x_j - 1) \cdot t_{tj} \quad (16.25)$$

Para a velocidade de vórtice, temos

$$\hat{v}_{\text{vrt},j} = \left[\frac{R_{\theta,j}}{(x_j - 1) \cdot (x_j + 1)} \right]^{1/2} \quad (16.26)$$

Comparando-se as equações (16.13) e (16.14), para a condição de rotação constante do eixo-árvore, com as equações (16.25) e (16.26), verifica-se que elas são idênticas, o que era de se esperar.

17 - MÍNIMO CUSTO

Como a equação geral do custo total de confecção (equação-14.34) satisfaz as condições formuladas no capítulo XV, tem-se as seguintes identidades:

$F(n) = C_c$ = custo total de confecção, por peça.

$F_i = C_i$ = custo do material da peça e dos tempos improdutivos, por peça.

$F_c(n) = C_{tc}$ = custo total de corte, por peça.

$F_r(n) = C_{tr}$ = custo total de reposição, por peça.

A seguir, serão deduzidas as equações gerais que definem o mínimo custo por peça usinada, nos casos gerais em que a rotação do eixo-árvore ou a velocidade de corte são mantidas constantes em cada estágio, e as ferramentas são trocadas individualmente.

17.1 - Rotação constante do eixo-árvore

17.1.1 - Caso geral

Como as funções C_{tc} e C_{tr} são deriváveis, como demonstrado a seguir, e portanto contínuas num dado intervalo $[n_a, n_b]$, o valor mínimo do custo total de confecção C_c ocorrerá quando sua derivada-primeira for nula, como formulado no capítulo XV.

Das equações gerais (14.4) e (14.19), resultam as derivadas primeiras

$$\frac{\partial C_{tc}}{\partial n} = -\frac{S}{q} \cdot \sum_{j=1}^k \frac{f_{ab,j}}{a_{bj} \cdot n_j^2} \quad (17.1)$$

$$\frac{\partial C_{tr}}{\partial n} = \frac{1}{q} \cdot \sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=1}^m \frac{y_i \cdot n_i^{x_i-2}}{a_{bi,j}} \cdot \frac{C_{ri}}{r_{ri}} \right] \quad (17.2)$$

De acordo com a equação (15.4), que estabelece a igualdade

das derivadas primeiras, segue que

$$\sum_{j=1}^N \left[\sum_{i=a}^m \gamma_{i,j} \cdot \frac{x_i^{n_{mc,j}-2}}{a_{bi,j}} \cdot \frac{c_{fi}}{f_{fi}} \right] = 0 \quad \text{e} \quad \sum_{j=1}^N \frac{\bar{a}_{b,j}}{a_{bj}^2 - n_{mc,j}} \quad (17.3)$$

onde $n_{mc,j}$ é a rotação do eixo-árvore para que o custo total de confecção, por peça, seja mínimo.

Para que a igualdade dos j ésimos termos da equação (17.3) seja satisfeita, é necessário e suficiente que os termos correspondentes do desenvolvimento em série sejam iguais, ou seja

$$\sum_{i=a}^m \gamma_{i,j} \cdot x_i^{n_{mc,j}} \cdot \frac{c_{fi}}{a_{bi,j} \cdot f_{fi}} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\bar{a}_{b,j}}{a_{bj}^2} \quad (17.4)$$

que é a equação geral para o cálculo da rotação do eixo-árvore ($n_{mc,j}$), em cada j éximo estágio, para que se tenha a condição de mínimo custo por peça usinada, quando as ferramentas são trocadas individualmente.

Para facilitar o cálculo de $n_{mc,j}$, principalmente nas operações de usinagem onde atuam muitas ferramentas, foi elaborado um programa de computação, fornecido no capítulo XVIII. Deve-se notar que a melhor solução para o cálculo de $n_{mc,j}$ é a numérica, dando-se valores sucessivamente crescentes para n , dentro de um dado intervalo de validade de x_i , e verificando-se se é satisfeita a equação (17.4). Refinando-se os intervalos de variação, obtêm-se valores cada vez mais próximos do valor exato, dentro da precisão desejada.

Como as equações (16.3) e (17.4) são da mesma forma, valem as considerações feitas no § 16.1.1, estendidas agora à condição de mínimo custo, com a diferença $\theta_{c,j}$ dada por:

$$\theta_{c,j} = \sum_{i=a}^m \gamma_{i,j} \cdot x_i^{n_j} \cdot \frac{c_{fi}}{a_{bi,j} \cdot f_{fi}} - 0 \quad \text{e} \quad \frac{\bar{a}_{b,j}}{a_{bj}^2}$$

calculada nos sucessivos intervalos de validade dos expoentes x_i .

17.3.2 - Casos particulares

a) Um único avanço em cada estágio

Seja $\bar{t}_{ai,j} = \bar{t}_j + \sum_{i=1}^n a_{ai,j} \cdot \bar{t}_{ai,j} + \bar{t}_{ai,j}$ a equação geral (17.4)

será:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot a_{ai,j} \cdot \frac{C_{ai}}{C_{ai}} = R_j \cdot \bar{t}_{ai,j} \quad (17.5)$$

b) Vezes (número de vezes) em cada estágio

Neste caso, a equação geral (17.5), para um único avanço em cada estágio, tornase:

$$x_{oc,j} = \left[\frac{S \cdot \bar{t}_{oc,j}}{\sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot \frac{C_{ai}}{C_{ai}}} \right]^{1/x_j} = \frac{1000}{x_j} \cdot \left[\frac{S \cdot \bar{t}_{oc,j} \cdot K_{aj}}{(x_j - 1) \cdot \sum_{i=1}^n a_{ai,j} \cdot \frac{C_{ai}}{C_{ai}}} \right]^{1/x_j} \quad (17.6)$$

Quando as ferramentas atuam em apenas um estágio, substituiu-se o valor de K_{aj} referido à (introdução) (ver § 7.4), dado por

$$K_{aj}^* = \bar{t}_{oc,j} \cdot (x_j - 1) \cdot \left[\frac{S \cdot \bar{t}_{oc,j}}{\sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot \frac{C_{ai}}{C_{ai}}} \right]^{1/x_j} \quad (17.7)$$

na equação (17.6), a vida da ferramenta $\bar{t}_{oc,j}$, $\bar{t}_{oc,j}$, $\bar{t}_{oc,j}$, $\bar{t}_{oc,j}$ será dada por

$$\bar{t}_{oc,j}^* = \left[\frac{(x_j - 1)}{S \cdot \bar{t}_{oc,j}} \right]^{1/x_j} \cdot \left[\frac{S \cdot \bar{t}_{oc,j}}{\sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot \frac{C_{ai}}{C_{ai}}} \right]^{1/x_j} \quad (17.8)$$

com R_j dada pela equação (17.4).

Além disso, quando todas as ferramentas que atuam no j-ésimo estágio deslocam-se apenas na direção principal de avanço (ver § 2.4), resulta $d_{aj} = d_j$ e $\bar{t}_{ai} = \bar{t}_{aj}$. Nestes casos, a equação (17.8) simplificar-se para

$$\bar{t}_{oc,j}^* = \left[\frac{(x_j - 1)}{S \cdot \bar{t}_{oc,j}} \right]^{1/x_j} \cdot \left[\frac{S \cdot \bar{t}_{oc,j}}{\sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot \frac{C_{ai}}{C_{ai}}} \right]^{1/x_j} \cdot \bar{t}_{aj} \cdot C_{ai} \quad (17.9)$$

já deduzidas por de Calaferte [33] e Factorin [34].

Se os custos c_{ij} são iguais para todas as ferramentas que atuam no j -ésimo estágio, as equações (17.8) e (17.9) serão dadas por

$$T_{m,j} = \left[\frac{S \cdot \left(\frac{K_{ej}}{K_{ej} - 1} \right)}{K_{ej} - 1} \right]^{\frac{1}{K_{ej}}} = \frac{1000}{\pi \cdot d_{ej}} \cdot \left[\frac{S \cdot K_{ej}}{(K_{ej} - 1) \cdot C_{ij}} \right]^{\frac{1}{K_{ej}}} \quad (17.10)$$

$$T_{m,j}^2 = (d_{ej} - 1) \cdot \frac{1}{S} \cdot \left(\frac{K_{ej}}{K_{ej} - 1} \right)^{\frac{1}{K_{ej}}} \quad (17.11)$$

onde d_{ej} é o diâmetro equivalente, para todas as ferramentas que atuam no j -ésimo estágio.

a) Uma única ferramenta atua em cada estágio

Se em todos os casos $i=j$, a eq. (17.11) torna-se

$$T_{m,j}^2 = \frac{(K_{ej} - 1) \cdot C_{ij}}{S} \quad (17.12)$$

e a velocidade de corte será

$$V_{m,j} = \left[\frac{K_{ej} \cdot S}{(K_{ej} - 1) \cdot C_{ij}} \right]^{\frac{1}{K_{ej}}} \quad (17.13)$$

Para facilitar o cálculo de $T_{m,j}$ e $V_{m,j}$ em cada estágio, foi elaborada uma tabela de cálculo, já publicada pelo autor, que se encontra anexada à contracapa interna da referência bibliográfica [36].

b) Várias ferramentas atuando em vários estágios

Assim como, como mostrado na figura 12.2, resulta (a), e portanto resulta para todos os estágios uma velocidade de corte

$$V_{m,j} = \left[\frac{K_{ej} \cdot S}{(K_{ej} - 1) \cdot C_{ij}} \right]^{\frac{1}{K_{ej}}} \quad (17.14)$$

Analisando-se esta equação verifica-se que, embora em cada estágio as demais condições sejam diferentes, deverá utilizar uma mesma velocidade de corte em todos os estágios. Isso se justifica -

pelo fato de que, para cada tipo de ferramenta e operação de corte, existe um avanço ótimo (ver § 5.5), que representa o comportamento da vida da ferramenta em relação ao avanço em todos os estágios.

17.2 - Velocidade de corte constante

17.2.1 - Caso geral

Mantendo-se constante a velocidade de corte em cada j é-simo estágio, o custo total de confecção, por peça, é dado pela equação geral (14.1), onde as parcelas C_{tc} (custo total de corte) e C_{tr} (custo total de reposição) são deriváveis, como demonstrado a seguir. Neste caso, valem as considerações formuladas no capítulo - XV.

Nas equações gerais (14.5) e (14.27) resultam as derivadas primeiras:

$$\frac{\partial C_{tc}}{\partial v} = \frac{\pi \cdot S}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{f_{ab,j} \cdot d_{ab,j}}{a_{aj,j} \cdot v_{mc,j}^2} \quad (17.15)$$

$$\frac{\partial C_{tr}}{\partial v} = \frac{\pi}{1000 \cdot q} \cdot \sum_{j=1}^N \left[\frac{f_{ab,j} \cdot d_{ab,j}}{a_{aj,j} \cdot v_{mc,j}^2} \cdot C_{ti} \right] \quad (17.16)$$

e de acordo com a equação (13.4), que estabelece a condição de mínimo, tem-se:

$$\sum_{j=1}^N \left[\frac{f_{ab,j} \cdot d_{ab,j}}{a_{aj,j} \cdot v_{mc,j}^2} \cdot C_{ti} \right] = S \cdot \sum_{j=1}^N \frac{f_{ab,j} \cdot d_{ab,j}}{a_{aj,j} \cdot v_{mc,j}^2}$$

onde $v_{mc,j}$ é a velocidade de corte da ferramenta-base, em cada j é-simo estágio, para que o custo total de confecção seja mínimo.

Para que a igualdade acima seja satisfeita, é necessário e suficiente que os termos correspondentes, em cada j é-simo estágio, sejam iguais, ou seja,

$$\sum_{i=1}^m \frac{E_{i,j} \cdot C_{fi}}{A_{bi,j} \cdot r_{fi}} \cdot \hat{v}_{mc,j}^{\alpha_j} = P \cdot \frac{\hat{c}_{ab,j}}{A_{bj}} \cdot d_{eb,j} \quad (17.17)$$

que é a equação geral para o cálculo da velocidade de corte constante ($\hat{v}_{mc,j}$), em cada j ésimo estágio, para que o custo total da confecção assuma seu valor mínimo.

O programa de computação fornecido no capítulo XVIII, servirá para facilitar o cálculo de $\hat{v}_{mc,j}$. É interessante notar-se que a melhor solução é a numérica, dando-se valores sucessivamente crescentes para a velocidade de corte $\hat{v}$, dentro de um dado intervalo de validade da equação de Taylor equivalente, e verificando-se se é satisfeita a equação (17.15). A precisão obtida será função dos sucessivos refinamentos dos acréscimos fornecidos.

Como as equações (17.6) e (17.17) são da mesma forma, valem as mesmas considerações formuladas nos § 16.1.1 e § 17.1.1.

17.2.2 - Casos particulares

Quando todas as ferramentas que atuam no j ésimo estágio apresentam uma mesma equação de Taylor equivalente, na equação geral (17.17), resulta:

$$\hat{v}_{mc,j} = \left[\frac{S \cdot \hat{c}_{ab,j} \cdot d_{eb,j}}{\sum_{i=1}^m \frac{E_{i,j} \cdot C_{fi}}{r_{fi}}} \right]^{\frac{1}{\alpha_j}} = \left[\frac{S \cdot \hat{c}_{ab,j} \cdot d_{eb,j} \cdot \alpha_j}{(\alpha_j - 1) \cdot \sum_{i=1}^m \frac{E_{i,j} \cdot C_{fi}}{r_{fi}}} \right]^{\frac{1}{\alpha_j}} \quad (17.18)$$

Se os custos C_{fi} são iguais para todas as ferramentas que atuam no j ésimo estágio, do conceito de ferramenta-equivalente, tem-se:

$$\bar{v}_{mc,j} = \left[\frac{S \cdot \bar{c}_{ab,j} \cdot d_{cb,j} \cdot f_{ij}}{B_{ej} \cdot C_{fj}} \right] = \left[\frac{S \cdot \bar{c}_{ab,j} \cdot d_{cb,j} \cdot f_{ij}}{(x_j - 1) \cdot C_{fj} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{d_{ai,j} \cdot d_{ci,j}}{c_i^{x_j-1}}} \right] \quad (17.19)$$

Considerando-se o valor da diferença-equivalente de diâmetros c_{ej} dada pela equação (11.16), segue que

$$\bar{v}_{mc,j} = \left[\frac{K_{ej} \cdot S \cdot c_{ab,j}^{x_j}}{(x_j - 1) \cdot C_{fj} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{d_{ai,j}^{x_j} \cdot d_{ci,j}}{c_i^{x_j-1}}} \right]$$

ou seja,

$$\bar{v}_{mc,j} = \frac{d_{cb,j}}{d_{ej}} \cdot \left[\frac{K_{ej} \cdot S}{(x_j - 1) \cdot C_{fj}} \right]^{\frac{1}{x_j}} \quad (17.20)$$

e portanto, para a fragmentação basta tomar-se uma vida dada por

$$T_{mc,j} = \frac{(x_j - 1) \cdot C_{fj}}{S} \cdot \left(\frac{d_{cb,j}}{d_{ej}} \right)^{x_j} \quad (17.21)$$

Se apenas uma fragmentação atua em cada estágio, segue que

$$T_{mc,j} = \frac{(x_j - 1) \cdot C_{fj}}{S} \quad (17.22)$$

$$\bar{v}_{mc,j} = \left[\frac{K_{ej} \cdot S}{(x_j - 1) \cdot C_{fj}} \right]^{\frac{1}{x_j}} \quad (17.23)$$

É interessante notar-se que as equações (17.22) e (17.23) são idênticas às equações (17.12) e (17.13), como era de se esperar.

18. - PROGRAMAS DE COMPUTAÇÃO

As equações gerais anteriormente fornecidas permitem a análise econômica de todas as operações de usinagem, com ferramentas monocortantes ou multicortantes.

Quando atua um número elevado de ferramentas em cada estágio, e principalmente, quando as ferramentas não satisfazem uma mesma Equação de Taylor Simplificada (ver § 9.1), a análise econômica das operações de usinagem é bastante simplificada pela utilização dos programas de computação apresentados a seguir:

Embora seja possível utilizar-se um único programa para o cálculo de todas as grandezas envolvidas, para maior simplicidade e eliminação de possíveis erros nos dados de entrada, o programa de cálculo foi dividido em duas partes distintas:

- a) determinação dos diâmetros-equivalentes para todas as ferramentas, em todos os estágios onde elas atuam.
- b) determinação das condições de mínimo custo, máxima produção, tempos e custos de usinagem.

Como as equações gerais, correspondentes às condições de rotação constante e velocidade de corte mantida constante, apresentam a mesma forma, foi possível a utilização de um mesmo programa de computação, salvo apenas a introdução de algumas constantes.

Nas figuras 18.1 e 18.2 são mostrados os programas para o cálculo dos diâmetros-equivalentes das ferramentas e para a análise econômica da operação de usinagem, correspondentes à condição de rotação do eixo-árvore constante. Na figura 18.3 é mostrado o fluxograma para o cálculo dos diâmetros-equivalentes das ferramentas, para a condição da velocidade de corte mantida constante. Nesta última condição, foi omitido o fluxograma para a análise econômica, ser da mesma forma que o correspondente à condição de rotação constante

do eixo-árvore.

Na solução dos exemplos de aplicação apresentados no capítulo XIX, foi utilizado um computador IBM/360, do Centro de Computação da Universidade Estadual de Campinas. A forma de apresentação dos resultados obtidos, bastante fácil de ser compreendida e analisada, também é mostrada nos exemplos de aplicação do capítulo XIX.

A listagem dos programas foi omitida neste trabalho, por ser demasiado longa e de difícil compreensão.

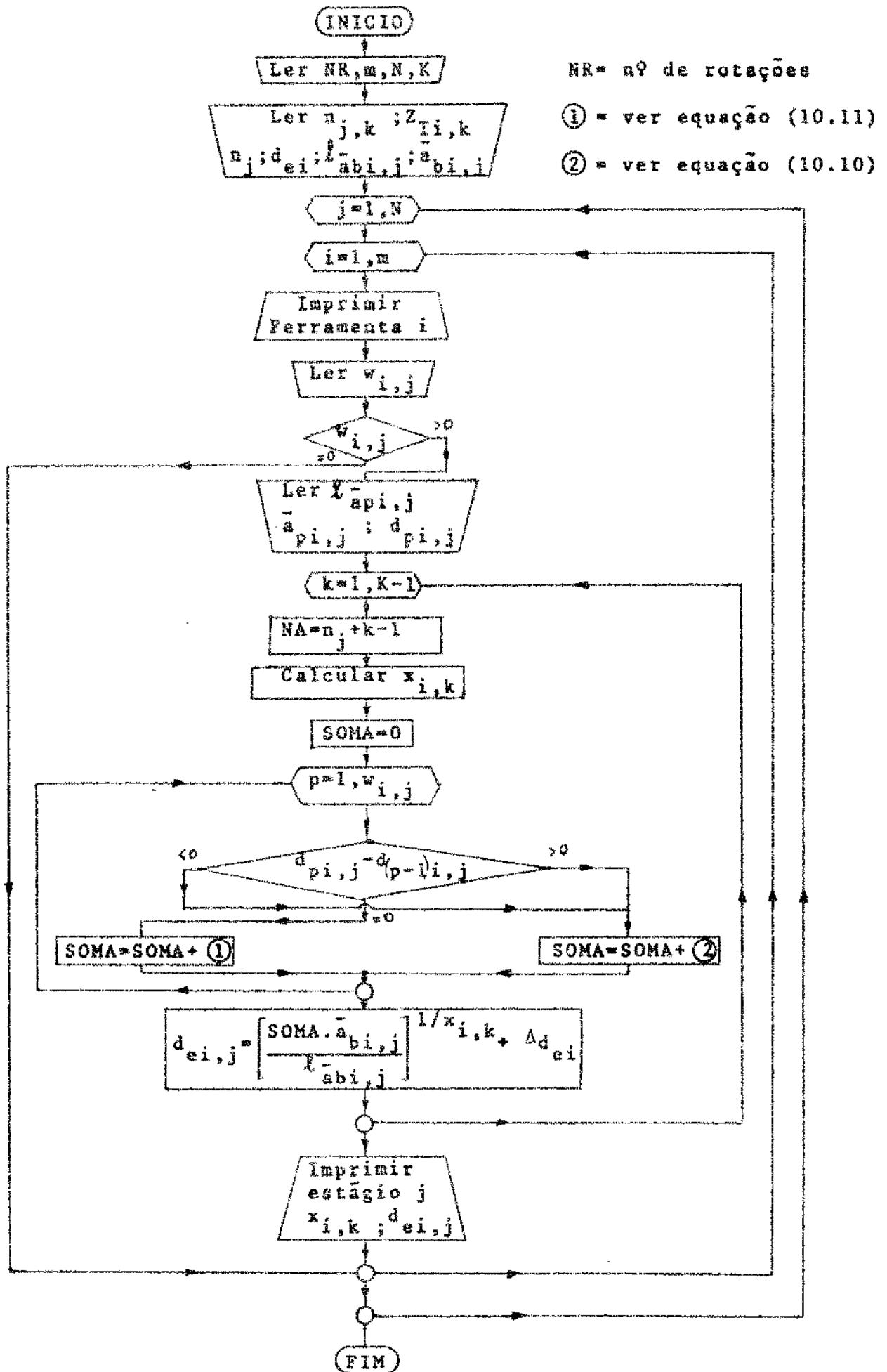
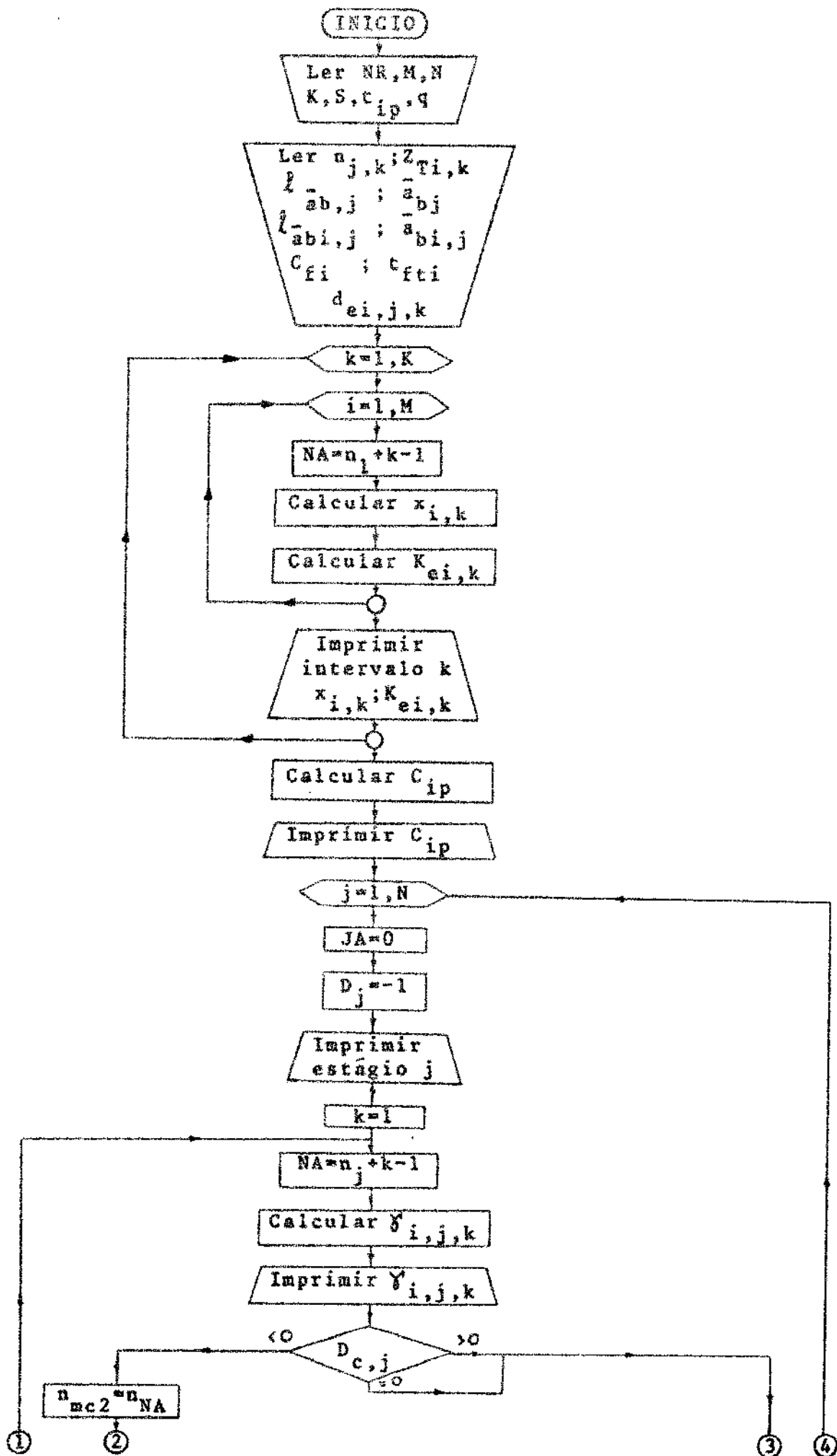
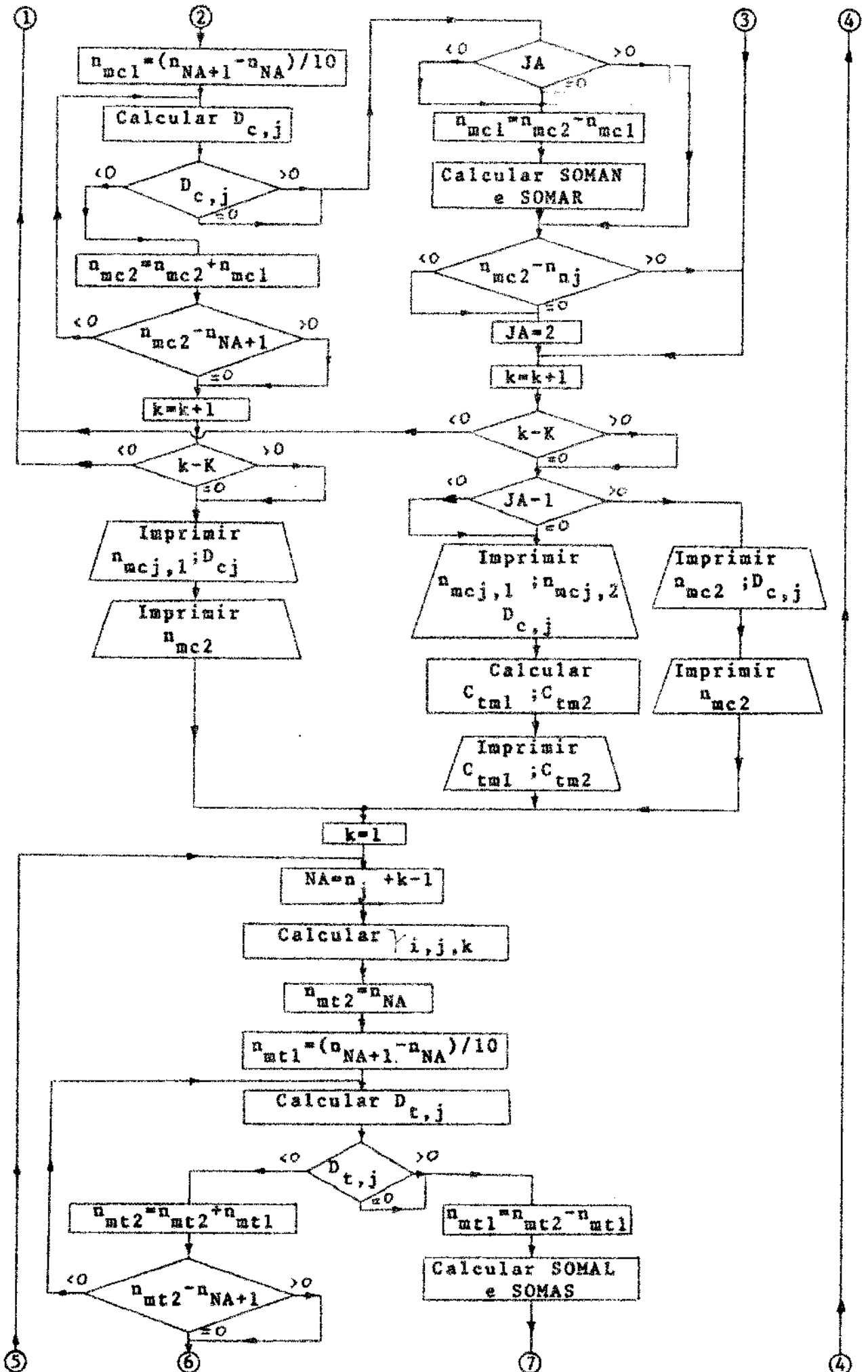


Fig. 18.1 - Fluxograma para cálculo do diâmetro-equivalente,
para a condição de rotação constante do eixo-arvore.





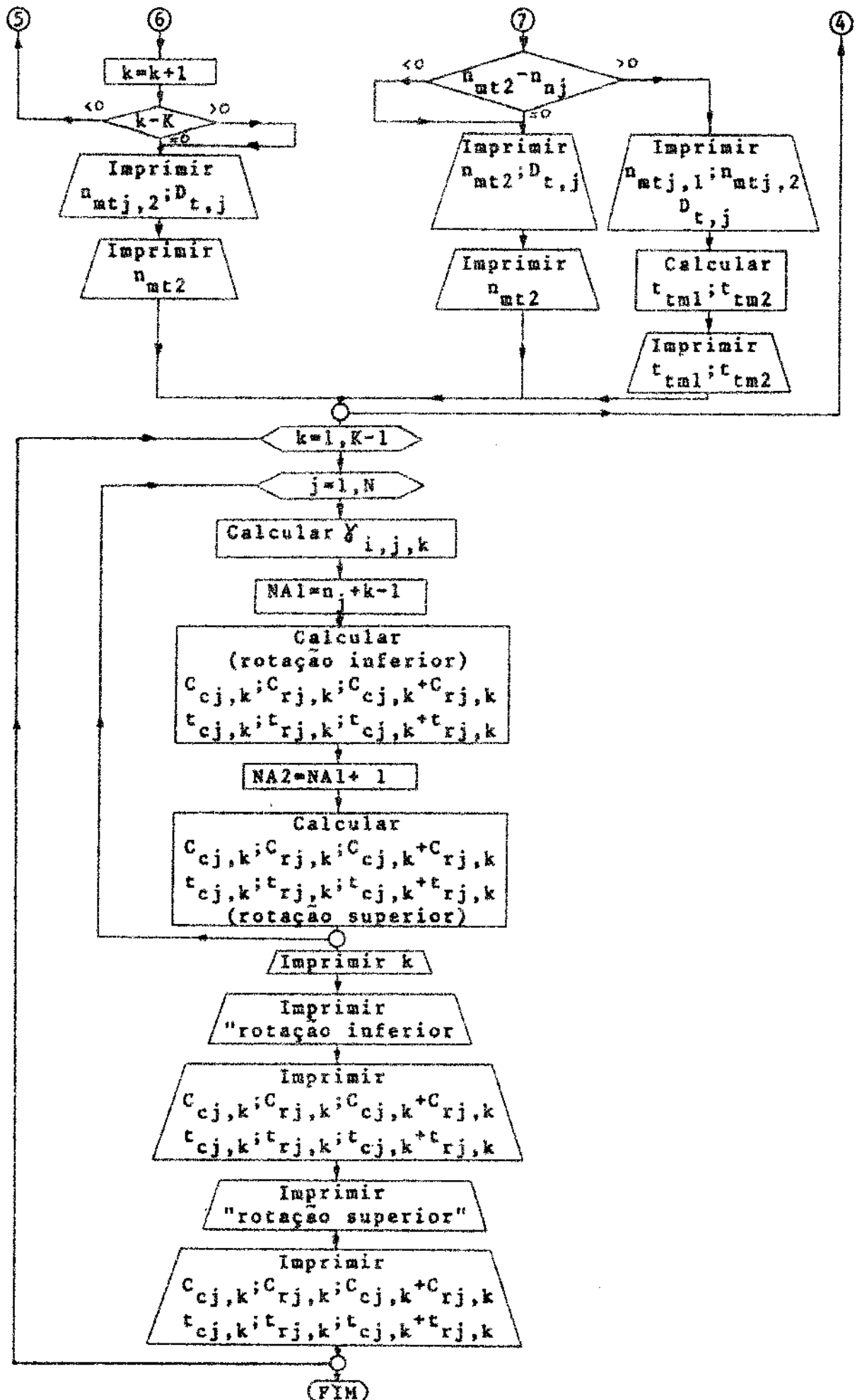


Fig. 18.2 - Fluxograma da análise econômica, para a condição de rotação constante.

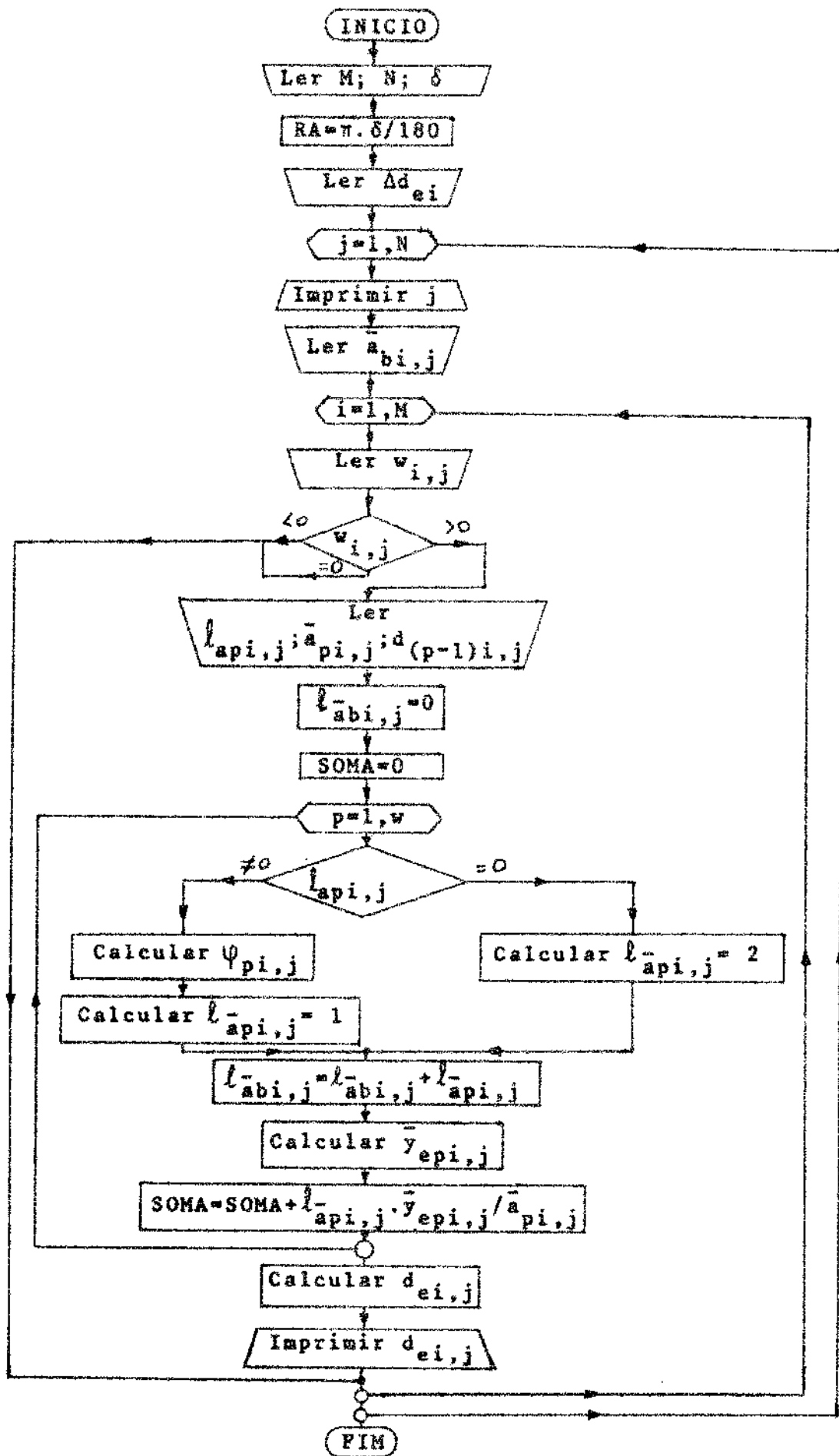


Fig. 18.3 - Fluxograma para cálculo dos diâmetros-equivalentes das ferramentas, para a condição de velocidade de corte mantida constante.

19 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

19.1 - Objetivos

Serão apresentados a seguir, quatro exemplos de aplicação do método proposto para a análise das condições econômicas de usinagem.

O primeiro exemplo refere-se a copiagem de perfis curvilíneos, com diferentes avanços do carro, na qual atua apenas uma ferramenta de corte. O segundo exemplo de aplicação refere-se à copiagem de perfis retilíneos e curvilíneos, com duas ferramentas atuando simultaneamente e uma outra ferramenta atuando independentemente, em outro estágio. O terceiro exemplo mostra a aplicabilidade do método, quando uma mesma ferramenta atua com diferentes condições de usinagem, em dois estágios. O último exemplo de aplicação refere-se à condição de velocidade de corte mantida constante, por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore, para a mesma peça do primeiro exemplo.

Para uma melhor compreensão do método proposto, no primeiro exemplo será mostrada a evolução do processo de cálculo e os resultados intermediários, apresentados em forma de tabelas e gráficos. Nos demais exemplos de aplicação, serão fornecidos apenas os resultados finais obtidos com o programa de computação apresentados no capítulo XVIII.

Embora o método proposto não tenha limitação quanto ao número de ferramentas e estágios, nos exemplos apresentados as operações de usinagem são executadas por no máximo três ferramentas. Isto permitirá uma melhor visualização e análise dos resultados obtidos. Por outro lado, embora o método seja aplicável a outras operações de usinagem, os exemplos apresentados referem-se à operação básica de torneamento, onde os diâmetros usinados são variáveis.

Alguns dados econômicos dos exemplos de aplicação foram alterados em relação aos valores reais, por se tratar de ensaios executados em indústrias privadas. Porém, os resultados aqui apresentados em nada alteram a confiabilidade do método proposto, que independe de tais dados.

19.2 - Torneamento de eixos para rodéis de vagões ferroviários

Copiagem de perfis curvilíneos, com diferentes avanços, pa

na a condição de rotação constante do eixo-árvore. Utilização de uma única ferramenta, em um único estágio.

19.2.1 - Conceituação do problema

Trata-se da copiagem longitudinal de um eixo para rodeiro - de vagão ferroviário, em aço ABNT 1050, forjado, cujas dimensões são dadas na figura 19.1. O torno utilizado foi um da marca *George-Fischer* (procedência suíça), do tipo G + F - KDM-18. O porta-ferramentas empregado foi de procedência nacional, marca *Sandvik-Coromant*, tipo R.170.3 - 5232, com insertos de fixação mecânica de metal duro (com uma camada de óxido de titânio) tipo GC-125, e dimensões TNMM-220416, mostrados na figura 19.2. A operação de copiagem foi mostrada na figura 10.3.

O estudo a seguir apresentado, visa proporcionar uma perfeita compreensão da parte teórica anteriormente desenvolvida. Na prática, é preferível utilizar-se os programas de computação apresentados no capítulo XVIII, o que será feito no § 19.2.14.

Os dados econômicos e auxiliares para a solução do problema são:

- Rotação do eixo-árvore: $n = 250-300-355-425$ rpm
- Avanço do carro: $\bar{a} = 0,36 - 0,50 - 0,25$ mm/v (ver figura 19.1)
- Dimensões usinadas: (ver figura 19.1)
- Profundidade de corte: variável
- Número médio de peças usinadas por vida da ferramenta: - ver tabela XIX.4 e figura 19.1
- Posição do desgaste convencional da ferramenta:
 $\Delta d_{eo} = 6,4$ mm
- Tempo de troca da ferramenta: $t_{ft} = 0,50$ min
- Tempos improdutivos da operação: $t_{ip} = 6,3$ min/peça
- Custo por vida da ferramenta: $C_{fTi} = 5,81$ Cr\$
- Custo da mão de obra, salário e sobretaxas: $S = 0,50$ Cr\$/min.

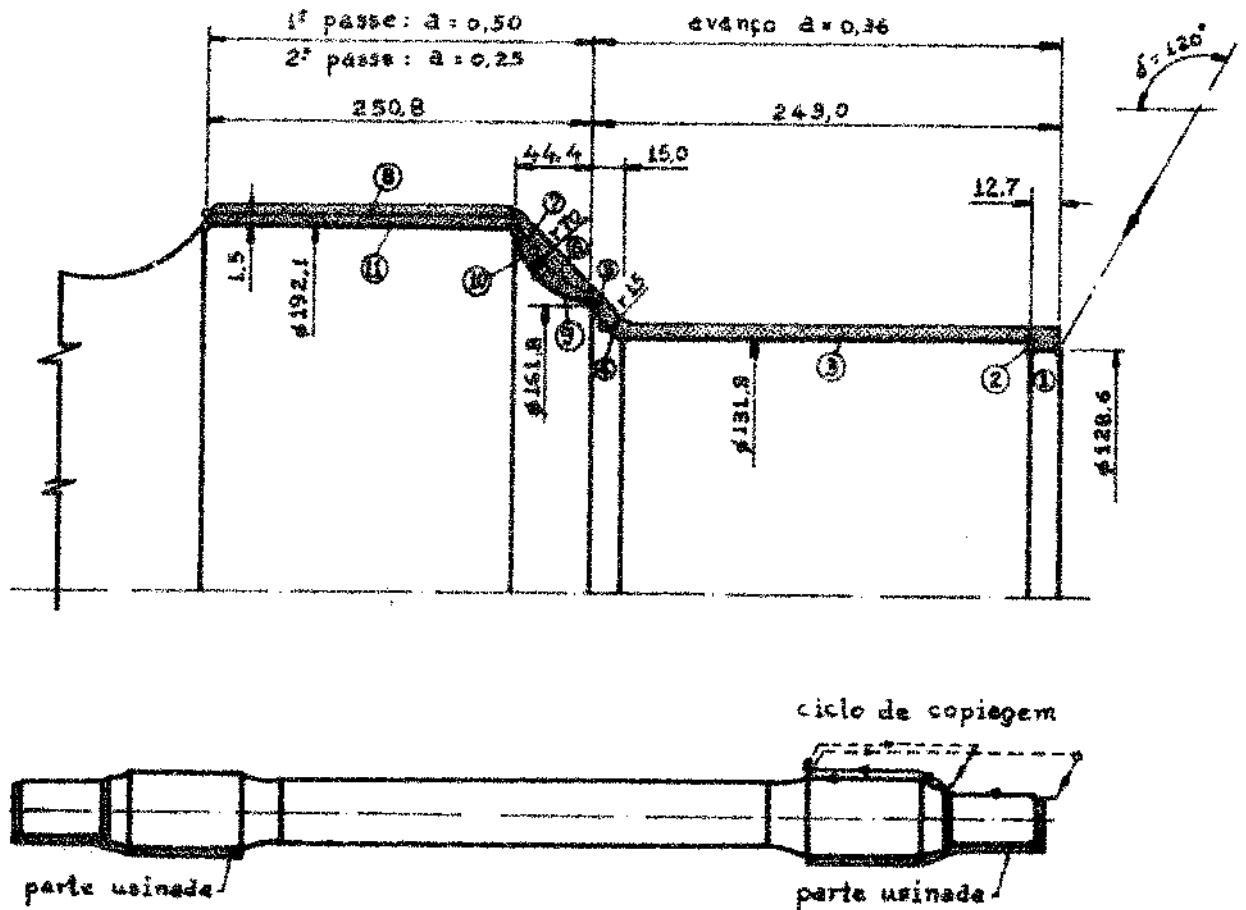


Fig. 19.1 - Dimensões e ordenação dos perfis usinados no eixo para rodeiro de vagão ferroviário.

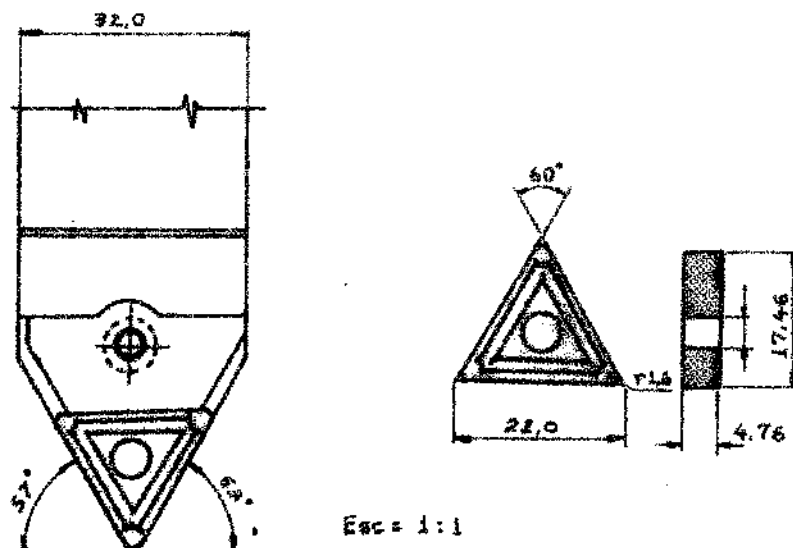


Fig. 19.2 - Porta-ferramenta e inserto de fixação mecânica, utilizados na operação de cópiagem do eixo para rodeiro.

19.2.2 - Cálculo dos percursos de avanço (ℓ_a)

Aplicando-se a equação (3.11) aos perfis usinados, cuja ordenação é mostrada na figura 19.1, os valores obtidos são fornecidos na tabela XIX.1. Nos raios de concordância (r70 e r15), os respectivos perfis usinados foram divididos em duas partes, para a sua utilização no parágrafo 19.2.7, onde será calculado o diâmetro-equivalente. No perfil 2, onde o ângulo de rampa assume o valor limite $\alpha = 90^\circ$, foi utilizada a equação (3.7), devido à indeterminação surgida ($0 \cdot \infty$), como sugerido no § 3.3.2.

Para uma melhor visualização das diferenças entre os percursos principal de avanço da ferramenta (ℓ_{ap}) e de avanço de carro do torno (ℓ_{ap}^-), em cada parte usinada com um mesmo avanço, a figura 19.3 mostra a variação da diferença ($\ell_{ap}^- - \ell_{ap}$) em função do percurso de avanço de carro (ℓ_{ap}).

Tabela XIX.1 - Valores calculados dos percursos de avanço de carro (ℓ_a) em cada perfil usinado.

Perfil nº	Percurso de avanço (mm) ℓ_{ap}	Diâmetro usinado (mm)		Avanço do carro (mm/v) $\bar{a}_p$	Ângulo de rampa (graus) α°	Coef. de correlação φ	Percurso de avanço do carro (mm) ℓ_{ap}^-	Percurso do carro para cada avanço (mm)
		d_p	d_{p-1}					
1	12,7	128,6	128,6	0,36	0	1,0000	12,7	253,4
2	0	131,9	128,6		90	-	0,9	
3	215,3	131,9	131,9		0	1,0000	215,3	
4	10,0	139,5	131,9		20,9	1,2195	12,2	
5	5,0	164,8	139,5	0,50	68,4	2,4607	12,3	259,6
6	30,0	178,6	164,8		13,0	1,1328	34,0	
7	14,4	195,1	178,6		29,9	1,3308	19,2	
8	206,4	195,1	195,1	0,25	0	1,0000	206,4	259,6
9	30,0	175,6	161,8		13,0	1,1328	34,0	
10	14,4	192,1	175,6		29,9	1,3308	19,2	
11	206,4	192,1	192,1		0	1,0000	206,4	
Percurso básico de avanço, ℓ_{ab}							772,6	

O percurso básico de avanço ℓ_{ab}^- , também pode ser calculado, diretamente, pelo ângulo total de rampa α_t , em cada ciclo de usinagem da ferramenta. De acordo com as equações (3.10) e (3.11), tem-se:

$$19 \text{ ciclo: } \psi_{t1} = 1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha_{t1} = 1 + 0,5773 \cdot \frac{66,5}{2.493,8} = 1,0389$$

$$29 \text{ ciclo: } \psi_{t2} = 1 - \cotg \delta \cdot \tg \alpha_{t2} = 1 + 0,5773 \cdot \frac{30,3}{2.250,8} = 1,0350$$

e portanto,

$$19 \text{ ciclo: } \ell_{a1}^- = \psi_{t1} \cdot \ell_{a1} = 1,0389 \cdot 493,8 = 513,0 \text{ mm}$$

$$29 \text{ ciclo: } \ell_{a2}^- = \psi_{t2} \cdot \ell_{a2} = 1,0349 \cdot 250,8 = 259,6 \text{ mm}$$

Para o percurso básico de avanço do carro (ℓ_{ab}^-), resulta

$$\ell_{ab}^- = \ell_{a1}^- + \ell_{a2}^- = 513,0 + 259,6 = 772,6 \text{ mm}$$

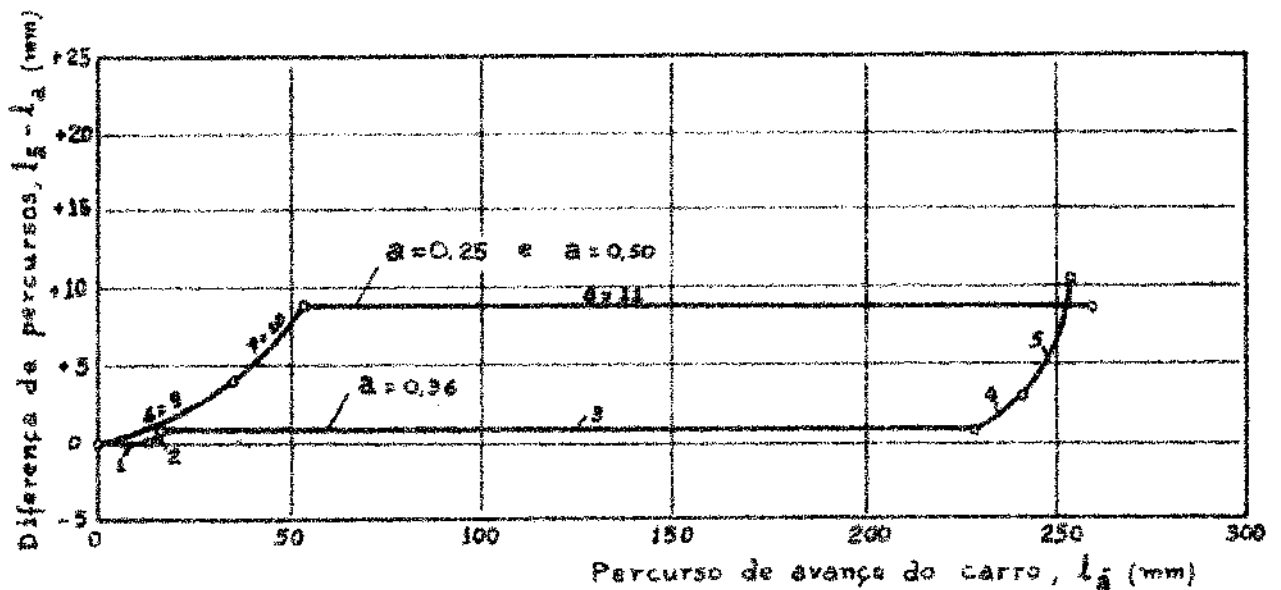


Fig. 19.3 - Variação da diferença entre os percursos de avanço do carro e principal de avanço da ferramenta.

19.2.3 - Cálculo dos coeficientes adimensionais (ξ) e das velocidades de avanço (v_a)

Utilizando-se as equações (4.11), (4.12), (4.16) e (4.19), - para os perfis usinados mostrados na figura 19.1, obtém-se os valo-

res fornecidos na tabela XIX.2. Nesta tabela, os valores superiores e inferiores correspondem aos pontos inicial e final do perfil usinado. A rotação do eixo-árvore, com a qual foram calculadas as velocidades de avanço, foi $n = 425$ rpm, correspondente a máxima rotação utilizada nos ensaios.

Tabela XIX.2 - Valores calculados dos coeficientes adimensionais ξ e das velocidades máximas de avanço (inicial e final), em cada perfil usinado.

Perfil nº	Ângulo de rampa (graus) α°	coeficientes adimensionais				Velocidade de avanço para $n = 425$ rpm (mm/min)				Avanço da ferramenta a (mm/v)			
		ξ_t	ξ_u	ξ_y	ξ_a	v_{at}	v_{au}	v_{ay}	v_a	a_t	a_u	a_y	a
1	0,0	1,00	0,00	0,00	1,00	153,0	0,0	0,0	153,0	0,36	0,00	0,00	0,36
2	90,0	1,73	2,00	1,73	0,00	264,0	306,0	264,0	0,0	0,62	0,72	0,62	0,00
3	0,0	1,00	0,00	0,00	1,00	153,0	0,0	0,0	153,0	0,36	0,00	0,00	0,36
4	0,0	1,00	0,00	0,00	1,00	153,0	0,0	0,0	153,0	0,36	0,00	0,00	0,36
	41,7	0,88	0,68	0,59	0,66	135,0	104,0	90,0	201,0	0,32	0,25	0,21	0,24
5	41,7	0,88	0,68	0,59	0,66	187,0	145,0	125,5	140,5	0,44	0,34	0,30	0,33
	90,0	1,73	2,00	1,73	0,00	368,0	425,0	368,0	0,0	0,87	1,00	0,87	0,00
6	0,0	1,00	0,00	0,00	1,00	215,5	0,0	0,0	212,5	0,50	0,00	0,00	0,50
	25,4	0,87	0,43	0,37	0,79	185,0	91,5	78,5	168,0	0,43	0,21	0,19	0,40
7	25,4	0,87	0,43	0,37	0,79	185,0	91,5	78,5	168,0	0,43	0,21	0,19	0,40
	45,0	0,89	0,73	0,63	0,63	189,5	155,0	134,0	134,0	0,45	0,37	0,32	0,32
8	0,0	1,00	0,00	0,00	1,00	212,5	0,0	0,0	212,5	0,50	0,00	0,00	0,50
9	0,0	1,00	0,00	0,00	1,00	106,3	0,0	0,0	106,3	0,25	0,00	0,00	0,25
	25,4	0,87	0,43	0,37	0,79	92,5	45,7	39,4	84,0	0,22	0,11	0,09	0,20
10	25,4	0,87	0,43	0,37	0,79	92,5	45,7	39,4	84,0	0,22	0,11	0,09	0,20
	45,0	0,89	0,73	0,63	0,63	94,5	77,5	67,0	67,0	0,22	0,18	0,16	0,16
11	0,0	1,00	0,00	0,00	1,00	106,3	0,0	0,0	106,3	0,25	0,00	0,00	0,25

19.2.4 - Cálculo dos avanços da ferramenta e avanço básico do carro ($\bar{a}_b$)

Utilizando-se os coeficientes adimensionais ξ já calculados (§ 19.2.3) e as equações (5.1) a (5.4), obtêm-se os valores dos avanços da ferramenta mostrados na tabela XIX.2. Os avanços do carro, em cada perfil usinado, são dados na figura 19.1.

Substituindo-se os percursos de avanço do carro, em cada parte da peça usinada onde o avanço do carro é constante, já calculados e fornecidos na tabela XIX.1, de acordo com a equação (5.6), o avanço básico do carro será dado por:

$$\bar{a}_b = \frac{\sum_{p=1}^3 \frac{\ell_{ab}}{\bar{a}_p}}{3} = \frac{\frac{253,4}{0,36} + \frac{259,6}{0,50} + \frac{259,6}{0,25}}{3} = \frac{772,6}{2261,5} = 0,3416 \frac{\text{mm}}{\text{v}}$$

19.2.5 - Cálculo do tempo total de corte (t_{tc})

Para as rotações do eixo-árvore $n = 250 - 300 - 355 - 425$ rpm, aplicando-se a equação geral (7.13), obtêm-se os valores indicados na tabela XIX.3 e figura 19.4.

Tabela XIX.3 - Valores calculados dos tempos de corte.

Parte usinada (p)	Avanço do carro (mm/v) $\bar{a}_p$	Percurso de avanço do carro (mm) ℓ_{ap}	Tempo de corte, t_{cp} (min)			
			Rotação do eixo-árvore, n (rpm)			
			250	300	355	425
1	0,36	253,4	2,816	2,346	1,983	1,656
2	0,50	259,6	2,077	1,731	1,463	1,222
3	0,25	259,6	4,154	3,461	2,925	2,443
Tempo total de corte, t_{tc}			18,094	15,078	12,742	10,643

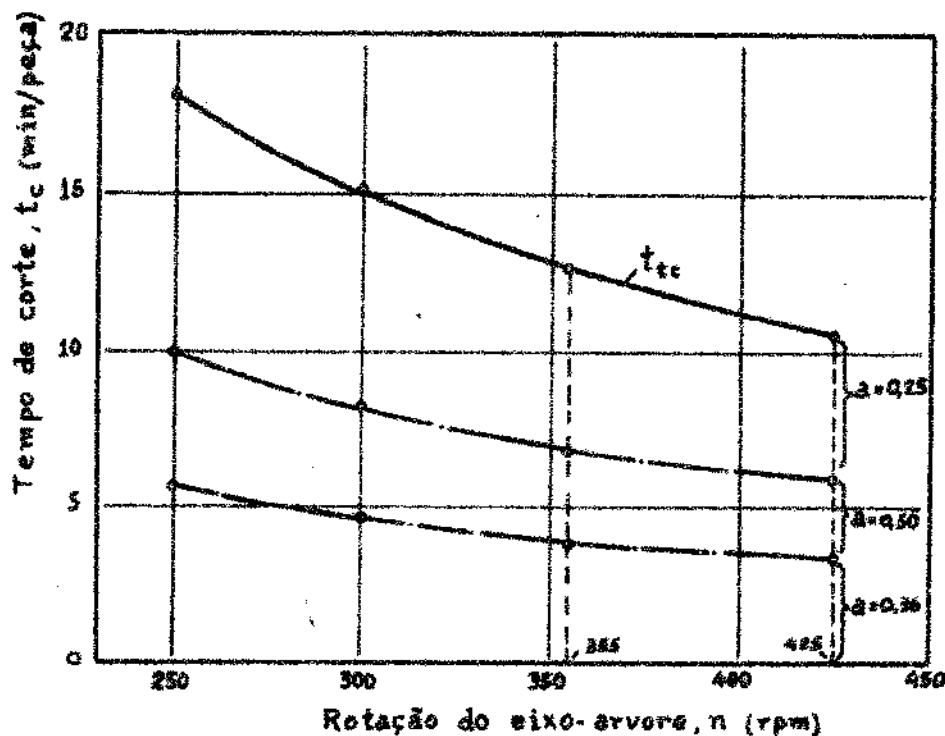


Fig. 19.4 - Variação dos tempos de corte em função da rotação do eixo-árvore.

19.2.6 - Cálculo do expoente da Equação de Taylor Equivalente (x)

Aplicando-se a equação (9.13), com os $(Z_{T,k})$, em cada k é-sima rotação do eixo-árvore (n_k), fornecidos na tabela XIX.4 e figura 19.5, obtêm-se os $(k-1)$ ésimos valores do expoente x , nos $(k-1)$ ésimos intervalos de validade $[n_{k-1}, n_k]$ da Equação de Taylor Equivalente, como formulado no § 9.4.2.4. Na figura 19.6 é mostrada a variação do expoente x com a rotação do eixo-árvore, onde nota-se que a sua variação é mais significativa nas rotações mais altas. Nesta figura, adotou-se como pontos de referência os valores médios das rotações do eixo-árvore (rotação superior e inferior), em cada intervalo de validade da Equação de Taylor Equivalente.

Tabela XIX.4 - Valores calculados do expoente x .

Valores experimentais					Valores corrigidos		
Ensaio n^o	Rotação (rpm) n'_k	Peças usinadas por vida $Z'_{T,k}$	Intervalo de validez $[n'_{k-1}/n'_k]$	Expoente x'	Rotação (rpm) n_k	Peças usina- das por vida $Z_{T,k}$	Expoente x
1	250	6,0	250-300	3,95630	251,19	5,916	3,9556
2	300	3,5			298,54	3,551	
3	355	2,0	300-355	4,32497	354,81	2,003	4,3158
4	425	1,0			421,70	1,030	
			355-425	4,85143			4,8508

Na tabela XIX.4 constam também os valores corrigidos das rotações (n_k), número de peças usinadas por vida ($Z_{T,k}$) e expoente x , a serem utilizados nos programas de computação, como foi visto no § 9.4.2.4.

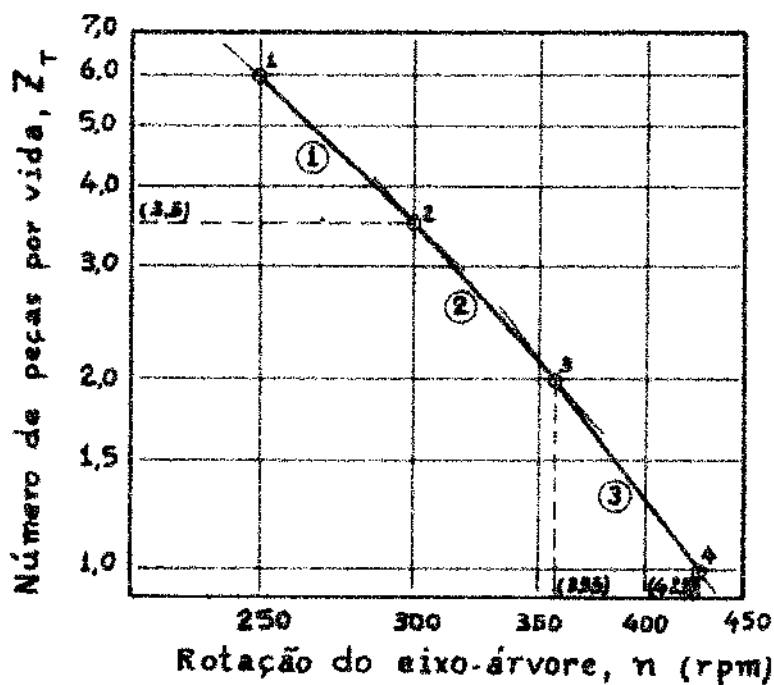


Fig. 19.5 - Curva de vida da ferramenta utilizada na cópiagem do eixo para rodeiro.

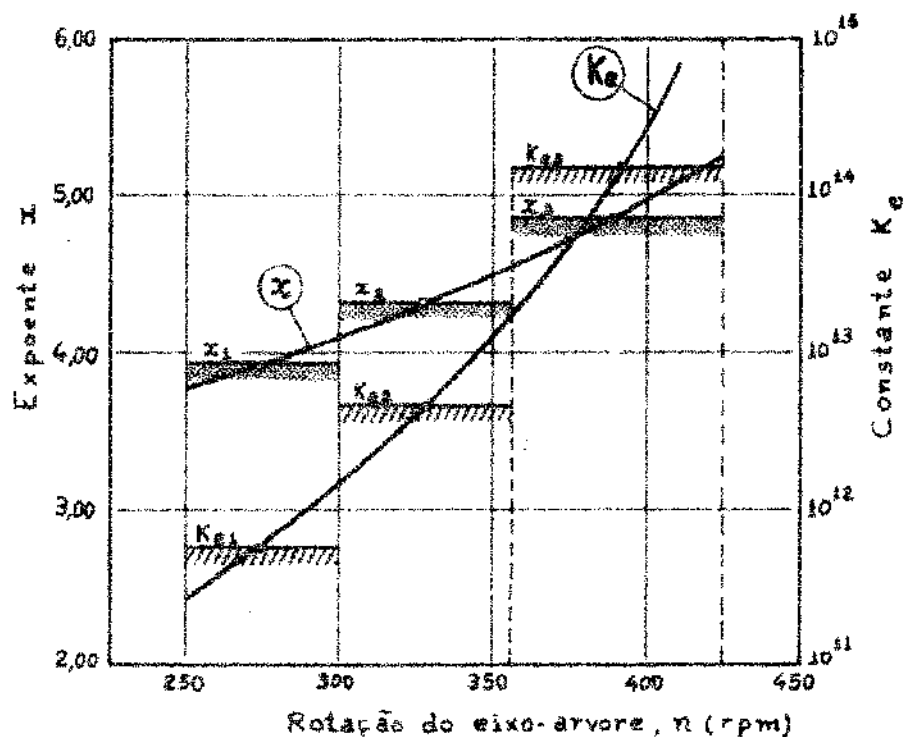


Fig. 19.6 - Variação do expoente x e da constante K_e , em função da rotação do eixo-árvore.

Analisando-se a figura 19.6, verifica-se que ocorre um leve aumento do expoente x nas rotações mais altas, onde a maior geração de calor ocasiona uma queda mais pronunciada da vida da ferramenta.

19.2.7 - Cálculo do diâmetro-equivalente (d_e)

Aplicando-se a equação geral (10.10), relativa ao perfil simplificado (partes retilíneas), com os dados apresentados nas tabelas XIX.1, XIX.3 e XIX.4, obtém-se os valores calculados do diâmetro-equivalente apresentados na tabela XIX.5. Como o diâmetro-equivalente depende do expoente x da Equação de Taylor Equivalente, em cada intervalo de validade $[n_{k-1}, n_k]$, tem-se um valor para cada intervalo, cuja variação é mostrada na figura 19.7. A posição do desgaste da ferramenta foi $Ad_{e0} = 6,40$ mm.

Tabela XIX.5 - Valores calculados do diâmetro-equivalente

Intervalo de rotações (rpm) $[n_{k-1}, n_k]$	Expoente x_k	Parte usinada	Avanço do carro (mm/v) $\bar{a}$	Parcela relativa a cada parte usinada 1)		Diâmetro-equivalente	
				Valor	%	d_{eo}	d_e 2)
251,19 a 298,54	3,9557	1	0,36	$1,968 \cdot 10^{11}$	10,8	178,50	184,90
		2	0,50	$5,597 \cdot 10^{11}$	31,0		
		3	0,25	$10,520 \cdot 10^{11}$	58,2		
298,54 a 354,81	4,3159	1	0,36	$1,075 \cdot 10^{12}$	8,8	179,50	185,45
		2	0,50	$3,892 \cdot 10^{12}$	31,8		
		3	0,25	$7,273 \cdot 10^{12}$	59,4		
354,81 a 421,70	4,8509	1	0,36	$1,431 \cdot 10^{13}$	7,5	179,50	186,21
		2	0,50	$6,210 \cdot 10^{13}$	32,4		
		3	0,25	$11,509 \cdot 10^{13}$	60,1		

1) correspondente aos termos do somatório da equação (10.10), em cada parte usinada.

2) dado pela equação (8.3).

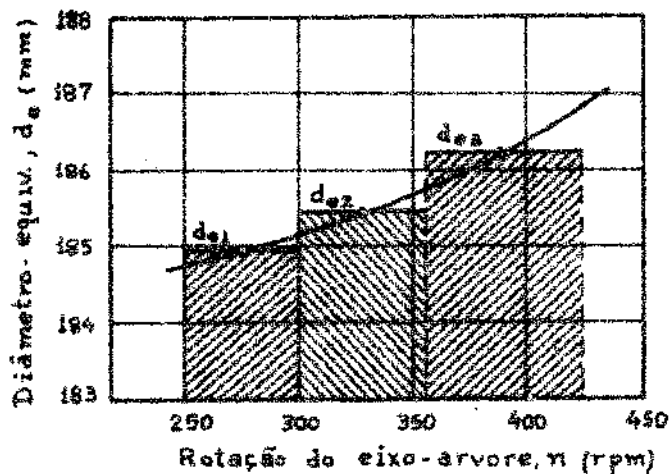


Fig. 19.7 - Variação do diâmetro-equivalente com a rotação do eixo-árvore.

Analisando-se os resultados obtidos, verifica-se que:

a) a variação do diâmetro-equivalente com a rotação do eixo-árvore foi pequena, no máximo de 0,71 %.

b) para valores crescentes de x (em cada intervalo), a va-

riação do diâmetro-equivalente aumenta ligeiramente, de modo exponencial (a curva é levemente convexa).

19.2.8 - Cálculo da constante da Equação de Taylor Equivalente (K_e)

Aplicando-se os dados anteriormente calculados, na equação geral (9.15), obtém-se os valores fornecidos na tabela XIX.6, relativos a cada intervalo de validade $[n_{k-1}, n_k]$ da Equação de Taylor Equivalente.

Na figura 19.6 é mostrada a variação de K_e em função da rotação do eixo-árvore.

Tabela XIX.6 - Valores calculados da constante da Equação de Taylor Equivalente.

Intervalo de validade	Nº de peças usinadas por vida $Z_{T,k}$	Rotação (rpm) n_k	Expoente x_k	Diâmetro equivalente $d_{e,k}$	Constante da Eq. de Taylor Equivalente $K_{e,k}$
1	3,551	298,54	3,9557	184,90	$3,8722 \cdot 10^{10}$
2	2,003	354,81	4,3159	185,45	$2,5121 \cdot 10^{11}$
3	1,030	421,70	4,8509	186,21	$4,4391 \cdot 10^{12}$

19.2.9 - Cálculo do tempo total de reposição (t_{tr})

Para o tempo de troca $t_{ft} = 0,50$ min, aplicando-se a equação geral (12.10) obtém-se os valores da constante γ (correspondente aos termos independentes da variação da rotação do eixo-árvore, em um dado intervalo de validade), resumidos na tabela XIX.7. Nesta mesma tabela são apresentados os valores calculados de t_{rj} e t_{tr} , obtidos das equações (12.9) e (12.8), respectivamente. Na figura 19.8 é mostrada a variação do tempo total de reposição, em função da rota

ção do eixo-árvore. Nota-se dos valores obtidos, que eles são pouco significativos, neste particular exemplo de aplicação, devido ao em prego de insertos de fixação mecânica.

Tabela XIX.7 - Valores calculados do tempo total de reposi
ção.

Intervalo de validade	Expoente	Constante	Diâmetro -equiva- lente	Constante	Tempo total de reposição (min) t_{tr}			
					Rotação do eixo-árvore (rpm)			
					250	300	355	425
1	3,9557	$3,8722 \cdot 10^{-10}$	184,90	$3,4389 \cdot 10^{-9}$	0,085	0,141	-	-
2	4,3159	$2,5121 \cdot 10^{-11}$	185,46	$4,9530 \cdot 10^{-10}$	-	0,141	0,250	-
3	4,8509	$4,4391 \cdot 10^{-12}$	186,21	$2,4870 \cdot 10^{-11}$	-	-	0,250	0,485

19.2.10 - Cálculo do tempo total de confecção t_t

Sendo os tempos improdutivos $t_{ip} = 6,30$ min/peça, com os tempos totais de corte e reposição anteriormente calculados (tabelas XIX.3 e XIX.7), aplicando-se a equação geral (13.10), resultam os va lores indicados na tabela XIX.8 e figura 19.8.

Rotação do eixo-árvore (rpm)	Tempo total de corte (min/peça)	Tempo total de reposição (min/peça)	Tempos improdutivos (min/peça)	Tempo total de confecção (min/peça)	Produção horária (100% eficiência) (peças/hora)
n	t_{tc}	t_{tr}	t_{ip}	t_t	P_h
251,19	18,007	0,085	6,300	24,392	2,46
298,54	15,151	0,141		21,592	2,78
354,81	12,748	0,250		19,298	3,11
421,70	10,726	0,486		17,512	3,43

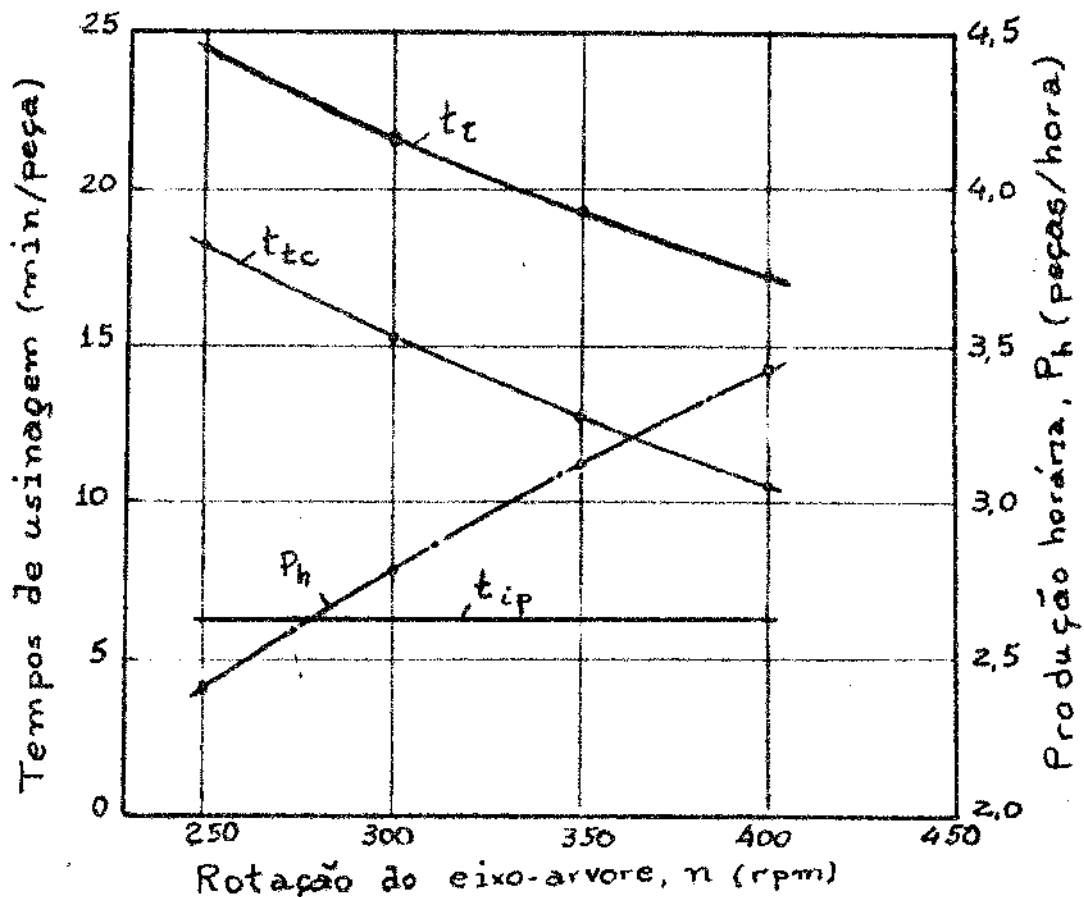


Fig. 19.8 - Variação do tempo total de confecção t_c e da produção horária, em função da rotação do eixo-árvore.

Analisando-se os resultados obtidos verifica-se que, neste particular exemplo, o tempo total de reposição é pouco significativo, o que nem sempre acontece.

Na figura 19.8 é também mostrada a variação da produção horária de peças (P_h), em função da rotação do eixo-árvore.

19.2.11 - Cálculo da rotação correspondente ao mínimo tempo total de confecção (n_{mt})

Utilizando-se a equação geral (16.3), por meio do programa de computação fornecido no capítulo XVIII, verifica-se que a rotação do eixo-árvore na qual o tempo total de confecção assume seu valor, mínimo está acima do intervalo pesquisado, como será mostrado no §-19.2.14. Como não é possível utilizar-se rotação superior a $n=425$ rpm, devido ao aparecimento de vibrações indesejáveis e piora da ru

gositade superficial, esta rotaçāo corresponde ā condiçāo de máxima produçāo.

19.2.12 - Cálculo dos custos de usinagem

Aplicando-se as equaçōes deduzidas no capítulo XIV obtem-se os resultados apresentados na tabela XIX.9 e figura 19.9. Os custos improdutivos (C_i), total de corte (C_{tc}) e total de reposiçāo - (C_{tr}) foram calculados pelas equaçōes gerais (14.2), (14.4) e (14.10) respectivamente. No § 19.2.14 sro apresentados os valores calculados dos custos de usinagem por meio do programa de computaçāo.

Tabela XIX.9 - Valores calculados dos custos de usinagem

Rotaçāo do eixo- -árvore (rpm) n	Custo total de corte (Cr\$/peça) C_{tc}	Custo total de reposiçāo (Cr\$/peça) C_{tr}	Custos im- produtivos (Cr\$/peça) C_i	Custo total de confecçāo (Cr\$/peça) C_t
251,19	9,004	1,024	3,150	13,178
298,54	7,576	1,707		12,432
354,81	6,374	3,025		12,549
421,70	5,363	5,883		14,396

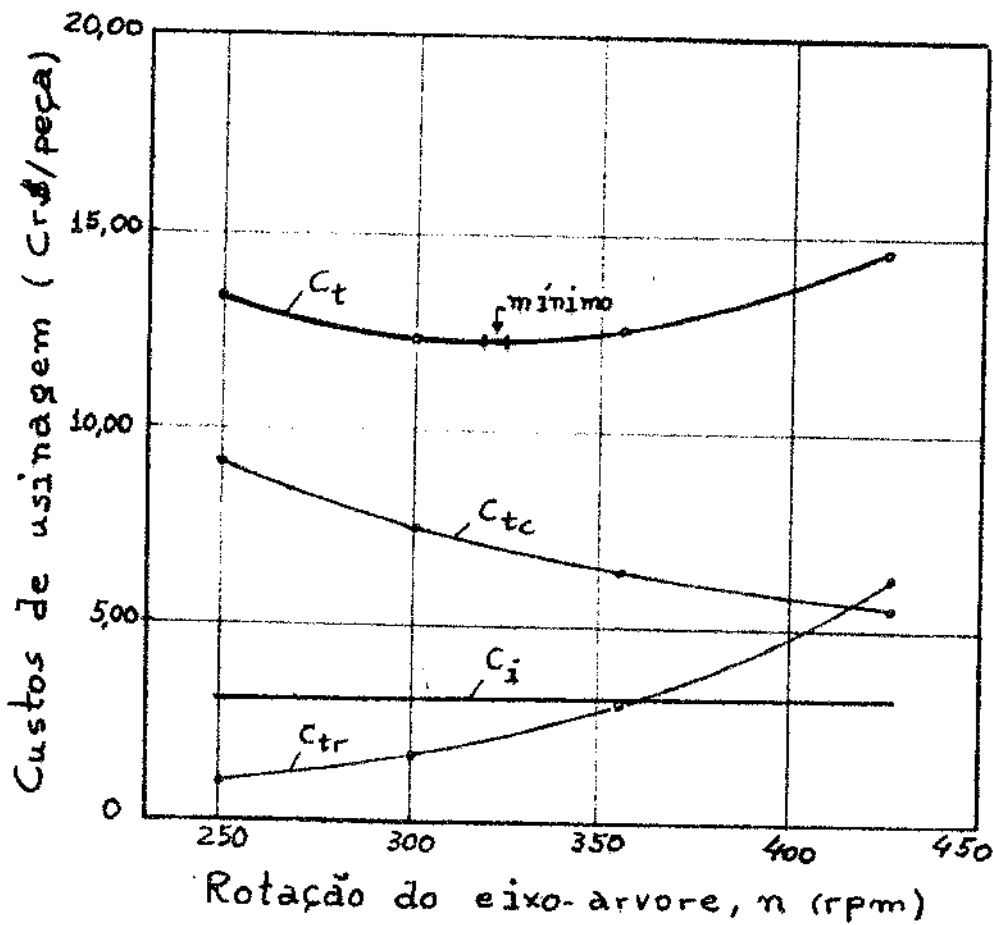


Fig. 19.9 - Variação dos custos de usinagem em função da rotação do eixo-árvore.

Analisando-se os resultados obtidos, verifica-se que a curva correspondente ao custo total de confecção apresenta um grande raio de curvatura na região de menor custo, localizada entre as rotações disponíveis no eixo-árvore 300 e 355 rpm. A diferença de custo, neste caso, será $\Delta_{C_t} = 12,549 - 12,432 = + 0,117$ Cr\$/peça, porém a rotação maior (355 rpm) apresenta menor tempo total de confecção - (ver figura 19.8), e portanto maior produção horária de peças (ver - figuras 19.8 e 19.10).

19.2.13 - Cálculo da rotação correspondente ao mínimo custo total de confecção (n_{mc})

Utilizando-se a equação geral (17.4), por meio do programa de computação apresentado no capítulo XVIII, verifica-se que a con-

dição de mínimo custo total de confecção, é satisfeita para uma rotação do eixo-árvore, localizada no intervalo (315,42 - 321,04)rpm, e cujo custo total mínimo está no intervalo (12,368 - 12,366) Cr\$/peça, como mostrado no §. 19.2.14.2 .

19.2.14 - Resultados obtidos com o programa de
computação

19.2.14.1 - Sub-programa para o cálculo do diâ-
metro-equivalente

Para a execução do programa de computação apresentado no - capítulo XVIII , fôram fornecidos os seguintes dados de entrada:

- número de rotações do eixo-árvore: $NR = 4$
- número de ferramentas: $m = 1$
- número de estágios: $N = 1$
- rotações do eixo-árvore: $n = 251,19 - 298,54 - 354,81 - 421,70$ rpm.
- número de ordem da 1^a rotação do estágio 1: $NI = 1$
- número de peças usinadas por vida da ferramenta 1:
 $Z_{T1} = 5,916 - 3,551 - 2,003 - 1,030$
- número de partes usinadas pela ferramenta 1, no estágio 1: $p = 11$
- avanço básico do carro, para a ferramenta 1, no estágio 1: $\bar{a}_{b1,1} = 0,3416$ mm/v
- avanços da ferramenta 1, no estágio 1, em cada p-ésima parte usinada: $\bar{a}_{p1,1} = 0,36 - 0,36 - 0,36 - 0,36 - 0,36 - 0,50 - 0,50 - 0,50 - 0,25 - 0,25 - 0,25$ mm/v

- percurso básico de avanço do carro, para a ferramenta 1, no estágio 1: $\ell_{ab1,1}^- = 772,6$ mm
- percurso de avanço do carro, para a ferramenta 1, no estágio 1, em cada pêsima parte usinada: $\ell_{ap1,1}^- = 12,7$ - 0,9 - 215,3 - 12,2 - 12,3 - 34,0 - 19,2 - 206,4 - 34,0 - 19,2 - 206,4 mm
- diâmetros usinados pela ferramenta 1, no estágio 1:
 $d_{p1,1} = 128,6 - 128,6 - 131,9 - 131,9 - 139,5 - 164,8 - 178,6 - 195,1 - 195,1 - 175,6 - 192,1 - 192,1$ mm
- posição do desgaste da ferramenta 1: $\Delta d_{e1} = 6,4$ mm

Os resultados obtidos foram:

FERRAMENTA 1

ESTAGIO 1

```
X(I,K) =      0.39556E 01    0.43158E 01    0.48508E 01
DE(I,K)=      0.18489E 03    0.18344E 03    0.18621E 03
// *END OF JOB
```

Os valores calculados dos diâmetros-equivalentes de cada ferramenta, em cada estágio ($d_{ei,j}$), por meio deste sub-programa, serão utilizados no programa para a análise econômica, mostrado a seguir.

19.2.14.2 - Programa para a análise das condições econômicas

Para a execução do programa apresentado no capítulo XVIII, foram fornecidos os seguintes dados de entrada:

- número de rotações do eixo-árvore: $NR = 4$
- número de ferramentas: $m = 1$
- número de estágios: $N = 1$
- número de rotações em cada estágio: $k = 4$
- custo do operário, máquina e sobretaxas: $S = 0,50$ Cr\$/min

- tempos improdutivos: $t_{ip} = 6,30$ min
- número de peças usinadas por operação: $q = 0,5$
- rotações do eixo-árvore: $n = 251,19 - 298,54 - 354,81 -$
 $- 421,70$ rpm
- número de ordem da 1ª rotação, no estágio 1: $NI = 1$
- número de peças usinadas por vida da ferramenta 1:

$$Z_{T1} = 5,916 - 3,551 - 2,003 - 1,030$$

- percursos básicos de avanço do carro:
 - no estágio 1: $\ell_{ab,1} = 772,6$ mm
 - para a ferramenta 1, no estágio 1: $\ell_{ab1,1} = 772,6$ mm
- avanços básicos do carro:
 - no estágio 1: $\bar{a}_{b1} = 0,3416$ mm/v
 - para a ferramenta 1, no estágio 1: $\bar{a}_{b1,1} = 0,3416$ mm/v
- diâmetros-equivalentes da ferramenta 1, no estágio 1, em cada intervalo de validade da Equação de Taylor Equivalente (calculados no item a):

$$d_{el,1} = 184,89 - 185,44 - 186,21 \text{ mm}$$

- tempo de troca da ferramenta 1: $t_{ft1} = 0,50$ min.
- custo por vida mais troca da ferramenta 1: $C_{f1} = 6,06$ Cr\$

Os resultados obtidos foram:

INTERVALO 1

X(I,K)	0.39556E 01
KE(I,K)	0.38722E 11

INTERVALO 2

X(I,K)	0.43158E 01
KE(I,K)	0.25121E 12

INTERVALO 3

X(I,K)	0.48508E 01
KE(I,K)	0.44391E 13

CUSTO IMPRODUTIVO CIP = 0.3150000E 01

ESTAGIO 1

GAMA(I) 0.3438894E-08
GAMA(I) 0.4953043E-09
GAMA(I) 0.2487018E-10

A ROTACAO DE MINIMO CUSTO ESTA NO INTERVALO 315.42 / 321.04 RPM
A DIFERENCA DE CUSTO PARA A ROTACAO MAIOR E 0.2508398E 02

O CUSTO TOTAL MINIMO ESTA NO INTERVALO 0.9218458E 01 / 0.9216453E 01

A ROTACAO DE MAXIMA PRODUCAO ESTA ACIMA DO INTERVALO PESQUISADO,
CUJA ROTACAO MAXIMA E 428.38 RPM
A DIFERENCA DE TEMPO E -0.1867560E 04

O TEMPO TOTAL MINIMO NAO FOI CALCULADO PORQUE A ROTACAO CORRESPON
DENTE ESTA ACIMA DO INTERVALO PESQUISADO, CUJA ROTACAO MAXIMA E
428.38 RPM

INTERVALO 1

ROTACAO INFERIOR

CUSTO CORTE CC(J) 0.90039E 01
TOTAL = 0.90039E 01

CUSTO REPOSICAO CFJ(J) 0.10243E 01
TOTAL = 0.10243E 01

CUSTO CONFECCAO CT(J) 0.10028E 02
TOTAL = 0.13178E 02

TEMPO CORTE TC(J) 0.18007E 02
TOTAL = 0.18007E 02

TEMPO REPOSICAO TR(J) 0.84516E-01
TOTAL = 0.84516E-01

TEMPO CONFECCAO TT(J) 0.18092E 02
TOTAL = 0.24392E 02

ROTACAO SUPERIOR

CUSTO CORTE CC(J) 0.75759E 01
TOTAL = 0.75759E 01

CUSTO REPOSICAO CFJ(J) 0.17065E 01
TOTAL = 0.17065E 01

CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.92824E 01
TOTAL =	0.12432E 02	
TEMPO CORTE	TC(J)	0.15151E 02
TOTAL =	0.15151E 02	
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.14080E 00
TOTAL =	0.14080E 00	
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.15292E 02
TOTAL =	0.21592E 02	

INTERVALO 2

ROTACAO INFERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.75759E 01
TOTAL =	0.75759E 01	
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.17065E 01
TOTAL =	0.17065E 01	
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.92824E 01
TOTAL =	0.12432E 02	
TEMPO CORTE	TC(J)	0.15151E 02
TOTAL =	0.15151E 02	
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.14080E 00
TOTAL =	0.14080E 00	
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.15292E 02
TOTAL =	0.21592E 02	

ROTACAO SUPERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.63744E 01
TOTAL =	0.63744E 01	
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.30254E 01
TOTAL =	0.30254E 01	
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.93998E 01
TOTAL =	0.12549E 02	
TEMPO CORTE	TC(J)	0.12748E 02
TOTAL =	0.12748E 02	
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.24962E 00
TOTAL =	0.24962E 00	

TEMPO CONFECCAO TT(J) 0.12998E 02
TOTAL = 0.19298E 02

INTERVALO 3

ROTACAO INFERIOR

CUSTO CORTE CC(J) 0.63744E 01
TOTAL = 0.63744E 01

CUSTO REPOSICAO CFJ(J) 0.30254E 01
TOTAL = 0.30254E 01

CUSTO CONFECCAO CT(J) 0.93998E 01
TOTAL = 0.12549E 02

TEMPO CORTE TC(J) 0.12748E 02
TOTAL = 0.12748E 02

TEMPO REPOSICAO TR(J) 0.24962E 00
TOTAL = 0.24962E 00

TEMPO CONFECCAO TT(J) 0.12998E 02
TOTAL = 0.19298E 02

ROTACAO SUPERIOR

CUSTO CORTE CC(J) 0.53633E 01
TOTAL = 0.53633E 01

CUSTO REPOSICAO CFJ(J) 0.58834E 01
TOTAL = 0.58834E 01

CUSTO CONFECCAO CT(J) 0.11246E 02
TOTAL = 0.14396E 02

TEMPO CORTE TC(J) 0.10726E 02
TOTAL = 0.10726E 02

TEMPO REPOSICAO TR(J) 0.48543E 00
TOTAL = 0.48543E 00

TEMPO CONFECCAO TT(J) 0.11212E 02
TOTAL = 0.17512E 02

// *END OF JOB

19.2.15 - Determinação do Intervalo de Máxima Eficiência (I.M.E)

Considerando-se os resultados obtidos anteriormente, as rotações disponíveis no eixo-árvore que definem o "Intervalo de Máxima Eficiência" (I.M.E), como mostra a figura 19.10, são:

mínimo custo: $n_{mc} = 355$ rpm

máxima produção: $n_{mt} = 425$ rpm

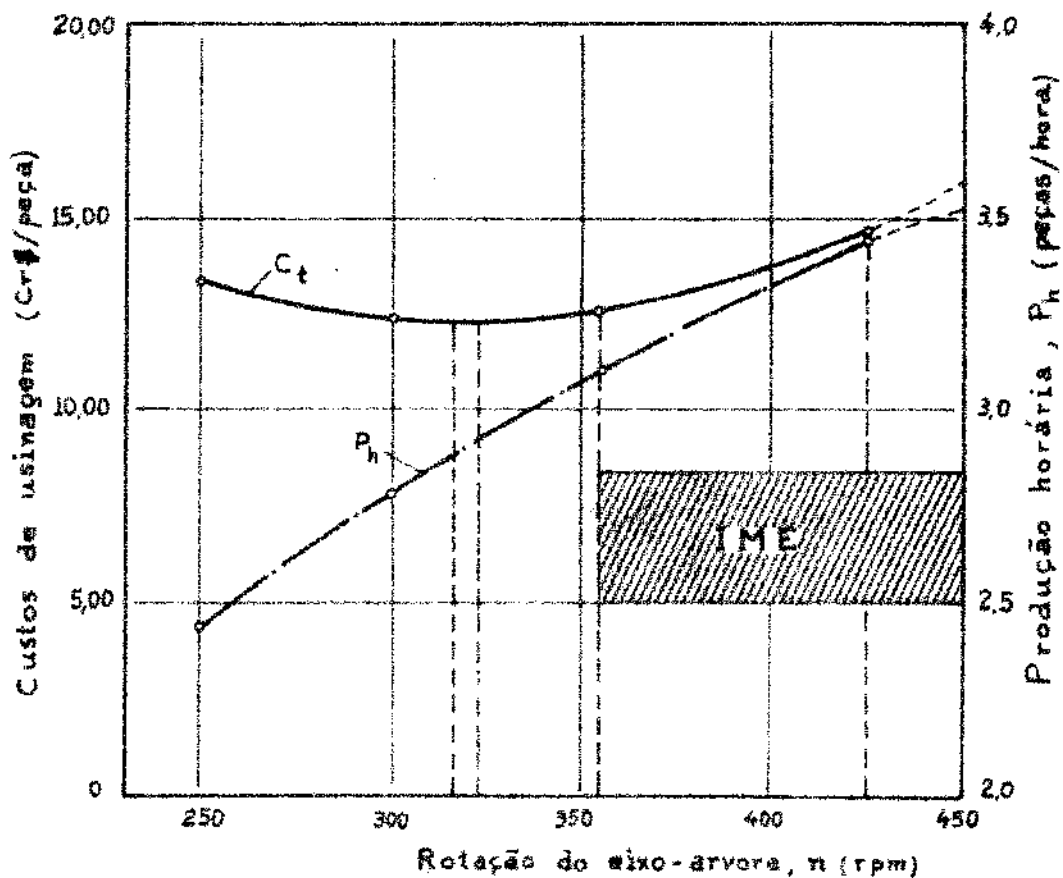


Fig. 19.10 - Intervalo de máxima eficiência, com a rotação à direita ($n=425$ rpm) limitada pelas condições operacionais, como foi visto no § 19.2.11.

As considerações gerais sobre os resultados obtidos com método serão formuladas no capítulo XZ.

19.3 - Torneamento de eixos-piloto para câmbios de automóveis

Copiagem de perfis curvelíneos, em dois estágios, executados por três ferramentas, para a condição de rotação constante

19.3.1 - Conceituação do problema

As operações de usinagem do eixo-piloto e as dimensões da peça (em bruto e acabada), mostrados na figura 19.11, foram executadas em um torno semi-automático George-Fischer, tipo G + F - 9/80. As ferramentas de corte utilizadas são mostradas na figura 19.12.

Os dados econômicos e auxiliares para a análise econômica da confecção do eixo-piloto em estudo, são apresentados no §19.3.3, na forma de dados de entrada para o programa de computação.

O número médio de peças usinadas por vida em função da rotação do eixo-árvore, são mostrados na figura 19.13 e tabela XIX.10. Como as rotações do eixo-árvore do torno não satisfazem uma perfeita progressão geométrica de razão $\varphi = 1,2589$, os correspondentes valores de Z_T e n , para cada ferramenta, foram corrigidos de acordo com o método apresentado no § 9.4.2.4, para a sua utilização no programa de computação.

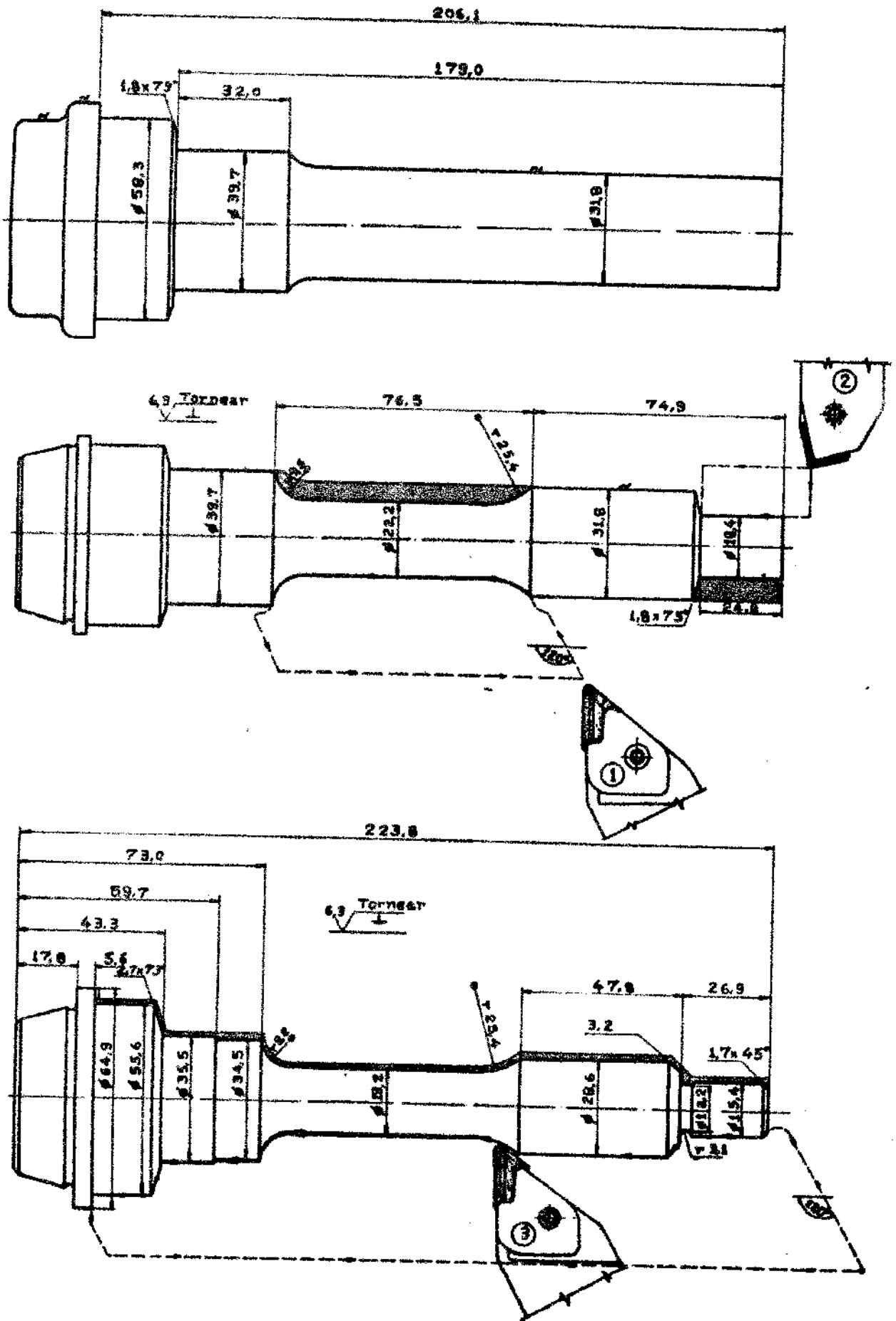


Fig. 19.11 - Dimensões usinadas e operações de corte, na usinagem de um eixo-piloto para cambio de automóvel: a) peça - em bruto; b) operações de corte executadas no estágio 1; c) idem, no estágio 2.

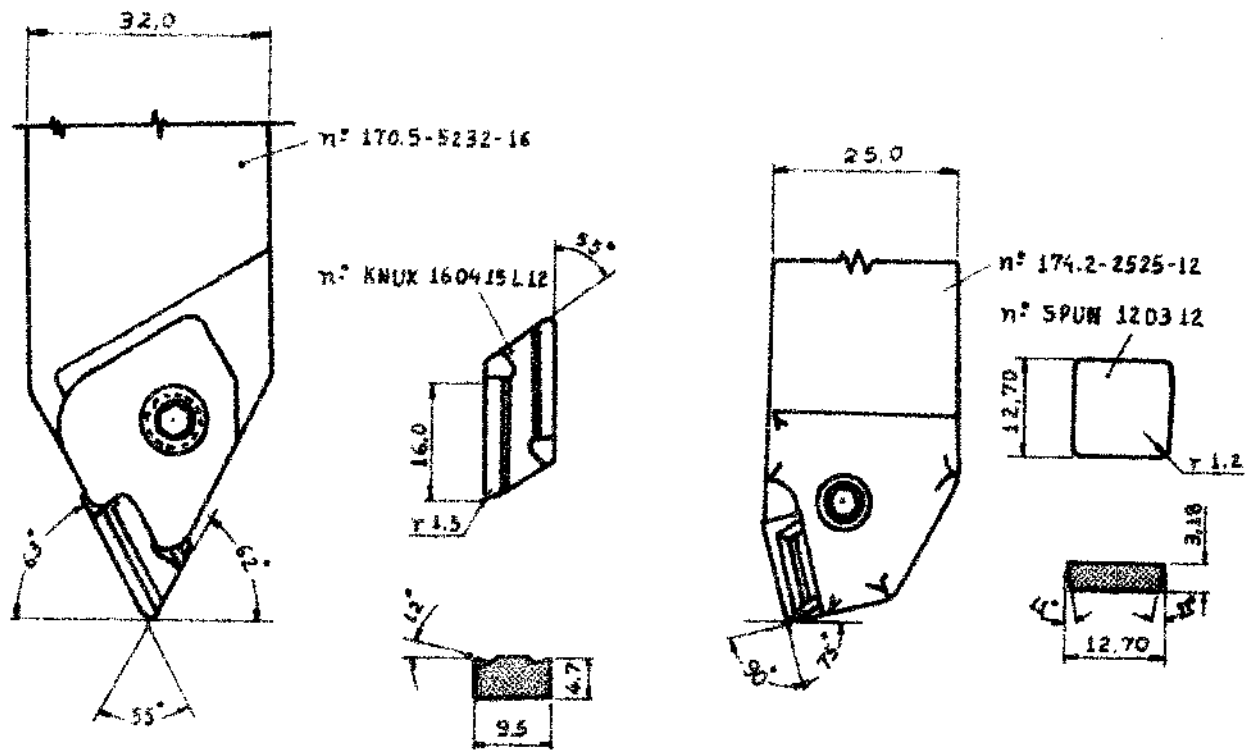


Figura 19.12 - Porta-ferramentas e inserts de fixação mecânica, utilizados para as operações de corte mostradas na figura 19.11.

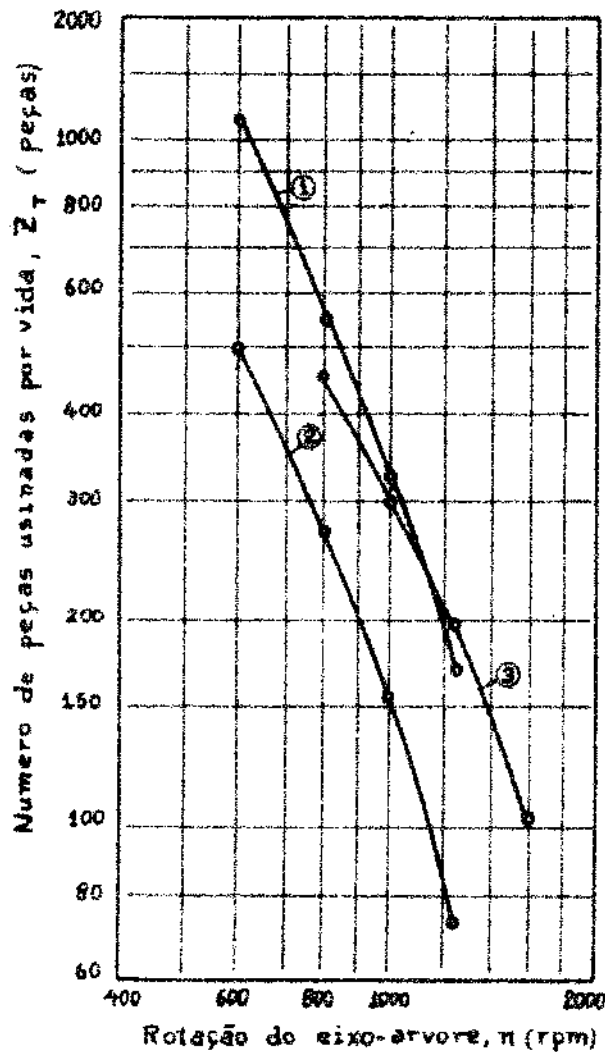


Fig. 19.13 - Curvas de vida das ferramentas de corte, utilizadas no torneamento do eixo-piloto (ver figura 19.11).

Tabela XIX.10 - Valores experimentais e corrigidos do número médio de peças usinadas por vida (Z_T), em função da rotação do eixo-árvore (n).

Ferramenta nº	Valores experimentais					Valores corrigidos				
	Rotação (rpm)					rotação (rpm)				
	800	1000	1250	1600	2000	794,33	1000,0	1258,9	1584,9	1995,3
1	550	322	166	67	-	559,25	322,00	162,54	69,34	-
2	281	158	73	25	-	285,79	158,00	71,23	26,05	-
3	-	340	195	93	40	-	340,00	191,58	95,68	40,36

19.3.2 - Cálculo dos percursos de avanço do carro (ℓ_a)

De modo análogo ao feito no § 19.2.2, utilizando-se os perfis simplificados mostrados na figura 19.14, e as equações gerais - (3.7) e (3.9), os resultados obtidos são apresentados na tab.XIX.11.

Tab. XIX.11- Valores calculados dos percursos de avanço (ℓ_a).

Parte usinada p	Ferramenta 1			
	Percurso da ferramenta ℓ_{ap}	diâmetro usinado		Percurso do carro ℓ_{-ap}
		d_p	d_{p-1}	
1	14,7	22,2	31,8	11,93
2	52,2	22,2	22,2	52,20
3	5,5	25,4	22,2	6,43
4	4,1	39,7	25,4	8,23

Total de avanço, $\ell_{a1,1}$ **78,8**

-	Ferramenta 2			
1	26,6	31,8	31,8	26,6

Total de avanço, $\ell_{a2,1}$ **26,6**

-	Ferramenta 3			
1	26,9	15,4	15,4	26,9
2	0	22,2	15,4	1,96
3	3,2	28,6	22,2	5,05
4	44,6	28,6	28,6	44,60

Parte usinada p	Ferramenta 3 (cont.)			
	Percurso da ferramenta ℓ_{ap}	diâmetro usinado		Percurso do carro ℓ_{-ap}
		d_p	d_{p-1}	
5	14,7	19,2	28,6	11,98
6	49,1	19,2	19,2	49,10
7	5,5	22,4	19,2	6,42
8	4,1	34,5	22,4	7,59
9	13,3	34,5	34,5	13,30
10	0	35,5	34,5	0,29
11	16,4	35,5	35,5	16,40
12	0	38,0	35,5	0,72
13	2,7	55,6	38,0	7,78
14	19,9	55,6	55,6	19,90
15	0	64,9	55,6	2,69

Total de avanço $\ell_{a3,2}$ **214,7**

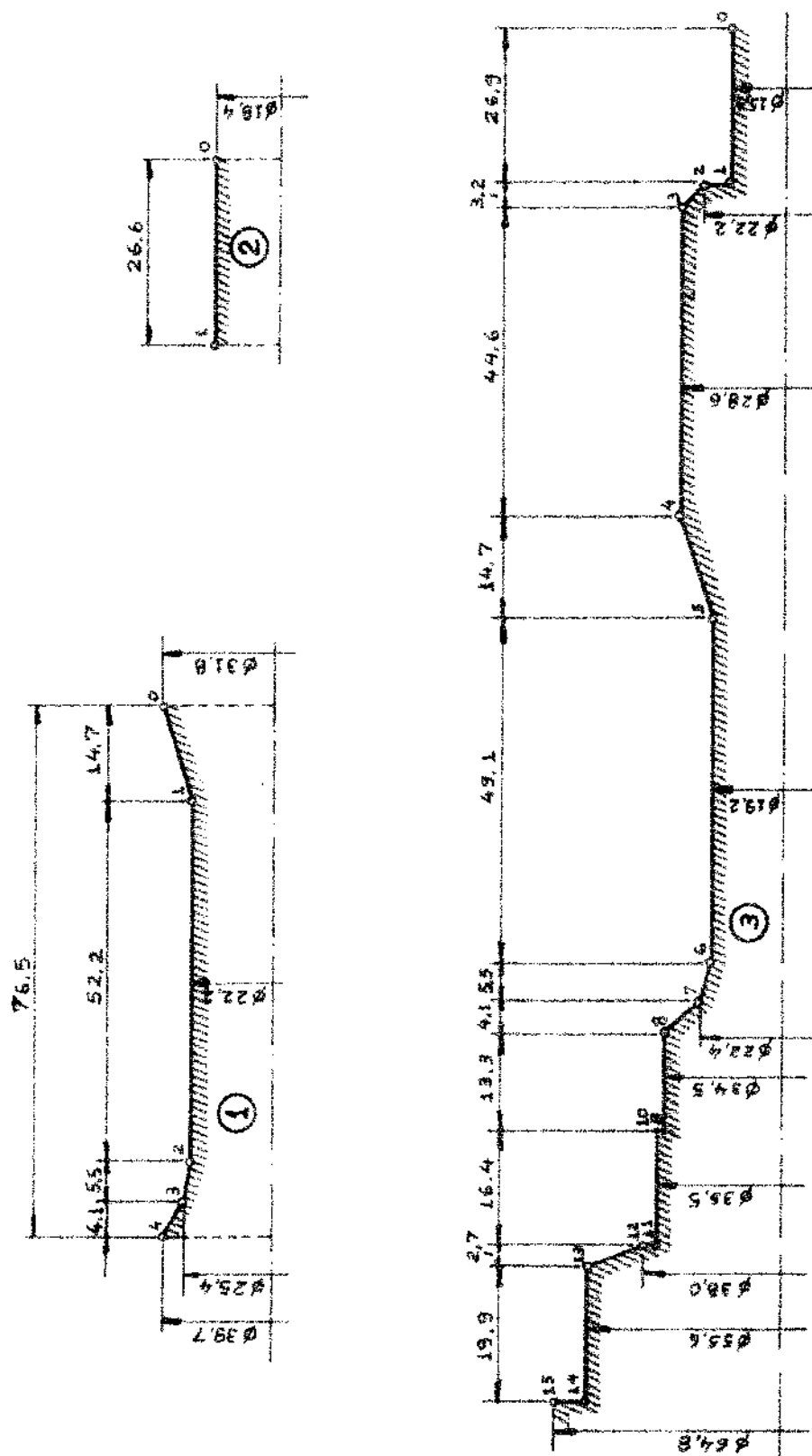


Fig. 19.14 - Perfis simplificados utilizados no cálculo dos percursos de avanço do carro e do diâmetro-equivalente, da peça mostrada na fig. 19.11.

19.3.3 - Dados de entrada para o programa de
computação

19.3.3.1 - Cálculo dos diâmetros-equivalentes

- rotações corrigidas do eixo-árvore: n (ver tabela XIX.10)
- número médio de peças usinadas por vida: Z_T (ver tabela XIX.10).
- avanços básicos do carro, para cada ferramenta e estágio:
 - ferramentas: $\bar{a}_{b1,1} = 0,36$; $\bar{a}_{b2,1} = 0,36$; $\bar{a}_{b3,2} = 0,45 \text{ mm/v}$
 - estágios: $\bar{a}_{b1} = 0,36$; $\bar{a}_{b2} = 0,45 \text{ mm/v}$
- percursos básicos do carro, para cada ferramenta e estágio:
 - ferramentas: $\ell_{ab1,1}^- = 78,8$; $\ell_{ab2,1}^- = 26,6$; $\ell_{ab3,2}^- = 214,7 \text{ mm}$
 - estágios: $\ell_{ab1}^- = 78,8$; $\ell_{ab2}^- = 214,7 \text{ mm}$
- posição do desgaste convencional das ferramentas:
 $\Delta d_{e1} = 9,6$; $\Delta d_{e2} = 13,4$; $\Delta d_{e3} = 3,2 \text{ mm}$
- percursos de avanço do carro em cada parte usinada, para cada ferramenta: (ver tabela XIX.11.
- avanços do carro, para cada ferramenta e estágio:
 - ferramenta 1: $\bar{a}_{p1,1} = 0,36 \text{ mm/v}$ (constante)
 - ferramenta 2: $\bar{a}_{p2,1} = 0,36 \text{ mm/v}$ (constante)
 - ferramenta 3: $\bar{a}_{p3,2} = 0,45 \text{ mm/v}$ (constante)
- diâmetros usinados pelas ferramentas, em cada estágio:
 d_p (ver tabela XIX.11.)

19.3.3.2 - Cálculo das condições econômicas

São utilizados os dados anteriores (§ 19.3.3.1), mais os seguintes:

- tempos de troca de cada ferramenta: $t_{ft1} = 0,90$; $t_{ft2} = 0,55$; $t_{ft3} = 1,25$ min.
- custos por vida e troca das ferramentas: $C_{f1} = 5,02$;
 $C_{f2} = 1,80$; $C_{f3} = 5,24$ Cr\$.
- Custo da máquina, operário e sobretaxas: $S = 0,63$ Cr\$/min
- tempos improdutivos da operação: $t_{ip} = 1,02$ min/peça.

19.3.4 - Resultados obtidos

19.3.4.1 - Diâmetros-equivalentes

FERRAMENTA 1

ESTAGIO 1

X(1,K) = 0.33975E 01 0.39692E 01 0.46993E 01
DE(1,K)= 0.34500E 02 0.34733E 02 0.35055E 02

FERRAMENTA 2

ESTAGIO 1

X(1,K) = 0.35739E 01 0.44602E 01 0.53680E 01
DE(1,K)= 0.45199E 02 0.45199E 02 0.45199E 02

FERRAMENTA 3

ESTAGIO 2

X(1,K) = 0.34913E 01 0.40155E 01 0.47483E 01
DE(1,K)= 0.40356E 02 0.41383E 02 0.42789E 02
// *END OF JOB

Para uma melhor visualização dos resultados obtidos pelo programa de computação, na tabela XIX.12 e figura 19.15 são mostradas as variações das constantes x_i e dos diâmetros-equivalentes $d_{ei,j}$ na qual tomou-se como pontos de referência os valores médios das rotações do eixo-árvore, em cada intervalo de validade da Equação de Taylor Equivalente, de modo análogo ao feito no § 19.2.6.

Estágio nº	Ferramenta nº	Intervalo de validade		Expoente x_i	Diâmetro- -equiva- lente. $d_{ei,j}$	Constante K_{ei}	Constante $\chi_{i,j}$
		nº	rotações				
1	1	1	794,33 - 1000,0	3,3975	34,500	$5,7801 \cdot 10^8$	$1,5484 \cdot 10^{-10}$
		2	1000,0 - 1258,9	3,9692	34,733	$8,6481 \cdot 10^9$	$3,6955 \cdot 10^{-12}$
		3	1258,9 - 1584,9	4,6993	35,055	$3,2864 \cdot 10^{11}$	$2,5101 \cdot 10^{-14}$
	2	1	794,33 - 1000,0	3,5739	45,199	$5,7457 \cdot 10^8$	$6,1212 \cdot 10^{-11}$
		2	1000,0 - 1258,9	4,4602	45,199	$4,6448 \cdot 10^{10}$	$1,8046 \cdot 10^{-13}$
		3	1258,9 - 1584,9	5,3680	45,199	$5,1485 \cdot 10^{12}$	$3,4935 \cdot 10^{-15}$
	3	1	1000,0 - 1258,9	3,4913	40,356	$3,5691 \cdot 10^9$	$1,3840 \cdot 10^{-10}$
		2	1258,9 - 1584,9	4,0155	41,383	$5,6399 \cdot 10^{10}$	$3,9714 \cdot 10^{-12}$
		3	1584,9 - 1995,3	4,7483	42,789	$3,2796 \cdot 10^{12}$	$2,2313 \cdot 10^{-14}$
2							

Tabela XIX.12 - Valores calculados dos expoentes $\{x_i\}$, dos diâmetros-equivalentes $\{d_{ei,j}\}$, das constantes $\{K_{ei}\}$, e das constantes $\{\chi_{i,j}\}$, em cada intervalo de validade da Equação de Faulstich-Equivalente das ferramentas.

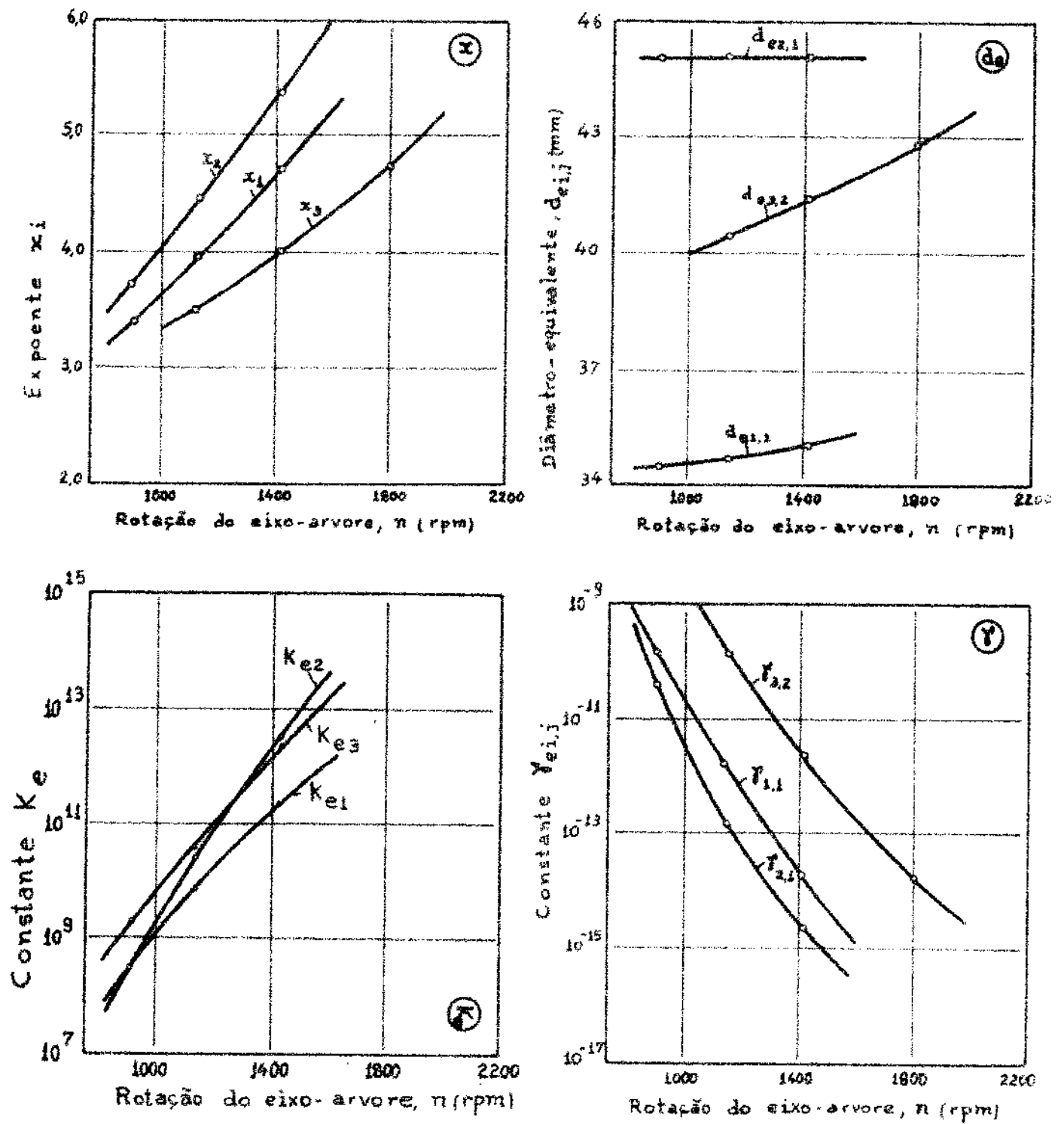


Fig. 19.15 - Variação dos expoentes x_i , diâmetros-equivalentes $d_{ei,j}$, constantes K_{ei} e $\gamma_{i,j}$, em função da rotação do eixo-árvore, na usinagem do eixo-piloto mostrado na figura 19.11.

19.3.4.2 - Análise econômica

INTERVALO 1

X(I,K)	0.33975E 01	0.35739E 01	0.34913E 01
KE(I,K)	0.57801E 09	0.57457E 09	0.35691E 10

INTERVALO 2

X(I,K)	0.39692E 01	0.44602E 01	0.40155E 01
KE(I,K)	0.86481E 10	0.46448E 11	0.56399E 11

INTERVALO 3

X(I,K)	0.46993E 01	0.53680E 01	0.47483E 01
KE(I,K)	0.32864E 12	0.51485E 13	0.32796E 13

CUSTO IMPRODUTIVO CIP = 0.6426000E 00

ESTAGIO 1

GAMA(I) 0.1548399E-09 0.6121225E-10 0.0000000E 00
 GAMA(I) 0.3695531E-11 0.1804590E-12 0.0000000E 00
 GAMA(I) 0.2510162E-13 0.3493512E-15 0.0000000E 00

A ROTACAO DE MINIMO CUSTO ESTA NO INTERVALO 1103.55 / 1129.44 RPM
 A DIFERENCA DE CUSTO PARA A ROTACAO MAIOR E 0.4991838E 01

O CUSTO TOTAL MINIMO ESTA NO INTERVALO 0.1618696E 00 / 0.1618327E 00

A ROTACAO DE MAXIMA PRODUCAO ESTA NO INTERVALO 1552.29 / 1584.89 RPM
 A DIFERENCA DE TEMPO PARA A ROTACAO MAIOR E 0.3376953E 01

O TEMPO TOTAL MINIMO ESTA NO INTERVALO 0.1723092E 00 / 0.1722016E 00

ESTAGIO 2

GAMA(I) 0.0000000E 00 0.0000000E 00 0.1384020E-09
 GAMA(I) 0.0000000E 00 0.0000000E 00 0.3971398E-11
 GAMA(I) 0.0000000E 00 0.0000000E 00 0.2231343E-13

A ROTACAO DE MINIMO CUSTO ESTA NO INTERVALO 1543.86 / 1584.90 RPM
 A DIFERENCA DE CUSTO PARA A ROTACAO MAIOR E 0.2476643E 02

O CUSTO TOTAL MINIMO ESTA NO INTERVALO 0.2443304E 00 / 0.2444182E 00

A ROTACAO DE MAXIMA PRODUCAO ESTA ACIMA DO INTERVALO PESQUISADO,
CUJA ROTACAO MAXIMA E 2036.33 RPM
A DIFERENCA DE TEMPO E -0.2454874E 03

O TEMPO TOTAL MINIMO NAO FOI CALCULADO PORQUE A ROTACAO CORRESPON-
DENTE ESTA ACIMA DO INTERVALO PESQUISADO, CUJA ROTACAO MAXIMA
E 2036.33 RPM

INTERVALO 1

ROTACAO INFERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.17360E 00	0.30057E 00
TOTAL = 0.47418E 00			
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.15274E-01	0.15411E-01
TOTAL = 0.30686E-01			
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.18888E 00	0.31599E 00
TOTAL = 0.11474E 01			
TEMPO CORTE	TC(J)	0.27556E 00	0.47711E 00
TOTAL = 0.75267E 00			
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.35337E-02	0.36764E-02
TOTAL = 0.72102E-02			
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.27909E 00	0.48078E 00
TOTAL = 0.17798E 01			

ROTACAO SUPERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.13789E 00	0.23876E 00
TOTAL = 0.37666E 00			
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.26982E-01	0.27350E-01
TOTAL = 0.54332E-01			
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.16488E 00	0.26611E 00
TOTAL = 0.10735E 01			
TEMPO CORTE	TC(J)	0.21888E 00	0.37899E 00
TOTAL = 0.59787E 00			
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.62760E-02	0.65243E-02
TOTAL = 0.12800E-01			

TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.22516E 00	0.38551E 00
TOTAL =	0.16306E 01		

INTERVALO 2

ROTACAO INFERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.13789E 00	0.23876E 00
TOTAL =	0.37666E 00		

CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.26982E-01	0.27351E-01
TOTAL =	0.54333E-01		

CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.16488E 00	0.26611E 00
TOTAL =	0.10735E 01		

TEMPO CORTE	TC(J)	0.21888E 00	0.37899E 00
TOTAL =	0.59787E 00		

TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.62760E-02	0.65246E-02
TOTAL =	0.12800E-01		

TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.22516E 00	0.38551E 00
TOTAL =	0.16306E 01		

ROTACAO SUPERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.10954E 00	0.18965E 00
TOTAL =	0.29919E 00		

CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.56154E-01	0.54773E-01
TOTAL =	0.11092E 00		

CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.16569E 00	0.24442E 00
TOTAL =	0.10527E 01		

TEMPO CORTE	TC(J)	0.17387E 00	0.30109E 00
TOTAL =	0.47490E 00		

TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.13258E-01	0.13066E-01
TOTAL =	0.26324E-01		

TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.18713E 00	0.31410E 00
TOTAL =	0.15212E 01		

INTERVALO 3

ROTACAO INFERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.10954E 00	0.18965E 00
TOTAL =		0.29919E 00	
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.56154E-01	0.54765E-01
TOTAL =		0.11092E 00	
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.16569E 00	0.24441E 00
TOTAL =		0.10527E 01	
TEMPO CORTE	TC(J)	0.17387E 00	0.30103E 00
TOTAL =		0.47490E 00	
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.13258E-01	0.13064E-01
TOTAL =		0.26322E-01	
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.18713E 00	0.31409E 00
TOTAL =		0.15212E 01	

ROTACAO SUPERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.87008E-01	0.15064E 00
TOTAL =		0.23765E 00	
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.14149E 00	0.12982E 00
TOTAL =		0.27132E 00	
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.22850E 00	0.28047E 00
TOTAL =		0.11515E 01	
TEMPO CORTE	TC(J)	0.13810E 00	0.23911E 00
TOTAL =		0.37722E 00	
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.34092E-01	0.30970E-01
TOTAL =		0.65062E-01	
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.17220E 00	0.27008E 00
TOTAL =		0.14622E 01	

// *END OF JOB

Para uma melhor visualização dos resultados, na tabela XIX.12 e figura 19.14 são apresentados os valores calculados das constantes K_{ei} e $\bar{X}_{i,j}$, na tabela XIX.13 e figura 19.16 os valores dos tempos e custos de usinagem. Na tabela XIX.13 os tempos e os custos de reposição, em cada estágio, não apresentaram variação significativa, para as rotações compreendidas em cada estágio. Por isso, os valores arredondados das rotações superiores e inferiores, foram apresen

tadas como valores únicos.

Tabela XIX.13 - Valores calculados dos tempos e custos de usinagem.

CUSTOS DE USINAGEM							
Condição de usinagem	Estágio 1		Estágio 2		Estágios 1 + 2		Custo total = Improd. + corte + reposição = C_t
	Corte C_{c1}	Reposição C_{r1}	Corte C_{c2}	Reposição C_{r2}	Corte C_{tc}	Reposição C_{tr}	
1	0,174	0,015	0,300	0,015	0,474	0,031	1,145
2	0,138	0,027	0,239	0,027	0,377	0,054	1,074
3	0,110	0,056	0,190	0,055	0,299	0,111	1,053
4	0,087	0,141	0,151	0,131	0,238	0,271	1,152
TEMPOS DE USINAGEM							
Condição de usinagem	Estágio 1		Estágio 2		Estágios 1 + 2		Tempo total = Improd + corte + reposição = t_t
	Corte t_{c1}	Reposição t_{r1}	Corte t_{c2}	Reposição t_{r2}	Corte t_{tc}	Reposição t_{tr}	
1	0,276	0,003	0,477	0,004	0,753	0,007	1,778
2	0,219	0,006	0,379	0,007	0,598	0,013	1,631
3	0,174	0,013	0,301	0,013	0,475	0,026	1,521
4	0,138	0,034	0,239	0,031	0,377	0,065	1,462

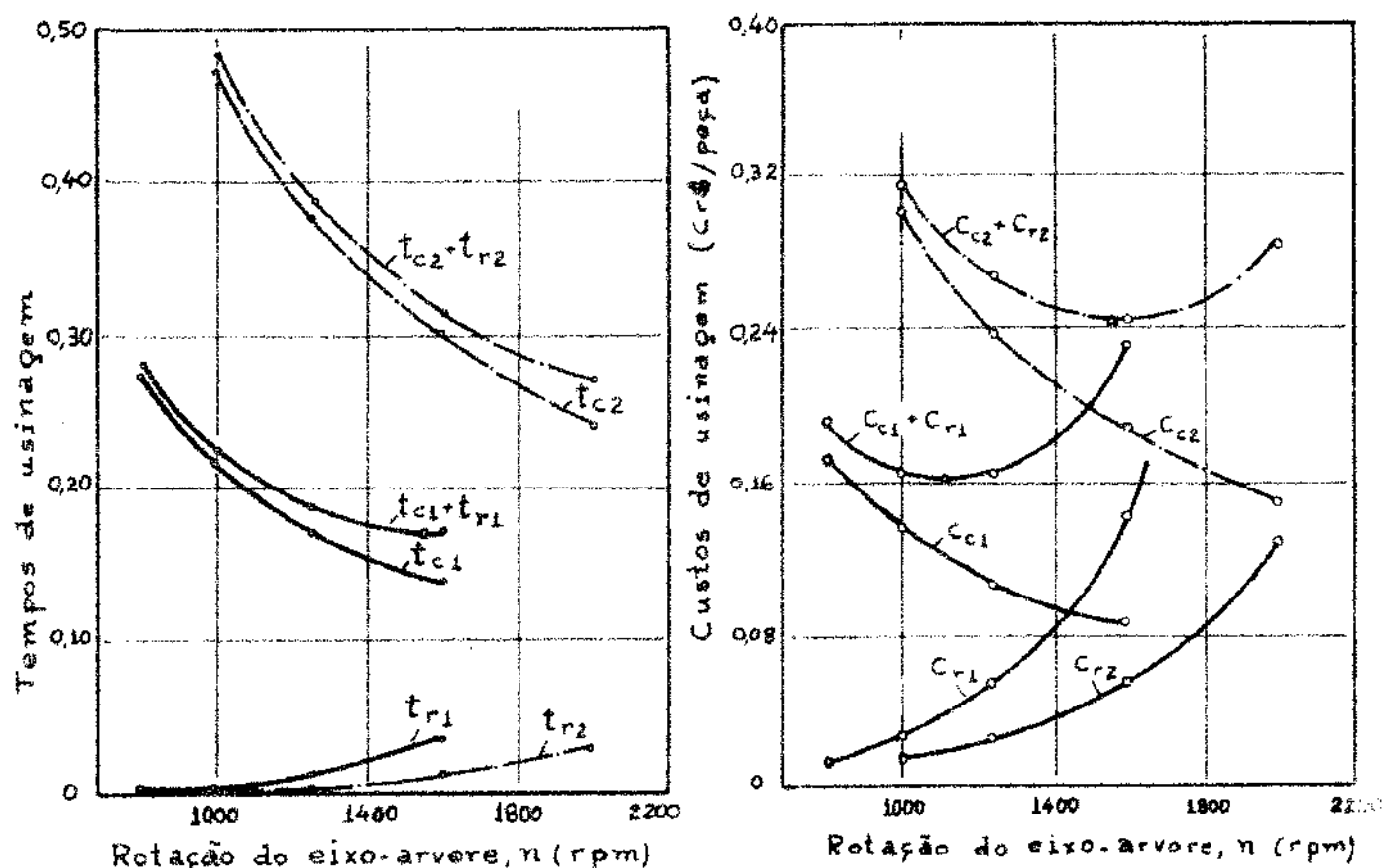


Fig. 19.16 - Variação dos tempos e custos de usinagem, no torneamento do eixo-piloto mostrado na figura 19.11.
As considerações gerais sobre os resultados obtidos serão formuladas no capítulo XX.

19.4 - Torneamento de eixos para redutores de engrenagens

Copiagem longitudinal, em dois passes consecutivos, executados por uma mesma ferramenta, em dois estágios, para a condição de velocidade de corte constante.

19.4.1 - Conceituação do problema

Neste exemplo de aplicação, mostra-se a aplicabilidade do método às operações de usinagem onde a ferramenta de corte atua com diferentes rotações do eixo-árvore e avanços. Para o eixo cujas dimensões usinadas e ciclos de usinagem são mostrados na figura 19.17,

os dados econômicos e auxiliares para a determinação dos diâmetros-e-
quivalentes e das condições econômicas são fornecidos no § 19.4.3 ,
na forma de dados de entrada para os programas de computação apre-
sentados no capítulo XVIII.

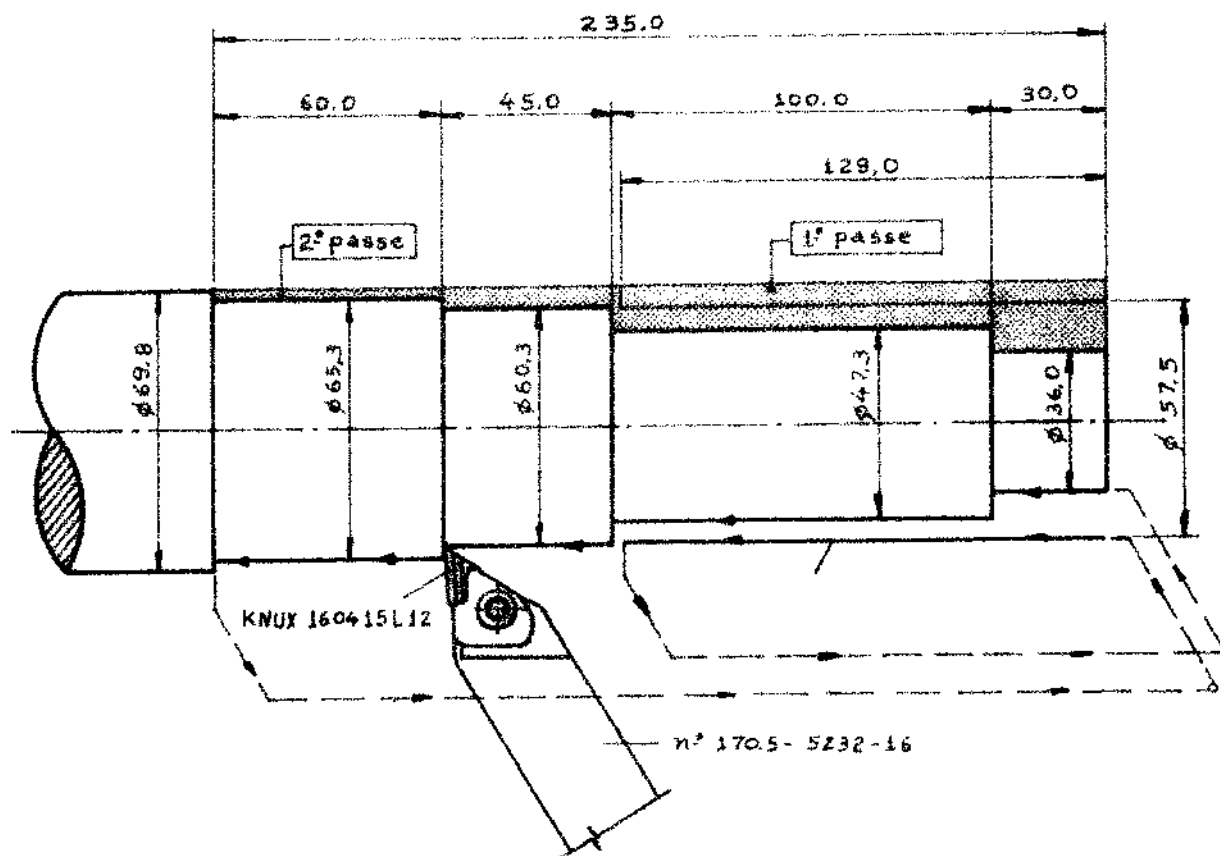


Fig. 19.17 - Peça, dimensões e ciclos de usinagem executados pela ferramenta, no torneamento de eixos para redutores de engrenagens.

19.4.2 - Cálculo dos percursos de avanço (l_a)

Utilizando-se as equações gerais (3.7) e (3.11), para as dimensões usinadas mostradas na figura 19.17, obtém-se os valores dos percursos de avanço (l_{ap}), em cada parte do perfil usinado, nos dois estágios em que a ferramenta atua, apresentados na tabela XIX.14.

Tabela XIX.14 - Valores calculados dos percursos de avanço ($\bar{\ell}_a^-$), no torneamento de um eixo para redutor.

Estágios nº	Parte usina da nº	Percursos da Ferramenta $\bar{\ell}_{ap}$	Diâmetros usinados		Percursos do carro $\bar{\ell}_{ap}^-$	Percursos básicos do carro $\bar{\ell}_{ab,j}^-$
			d_p	d_{p-1}		
1	1	129,0	57,5	57,5	129,0	131,75
	2	0	69,8	57,5	2,75	
2	1	30,0	36,0	36,0	30,00	244,75
	2	0	47,3	36,0	3,26	
	3	100,0	47,3	47,3	100,00	
	4	0	60,3	47,3	3,75	
	5	45,0	60,3	60,3	45,00	
	6	0	65,3	60,3	1,44	
	7	60,0	65,3	65,3	60,00	
	8	0	69,8	65,3	1,30	

19.4.3 - Dados de entrada para o programa de
computação

19.4.3.1 - Cálculo dos diâmetros-equivalentes

- rotações do eixo-árvore: $n_j = 562,34 - 707,95 - 891,25 - 1122,00 - 1412,5 - 1778,3$ rpm
- número médio de peças usinadas por vida: $Z_{T1} = 58,52 - 37,21 - 22,48 - 11,94 - 4,786$
- número de ordem da 1ª rotação do 2º estágio: $NI = 2$
- avanços básicos do carro:
 - ferramenta: $\bar{a}_{b1,1} = 0,450$; $\bar{a}_{b1,2} = 0,355$ mm/v
 - estágio: $\bar{a}_{b1} = 0,450$; $\bar{a}_{b2} = 0,355$ mm/v

- percursos básicos de avanço do carro:

ferramenta: $\ell_{ab1,1}^- = 131,75$; $\ell_{ab1,2}^- = 244,75$ mm

estágio: $\ell_{ab1}^- = 132,75$; $\ell_{ab1,2}^- = 244,75$ mm

- percursos de avanço do carro em cada parte usinada: ver tabela XIX.14

- avanços do carro em cada parte usinada e estágio:

estágio 1: $\bar{a}_{p1,1} = 0,450$ mm/v (constante)

estágio 2: $\bar{a}_{p1,2} = 0,355$ mm/v (constante)

- posição do desgaste convencional da ferramenta 1:

$\Delta d_{e,1} = 13,0$ mm

- diâmetros usinados pela ferramenta, em cada estágio:

d_p - ver tabela XIX.14

19.4.3.2 - Cálculo das condições econômicas

São utilizados os dados anteriores (§ 19.4.3.1), mais os seguintes:

- tempo de troca da ferramenta: $t_{ft1} = 2,50$ min

- custo por vida e troca da ferramenta: $C_{f1} = 5,24$ Cr\$

- custo da máquina, operário e sobretaxas: $S = 0,57$ Cr\$/min

- tempos improdutivos: $t_{ip} = 0,38$ min/peça.

19.4.4 - Resultados obtidos

19.4.4.1 - Diâmetros-equivalentes

FERRAMENTA 1

ESTAGIO 1

X(I,K) = 0.29663E 01 0.31886E 01 0.37481E 01 0.49704E 01
DE(I,K)= 0.70646E 02 0.70649E 02 0.70655E 02 0.70669E 02

ESTAGIO 2

X(I,K) = 0.29665E 01 0.31887E 01 0.37480E 01 0.49696E 01
DE(I,K)= 0.67712E 02 0.67896E 02 0.68345E 02 0.69247E 02
// *END OF JOB

Na tabela XIX.15 e figura 19.18, são apresentados os resultados obtidos. Nota-se neste exemplo de aplicação, que a variação do diâmetro-equivalente da ferramenta em função da rotação do eixo-árvore, é pouco pronunciada no estágio 1 e bastante pronunciada no estágio 2. Isto se deve ao fato de que, no estágio 1 o perfil usinado apresenta apenas uma parte (a de nº 2) onde o diâmetro é variável.

Tabela XIX.15 - Valores calculados do expoente (x), do diâmetro-equivalente (d_e), da constante (K_e) e da constante (δ), em cada intervalo de validade da Equação de Taylor Equivalente, no torneamento de eixos para redutores.

Está- gio	Ferra- menta	Intervalo de validez		Expoente	Diâmetro -equiva- lente d _e	Constante K _e	Constante δ
		nº	rotações				
1	1	1	562,34-707,95	2,9663	70,646	2,1480.10 ⁸	3.4676.10 ⁻⁸
		2	707,95-891,25	3,1886	70,649	6,8738.10 ⁸	8.6315.10 ⁻⁹
		3	891,25-1122,0	3,7481	70,655	1,4673.10 ¹⁰	2,1879.10 ⁻¹⁰
		4	1122,0-1412,5	4,9704	70,669	1,6023.10 ¹³	4,6024.10 ⁻¹⁴
2		1	707,95-891,25	2,9665	67,712	2,1480.10 ⁸	5.6798.10 ⁻⁸
		2	891,25-1122,0	3,1887	67,896	6,8738.10 ⁸	1.4127.10 ⁻⁸
		3	1122,0-1412,5	3,7480	68,345	1,4673.10 ¹⁰	3,5884.10 ⁻¹⁰
		4	1412,5-1778,3	4,9696	69,247	1,6023.10 ¹³	7,7282.10 ⁻¹⁴

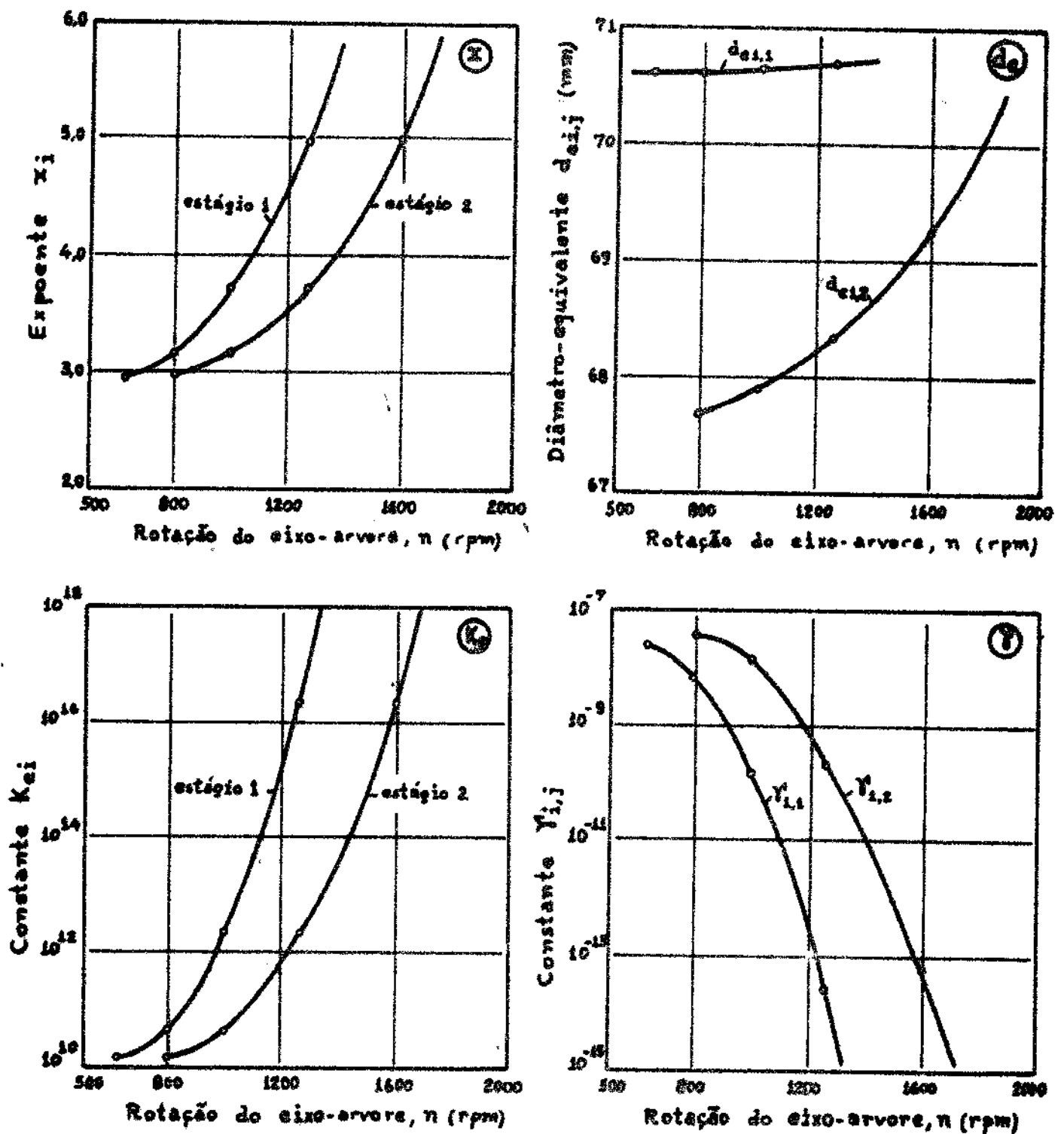


Fig. 19.18 - Variação do expoente x_i , dos diâmetros-equivalentes $d_{ei,j}$ e das constantes K_{ei} e $Y_{i,j}$ em função da variação da rotação do eixo-árvore, no torneamento de eixos para redutores.

19.4.4.2 - Análise econômica

INTERVALO 1

X(I,K) 0.29663E 01
KE(I,K) 0.21480E 09

INTERVALO 2

X(I,K) 0.31886E 01
KE(I,K) 0.68738E 09

INTERVALO 3

X(I,K) 0.37481E 01
KE(I,K) 0.14678E 11

INTERVALO 4

X(I,K) 0.49704E 01
KE(I,K) 0.16023E 14

CUSTO IMPRODUTIVO CIP = 0.2166000E 00

ESTAGIO 1

GAMA(I) 0.3467575E-07
GAMA(I) 0.8631543E-08
GAMA(I) 0.2187944E-09
GAMA(I) 0.4602415E-13

A ROTACAO DE MINIMO CUSTO ESTA NO INTERVALO 960.47 / 983.54 RPM
A DIFERENCA DE CUSTO PARA A ROTACAO MAIOR E 0.1199698E 01

O CUSTO TOTAL MINIMO ESTA NO INTERVALO 0.2320095E 00 / 0.2318608E 00

A ROTACAO DE MAXIMA PRODUCAO ESTA NO INTERVALO 1267.24 / 1296.29 RPM
A DIFERENCA DE TEMPO PARA A ROTACAO MAIOR E 0.1022162E 02

O TEMPO TOTAL MINIMO ESTA NO INTERVALO 0.2848376E 00 / 0.2847266E 00

ESTAGIO 2

GAMA(I) 0.5679804E-07
GAMA(I) 0.1412661E-07
GAMA(I) 0.3588391E-09
GAMA(I) 0.7728208E-13

A ROTACAO DE MINIMO CUSTO ESTA NO INTERVALO 1075.84 / 1098.92 RPM
A DIFERENCA DE CUSTO PARA A ROTACAO MAIOR E 0.2190964E 02

O CUSTO TOTAL MINIMO ESTA NO INTERVALO 0.5299398E 00 / 0.5300986E 00

A ROTACAO DE MAXIMA PRODUCAO ESTA NO INTERVALO 1375.92 / 1412.50 RPM
A DIFERENCA DE TEMPO PARA A ROTACAO MAIOR E 0.2987417E 03

O TEMPO TOTAL MINIMO ESTA NO INTERVALO 0.6598395E 00 / 0.6642957E 00

INTERVALO 1

ROTACAO INFERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.29676E 00	0.55509E 00
TOTAL =		0.85185E 00	
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.20992E-01	0.68549E-01
TOTAL =		0.89542E-01	
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.31775E 00	0.62364E 00
TOTAL =		0.11580E 01	
TEMPO CORTE	TC(J)	0.52064E 00	0.97384E 00
TOTAL =		0.14944E 01	
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.10015E-01	0.32704E-01
TOTAL =		0.42720E-01	
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.53065E 00	0.10065E 01
TOTAL =		0.19172E 01	

ROTACAO SUPERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.23572E 00	0.44093E 00
TOTAL =		0.67665E 00	
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.33015E-01	0.10780E 00
TOTAL =		0.14081E 00	
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.26874E 00	0.54873E 00
TOTAL =		0.10340E 01	

TEMPO CORTE	TC(J)	0.41355E 00	0.77356E 00
TOTAL =	0.11871E 01		
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.15751E-01	0.51433E-01
TOTAL =	0.67184E-01		
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.42930E 00	0.82499E 00
TOTAL =	0.16343E 01		

INTERVALO 2

ROTACAO INFERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.23572E 00	0.44093E 00
TOTAL =	0.67665E 00		
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.31759E-01	0.10906E 00
TOTAL =	0.14082E 00		
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.26748E 00	0.54999E 00
TOTAL =	0.10340E 01		

TEMPO CORTE	TC(J)	0.41355E 00	0.77356E 00
TOTAL =	0.11871E 01		
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.15152E-01	0.52033E-01
TOTAL =	0.67186E-01		
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.42870E 00	0.82559E 00
TOTAL =	0.16343E 01		

ROTACAO SUPERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.18724E 00	0.35024E 00
TOTAL =	0.53749E 00		
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.52570E-01	0.18052E 00
TOTAL =	0.23309E 00		
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.23981E 00	0.53077E 00
TOTAL =	0.98718E 00		

TEMPO CORTE	TC(J)	0.32850E 00	0.61447E 00
TOTAL =	0.94297E 00		
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.25081E-01	0.86127E-01
TOTAL =	0.11120E 00		
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.35358E 00	0.70059E 00
TOTAL =	0.14341E 01		

INTERVALO 3

ROTACAO INFERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.18724E 00	0.35024E 00
TOTAL =		0.53749E 00	
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.47433E-01	0.18566E 00
TOTAL =		0.23309E 00	
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.23467E 00	0.53591E 00
TOTAL =		0.98719E 00	
TEMPO CORTE	TC(J)	0.32850E 00	0.61447E 00
TOTAL =		0.94297E 00	
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.22630E-01	0.88579E-01
TOTAL =		0.11120E 00	
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.35113E 00	0.70305E 00
TOTAL =		0.14341E 01	

ROTACAO SUPERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.14873E 00	0.27821E 00
TOTAL =		0.42695E 00	
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.89305E-01	0.34956E 00
TOTAL =		0.43886E 00	
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.23804E 00	0.62777E 00
TOTAL =		0.10824E 01	
TEMPO CORTE	TC(J)	0.26094E 00	0.48809E 00
TOTAL =		0.74903E 00	
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.42607E-01	0.16677E 00
TOTAL =		0.20938E 00	
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.30355E 00	0.65487E 00
TOTAL =		0.13384E 01	

INTERVALO 4

ROTACAO INFERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.14073E 00	0.27821E 00
TOTAL =	0.42695E 00		
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.69548E-01	0.36931E 00
TOTAL =	0.43886E 00		
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.21828E 00	0.64752E 00
TOTAL =	0.10824E 01		

TEMPO CORTE	TC(J)	0.26094E 00	0.48809E 00
TOTAL =	0.74903E 00		
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.33181E-01	0.17619E 00
TOTAL =	0.20938E 00		
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.29412E 00	0.66429E 00
TOTAL =	0.13384E 01		

ROTACAO SUPERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	0.11814E 00	0.22098E 00
TOTAL =	0.33913E 00		
CUSTO REPOSICAO	CFJ(J)	0.17350E 00	0.92152E 00
TOTAL =	0.10950E 01		
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	0.29165E 00	0.11425E 01
TOTAL =	0.16507E 01		

TEMPO CORTE	TC(J)	0.20727E 00	0.38769E 00
TOTAL =	0.59497E 00		

TEMPO REPOSICAO	TR(J)	0.82780E-01	0.43966E 00
TOTAL =	0.52244E 00		

TEMPO CONFECCAO	TT(J)	0.29005E 00	0.82735E 00
TOTAL =	0.14974E 01		

// *END OF JOB

Para uma melhor comparação e análise dos resultados obtidos, estes são mostrados na figura 19.19 e tabela XIX.15.

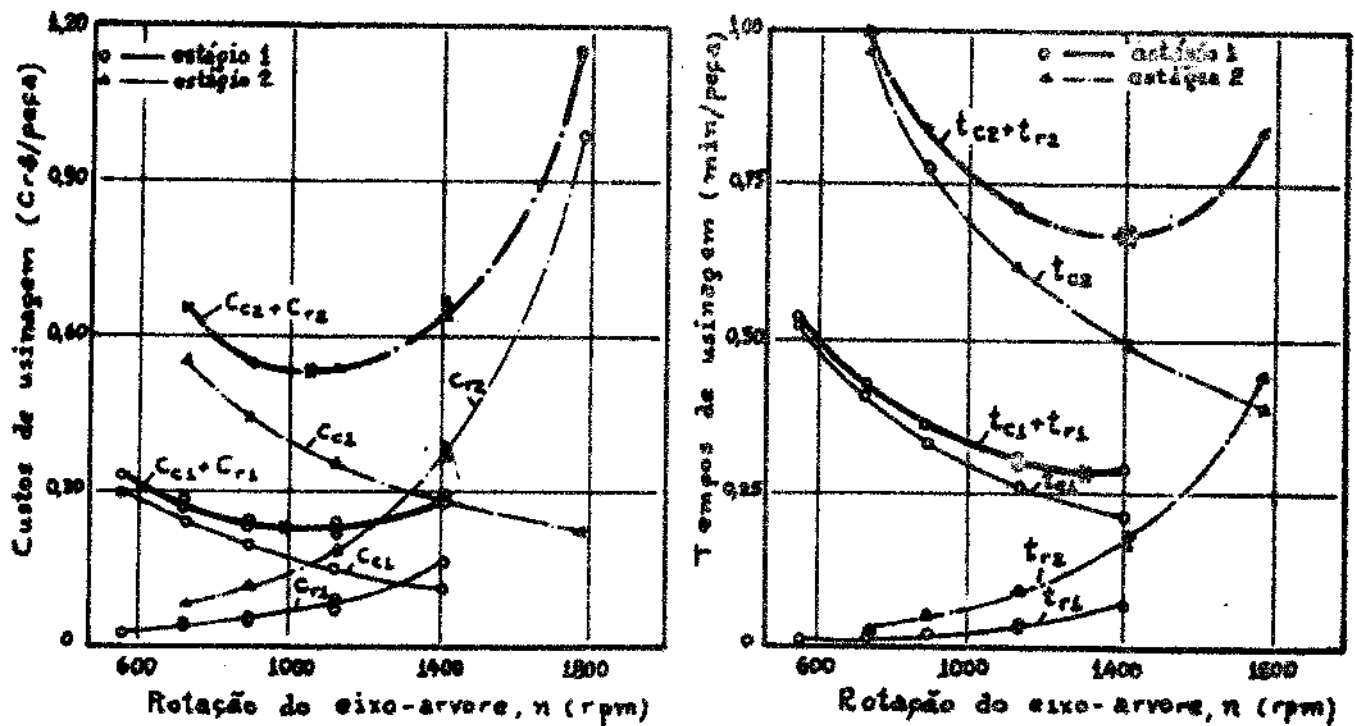


Fig. 19.19 - Variação dos tempos e custos de usinagem, em função da rotação do eixo-árvore.

CUSTOS DE USINAGEM								
Intervalo de validade		Estágio 1			Estágio 2			Custo Total
		corte	reposição	Total	corte	reposição	Total	
n	rotação	C_{c1}	C_{r1}	$C_{c1} + C_{r1}$	C_{c2}	C_{r2}	$C_{c2} + C_{r2}$	Improd. + + corte + + reposição C_b
1	inf.	0,297	0,021	0,318	0,555	0,069	0,624	1,158
	sup.	0,236	0,033	0,269	0,441	0,108	0,549	1,034
2	inf.	0,236	0,032	0,268	0,441	0,109	0,550	1,034
	sup.	0,187	0,053	0,240	0,350	0,180	0,531	0,987
3	inf.	0,187	0,047	0,235	0,350	0,186	0,536	0,987
	sup.	0,149	0,089	0,238	0,278	0,350	0,628	1,082
4	inf.	0,149	0,069	0,218	0,278	0,369	0,647	1,082
	sup.	0,118	0,173	0,294	0,221	0,921	1,142	1,650

TEMPOS DE USINAGEM								
Intervalo de validade		Estágio 1			Estágio 2			Custo Total Improd. + + corte + + reposição t_t
nº	rotação	t_{c1}	t_{r1}	$t_{c1}+t_{r1}$	t_{c2}	t_{r2}	$t_{c2}+t_{r2}$	
1	inf.	0,521	0,010	0,531	0,974	0,033	1,007	1,917
	sup.	0,414	0,016	0,429	0,774	0,051	0,825	1,634
2	inf.	0,414	0,015	0,429	0,774	0,052	0,826	1,634
	sup.	0,328	0,025	0,353	0,614	0,086	0,700	1,434
3	inf.	0,328	0,023	0,351	0,614	0,089	0,703	1,434
	sup.	0,261	0,043	0,304	0,488	0,167	0,655	1,338
4	inf.	0,261	0,033	0,294	0,488	0,176	0,664	1,338
	sup.	0,207	0,083	0,290	0,388	0,440	0,827	1,497

19.5 - Torneamento de eixos para rodeiros de vagões ferroviários

Copiagem de perfis curvelíneos, com diferentes avanços, para a condição de velocidade de corte mantida constante. Utilização de uma única ferramenta, em um único estágio.

19.5.1 - Conceituação do problema

Trata-se da copiagem do mesmo eixo para rodeiros de vagões ferroviários, mostrado na figura 19.1, na qual admitiu-se que a velocidade de corte é mantida constante, por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore. A ferramenta e as condições operacionais do torno são as mesmas do § 19.2, mas a curva de vida é diferente, como mostra a figura 19.20. Os dados econômicos e auxiliares são apresentados no § 19.5.2, na forma de dados de entrada para

os programas de computação, apresentados no capítulo XVIII .

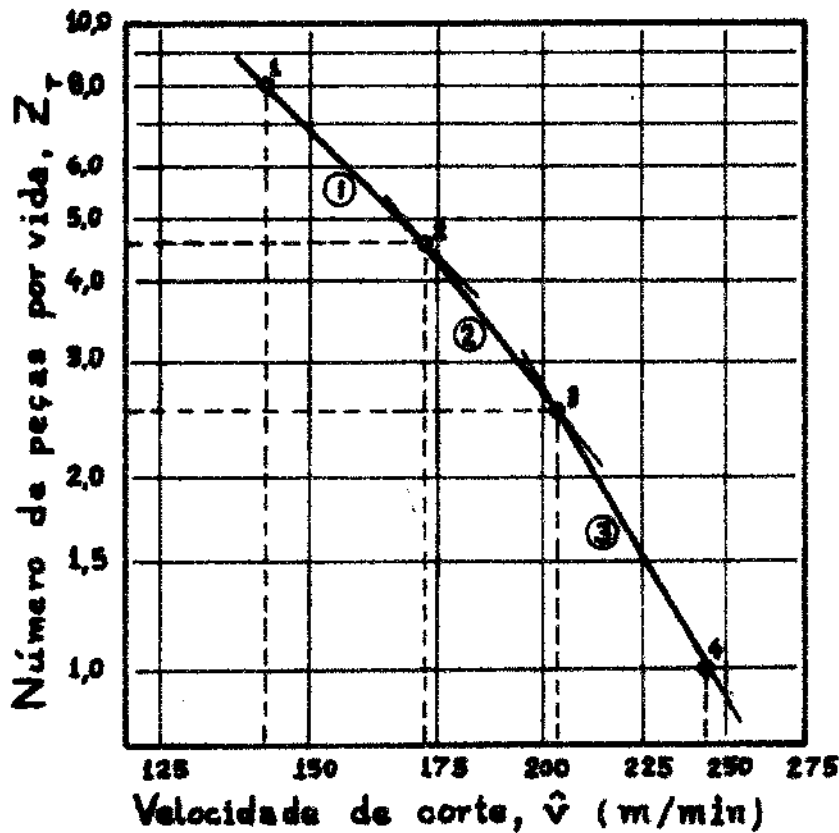


Fig. 19.20 - Curva de vida da ferramenta, para a condição de velocidade de corte constante.

19.5.2 - Dados de entrada para os programas de computação

19.5.2.1 - Diâmetro-equivalente

Para a execução do programa de computação foram fornecidos os seguintes dados de entrada:

- nº de perfis: $p = 11$
- nº de ferramentas: $m = 1$
- nº de estágios: $N = 1$
- percursos de avanço da ferramenta 1, em cada parte usada: $\ell_{ap1,1} = 12,7 - 0 - 215,3 - 10,0 - 5,0 - 30,0 - 14,4 - 206,4 - 30,0 - 14,4 - 206,4$ mm

- diâmetros usinados pela ferramenta 1: $d_{p1,1} = 128,6 - 128,6 - 131,9 - 131,9 - 139,5 - 164,8 - 178,6 - 195,1 - 195,1 - 175,6 - 192,1 - 192,1$ mm
- avanço básico do carro: $\bar{a}_{b1,1} = 0,3416$ mm/v
- avanços do carro, em cada parte usinada: $\bar{a}_{p1,1} = 0,36 - 0,36 - 0,36 - 0,36 - 0,50 - 0,50 - 0,50 - 0,25 - 0,25 - 0,25$ mm/v
- Posição do desgaste convencional da ferramenta: $\Delta d_{e1} = 6,4$ mm
- Ângulo de inclinação do Cópador: $\delta = 120^\circ$

19.5.2.2 - Análise econômica

São utilizados os mesmos dados do parágrafo anterior, mais os seguintes:

- número de velocidades de corte: $NV = 4$
- salário da máquina, operário e sobretaxas: $S = 0,50$ Gr\$/min
- tempos improdutivos: $t_{ip} = 6,30$ min.
- número de peças executadas por operação: $q = 0,5$
- velocidades de corte (valores corrigidos): $\hat{v}_{b1} = 141,25 - 167,88 - 199,53 - 237,14$ m/min
- número médio de peças usinadas por vida: $Z_{T1} = 7,792 - 4,670 - 2,520 - 0,958$
- percursos básicos de avanço do carro:
 - ferramenta 1: $\ell_{ab1,1} = 772,6$ mm
 - estágio 1: $\ell_{ab1} = 772,6$ mm
- avanços básicos do carro:
 - ferramenta 1: $\bar{a}_{b1,1} = 0,3416$ mm
 - estágio 1: $\bar{a}_{b1} = 0,3416$ mm
- diâmetro-equivalente: $d_{e1,1} = 178,19$ mm (calculado no § 19.5.3.1).

- custo da ferramenta 1 (vida+troca): $C_{f1} = 6,06 \text{ Cr\$}$
- tempo de troca da ferramenta 1: $t_{ft1} = 0,50 \text{ min}$
- diâmetro-equivalente da ferramenta-base do estágio 1:
 $d_{eb,1} = 178,19 \text{ mm}$
- diferença de diâmetros: $c_1 = 1$ (apenas uma ferramenta atua no estágio 1).

19.5.3 - Resultados obtidos

19.5.3.1 - Diâmetro-equivalente

ESTAGIO 1

FERRAMENTA 1 - DE(1,J) = 0.17819E 03
// *END OF JOB

19.5.3.2 - Análise econômica

INTERVALO 1

X(1,K) 0.39640E 01
KE(1,K) 0.46533E 11

INTERVALO 2

X(1,K) 0.45718E 01
KE(1,K) 0.10472E 12

INTERVALO 3

X(1,K) 0.66007E 01
KE(1,K) 0.48557E 17

CUSTO IMPRODUTIVO CIP = 0.3150000E 01

ESTAGIO 1

BETA(1) 0.4384538E-05
BETA(1) 0.2347776E-06
BETA(1) 0.7933133E-11

A VELOCIDADE DE MINIMO CUSTO ESTA NO INTERVALO 183.70 / 186.87 M/MIN
A DIFERENCA DE CUSTO PARA A VELOCIDADE MAIOR E 0.6231875E 03

O CUSTO TCTAL MINIMO ESTA NO INTERVALO 0.866222CE C1 / 0.8678096E 01

A VELOCIDADE DE MAXIMA PRODUCAO ESTA ACIMA DO INTERVALO PESQUISADO, CU
JA VELOCIDADE MAXIMA E 240.90 M/MIN
A DIFERENCA DE TEMPO E -0.2526888E C6

O TEMPO TOTAL MINIMO NAO FOI CALCULADO PORQUE A VELOCIDADE CORRESPONDE
NTE ESTA ACIMA DO INTERVALO PESQUISADO, CUJA VELOCIDADE MAXIMA E
240.90 M/MIN

INTERVALO 1

VELOCIDADE INFERIOR

CUSTO CORTE CC(J) 0.89636E C1
TCTAL = 0.89636E C1

CUSTO REPOSICAO CR(J) 0.77772E C0
TCTAL = 0.77772E C0

CUSTO CONFECCAO CT(J) 0.97413E C1
TCTAL = 0.12891E C2

TEMPO CORTE TC(J) 0.17927E C2
TCTAL = 0.17927E C2

TEMPO REPOSICAO TR(J) 0.64168E-C1
TCTAL = 0.64168E-C1

TEMPO CONFECCAO TT(J) 0.17991E C2
TCTAL = 0.24291E C2

VELOCIDADE SUPERIOR

CUSTO CORTE CC(J) 0.75417E C1
TCTAL = 0.75417E C1

CUSTO REPOSICAO CR(J) 0.12976E C1
TCTAL = 0.12976E C1

CUSTO CONFECCAO CT(J) 0.88354E C1
TCTAL = 0.11989E C2

TEMPO CORTE TC(J) 0.15083E C2
TCTAL = 0.15083E C2

TEMPO REPOSICAO TRI(J) 0.10707E C0
TCTAL = 0.10707E C0

TEMPO CONFECCAO TT(J) C.15151E C2
TCTAL = 0.21491E C2

INTERVALO 2

VELOCIDADE INFERIOR

CUSTO CORTE CC(J) C.75417E C1
TCTAL = 0.75417E C1

CUSTO REPOSICAO CR(J) C.12976E C1
TCTAL = 0.12976E C1

CUSTO CONFECCAO CT(J) C.88394E C1
TCTAL = 0.11989E C2

TEMPO CORTE TC(J) C.15083E C2
TCTAL = 0.15083E C2

TEMPO REPOSICAO TR(J) C.10707E C2
TCTAL = 0.10707E C2

TEMPO CONFECCAO TT(J) C.15151E C2
TCTAL = 0.21491E C2

VELOCIDADE SUPERIOR

CUSTO CORTE CC(J) C.63455E C1
TCTAL = 0.63455E C1

CUSTO REPOSICAO CR(J) C.24048E C1
TCTAL = 0.24048E C1

CUSTO CONFECCAO CT(J) C.87502E C1
TCTAL = 0.11900E C2

TEMPO CORTE TC(J) C.12691E C2
TCTAL = 0.12691E C2

TEMPO REPOSICAO TR(J) C.19841E C2
TCTAL = 0.19841E C2

TEMPO CONFECCAO TT(J) C.12889E C2
TCTAL = 0.19189E C2

INTERVALO 3

VELOCIDADE INFERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	C.63455E C1
TOTAL =	0.63455E C1	
CUSTO REPOSICAO	CR(J)	C.24048E C1
TOTAL =	0.24048E C1	
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	C.87502E C1
TOTAL =	0.11900E C2	
TEMPO CORTE	TC(J)	C.12691E C2
TOTAL =	0.12691E C2	
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	C.19841E CC
TOTAL =	0.19841E CC	
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	C.12889E C2
TOTAL =	0.19189E C2	

VELOCIDADE SUPERIOR

CUSTO CORTE	CC(J)	C.53391E C1
TOTAL =	0.53391E C1	
CUSTO REPOSICAO	CR(J)	0.63258E C1
TOTAL =	0.63258E C1	
CUSTO CONFECCAO	CT(J)	C.11865E C2
TOTAL =	0.14815E C2	
TEMPO CORTE	TC(J)	C.10678E C2
TOTAL =	0.10678E C2	
TEMPO REPOSICAO	TR(J)	C.52193E CC
TOTAL =	0.52193E CC	
TEMPO CONFECCAO	TT(J)	C.11200E C2
TOTAL =	0.17500E C2	

Nas tabelas XIX.16, XIX.17 e figura 19.21, são mostrados os valores obtidos pelo programa de computação, o que permitirá uma melhor comparação e análise dos resultados.

Tabela XIX.16 - Valores calculados dos expoentes x , e das constantes K_e e β , em cada intervalo de validade da Equação de Taylor Equivalente.

Intervalo k			Expoente x_k	Constante $K_{e,k}$	Constante K
Nº	Velocidade				
	inf.	sup.			
1	141,25	167,88	3,9640	$4,6533 \cdot 10^{10}$	$4,3845 \cdot 10^{-6}$
2	167,88	199,53	4,5718	$1,0472 \cdot 10^{12}$	$2,3478 \cdot 10^{-7}$
3	199,53	237,14	6,6007	$4,8597 \cdot 10^{16}$	$7,9331 \cdot 10^{-12}$

Tabela XIX.17 - Valores calculados dos tempos e custos de usinagem, em função da velocidade de corte.

Custos de usinagem					
Intervalo		Custo de corte C_{cl}	Custo de reposição C_{rl}	Custos improdutivos C_{ip}	Custo total C_t
Nº	Posição				
1	inf.	8,964	0,778	3,15	12,891
	sup.	7,542	1,298		11,989
2	inf.	7,542	1,298		11,989
	sup.	6,345	2,405		11,900
3	inf.	6,345	2,405		11,900
	sup.	5,339	6,326		14,815
tempos de usinagem					
1	inf.	17,927	0,064	6,300	24,291
	sup.	15,083	0,107		21,491
2	inf.	15,083	0,107		21,491
	sup.	12,691	0,198		19,189
3	inf.	12,691	0,198		19,189
	sup.	10,678	0,522		17,500

20 - Considerações finais sobre o método e os resultados obtidos

O método geral apresentado neste trabalho, possibilita a obtenção das condições econômicas (mínimo custo e máxima produção, tempos e custos envolvidos) para qualquer tipo de ferramenta de corte e operação de usinagem. Particularmente, ele pode ser aplicado, sem restrições de qualquer ordem, às operações de copiagem e às operações com multiferramentas. Quando todas as ferramentas que atuam em um dado estágio, não apresentam uma mesma Equação de Taylor Equivalente, a otimização dos tempos e custos de usinagem só é possível com o método numérico apresentado neste trabalho, bastante simplificado com a utilização de um computador digital.

A obtenção de equações gerais para o cálculo dos tempos e custos de corte e reposição, seguiu um novo caminho, a partir dos percursos de avanço do carro, o que não foi antes utilizado, talvez por causa do grande número de variáveis envolvidas, que quase sempre impedia a correlação das grandezas envolvidas.

Por outro lado, as equações apresentadas para as condições de rotação do eixo-árvore constante ou velocidade de corte constante, possuem a mesma forma, o que permitiu a análise em paralelo desta última condição, o que antes não foi realizado por nenhum outro autor.

O estudo dos erros introduzidos com a utilização de segmentos retilíneos para as curvas de vida das ferramentas não foi analisado neste trabalho, devido a sua pouca significância nos resultados obtidos, como foi notado nos exemplos de aplicação do capítulo XIX. Posteriormente, pretendemos analisar este aspecto, caso surjam problemas práticos que o justifiquem. Do mesmo ponto de vista, isto ocorre com a utilização do expoente x constante, em cada -

intervalo de validade da Equação de Taylor Equivalente, quando uma mesma ferramenta atua em vários estágios, principalmente em se tratando de peças com pequeno número de peças usinadas por vida. Neste último caso, principalmente nas operações de desbaste, onde a ferramenta é trocada antes de completar uma das peças, haverá uma alteração da vida média quando os diâmetros usinados são variáveis o que poderá ocasionar uma grande dispersão nos valores da vida da ferramenta, só compensada com um grande número de valores observados.

Muitos outros aspectos práticos da utilização do método geral não fôra efetuados, por representarem casos específicos, como - por exemplo, sua extensão às operações de usinagem com ferramentas abrasivas.

SÍMBOLOS UTILIZADOS

- a - avanço da ferramenta por volta do eixo-árvore, na direção principal de avanço (mm/v).
- $\bar{a}$ - avanço do carro ou mesa móvel, por volta do eixo-árvore (mm/v).
- $\bar{a}_b$ - avanço básico do carro ou mesa móvel, por volta do eixo-árvore (mm/v).
- $\bar{a}_{bi,j}$ - idem $\bar{a}_b$, correspondente à i ésima ferramenta, no j ésimo estágio (mm/v).
- $\bar{a}_{bj}$ - idem $\bar{a}_b$, relativo ao j ésimo estágio (mm/v).
- $\bar{a}_j$ - idem $\bar{a}$, relativo ao j ésimo estágio (mm/v).
- $\bar{a}_{j,p}$ - idem $\bar{a}$, correspondente ao j ésimo estágio, na usinagem do perfil de ordem p (mm/v).
- a_m - avanço principal médio da ferramenta, por volta do eixo-árvore, na direção principal de avanço (mm/v).
- a_t - avanço tangencial da ferramenta, por volta do eixo-árvore, na direção tangencial ao perfil usinado (mm/v).
- a_u - avanço da ferramenta segundo o eixo de inclinação do Copiador, por volta do eixo-árvore (mm/v).
- a_y - avanço transversal da ferramenta, por volta do eixo-árvore, na direção perpendicular à direção principal de avanço (mm/v).
- A - área principal, correspondente à área sob o perfil usinado (mm²).
- A_c - área corretiva, correspondente à soma das áreas A_o e A_w (mm²).
- A_e - área equivalente do perfil usinado (mm²).
- A_o - área correspondente à abcissa final e ordenada inicial do perfil usinado (mm²).
- A_w - área correspondente à abcissa inicial e ordenada final do perfil usinado (mm²).
- C_{cj} - custo do tempo de corte do j ésimo estágio (Cr\$/peça)

SÍMBOLOS UTILIZADOS

- a - avanço da ferramenta por volta do eixo-árvore, na direção principal de avanço (mm/v).
- $\bar{a}$ - avanço do carro ou mesa móvel, por volta do eixo-árvore (mm/v).
- $\bar{a}_b$ - avanço básico do carro ou mesa móvel, por volta do eixo-árvore (mm/v).
- $\bar{a}_{bi,j}$ - idem $\bar{a}_b$, correspondente à i ésima ferramenta, no j ésimo estágio (mm/v).
- $\bar{a}_{bj}$ - idem $\bar{a}_b$, relativo ao j ésimo estágio (mm/v).
- $\bar{a}_j$ - idem $\bar{a}$, relativo ao j ésimo estágio (mm/v).
- $\bar{a}_{j,p}$ - idem $\bar{a}$, correspondente ao j ésimo estágio, na usinagem do perfil de ordem p (mm/v).
- a_m - avanço principal médio da ferramenta, por volta do eixo-árvore, na direção principal de avanço (mm/v).
- a_t - avanço tangencial da ferramenta, por volta do eixo-árvore, na direção tangencial ao perfil usinado (mm/v).
- a_u - avanço da ferramenta segundo o eixo de inclinação do Copiador, por volta do eixo-árvore (mm/v).
- a_y - avanço transversal da ferramenta, por volta do eixo-árvore, na direção perpendicular à direção principal de avanço (mm/v).
- A - área principal, correspondente à área sob o perfil usinado (mm²).
- A_c - área corretiva, correspondente à soma das áreas A_o e A_w (mm²).
- A_e - área equivalente do perfil usinado (mm²).
- A_o - área correspondente à abscissa final e ordenada inicial do perfil usinado (mm²).
- A_w - área correspondente à abscissa inicial e ordenada final do perfil usinado (mm²).
- C_{cj} - custo do tempo de corte do j ésimo estágio (Cr\$/peça)

- $C_{er,j}$ - custo de reposição da ferramenta equivalente do j -ésimo estágio (Cr\$/peça).
- C_{fi} - custo por vida e reposição da i ésimas ferramenta (Cr\$).
- C_{fj} - custo por vida e reposição das ferramentas que atuam no j ésimos estágio (Cr\$).
- C_{fTi} - custo por vida da i ésimas ferramenta (Cr\$).
- c_i - diferença de diâmetros em um grupo de ferramentas (mm).
- C_i - custo independente da rotação do eixo-árvore (Cr\$/peça).
- C_{ip} - custo dos tempos improdutivos (Cr\$/peça).
- C_m - custo do material da peça (Cr\$/peça).
- C_t - custo total de confecção (Cr\$/peça).
- C_{tc} - custo total de corte do material da peça (Cr\$/peça).
- C_{tf} - custo total das ferramentas (Cr\$/peça).
- C_{tr} - custo total de reposição das ferramentas (Cr\$/peça).
- $C_{rf,j}$ - custo da vida das ferramentas consumidas no j ésimos estágio (Cr\$/peça).
- C_{ri} - custo de reposição da i ésimas ferramenta (Cr\$/peça).
- C_{rj} - custo de reposição das ferramentas do j ésimos estágio (Cr\$/peça).
- $C_{rt,j}$ - custo de troca das ferramentas do j ésimos estágio (Cr\$/peça).
- d, D - diâmetro nominal da peça ou ferramenta (mm).
- d_e - diâmetro-equivalente (mm).
- $d_{eb,j}$ - diâmetro-equivalente da ferramenta-base, no j ésimos estágio (mm).
- $d_{ei,j}$ - diâmetro-equivalente da i ésimas ferramenta, no j ésimas estágio (mm).
- d_{ej}^* - diâmetro-equivalente da ferramenta-padrão do j ésimos estágio.
- d_{eo} - diâmetro-equivalente referido ao Ponto principal de referência da ferramenta (mm).
- d_o, D_o - diâmetro da peça referido ao Ponto principal de referência da ferramenta (mm).

- g - número de ordem dos grupos de ferramentas.
- G - número total de grupos de ferramentas.
- i, j, k - ordem de numeração nos somatórios, correspondentes às ferramentas, estágios e operações de corte.
- K - constante da Equação de Taylor Simplificada.
- K_{ei} - constante da Equação de Taylor Equivalente da i ésimas ferramenta.
- K_{ej} - constante da Equação de Taylor Equivalente de todas as ferramentas que atuam no j ésimos estágio.
- K_{ej}^* - constante da Equação de Taylor Equivalente da ferramenta-padrão do j ésimos estágio.
- ℓ_a - percurso principal de avanço de corte da ferramenta (mm).
- ℓ_a^- - percurso de avanço do carro ou mesa móvel durante a operação de corte (mm).
- ℓ_{aa} - percurso principal de aproximação da ferramenta (mm).
- ℓ_{aa}^- - percurso de avanço do carro ou mesa móvel, durante o percurso principal de aproximação da ferramenta (mm).
- $\ell_{ab,j}^-$ - percurso básico de avanço de todas as ferramentas que atuam no j ésimos estágio (mm).
- $\ell_{abi,j}^-$ - percurso básico de avanço da i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio (mm)
- ℓ_{ae} - percurso principal de entrada da ferramenta na peça (mm)
- ℓ_{ae}^- - percurso de avanço do carro ou mesa móvel, durante o percurso principal de entrada da ferramenta na peça (mm).
- ℓ_{af} - percurso de avanço de corte da ferramenta (mm).
- ℓ_{af}^- - percurso de avanço do carro ou mesa móvel durante o percurso de avanço de corte da ferramenta (mm).
- ℓ_{ap} - percurso principal de avanço de corte da ferramenta - na usinagem do p ésimos perfil da peça (mm).
- $\ell_{aj,p}^-$ - percurso de avanço do carro ou mesa móvel, no j ésimos estágio, na usinagem do perfil de ordem p (mm).

- ℓ_{ar} - percurso principal de retirada da ferramenta da peça (mm).
- ℓ_{ar}^- - percurso de avanço do carro ou mesa móvel, durante o percurso principal de retirada da ferramenta da peça (mm).
- ℓ_{as} - percurso principal de saída da ferramenta, durante a operação de corte (mm).
- ℓ_{as}^- - percurso de avanço do carro ou mesa móvel, durante o percurso principal de saída da ferramenta (mm).
- ℓ_{at} - percurso total de avanço da ferramenta (mm).
- ℓ_{at}^- - percurso total de avanço do carro ou mesa móvel, durante o percurso total de avanço da ferramenta (mm).
- ℓ_{a*} - percurso principal de corte da ferramenta-padrão (mm).
- $\ell_{a*,j}$ - idem, no j-ésimo estágio (mm).
- ℓ_c - percurso de corte da ferramenta (mm).
- ℓ_e - percurso efetivo de corte da ferramenta (mm).
- m - número total de ferramentas.
- n - rotação do eixo-árvore (rpm).
- n_e - rotação-equivalente do eixo-árvore (rpm).
- n_j - rotação do eixo-árvore no j-ésimo estágio (rpm).
- $n_{mc,j}$ - rotação do eixo-árvore para o mínimo custo total de confecção, por peça, no j-ésimo estágio (rpm).
- $n_{mt,j}$ - idem, para o mínimo tempo total de confecção, por peça (rpm).
- n_{ti} - número total de trocas da i-ésima ferramenta, na usinagem de um lote de peças.
- N - número total de estágios.
- p - profundidade de corte (mm).
- q - número de peças usinadas por operação.
- $\tilde{Q}_{ri}$ - número total de trocas da i-ésima ferramenta, na usinagem de um lote de peças.
- R - coeficiente adimensional de correlação entre o tempo de corte da operação e o tempo de corte da ferramenta-padrão.

- R_j - idem, relativo a cada j éximo estágio.
- S - salário do operário e da máquina, inclusive sobretaxas (Cr\$/min).
- $s_{i,g}$ - coeficiente de participação de cada i éxima ferramenta, no tempo de troca de g éximo grupo de ferramentas.
- t - tempo (min).
- t_c - tempo de corte (min).
- t_{ca} - tempo principal de corte, independente do ângulo de inclinação do Copiador (min).
- t_{cc} - tempo corretivo de corte, dependente do ângulo de inclinação do Copiador (min).
- t_{ci} - tempo de corte da i éxima ferramenta (min).
- $t_{ci,j}$ - idem t_{ci} , no j éximo estágio (min).
- t_{cj} - tempo de corte de todas as ferramentas que atuam no j éximo estágio (min).
- t_e - tempo total de execução (min/peça).
- $t_{er,j}$ - tempo de reposição da ferramenta-equivalente, no j éximo estágio (min/peça).
- t_{fti} - tempo de troca da i éxima ferramenta (min).
- $t_{ft,g}$ - tempo de troca do g éximo grupo de ferramentas (min).
- $t_{ft,j}$ - tempo de troca de qualquer uma das ferramentas que atuam no j éximo estágio (min).
- t_{ip} - tempos improdutivos (min/peça).
- t_{iv} - tempos independentes da velocidade de corte (min/peça).
- t_p - tempo de preparação da máquina (min).
- t_{rj} - tempo de reposição das ferramentas do j éximo estágio (min).
- t_c - tempo total de confecção (min/peça).
- t_{tc} - tempo total de corte (min/peça).
- t_{tr} - tempo total de reposição (min/peça).
- T - vida da ferramenta (min).

- T_i - vida da i é^{sa} ferramenta (min).
- T_{mc} - vida da ferramenta para a condição de mínimo custo total de confecção (min).
- T_{mt} - vida da ferramenta para a condição de mínimo tempo total de confecção (min).
- $T_{mc,j}^*$ - idem T_{mc} , correspondente à ferramenta-padrão do j é^{si}mo estágio (min).
- $T_{mt,j}^*$ - idem T_{mt} , correspondente à ferramenta-padrão do j é^{si}mo estágio (min).
- v - velocidade de corte (m/min).
- $\hat{v}$ - velocidade de corte mantida constante por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore (m/min)
- v_a - velocidade de avanço da ferramenta, na direção principal de avanço (mm/min).
- v_a^- - velocidade de avanço do carro ou mesa móvel (mm/min).
- v_{am} - velocidade de avanço média da ferramenta (mm/min).
- v_{am}^- - velocidade média de avanço do carro ou mesa móvel (mm/min).
- v_{at} - velocidade tangencial de avanço da ferramenta (mm/min)
- v_{au} - velocidade de avanço da ferramenta segundo o eixo de inclinação do Copiador (mm/min).
- v_{ay} - velocidade transversal de avanço da ferramenta (mm/min).
- $\hat{v}_b$ - velocidade de corte mantida constante, da ferramenta-base (m/min).
- $\hat{v}_{b,j}$ - idem $\hat{v}_b$, no j é^{si}mo estágio (m/min).
- v_e - velocidade de corte equivalente (m/min).
- $v_{ei,j}$ - velocidade de corte equivalente da i é^{sa} ferramenta, no j é^{si}mo estágio (m/min).
- v_{eo} - velocidade de corte equivalente referida ao Ponto principal de referencia da ferramenta (m/min).
- $\hat{v}_{mc,j}$ - velocidade de corte mantida constante, para a condição de mínimo custo total de confecção (m/min).

- $\hat{v}_{mt,j}$ - velocidade de corte mantida constante, para a condição de mínimo tempo total de confecção (m/min).
- v_o - velocidade instantânea de corte, referida ao Ponto - principal de referência da ferramenta (m/min).
- $\hat{v}_o$ - idem v_o , mantida constante por meio de uma conveniente variação da rotação do eixo-árvore (m/min).
- x - expoente das Equações de Taylor.
- x_i - idem x , correspondente à i ésimas ferramenta.
- x_j - idem x , correspondente a todas as ferramentas que atuam no j ésimos estágio.
- x_k - idem x , correspondente a cada k ésimas condição de usinagem.
- y - ordenada, no sistema cartesiano de coordenadas (mm).
- $\bar{y}_e$ - ordenada-equivalente do perfil total usinado (mm).
- $\bar{y}_{eb}$ - idem $\bar{y}_e$, relativa à ferramenta-base (mm).
- y_m - ordenada média do perfil usinado (mm).
- y_o - ordenada inicial do perfil usinado (mm).
- y_w - ordenada final do perfil usinado (mm).
- Y - função correspondente à parcela principal do diâmetro-equivalente.
- z - abcissa, no sistema cartesiano de coordenadas (mm).
- Z - função correspondente à parcela corretiva do diâmetro-equivalente.
- $Z_{eT,j}$ - número médio de peças usinadas por vida da ferramenta-equivalente do j ésimos estágio.
- Z_T - número médio de peças usinadas por vida da ferramenta.
- Z_{Ti} - idem Z_T , correspondente à i ésimas ferramenta.
- $Z_{Ti,j}$ - idem Z_T , correspondente à i ésimas ferramenta, no j ésimos estágio.
- Z_{T*} - idem Z_T , relativo à ferramenta-padrão.
- $Z_{T*,g}$ - idem Z_T , relativo à ferramenta-padrão do g ésimos grupo de ferramentas.

- α_t - ângulo total de rampa do perfil usinado (gram).
- β - constante, independente da velocidade de corte, em cada intervalo de validade da Equação de Taylor Equivalente.
- $\beta_{e,j}$ - idem β , correspondente à ferramenta-equivalente do j-ésimo estágio.
- $\beta_{i,j}$ - idem β , correspondente à i-ésima ferramenta, no j-ésimo estágio.
- γ - constante, independente da rotação do eixo-árvore, em cada intervalo de validade da Equação de Taylor Equivalente.
- $\gamma_{e,j}$ - idem γ , correspondente à ferramenta-equivalente do j-ésimo estágio.
- δ - ângulo de inclinação do Copiador (graus).
- φ - coeficiente de correlação entre os deslocamentos do carro ou mesa móvel e os da ferramenta.
- φ_t - coeficiente de correlação entre o deslocamento total do carro ou mesa móvel e o da ferramenta, na direção principal de avanço.
- $\varphi_{tb,j}$ - idem φ_t , correspondente à ferramenta-base, no j-ésimo estágio.
- ξ_a - coeficiente adimensional (direção principal de avanço).
- ξ_t - coeficiente adimensional (direção tangencial de avanço).
- ξ_u - coeficiente adimensional (direção do eixo de inclinação do copiador).
- ξ_y - coeficiente adimensional (direção radial de avanço).
- Δd_{eo} - variação do diâmetro-equivalente, referido ao Ponto principal de referência (mm).
- Δy - diferença entre ordenadas do perfil usinado (mm).
- Δz - diferença entre abscissas do perfil usinado (mm).
- θ - ângulo de giro do eixo-árvore (rad).
- σ_i - coeficiente de inutilização prematura da i-ésima ferramenta.

- η_i - termos do desenvolvimento em série da função que define as parcelas componentes do diâmetro-equivalente.
 - ∂ - derivada.
 - $\sum$ - somatório.
 - [] - referências bibliográficas
 - () - numeração das equações.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Taylor, F.W. - "The Art of Cutting of Metals". Transactions of the ASME, vol. 28, nº 1119, pág. 31-35, - 1907.
- [2] Leyensetter, W. - "Die wirtschaftliche Schinittges — chwindigkeit", AWF Mitteilungen, vol. 15, nº 4, 1933.
- [3] Paasche, J. "Kennzeichen und Bestimmung der wirtschaftlichen Schnittgeschwindigkeit", AWF Mitteilungen, - vol. 15, nº 6, 1933.
- [4] Wallichs, A. e Schöpke, H. - "Beitrag zur Frage der wirtschaftlichen Schinittgeschwindigkeit", AWF Mitteilungen, vol. 15, nº 7, 1933.
- [5] Witthoff, J. - "Die rechnerische Ermittlung der günstigsten Arbeitsbedingungen bei der spanabhebenden Formung", Werkstatt und Betrieb, vol. 80, pág. 77, 1947.
- [6] Atalay, A - "A Study of cutting Speed for Maximum - Production Rate", tese de mestrado, University of Michigan, Ann Arbour, Michigan, 1948.
- [7] Witthoff, J. - "Ermittlung und betriebswirtschaftliche Bedeutung der Werkzeugkosten", Werkstattstechnik und Maschinembau, vol. 39., pág. 148, 1949.
- [8] Lickley, J.M. e Chisholm, A.J. - "The economics of Machining Operations", Machinery (London), vol. 75, pág. 673, 1949.
- [9] Burmester, H.J. - "Das Standzeitkriterium in kostenmässiger Betrachtung", Werkstatt und Betrieb, vol. 84, pág. 512, 1951.
- [10] Gilbert, W.W. - "The Economics of Metal Cutting", Manual on Cuttings of Metals", ASME, 2^a edição, pág. 313, 1952.
- [11] Witthoff, J. - "Die Ermittlung der günstigsten Arbeitsbedingungen bei der spanabhebenden Formgebung", Werkstatt und Betrieb", München, vol. 85, pág. 521, 1952.
- [12] Witthoff, J. - "Über den Einfluss der Grösse der Verschleissmarkenbreite", Werkstatt und Betriebe, München, vol. 88, nº 5, pág. 223, 1955.

- [13] Eiselle, F - "Die Wirtschaftlichkeit der Zerspanung". Maschinenmarkt, Coburg, vol. 61, n^{os}. 69 - 70, pág. 99 - 105, Setembro de 1955.
- [14] Witthoff, J. - "Über die Kosten und die Wirtschaftlichkeit automatisierter Fertigungen". Conferência apresentada no 89 Colloquium de Máquinas Operatrizes de Aachen, em 24 de Maio de 1956.
- [15] Witthoff, J. - "Ergänzende Betrachtungen zur Ermittlung der günstigsten Arbeitsbedingungen bei der spanenden-Formgebung", Werkstatt und Betrieb, München, vol. 90, nº 1, pág. 61, 1957.
- [16] Gilbert, W.W. - "On the Economics of the Basic Turning Operation", Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, New York, pág. 1479, Outubro de 1958.
- [17] Siekmann, H.J. - "Now and Easier Way to Find Best Cutting Speeds", American Machinist, vol. 102, nº 103, pág. 97, 1958.
- [18] Brewer, R.C. "On the Economics of the Basic Turning - Operation". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, New York, pág. 1479, Outubro de 1958.
- [19] Vieregge, G. - "Zerspanung der Eisenwerkstoffe". Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1959.
- [20] Oxford Jr., C.J. - "How to Evaluate Cutting tools". Metalworking Production, pág. 610 - 612, 6 de abril de 1960.
- [21] Gilbert, W. - "Economics of Machining in ASTM - Machining with Carbides and Oxides". Mc Graw-Hill Book Co. Inc., New York, 1962.
- [22] Optiz, H. e Gappish, M. - "Some Recent research on wear behavior of Carbide Cutting Tools". International-Journal of Machine Tool Design and Research, vol. 2, pág. 43-73, 1962.
- [23] McCullough, E.M. - "Economics of Multitool Lathe Operations". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, vol. 85, série B, nº 4, 1963.
- [24] Brierley, R.G. e Siekmann, H.J. - "Machining Principles and Cost Control". Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1964.

- [25] Pankine, A.V. - "Usinage des Metaux par la coupe". Edição: "Ecole Superieure", Moscou, 1965.
- [26] Wu, S.M., Ermer, D.S. e Hill, W.J. - "An Exploratory-Study of Taylor's Tool-Life Equation by Power Transformations". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, vol. 88, série B, nº 1, pág. 81, Fevereiro de 1966.
- [27] Taha, H.A - "A Police for determining the Optimal Cycle Length for a Cutting tool". The Journal of Engineering for Industry, vol. 17, nº 3, pág. 157-162, Março de 1966.
- [28] Ermer, D.S. e Wu, S.M. - "The Effect of Experimental-Error on the Determination of the Optimum Metal-Cutting Conditions". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, vol. 89, série B, nº 2, pág. 315, Maio de 1966.
- [29] Ermer, D.S e Wu, S.M - "Maximum Profit as the Criterium in the Determination of the Optimum Cutting Conditions". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, vol. 88, série B, nº 2, pág. 435, Maio de 1966.
- [30] Taylor, J. - "Carbide Cutting Tool Variance and Breakage: Unknown Factors in machining Economics". Advances in Machine Tool Design and Research, pág. 487-504, 1967.
- [31] Field, M. e Zatlín, N. - "Computer Approach for Storage of Machinability and Calculation of Machining costs and Production Rates". Advances in Machine Tool Design and Research, pág. 505-529, 1967.
- [32] Degenhardt, V. - "Die Bedeutung des Werkzeugverschleißes im Hinblick auf die Optimierung der Zerspanbedingungen". Industrie Anzeiger, vol. 90, nº 93, pág. 45-50, 1968.
- [33] Depiereus, W.R. - "Neues Standzeitkriterium bei spanender Bearbeitung mit hohen Schnittbedingungen". Industrie Anzeiger, vol. 90, nº 101, pág. 2220-2224, 1968.
- [34] Crookall, J.R. - "The Performance-Envelope Concept in the Economics of Machining". International Journal of Machine Tool Design and Research, vol. 9, nº 4, pág. 261-278, 1969.

- [35] König, W. - "The Present Position of the Metal Cutting Process". Advances in Machine Tool Design and Research, pag. 215 - 240, 1969.
- [36] Ermer, D.S. e Morris, M.S. - "A Treatment of Errors of Estimation in determining Optimum Machining Conditions". International Journal of Machine Tool Design and Research. vol. 9, nº 4, pag. 357, 1969.
- [37] König, W. e Depierreux, W.R. - "Wie Lassen sich Vorschub und Schnittgeschwindigkeit Optmieren?". Industrie-Anzeiger, vol. 91, nº 61, pag. 1481-1484, 1969.
- [38] O Kushima, K. e Fujii, S. - "A Contribution to Determination of Tool Change Interval". Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 12, nº 52, pag. 910-917, 1969.
- [39] Bhattacharyya, Ghosh e Hann - "Analysis of Tool wear - part II - Application of flank wear models". Journal of Engineering for Industry, vol. 92, série - B, nº 1, pag. 109, 1970.
- [40] Ermer, D.S. - "A Baesyan Model of Machining Economics of Optimization by Adaptive Control". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, vol. 92, série B, nº 3, pag. 628-632, Agosto de 1970.
- [41] Schaumann, R. - "Ermittlung und Berechnung der Kosten günstigsten Standzeit und Schnittgeschwindigkeit". Werkstattstechnik, vol. 60, nº 1, pag. 14-21, 1970.
- [42] Hitomi, K. - "Studies of Economical Machining: Analysis of the Maximum-Profit Cutting Speed and its Numerical Computation". Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 14, nº 69, pag. 294-302, - 1971.
- [43] Arshinov, V. e Alekseev, G. - "Metal Cutting Theory - and Cutting Tool Design". MIR Publishers, Moscou, 1970.
- [44] Hitomi, K. - "Optimization of Multi-Estage Machining-system: analysis of optimal machining conditions for flow-tips machine systems". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, vol. 93, série B, nº 2, pag. 498-506, Maio de 1971.
- [45] Tipnis, V.A. e Joseph, R.A. - "A Study of Plunge (or Form) Machining of Low-Carbon Resulfurized Steel on a

- Multi-Splinde Automatic-Screw Machine". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, - vol. 93, série B, nº 2, pág. 559-570, Maio de 1971.
- [46] Wu, S.M. e Datal, J.G. - "Stochastic Model for Machining Process: Optimum Decision-Making and Control". - Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, vol. 93, série B, nº 2, pág. 593-602, Maio de 1971.
- [47] Frost e Smith - "Optimization of the Machining process and overall system concepts". Annales of the CIRP, - vol. 19, nº 2, pág. 385-394, Maio de 1971.
- [48] Wager, J.G. e Barash, M.M. - "Study of the distribution of the Life of HSS Tools". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, vol. 93, série B, nº 4, pág. 1044-1050, Novembro de 1971.
- [49] Ermer, D.S. - "Optimization of the Constrained Machining Economics problem by geometric programming". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, vol. 93, série B, nº 4, pág. 1067-1072, Novembro de 1971.
- [50] Kops, L. - "Economical Aspects of Cutting Speed selection when cutting stepped-parts". Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, vol. 93, série B, nº 4, pág. 1113- , Novembro de 1971.
- [51] Kronenberg, M. - "Ersatz der Taylor-Formel durch eine neue Standzeitgleichung". ZvF, vol. 66, pág. 4-7, - 1971.
- [52] Kazinczy, M. - "Tool Life Criterium of single Point Tools when Cutting with NC Machine-Tools". Mechanical Engineering (Hungria), vol. 1, nº 3, pág. 342-347, - 1971.
- [53] "Conceitos da Técnica de Usinagem, Movimentos e Relações Geométricas" (P-NB-204). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1971.
- [54] "Begriffe der Zerspantechnik, Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges", (DIN 6580), Beuth - Vertrieb - GmbH, Berlin, 1963.
- [55] " Ferramentas de usinagem- geometria da cunha cortante " (P-NB-83). Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1972.

- [56] Ferraresi, Dino - "Fundamentos da Usinagem dos Metais". Ed. Edgard Blücher, 1970.
- [57] Sauer, L. ; Draghici, G. e Chiriacescu, S. - "Die äquivalente Drehzahl und Standzeit des Werkzeugs beim Drehen mit wechselnder Beanspruchung". Werkstattstechnik, nº 59, vol. 2, 1969.
- [58] Acherkan, N. - "Machine Tool Design", MIR Publishers, Moscow, 1968.
- [59] Stau, C.H. ; Busch, E. - "Nachformeinrichtungen für Drehbanke. (Kopierdrehen)"; Springer-Verlag, Berlin, - 1968 (original). Consultada a edição em espanhol "Torneado copiador y cálculo para torneros", Editorial Labor, Barcelona, 1969.
- [60] Pallerosi, C.A. - "Exemplos de aplicação dos métodos para cálculo das condições econômicas de usinagem" - cap. 13.10 da referência bibliográfica [57].
- [61] Thomas Jr, G.B. - "Cálculo". Editora da Universidade de S. Paulo, 1969.
- [62] "Geometria da cunha cortante das ferramentas de usinagem" (P-TB-225). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), no prelo.
- [63] "Anuario estatístico" - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - 1970.