

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO
PARA CÁLCULO DOS CUSTOS DE TORNEAMENTO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALFREDO JOSÉ BATISTA

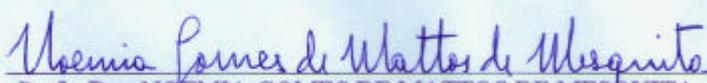
RECIFE, AGOSTO DE 2005

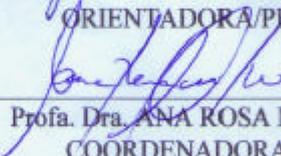
“DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA CÁLCULO DOS CUSTOS DE TORNEAMENTO”.

ALFREDO JOSÉ BATISTA

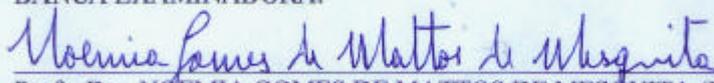
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

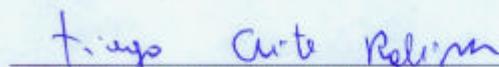
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EPP/UFPE


Prof.ª. Dra. NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA
ORIENTADORA/PRESIDENTE


Prof.ª. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:


Prof.ª. Dra. NOEMIA GOMES DE MATTOS DE MESQUITA (UFPE)


Prof. Dr. TIAGO LEITE ROLIM (UFPE)


Prof. Dr. CELSO LUIZ PEREIRA RODRIGUES (UFPB)

Jesus e a Maria,
À memória de minha Mãe Eremita,
Ao meu pai José Batista,
À minha esposa Fátima,
Aos meus filhos: Aderson, Adriano e Gabriel,
À minha nora Amanda,
Ao meu neto Miguel.

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste trabalho várias pessoas e entidades foram de fundamental importância. Entre as pessoas, destaco a professora Noemia Gomes de Mattos de Mesquita, pela efetiva participação como orientadora em todas as fases do trabalho. O acompanhamento, a colaboração, as discussões técnicas e a dedicação do orientador com o aluno são pontos primordiais na realização de uma dissertação de mestrado ou qualquer trabalho científico; tudo isto eu obtive da minha orientadora, e agradeço nesta oportunidade.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica, representado pelo professor Ivan Vieira de Melo; à coordenação do Mestrado em Engenharia Mecânica, na pessoa da professora Ana Rosa.

Agradeço a secretária Eliane Alves, pelos esclarecimentos e informações durante o período do mestrado.

Ao professor Davi Ferraz, pelos conhecimentos básicos da linguagem Visual Basic, de grande importância para esta dissertação.

Aos professores Armando Shinohara, Pedro Gruzzo e Gustavo Viera, pelo repasse dos conhecimentos e experiências nas disciplinas básicas e que fizeram parte do curso.

A todos os colegas que conviveram comigo durante a realização do curso, pela amizade.

A minha esposa e filhos pela compreensão, amor, dedicação e incentivo; fundamentais para a concretização dos objetivos que resultaram no presente estudo.

Aos colegas de trabalho da CEASA-PE/OS, pelo encorajamento.

Aos meus familiares: irmãos, irmãs, cunhadas e cunhados, sobrinhos e sobrinhas, nora e neto, pelo incentivo.

A Deus.

RESUMO

A minimização dos custos de fabricação por usinagem vem sendo estudada desde o início do século XX. Ao longo de todos estes anos, várias correntes de pesquisa foram desenvolvidas com o objetivo de minimizar custos sem prejuízo da qualidade do produto final. Na maioria dos casos de programação e planejamento da produção, o tempo de fabricação requerido, para uma tarefa específica, é conhecido antecipadamente. A produção, na prática, pode ser alterada através da modificação das condições de fabricação. No caso da fabricação por usinagem, os parâmetros de corte: velocidade de corte; avanço e profundidade de corte; associados à potência motor da máquina-ferramenta e às características da ferramenta de corte têm uma influência direta no número de peças fabricadas por hora. Especificamente o avanço tem uma influência direta não somente sobre qualidade, no que diz respeito ao acabamento superficial, mas também ao custo de manufatura da peça. Este trabalho teve como objetivo otimizar o processo de torneamento, minimizando o custo de usinagem. Isto foi feito a partir da dedução de equações que levam em consideração não somente a velocidade de corte, mas também o avanço e a profundidade de corte e o acabamento superficial da peça usinada. O software que foi desenvolvido para esta finalidade será mais tarde um módulo de um sistema CAD/CAPP/CAM e mostrará ao usuário a melhor condição de corte entre o mínimo custo e a máxima produção.

ABSTRACT

The minimizing of the manufacturing cost has been studied since the beginning of the twentieth century. During all these years many types of research chain were developed with the objective of minimizing cost without quality detriment. In most of the cases of programming and planning production, the required time of manufacturing to a specific task is previously known. The productivity, in a practical way, can be changed through modification of manufacturing condition. In the case of machining manufacturing the cutting parameters like cutting speed, feed and depth of cut associated with the tool machine motor power and with geometrical characteristic on the cut tool has a direct influence on the quantity of manufacturing part per hour. Specifically the feed has a direct influence on the quality not only in respect of its finishing, but also in respect of the piece manufacturing cost. This work has the aim of optimizing the turning process, minimizing the machining cost. It is done up the deduction of equations that take into account not only the speed but also the feed, the depth of cut and the part finishing. The software that is been developing to this goal will be later a module of a CAD/CAPP/CAM system and will show the user the best cutting condition between the minimum cost speed and the maximum productivity speed.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. CUSTOS DE USINAGEM	3
2.1 Custo do Torneamento	16
2.2 Tempos de Corte	17
2.3 Linguagem de Programação	19
3. OBJETIVO	24
4. DEDUÇÃO DE EQUAÇÕES DE CUSTO PARA OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO	25
4.1 Custo da Operação de Desbaste	25
4.1.1 Equação dos Custos do Desbaste com Passes Axiais em Peça de Formato Cilíndrico	25
4.1.1.1 Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Axial em Peça de Formato Cilíndrico	26
4.1.2 Equação dos Custos do Desbaste com Passes Axiais em Peça de Formato Cônico	28
4.1.2.1 Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Axial em Peça de Formato Cônico	30
4.1.3 Equação dos Custos do Desbaste com Passes Axiais em Peça de Formato Circular	30
4.1.3.1 Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Axial em Peça de Formato Circular	31
4.1.4 Equação dos Custos do Desbaste com Passes Radiais em Peça de Formato Cilíndrico	31
4.1.4.1 Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Radial em Peça de Formato Cilíndrico	33
4.1.5 Equação dos Custos do Desbaste com Passes Radiais em Peça de Formato Cônico	35
4.1.5.1 Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Radial em Peça de Formato Cônico	36
4.1.6 Equação dos Custos do Desbaste com Passes Radiais em Peça de Formato Circular	37
4.1.6.1 Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Radial em Peça de Formato Circular	38
4.2 Formulação de Equações para o 2 ^o Estágio de Desbaste e para o Acabamento	39
4.2.1 Equação para o Torneamento Cilíndrico do 2 ^o Estágio de Desbaste e do Acabamento	39
4.2.2 Equação para o Torneamento Cônico do 2 ^o Estágio de Desbaste e do Acabamento	40
4.2.3 Equação para o Torneamento Radial do 2 ^o Estágio de Desbaste e do Acabamento	41
4.2.4 Equação para o Torneamento Circular do 2 ^o Estágio de Desbaste e do Acabamento	42
5. MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE USINAGEM POR TORNEAMENTO	44
5.1 Limitações dos Parâmetros de Corte	44
5.1.1 Faixa de Variação da Velocidade de Corte	44

5.1.2	Faixa de Variação do Avanço	45
5.1.3	Faixa de Variação da Profundidade de Corte	46
5.2	Seqüência para a Obtenção da Otimização dos Parâmetros de Corte	47
5.3	Dados de Entrada do Aplicativo	49
6.	APLICATIVO PARA O CÁLCULO DO CUSTO DE TORNEAMENTO	52
7.	UTILIZAÇÃO PRÁTICA DO APLICATIVO PARA O CÁLCULO DE CUSTO DE TORNEAMENTO	64
8.	CONCLUSÕES	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

Na usinagem de metais, a seleção de parâmetros de corte, tais como, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, têm um impacto direto na economia da fabricação (White e Houshyar, 1992). Pesquisas sobre parâmetros de corte ótimos são desenvolvidas desde 1907 (Taylor 1907). A partir de então, o problema vem sendo abordado usando-se diferentes métodos matemáticos. Amarego e Brown (1969) usaram cálculo diferencial. Brewer (1966), Bhattacharyya; Faria-Gonzalez; Ham (1970) multiplicador de Lagrange; Ermer e Patel (1974) programação linear; e Iwata et al (1972) programação com restrições de ocorrência de eventos.

Para o cálculo do custo de usinagem, de acordo com as formulações presentes nos trabalhos de vários autores, entre eles, Brewer (1966) e Ferraresi (1990); além do avanço, velocidade e profundidade de corte, são necessários a introdução de outros dados, fixos e variáveis, que compõem as parcelas do custo. São elementos que independem das condições de corte, entre outros, aqueles referentes à matéria prima. Entram também na composição do custo final, os dados relativos aos gastos com o operador, com a máquina e com as ferramentas de corte. Além dos componentes básicos presentes nas citadas formulações, outros podem ser introduzidos, como os definidos no estudo de Jha (1996) que incorpora outras parcelas, a exemplo dos custos de possíveis atrasos na produção; os custos da espera do trabalho semi-acabado, aguardando processamento através de operações posteriores de usinagem e, os custos do capital imobilizado relativo a peças acabadas em estoque. Portanto, se trata de um problema que envolve utilização de parâmetros tecnológicos, como também, de levantamento pormenorizado de custos. Neste trabalho, componentes de custos desta natureza não serão levados em consideração. Não que eles não mereçam atenção ou não tenham importância, isto não é o caso, mas porque este trabalho abordará as componentes de custo ligadas diretamente ao processo no chão de fábrica. Admitamos, portanto, que, o custo devido a possíveis atrasos na produção, caso ocorra, acarretará em uma parcela que não incidirá sobre o preço da usinagem do produto do cliente, mas que a empresa deverá arcar com o prejuízo. Consideremos também que a firma deve trabalhar num sistema “just-in-time”, de forma que os custos devido a peças em estoque não devem existir, ou seja, não são levados em consideração neste trabalho e não serão repassados ao cliente.

Uma ferramenta capaz de associar a otimização dos parâmetros tecnológicos, visando a minimização dos custos de usinagem, por torneamento, em máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) e, ao mesmo tempo, facilitar as entradas dos dados, fornecendo no final, o valor do custo, é a meta do presente trabalho. Esta ferramenta deverá se apresentar na forma de um aplicativo capaz de funcionar em microcomputadores que utilizam o sistema operacional Windows.

Na dedução dos algoritmos para o cálculo das parcelas de custo implementados no aplicativo desenvolvido, foi considerado que as operações de usinagem se realizam em três estágios, a saber: um primeiro estágio de desbaste, um segundo estágio de desbaste ou também denominado de pré-acabamento e um terceiro estágio que é o de acabamento. Esta também foi a abordagem utilizada por Andrade (2001) para a geração automática do código CNC para peças torneadas. A partir desta sistematização é que novas equações foram deduzidas para o processamento dos dados que compõem as várias parcelas dos custos de usinagem. As três principais parcelas dos custos de usinagem são aquelas básicas conhecidas da literatura: 1) os custos fixos que independem das condições de corte e que englobam os custos de preparação e tempos mortos ou secundários; 2) os custos da máquina e do operador que dependem das condições de corte, uma vez que, elas influenciam no tempo de usinagem (tanto o salário homem quanto o salário máquina são dados em valor monetário por hora), e 3) o custo com as ferramentas de corte que também sofrem uma influência direta das condições de corte, pois, o fator que mais influencia no desgaste da ferramenta é a velocidade de corte seguida do avanço.

Nos algoritmos desenvolvidos neste trabalho para a implementação dos custos de usinagem foram levadas em consideração as três principais parcelas de custos acima citadas, assim como, os tempos de corte deduzidos por Andrade (2001). Nas operações de desbaste pode-se trabalhar com minimização dos custos de usinagem, grandeza a ser otimizada. No acabamento, a otimização requer que se leve em consideração a manutenção de tolerâncias dimensionais e características da qualidade superficial que são condições que vão garantir a funcionalidade da peça usinada.

2. CUSTOS DE USINAGEM

Neste capítulo serão abordados alguns trabalhos referentes à área de custos de usinagem.

He (1991) desenvolveu três modelos de custos de fabricação por usinagem levando-se em conta as tolerâncias da peça na fabricação. Nesta metodologia as dimensões e as tolerâncias dos componentes, que estão sendo usinados são especificadas para cada estágio de fabricação de acordo com as exigências de funcionamento. O custo de usinagem dos rejeitos foi inserido no cálculo do custo de fabricação. Os rejeitos são definidos em função das dimensões e tolerâncias fixadas para a peça e pelas limitações do processo de fabricação.

De acordo com o trabalho de He (1991), no planejamento do processo buscando a minimização de custo, inicialmente, o projetista tem de elaborar um plano de fabricação que além de um funcionamento correto da peça, seja adequado à fabricação com baixo custo. Em seguida, deve escolher um método de atribuição de tolerâncias com a finalidade de conseguir a menor porcentagem possível de rejeitos de fabricação. Apesar de que o custo de produção não depender somente do percentual de rejeitos, mas também dos custos de usinagem e das ferramentas de corte, ou seja, das despesas de cada operação. Finalmente, apesar de existirem muitos outros critérios de otimização, semelhante ao lucro máximo, máximo ganho de qualidade, máxima taxa de retorno, máximo retorno e máximo benefício, entre outros, muitos deles são difíceis de se relacionar com as tolerâncias, portanto o custo é o mais comum e simples critério de avaliação deste relacionamento. A interação custo-tolerância é mostrada na figura 2.1. A curva mostra que, quando a tolerância tende a zero, o custo tende ao infinito ($x = 0 \Rightarrow C = \infty$).

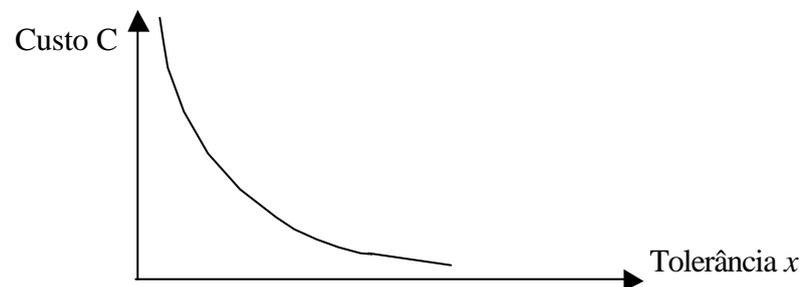


Figura 2.1 - Relação típica de custo-tolerância (He 1991)

C é uma função decrescente de x , tendendo a valores baixos a medida que x aumenta, se estabilizando quando o valor de x for muito elevado.

Em trabalho mais recente, Diplaris e Sfantsikopoulos (2000), também desenvolveram estudo da relação de custo-tolerância na usinagem. Consideram que as tolerâncias contribuem para a precisão e a qualidade de uma peça usinada e para o seu custo de fabricação. A otimização das tolerâncias inseridas no custo de usinagem resulta em excelentes resultados na produção, que utiliza variações empíricas, técnicas, metodologias e analíticas desenvolvidas por computadores, com obtenção de resultados variados. Entre eles a função custo-tolerância entra com contribuição significativa. Com base na experiência de produção em chão de fábrica e intensa pesquisa bibliográfica eles desenvolveram um novo modelo analítico de custo-tolerância. Este modelo tem uma maior abrangência de campos de aplicações e produz resultados que evitam erros na prática industrial.

Maropoulos e Hinduja (1991) desenvolveram um estudo para minimização de custo de usinagem para torneamento em um centro de comando numérico computadorizado (CNC), através de um sistema que otimiza a seleção das ferramentas de corte. Para todas as ferramentas possíveis de serem utilizadas, o sistema calcula o custo de usinagem baseado em dados aproximados de corte entre o primeiro e último passe. Na determinação dos parâmetros de corte, são levados em consideração a potência de corte, o método de fixação, o tipo de

quebra-cavaco, a deflexão da peça e o desgaste da ferramenta. O sistema apresenta várias alternativas de solução de forma ordenada e em escala de custo, para auxiliar na tomada de decisão.

O programa automático de seleção de ferramentas pode ser dividido em módulos; o primeiro módulo determina as ferramentas para as operações de acabamento e o segundo seleciona as ferramentas para as operações de desbaste. Ambos formam parte integrante do sistema CAM (Manufatura Ajudada por Computador) que no estudo se chama TECHTURN. O layout geral é mostrado na figura 2.2.

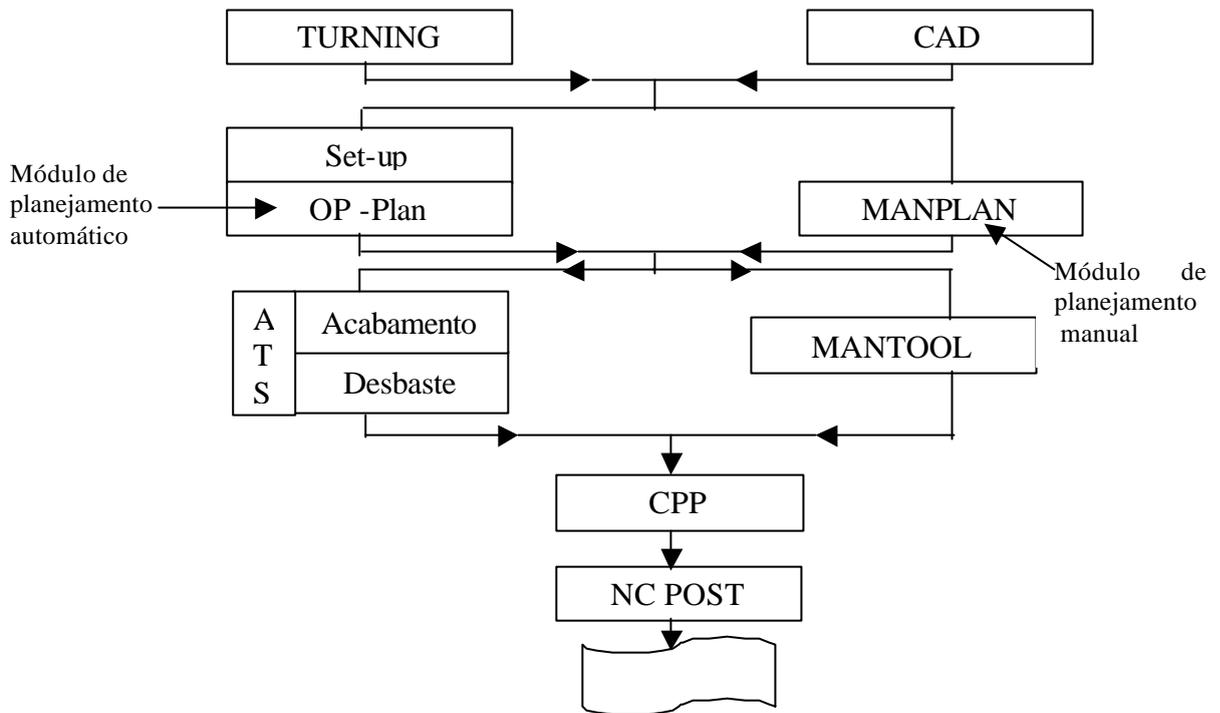


Figura 2.2 - Diferentes módulos do TECHTURN (Marapoulas e Hinduja 1991)

Inicialmente o usuário desenha a peça usando o módulo geométrico (TURNING) do TECHTURN. Alternativamente, o usuário pode criar a peça com um sistema de desenho comercialmente existente (Autocad, Microstation, entre outros) e passar os dados utilizando o TECHTURN com o uso de um arquivo auxiliar (por exemplo, arquivo no formato IGES). Antes de a peça ser fabricada é definido o módulo de planejamento de operação a ser adotado, se o módulo manual (MANPLAN) ou o automático (OP-PLAN). Para a execução das operações de torneamento no módulo CPP é definido o perfil do contorno da peça; posteriormente, no módulo NC POST, se define: o método, as posições de fixação e a sub-operação associada (isto é, desbaste longitudinal, faceamento externo, etc.). A sub-operação é só um indicativo do tipo de usinagem; na prática, a ferramenta segue o contorno do perfil. A definição da ferramenta e seus dados são retirados do banco de dados da memória do sistema.

White e Houshyar (1992) apresentaram uma técnica de otimização de processos de usinagem através da velocidade de corte, considerada como variável única. Apresentaram modelos matemáticos para usinagem de simples e múltiplos estágios. No desenvolvimento do estudo, foi considerado que o tempo e o custo de usinagem são funções da velocidade. É acrescentado na função objetivo o custo da “qualidade”, portanto, reconhecendo que o grau de acabamento da peça afeta seu custo. Para a usinagem em múltiplo estágio, é considerado o “ciclo de tempo”, referente à velocidade de usinagem em cada estágio para determinar o tempo do ciclo de produção. A formulação dos modelos matemáticos de White e Houshyar (1992) é mostrado a seguir:

Formulação matemática de um único estágio de produção;

A expressão para o tempo unitário de usinagem é dada pela equação (2.1):

$$T_u = t_l + t_m + [t_t / (T_0/t_m)] \quad (2.1)$$

Onde:

T_u é o tempo unitário de usinagem em min/peça;

t_l é o tempo de carregamento da peça em min/peça (colocação, fixação, inspeção e retirada da peça);

t_m é o tempo real de usinagem em min/peça (aproximação, corte, e afastamento da ferramenta);

t_t é o intervalo de tempo total entre trocas da ferramenta em min./afiação (retirada, afiação ou troca, recolocação);

T_0 é a vida da ferramenta em min/afiação;

T_0/t_m é o número médio de peças usinadas entre trocas da ferramenta.

Custo unitário de usinagem:

$$C_u = c_0 + c_1 t_l + (c_1 + c_m) t_m + [(c_1 t_t + c_1) / (T_0/t_m)] + C_Q \quad (2.2)$$

Onde:

C_u é o custo unitário de usinagem (\$/peça);

c_0 é o custo da matéria prima (\$/peça);

c_1 é o custo de mão-de-obra e da máquina (\$/min);

c_m é o custo de usinagem (corte) em \$/min;

c_t é custo da ferramenta em \$/afiação;

C_Q é o custo associado com o grau de acabamento da peça (qualidade) em \$/peça.

Nas equações (2.1) e (2.2), tempo de usinagem (t_m), vida da ferramenta (T_0) e custo da qualidade (C_Q) têm uma única variável de decisão, isto é, a velocidade de corte (V). Conhecendo T_u e C_u , e definindo r_0 , unidade de receita, a unidade de lucro de usinagem, (P_u), e a razão de rendimento de usinagem, (R_u), têm definições dadas por:

$$P_u = r_0 - C_u \quad (2.3)$$

$$R_u = P_u / T_u \quad (2.4)$$

O argumento seguinte é usado para determinar o comportamento de t_m , T_0 , e C_Q como função da velocidade de corte, (V).

A velocidade de usinagem (V), é selecionada dependendo dos materiais da ferramenta de corte e da peça. Aumentando a velocidade de corte resulta em menor tempo de usinagem. Desse modo:

$$t_m = k_1 / V \quad (2.5)$$

A qualidade k_1 é uma função dos parâmetros de usinagem, por exemplo:

$$k_1 = \mathbf{pLD / I}^f ; \text{ para desbaste, furação,.....} \quad (2.6)$$

Onde:

D e L são o diâmetro e o comprimento de trabalho, respectivamente;

f é o avanço.

Na usinagem, o dano da ferramenta de corte pode ocorrer através do desgaste ou avarias. A equação de Taylor (1907), mostra que a vida da ferramenta (T_0) se relaciona com a velocidade de corte (V) e o avanço (f), ou seja:

$$V(T_0)^n = k_2 \quad (2.7)$$

Onde n é o expoente que depende do material da ferramenta, do material da peça e das condições de corte; k_2 depende dos parâmetros de usinagem (avanço, profundidade, ângulos $\chi, \varepsilon, \gamma, \alpha, \lambda$).

Segundo White e Houshyar (1992) a qualidade do acabamento da peça diminui quando a velocidade de corte é baixa, e melhora a medida em que se aumenta a velocidade. Portanto, o custo que é associado com peças rejeitadas, tempo de trabalho perdido e baixa qualidade do produto é relacionado com a velocidade de corte da seguinte forma:

$$R_a = \begin{cases} 1.22 \times 10^5 S f^{1.004} V^{-1.5}; & \text{para } 25 < V < 250 \text{ e } f < 0,75 \\ 71 S f^{1.5}; & \text{para } V > 250 \text{ e } f < 0,75 \\ 300 S f^{4.54}; & \text{para } f > 0,75 \end{cases} \quad (2.8)$$

Onde:

$$S = r^{-0.714} (\text{BHN})^{-0.323};$$

r é o raio da ponta da ferramenta em mm;

BHN é a dureza Brinell do material;

V é a velocidade em m / min;

f é o avanço em mm / volta;

R_a é a rugosidade em μ_m .

Considerando a velocidade de corte na faixa de $25 < V < 250 \text{ m/min}$ o resultado é mostrado na equação (2.9) para a qualidade e custo da peça acabada:

$$C_Q = C_q A R_a = \mathbf{d}_l C_q V^{-1.52} \quad (2.9)$$

Onde:

$$\mathbf{d}_l = 1.22 \times 10^5 A S f^{1.004};$$

C_q é o custo por micrometro adicional de rugosidade, por centímetro quadrado de peça trabalhada ($\$/\mu_m \cdot \text{cm}^2$);

A é a medição da área da peça acabada em (cm^2);

R_a é o desvio médio aritmético de rugosidade em (μ_m).

O custo da qualidade da peça é adicionado na função objetivo como elemento importante do custo total de usinagem. Usando as equações (2.5), (2.7) e (2.9) nas equações (2.1) e (2.2), respectivamente, e após algumas transformações algébricas, temos,

$$T_u = \mathbf{a}_0 + \mathbf{b}_0 V^{-1} + \mathbf{g} V^m \quad (2.10)$$

$$C_u = a_0 + \mathbf{b}_l V^{-1} + \mathbf{g} V^m + \mathbf{d}_l C_q V^{-1.52} \quad (2.11)$$

Onde:

$$m = 1/n - 1; \mathbf{a}_0 = t_1; \mathbf{b}_0 = k_1; \mathbf{g} = k_1 t_1 (k_2)^{-1/n};$$

$$a_0 = c_0 + c_1 t_1; \mathbf{b}_l = (c_1 + c_m) k_1; \mathbf{g} = (c_1 t_1 + c_1) k_1 (k_2)^{-1/n}; \text{ e } \mathbf{d}_l = 25.000$$

A unidade de produção sendo: $P_u = r_0 - C_u$, temos,

$$P_u = \mathbf{a}_l - \mathbf{b}_l V^{-1} - \mathbf{g} V^m - \mathbf{d}_l C_q V^{-1.52} \quad (2.12)$$

Onde:

$\mathbf{a}_l = r_0 - a_0$, e r_0 é a unidade de receita

Desta forma a razão de produção unitária será:

$$R_u = P_u / T_u \quad \text{e} \quad R_u = [a_1 V - b_1 - g(V)^{m+1} - d_1 C_q (V)^{-0.52}] / [a_0 V - b_0 - g(V)^{m+1}] \quad (2.13)$$

O valor da velocidade ótica de corte para cada situação (máxima razão de produção, minimização do custo, maximização do rendimento) é calculada derivando-se as equações (2.10) a (2.13) em relação a velocidade de corte.

De acordo com o estudo de White e Houshyar (1992), no sistema de produção de múltiplo estágio, a determinação da velocidade ótica de produção em cada estágio afeta o tempo do ciclo de produção. Na produção de múltiplo estágio são empregadas notações similares à aquelas usadas para simples estágio, porém, com a adoção do índice j referente ao estágio j . O tempo unitário de cada estágio de usinagem (T_j), pode ser definido como a soma dos tempos improdutivo (colocação da peça, ajustagem, inspeção e retirada), tempo de usinagem (aproximação, corte, afastamento) e tempo de substituição de ferramentas, isto é:

$$T_j = t_{1j} + k_{ij}(V_j)^{-1} + [k_{1j} t_{ij} (k_{2j})^{-1/n_j}] V_j^{(1/n_j) - 1} \quad ; \text{ ou se } m = (1/n) - 1$$

$$T_j = \alpha_{0j} + \beta_{0j} (V_j)^{-1} + \gamma_{0j} (V_j)^{m_j} \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

Considerando que o estágio k é o estágio gargalo, o ciclo de tempo será:

$$t = \max_{j \in \hat{N}} T_j(V_j) = a_{0k} + b_{0k} (V_k)^{-1} + g_k (V_k)^{m_k} \quad (2.15)$$

O estágio K é o maior estágio (estágio gargalo) ele pode determinar o tempo de produção, portanto é um importante fator na determinação do custo de produção. Os outros estágios são denominados estágios livres, neles, a velocidade de usinagem pode ser alterada sem afetar o tempo do ciclo, esta característica pode ser usada para estudar uma melhor velocidade de usinagem que reduza o custo total de produção.

Custo unitário de produção:

O custo unitário de cada estágio de usinagem (C_j) é diferente do simples estágio em dois aspectos: 1^o) o custo unitário do material (c_0) é considerado uma única vez no custo total de usinagem; e 2^o) a mão-de-obra e o custo geral associado com o estágio j não é c_j , mas é associado com o estágio k (gargalo). Porque o maior estágio determina a duração do tempo que a peça fica parada. Portanto:

$$C_j = \{C_{mj} t_{mj} + [c_{1j} / (T_{0j} / t_{mj})]\} + c_{1j} \{t_{1k} + t_{mk} + t_k / (T_{0k} / t_{mk})\} \quad (2.16)$$

$$C_j = b_{3j} (V_j)^{-1} + g_j (V_j)^{m_j} + d_{3j} C_q (V_j)^{-1.52} + t c_{1j}; \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (2.17)$$

Onde:

$$b_{3j} = c_{mj} k_1;$$

$$g_j = c_{1j} k_{1j} (k_{2j})^{-1/n_j};$$

$$d_{3j} = 25000;$$

$$m_j = (1/n_j) - 1$$

Conseqüentemente, o custo total de usinagem (C_u) é a soma de todos os estágios, mais o custo unitário do material, c_0 , isto é:

$$C_u = c_0 + \sum_{j \in N} C_j = c_0 + c_1 t + \sum_{j \in N} [b_{3j} (V_j)^{-1} + g_j (V_j)^{m_j} + d_{3j} (V_j)^{-1.52}] \quad (2.18)$$

Onde $c_1 = \sum c_{1j}$. Se r_0 é definido como unidade de receita, então o rendimento de produção (R_u) será dado por:

$$R_u = (r_0 - C_u) / t$$

Ou seja,

$$R_u = \mathbf{a}_l - \left\{ \sum_{j \in \mathbf{I}_N} \mathbf{b}_{3j} (V_j)^{-1} + \mathbf{g}_j (V_j)^{m_j} + \mathbf{d}_{3j} (V_j)^{-1.52} \right\} / [\mathbf{a}_{0k} + \mathbf{b}_{0k} (V_k)^{-1} + \mathbf{g}_{0k} (V_k)^{m_k}] - c_l \quad (2.19)$$

Onde: $\alpha_1 = r_0 - c_0$

O conhecimento dos valores de velocidade ótima de corte para múltiplo estágio, nos três critérios de otimização (maximização da produção, minimização do custo e maximização do rendimento de produção) são obtidos da mesma forma empregada para estágio único derivando-se as equações (2.14), (2.17) a (2.19) em relação a velocidade de corte.

Kee (1994) elaborou uma estratégia de otimização para a escolha das condições ótimas de corte em operações de desbaste, com múltiplos passes, executadas em torno convencional ou CNC. A análise é baseada em critérios de máxima produção e incorpora restrições tecnológicas relevantes. Para chegar à solução final utilizou uma combinação de teoria econômica e métodos de cálculos. É comum se considerar para múltiplos passes, todos como sendo iguais, sendo apenas o último deferente. Porém, o software apresentado no estudo de Kee (1994) mostra que, na realidade existem condições diferentes de corte para cada passe. É mostrada a importância da utilização da estratégia de otimização desenvolvida em relação a aquelas adotadas em manuais e, demonstra os efeitos das principais variáveis.

Jha (1996) pesquisou um modelo matemático para otimização do custo de usinagem através de um programa de geometria estocástica. O modelo contém uma descrição minuciosa dos custos, insere multa para violação de prazos, considera os rejeitos, entre outros.

Na fabricação, o tempo de conclusão é predeterminado. Se o prazo não é cumprido, a empresa pode perder o contrato de fornecimento. Além disso, o ágio perdido no mercado pode ser elevado. Custo de usinagem, custo de mão-de-obra e custo da ferramenta são também incluídos no desenvolvimento da função custo. A descrição do custo considera também o custo decorrente da espera do trabalho semi-acabado, estocado, aguardando processamento através de operações de usinagem posteriores. O estoque de peças trabalhadas e armazenadas também conta para o capital imobilizado. Os diferentes fatores de custo dependem da variação das condições de mercado e, portanto, os coeficientes de custo são probabilísticos. Conseqüentemente, o custo total do sistema vem a ser estocástico. O conhecimento da expectativa de custo pode mostrar ao responsável pelo processo uma idéia de grandeza da expectativa de rendimento. Isto pode ajudar a decidir se quer ou não a fabricação do produto. O Modelo matemático apresentado no estudo de Jha (1996) para a otimização de custo estocástico é apresentado a seguir.

A função custo total, C_p , para um lote de peças em um sistema de fabricação é a soma das seguintes parcelas de custo:

(i) Custo de produção do set-up:

$$C_s = q \cdot \frac{s}{Q} \quad (2.20)$$

Onde q é o número de peças do lote, s é o custo de set-up e Q é a demanda anual.

(ii) Custo de ferramenta de usinagem:

$$C_t = q \left(\frac{T_c}{T} \right) K_t \quad (2.21)$$

Onde T_c é o tempo de corte, T é a vida da ferramenta, T_c / T é o número total de novas arestas requeridas para a usinagem de uma peça do produto e K_t é o custo por aresta de corte da ferramenta.

(iii) Custo de usinagem:

$$C_m = q \cdot t \cdot K_d \quad (2.22)$$

$$t = T_L + T_c + T_d \left(\frac{T_c}{T} \right) \quad (2.23)$$

Onde t é o tempo total, K_d é o custo de operação por unidade de tempo, T_L é o tempo de colocação, aproximação e retirada da peça (tempo improdutivo) e T_d tempo para substituição da ferramenta desgastada pelo uso.

(iv) O custo de produção do lote q de produtos idênticos:

$$C_i = q \cdot (q-1) \cdot t \cdot \frac{(w_i + w_0)}{2} \quad (2.24)$$

Onde w_i e w_0 são os custos de espera por unidade de tempo antes e após o processamento, respectivamente.

(v) Custo da multa por atraso:

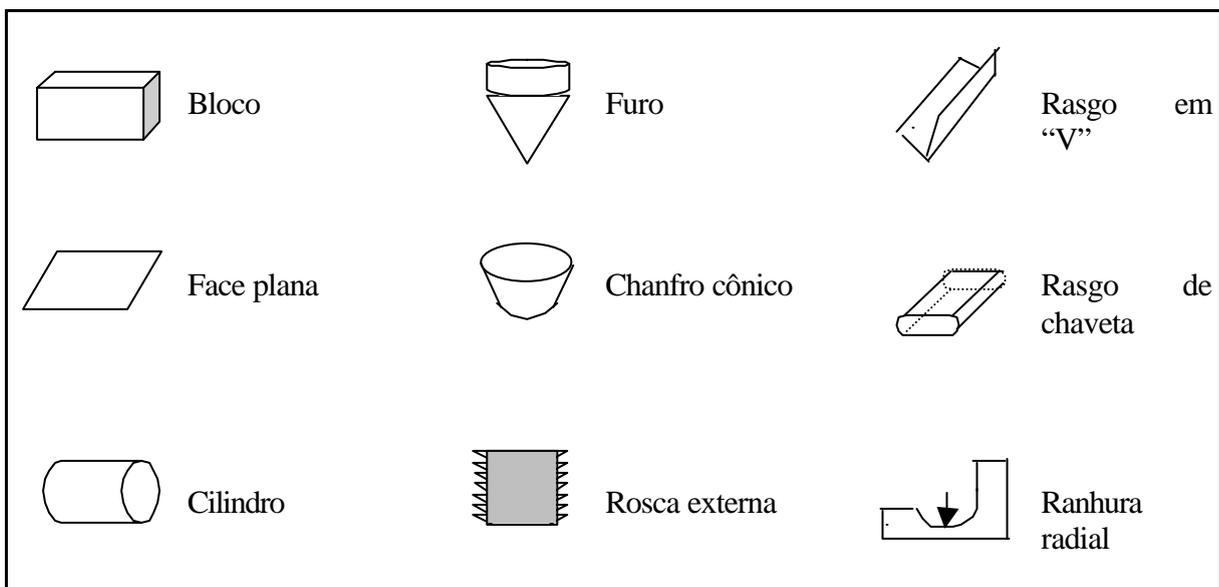
$$C_i = \max\{0; (q \cdot t - D_u) p\} \quad (2.25)$$

Onde $q \cdot t$ é o tempo total para a produção do lote; D_u é o prazo para conclusão do lote (na prática não há ganho para a entrega antecipada).

Portanto, o custo total C_p , é:

$$C_p = (s \cdot q / Q) + q(T_c / T) \cdot K_t + q \cdot \{T_L + T_c + T_d(T_c / T)\} \cdot K_d + q(q-1) \cdot \{T_L + T_c + T_d(T_c / T)\} \cdot \frac{(w_i + w_0)}{2} + p \cdot \{q \cdot (T_L + T_c + T_d(T_c / T)) - D_u\} \quad (2.26)$$

Feng et al (1996) desenvolveram uma metodologia para a classificação e avaliação do custo de usinagem através das características de forma da peça e das afinidades entre as mesmas. A unidade de custo de fabricação foi determinada através dos dois fatores principais: o tipo de processo de fabricação e o correspondente tempo requerido para realizá-lo. Modelos de avaliação de custo de usinagem foram investigados para quatro casos típicos: 1) usinagem tradicional; 2) usinagem simultânea; 3) montagem de peça e mudança de processo simultâneos e, 4) máquinas de múltiplas ferramentas. As características de forma são classificadas em simples e complexas. Formas simples são apresentadas na figura 2.3 e as formas complexas na figura 2.4



2.3. Características de forma simples (Feng et al, 1996).

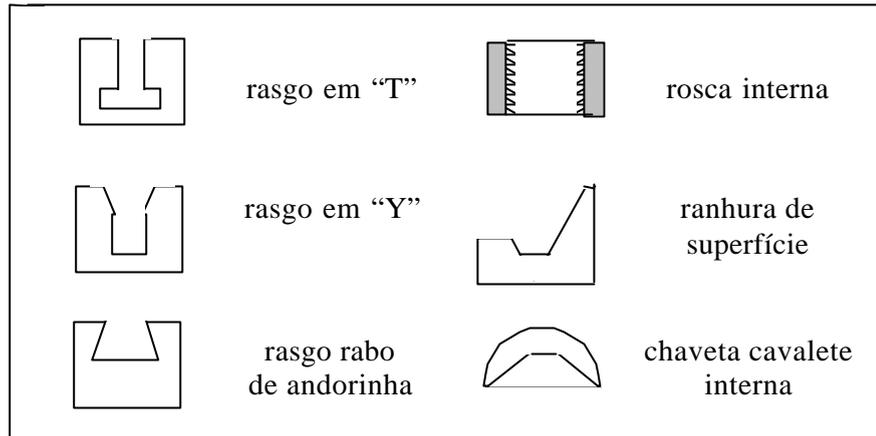


Figura 2.4.- Características de forma complexas (Feng et al, 1996).

Nas características de forma de usinagem complexas, dois componentes predominantes do tempo de usinagem são definidos: o tempo de set-up, que é o tempo utilizado para mudar a posição da peça que está sendo usinada; e o tempo de recolocar ou trocar a ferramenta de corte. Uma característica complexa, semelhante a um rasgo em forma de “T”, ou em “Y”, não pode ser obtida de uma simples operação de usinagem, de apenas um set-up e/ou de uma troca de ferramenta de corte, mas de diversas operações, vários set-ups e/ou trocas de ferramentas de corte, o que significa muito tempo e a conseqüente elevação dos custos de usinagem. O nível de dificuldade de usinagem depende principalmente da relação e da quantidade de “set-ups” e trocas de ferramenta de corte. Portanto, o custo de usinagem de uma peça é influenciado pela complexidade da forma usinada. Na obtenção do custo final são utilizados diagramas de fluxo de processo e tabelas padronizadas de custos de usinagem. No trabalho de Feng et al (1996) são apresentados modelos matemáticos para o cálculo de custo unitário de fabricação, de acordo com os quatro casos típicos citados anteriormente. Considera-se que reduzindo o custo de um produto no estágio de projeto é mais efetivo do que no estágio de fabricação. O custo de usinagem de uma peça depende não somente do tipo de características de forma da peça, mas também da afinidade entre as características. Um algoritmo é apresentado junto com os modelos matemáticos para determinar a alternativa de mínimo custo da peça usinada.

Junior e Ubertino (1995) otimizaram as condições de usinagem para o processo de torneamento. Eles apresentaram as formas de otimização para o mínimo custo e para a máxima produção, considerando as restrições tecnológicas impostas ao processo de usinagem. Como forma de aplicar estes conceitos desenvolveram um sistema para determinação otimizada de condições de usinagem apoiado por banco de dados. O sistema permite a seleção de materiais, ferramentas e máquinas, a partir de informações contidas em bancos de dados. Com o uso deste sistema determina-se a velocidade de corte otimizada, o avanço e a profundidade de corte. Os resultados são utilizados para torno convencional e Comando Numérico. Para validar o sistema, se utilizou dados da literatura e de ensaios de usinagem.

Bem-Arieh (2000) considerando que a estimativa de custo de fabricação de uma peça usinada é uma tarefa difícil e de grande importância para as empresas de manufatura e, que, a precisão da estimativa de custo é fundamental para o controle de custo, para o bom resultado do trabalho, e a manutenção de uma posição competitiva da empresa no mercado; desenvolveu um sistema de estimativa de custo para peças rotacionais que utiliza uma combinação da estimativa de variação de custo e cálculo de custo. Na variação de custo são utilizados parâmetros de usinagem, históricos, de um banco de dados. O cálculo de custo é baseado na geometria da peça, na ferramenta de corte e nos parâmetros de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte). O sistema apresenta o cálculo do tempo de fabricação. Neste tempo, são incluídos os tempos de corte propriamente dito (produção de cavaco) e os tempos

improdutivos: colocação da peça bruta e retirada da peça acabada; tempo de troca da ferramenta; e os tempos de aproximação, afastamento e reaproximação da ferramenta de corte.

A seguir serão mostrados alguns trabalhos mais recentes e interessantes na área de custos de usinagem.

Hui; Leung; Linn (2001) desenvolveram um interessante processo de otimização de custo de usinagem a partir de um modelo de tempo-dinâmico para passe único de torneamento. O modelo incorpora considerações sobre a natureza aleatória da vida, da manutenção, da substituição e da afiação da ferramenta de corte. Admite que os custos de usinagem, considerando o grau de acabamento da peça, são definidos por dois conjuntos de decisões: 1) Condições de usinagem definida pela escolha da velocidade de corte e do avanço; e 2) A condição da ferramenta definida pela vida útil e condições de afiação. O modelo trata do custo da qualidade do acabamento da peça nos dois mais importantes aspectos: desvio da meta de rugosidade, e desvio das metas de dimensões. No modelo, as variáveis de decisão são: v velocidade de corte (m/min), f avanço (mm/volta), m número de afiações; T intervalo de tempo entre afiações da ferramenta.

É apresentado a seguir mais detalhe do importante trabalho realizado pelos citados autores.

1) Razão de rendimento da produção de peças: a Razão de Retirada de Material (RRM) é a quantidade de material removido de uma peça por unidade de tempo. Para processos de torneamento, o RRM em mm^3/min , é dado pela equação (2.27), Hui et al (2001):

$$r = 500(D_0 - D_i) f V \quad (2.27)$$

Onde:

D_0 e D_i são os diâmetros inicial e final da peça, respectivamente.

Para um comprimento de corte L , o volume de metal a ser removido é $\pi L (D_0^2 - D_i^2) / 4$. Fazendo $D = (D_0 + D_i) / 2$, o tempo de corte para uma peça simples é: $t_w = \text{volume de metal} / \text{RRM} = \pi D L / 1000 V f$. Considerando t_h o tempo de colocação/retirada de uma peça, o tempo gasto para produzir uma simples peças é: $t_w + t_h$. A razão de rendimento de produção para o tempo unitário de máquina é dada pela equação (2.28).

$$R_u = p \cdot (n^0 \text{ de peças processadas por tempo unitário de máquina}) = p / (t_w + t_h) \quad (2.28)$$

Onde:

p é o rendimento de produção (atribuído para operação de torneamento) por peça.

Pode se observar que a razão de rendimento é diretamente proporcional a $V e f$.

2) Custo do salário-homem e salário-máquina: o custo do trabalho de colocação e retirada por peça é $C_h t_h$; o custo do trabalho de operação da máquina por peça é $C_w t_w$; e o custo do tempo da máquina por peça é $C_z t_w$. O custo total de máquina por unidade de tempo é:

$$[C_h t_h + (C_w + C_z) t_w] / (t_w + t_h). \quad (2.29)$$

Onde:

C_h é o custo direto do trabalho no manuseio por unidade de tempo;

C_w é o custo direto do trabalho de corte por unidade de tempo;

C_z é o custo da máquina por unidade de tempo de corte.

3) Custo Decorrente do Desvio da Qualidade: uma das maiores componentes de custo é aquela imputada ao devido na qualidade da peça, como um resultado da má condição da ferramenta ou quebra da mesma. Os dois principais atributos para monitorar a peça, são: acabamento superficial e precisão dimensional. Isto é, o custo da qualidade é a soma do custo

do desvio da meta do acabamento superficial e desvio da meta dimensional. O acabamento superficial para processos de torneamento, é aproximadamente dada por $R_z = 0,0321 f^2 / r_e$, onde r_e é o raio da ponta de uma ferramenta nova ou reafiada. O custo da qualidade devido ao acabamento superficial pode ser expresso como, $C_r (R_z - R_0)^2$, se $R_z > R_0$, caso contrário o custo é zero. C_r é o custo da qualidade por unidade de área de desvio em unidade de tempo e, R_0 é a meta de rugosidade superficial. Considerando que o raio da ponta r_e é uma função do tempo de corte, t , o custo do desvio da rugosidade em um período, T , de afiação é dado pela equação (2.30):

$$\text{Custo do desvio de rugosidade} = \int_0^T C_r (\overline{R_z}(t) - R_0)^2 dt \quad (2.30)$$

Onde $\overline{R_z}(t)$ é uma função do tempo t de uso da ferramenta. Aproximando $\overline{R_z}(t)$ pela rugosidade média R_z que é avaliada por um raio de ponta médio r_e de uma ferramenta gasta, o custo médio do desvio de rugosidade por unidade de tempo é dado por:

$$C_r (R_z - R_0)^2 / (t_w + t_h) \quad (2.31)$$

4) O Desvio da Meta da precisão dimensional na usinagem ocorre porque a precisão de corte diminui com o tempo. A ferramenta pode ser reafiada para restaurar as condições de operações ou ser substituída por uma nova ferramenta. Porém, a ferramenta só pode ser afiada para um número finito de vezes (o número máximo de afiações é normalmente prescrito pelo fabricante). É importante que o número de afiações e o intervalo de afiações, T , sejam determinados para evitar afiações prematuras ou ultrapassagem do tempo de afiação. É considerado que, D_t (diâmetro da peça produzida no tempo t), o intervalo de tempo $[kT, (k + 1)T]$, $k = 0, 1, \dots, m$ (em que ocorre dano à peça) e, o desvio médio da meta do diâmetro D' ; formam uma função linear $\mathbf{a}(t - kT)$, $kT < t < (k + 1)T$, onde \mathbf{a} é uma função linear de RRM. A suposição da relação linear representa um desvio linear do processo. Considera-se que a peça é rejeitada quando o diâmetro exceder um nível de tolerância superior D_0^* ou um nível de tolerância inferior D_i^* . Sendo o intervalo de afiação, T , um parâmetro estabelecido, ele pode ser escolhido como um múltiplo de, t_w , isto é, $T = n_w \cdot t_w$, não ocorrendo falhas no intervalo de $(0, T)$. Considerando P o rejeito da peça, $jth = P$ [diâmetro $> D_0^*$ ou diâmetro $< D_i^*$], temos:

$$P = 1 - \Phi\left(\frac{D_0^* - D' - j\mathbf{a}_w}{\mathbf{s}}\right) + \Phi\left(\frac{D_i^* - D' - j\mathbf{a}_w}{\mathbf{s}}\right) = \mathbf{e}, j = 1, 2, \dots, n_w \quad (2.32)$$

Onde $\Phi(\cdot)$ é a função probabilidade acumulativa de uma distribuição normal padrão. O número esperado de peças rejeitadas no intervalo T de corte é:

$$\mathbf{e} = \sum_{j=1}^{n_w} \mathbf{e} \quad (2.33)$$

Considerando C_D como o custo do rejeito de peça. A previsão de custo devido ao desvio de meta dimensional por unidade de tempo é:

$$\frac{C_D \mathbf{e}}{(T + n_w t_h)} = \frac{C_D \mathbf{a}_w}{T(t_w + t_h)} \quad (2.34)$$

5) Custo de Manutenção da Ferramenta (falha, compra/substituição e afiação): A probabilidade de falha da ferramenta pode ser descrita por uma função exponencial. A média

da função exponencial de falha, ou a expectativa física da vida da ferramenta, pode ser expressa em termos de parâmetros de corte pela fórmula expandida de Taylor (1907), ou seja, $(I / \mathbf{q}) = [I / (V^a f^b)]$, onde I , a , b são constantes para uma específica combinação ferramenta/peça. Os parâmetros de manutenção, (m, T) e a escolha dos parâmetros de corte determinam o ciclo econômico da vida da ferramenta. Considerando que afiação não muda a distribuição da vida da ferramenta, o custo da falha, da compra e troca da ferramenta, e afiação é expressa por:

$$C_P \int_0^{(m+1)T} f(t) dt = C_P F[(m+1)T] \quad (2.35)$$

Onde:

C_P é o custo de falha da ferramenta;

$f(\cdot)$ é a função da densidade de probabilidade da vida da ferramenta;

$F(\cdot)$ é a função da distribuição acumulativa da vida da ferramenta;

Orth (2001) desenvolveu um sistema de monitoramento do desgaste de flanco de ferramentas de corte. É considerado que o monitoramento do processo de fabricação tem a finalidade de otimizar a produção em termos de custo e tempo e, melhorar a qualidade do produto final para atender as encomendas de consumidores cada vez mais exigentes e assim se manter no mercado. De acordo com o sistema desenvolvido se pode obter produtos altamente personalizados e especializados, com custos reduzidos. Através deste monitoramento, pode-se evitar que um produto defeituoso seja fabricado e chegue ao consumidor. No estudo são descritos todos os problemas do desgaste de flanco e as tecnologias existentes para o monitoramento do processo de fabricação. São apresentadas todas as fases do desenvolvimento do sistema de visão, desde o projeto óptico até a implementação do software. Finalmente, é apresentado detalhadamente o sistema de medição desenvolvido.

Nicolaou; Thurston; Carnahan (2002) desenvolveram um estudo para a obtenção do equilíbrio entre a qualidade do produto, o custo de usinagem e minimização dos impactos ao meio ambiente decorrentes dos processos de usinagem. Após a definição dos parâmetros ótimos de usinagem, decisões de fabricação devem ser tomadas a respeito da obtenção do referido equilíbrio. Em relação à qualidade são formulados dois modelos matemáticos para estimativa inicial de compatibilização dos três critérios: 1) Modelo com experimentação virtual por meio de simulação e, 2) Modelo através da experimentação física. O custo é estimado através de uma atividade baseada na aproximação de custo. O tratamento do líquido residual do fluido de corte, para evitar o impacto ambiental, é estimado através de análise estequiométrica. As variáveis de decisão de entrada, incluem, a escolha do material, desenho, fabricação e especificação do líquido refrigerante/lubrificante. A contribuição do estudo é a integração das atividades baseadas em: estimativas do custo e qualidade da usinagem, via análise estatística dos dados provenientes dos experimentos virtuais e físicos, e; estimativa do tratamento do líquido residual do fluido de corte, para minimizar o impacto ambiental. Isto permite a formulação da teoria de decisão. No trabalho é apresentado um exemplo de usinagem de uma junta de direção tendo como variáveis de decisão: a escolha do material da peça (aços x alumínio), o avanço, a velocidade de corte e a escolha entre usinagem molhada versus usinagem a seco.

Da Silva e Mezzomo (2002), desenvolveram uma metodologia de criação de banco de dados em sistema CAD visando à determinação automática dos parâmetros de corte para processo de usinagem. O modelo estudado foi implementado para máquinas CNC como um módulo de um sistema de programação automática. A utilização da técnica permite o armazenamento de informações contidas em manuais de usinagem, tabelas fornecidas por fabricantes de ferramentas e, dados históricos de operações anteriores. Além de aumentar a

produtividade na geração de programas CN, a aplicação do sistema dispensa o conhecimento especializado por parte do programador CN. Para a implantação do modelo foi adotado o programa AutoCAD 2000 (Autodesk., 2000), que possui uma linguagem computacional versátil e de fácil entendimento, o AutoLISP 2000. Os arquivos são estruturados na forma de listas e tratados como, programas, dados para programas ou como entradas agrupadas. Funções de programação permitem a criação de novas listas, adição de membros a uma lista existente, acessar elementos ou executar procuras avançadas em listas. A possibilidade de utilizar listas de associações como banco de dados permite criar arquivos para armazenar informações referentes ao processo produtivo. Os arquivos são estruturados nas seguintes modalidades: arquivo de equipamentos, relativos aos dados de máquina-ferramenta; arquivo de materiais, diz respeito a dados de material de peça a usinar; arquivo de ferramentas de corte e arquivo de dados de corte recomendados.

Mastelari e Coppini (2002) desenvolveram um projeto de um sistema de informação para indústrias de manufatura por usinagem. O projeto é constituído de dois subsistemas, o primeiro, tem a função de programar a fabricação de peças em centros de torneamento. Trata-se do editor/simulador de programas Comando Numérico (CN) para torneamento e o banco de dados de ferramentas. Ao programador basta responder perguntas que são apresentadas sequencialmente na forma de janelas de diálogos para que percursos e condições operacionais de usinagem sejam automaticamente organizados. O simulador ajuda na descrição da peça e na verificação da execução das operações. Ao usar o editor de programas CN o usuário poderá definir se deseja trabalhar no modo de máxima produção, de mínimo custo de produção ou especificar outras condições tecnológicas para o torneamento. Ao definir as operações, o banco de dados de ferramentas é acessado de forma a facilitar a escolha das mesmas. Na programação da peça, o programador determina o número de peças que irá produzir. Com este dado, mais os dados geométricos da peça, os dados das ferramentas (x e K de Taylor) e dados econômicos, se calculam: o tempo de cada operação, o número de insertos que irá necessitar para cada operação e, os custos envolvidos. A partir do conjunto de dados geométricos e tecnológicos obtidos, gera-se o programa CN para a máquina especificada. O segundo subsistema é um gerenciador de banco de dados destinado à administração de materiais; desta forma ele integra diferentes áreas relacionadas com a produção. É programado para reposição automática dos estoques de ferramentas e materiais, e ativa o processo de compra a partir de critérios previamente definidos.

Saravanan et al (2005) desenvolveram um estudo de pesquisa concentrado na otimização dos parâmetros de usinagem para torneamento cilíndrico, desde o primeiro passe de desbaste ao acabamento. Os parâmetros de usinagem em múltiplos passes de torneamento são: profundidade de corte, velocidade de corte e avanço. O bom resultado da usinagem é avaliado pelo seu custo de produção. Neste trabalho, os parâmetros ótimos de usinagem para todas as fases de produção da peça são determinados considerando o mínimo custo de produção, sujeito a um conjunto de restrições. As restrições consideradas são: força de corte, potência da máquina, temperatura da ponta da ferramenta, entre outros. Eles consideram que a obtenção de parâmetros ótimos de corte é a grande preocupação no ambiente de manufatura por usinagem, onde a economia nas operações representa importante função na competitividade de mercado. O perfil final de usinagem da peça pode consistir de torneamento cilíndrico, torneamento radial, torneamento cônico e, torneamento circular. Devido à alta complexidade do problema de otimização, seis diferentes algoritmos não tradicionais foram empregados para se chegar à solução do problema;

Anselmetti e Louati (2005) criaram um método para a especificação tridimensional de medidas de tolerâncias de peças e, geração das condições de produção com utilização das Normas ISO. O método proposto é baseado na representação gráfica do formato da peça, no planejamento do processo de produção e nas exigências de funcionalidade do produto; todos, com a utilização de norma ISO, que inclui o desenvolvimento de um banco de dados de referência. Um simples procedimento de interação determina as especificações ISO de cada

fase, de acordo com cada formato do perfil da peça. O algoritmo desenvolvido utiliza uma representação vetorial da zona de tolerância que corresponde ao grau de liberdade indicado para cada formato do perfil da peça. O método proposto é restrito apenas aos processos de usinagem.

Wang e Liang (2005) desenvolveram uma abordagem integrada envolvendo seleção do processo, seleção dos parâmetros de usinagem e, definição das tolerâncias da peça; evitando assim, a tomada de decisões incompatíveis. Esta abordagem integrada foi formulada como um modelo de critério duplo, para tratar tanto os custos mensuráveis como os imensuráveis. O modelo utiliza um método de meta de programação tipo Cheby-Shev, modificado, para encontrar o ponto ótimo que atenda aos dois critérios estabelecidos. Neste trabalho, os autores apresentaram exemplos para mostrar as aplicações e as soluções obtidas do modelo. Com a adoção do modelo é mostrado que, as decisões sobre a seleção do processo envolvendo a escolha dos parâmetros de corte e as tolerâncias da peça podem ser obtidas simultaneamente.

Kayan e Akturk (2005) determinaram limites superiores e inferiores dos tempos de execução de cada operação controlados pelas condições de usinagem. O método é usado para definir um conjunto discreto e eficiente de pontos para programação da máquina CNC; levando-se em consideração dois objetivos: as minimizações dos custos e de tempo de usinagem. As restrições tecnológicas da máquina CNC, juntamente com a definição dos parâmetros específicos para determinada peça afetam as condições de usinagem (velocidade de corte e avanço) e influenciam nos tempos de processamento e na vida da ferramenta de corte. Desde que sejam bem conhecidos os tempos para execução das tarefas ou etapas da fabricação, o sistema pode utilizar recursos bem mais eficientes para a seleção apropriada das condições de corte e dos tempos de fabricação.

A equação de custo de produção por usinagem, como definido em Ferraresi (1990), inicia seu desenvolvimento envolvendo parcelas divididas em dois blocos; no primeiro, aquelas referentes ao custo total da matéria-prima; no segundo, as que dizem respeito ao custo total de usinagem. De acordo com Ferraresi (1990), o custo total de produção por usinagem é determinado através das seguintes expressões:

$$K_p = \underbrace{(K_m + K_{mi})}_{\text{Custo total de matéria-prima}} + \underbrace{(K_{us} + K_{ui})}_{\text{Custo total de usinagem}} \quad (2.36)$$

$$K_p = (K_m + K_{mi}) + K_{us} + K_{ui} + K_{um} + K_{uf} + (K_{eq} + K_{if} + K_v) \quad (2.37)$$

Onde:

K_p é o custo de fabricação, em (R\$/peça);

K_m é o custo de matéria-prima, em (R\$/peça);

K_{mi} é o custo indireto da matéria-prima, em (R\$/peça);

K_{us} é o custo de mão-de-obra, em (R\$/peça);

K_{ui} é o custo indireto de usinagem, em (R\$/peça);

K_{um} é o custo da máquina (juros, depreciação, manutenção, espaço, energia), em (R\$/peça);

K_{uf} é o custo das ferramentas (depreciação, troca, afiação), em (R\$/peça);

K_{eq} é o custo de controle de qualidade, em (R\$/peça);

K_{if} é o custo indireto de fabricação, independente das condições de usinagem, em (R\$/peça);

K_v é o custo proporcional às variações de custo de operações anteriores ou posteriores, em (R\$/peça).

Estas parcelas de custo são depois reduzidas em três principais parcelas, veja a equação (2.38) abaixo.

$$K_p = C_1 + \frac{t}{60} C_2 + \frac{t}{T} C_3 \quad (2.38)$$

Onde:

K_p é o custo de fabricação por peça, em (R\$/peça);

C_1 é a constante de custo independente da velocidade de corte, em (R\$/peça);

C_2 é a soma das despesas totais de mão-de-obra e salário máquina, em (R\$/hora);

C_3 é a constante de custo relativo à ferramenta de corte, em (R\$);

t_c é o tempo de corte, em (minutos/peça), e;

T é o tempo de vida da ferramenta de corte, em minutos.

2.1 Custo do Torneamento

Para o torneamento t_c é o tempo de corte, que varia para cada tipo de sub-operação de torneamento. Para o torneamento cilíndrico, t_c é dado pela equação (2.39). O tempo de vida da aresta da ferramenta de corte, T , é dado pela equação de Taylor (2.40).

$$t_c = \frac{l p \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v} \quad (2.39)$$

$$T = \frac{K}{v^x} \quad (2.40)$$

Portanto, para o custo unitário de uma peça cilíndrica, para um único passe de torneamento, temos a equação (2.41).

$$Kp = C_1 + \frac{p \cdot d \cdot l}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot v} C_2 + \frac{p \cdot d \cdot l \cdot v^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} C_3 \quad (2.41)$$

Onde:

d é o diâmetro da peça, em (mm);

l é o percurso de avanço, em (mm);

f é o avanço, em (mm/volta);

v é a velocidade de corte, em (m/min);

C_2 é a soma das despesas totais de mão-de-obra e salário máquina, em (R\$/hora):

$$C_2 = S_h + S_m \quad (2.42)$$

Onde:

S_h é o salário do operador mais encargos e S_m é o salário máquina em (R\$/hora) expresso através da equação:

$$S_m = (1/H) \{ [V_{mi} - V_{mi} (m/M)] j + (V_{mi}/M) + K_{me} + E_m \cdot K_e \cdot j \} \quad (2.43)$$

Onde:

H é o número de horas trabalhadas da máquina por ano ($\cong 2.400$ horas/ano);

V_{mi} é o valor inicial de aquisição da máquina em (R\$);

m é a idade da máquina em (anos);

M é a vida prevista para a máquina em (anos);

j é a taxa de juros por ano;

K_{me} é o custo anual de conservação da máquina;

E_m é o espaço ocupado pela máquina em (m³);

K_e é o custo do m³ ocupado pela máquina em (R\$/m³)

x e K são os parâmetros da fórmula de Taylor. Trata-se de constantes que dependem do material da ferramenta e da peça e também das condições de corte, Ferraresi (1990); C_3 é a constante de custo relativo à ferramenta (consideramos o caso de ferramentas com insertos reversíveis), em (R\$), expresso através da equação:

$$C_3 = K_{ft} + (t_{ft}/60) (S_h + S_m) \quad (2.44)$$

Onde: K_{ft} é o custo da ferramenta por vida T , da aresta, em (R\$), que no caso de insertos reversíveis é dado por:

$$K_{ft} = (1/n_{fp})(V_{si}) + K_s/n_s \quad (2.45)$$

Onde:

n_{fp} é a vida média do porta-ferramenta, em quantidades de fios de corte, até sua possível inutilização (por exemplo 500);

V_{si} é o custo de aquisição do porta-ferramenta, em (R\$);

K_s é o custo de aquisição do inserto reversível, em (R\$);

n_s é número de fios de corte do inserto reversível.

t_{ft} é o tempo de troca de posição da aresta cortante do inserto ou do próprio inserto.

2.2 Tempos de Corte

Andrade (2001) elaborou um estudo para a integração dos processos CAD/CAPP/CAM com geração automática do programa de Comando Numérico (CNC) para peças rotacionais. No seu trabalho, a otimização do processo foi realizada para um tempo mínimo de fabricação. O modelo adotado por ele considerou que o trabalho da ferramenta de corte é realizado em 03 (três) estágios, como mostrado na figura 2.5. No 1º estágio de desbaste, a ferramenta com movimentos axiais, radiais ou mistos; com profundidade, avanço e velocidade de corte preestabelecidos, realizam operação para a remoção da maior quantidade de cavaco da peça por unidade de tempo. No 2º estágio, também de desbaste, com os mesmos parâmetros novamente especificados, a ferramenta percorre todo o contorno da peça, deixando um sobremetal de 1,00 mm para ser removido no 3º estágio, de acabamento.

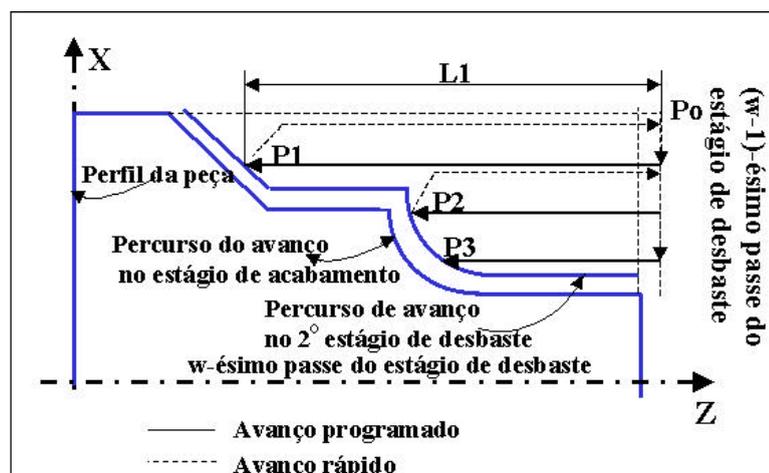


Figura 2.5 – Estágios de torneamento – Andrade (2001)

No trabalho de Andrade (2001), foram calculados os tempos de corte para as operações de torneamento apresentadas na figura 2.6. Para a otimização dos parâmetros de usinagem foram utilizadas as equações (2.46) a (2.49) do tempo total de usinagem para cada operação.

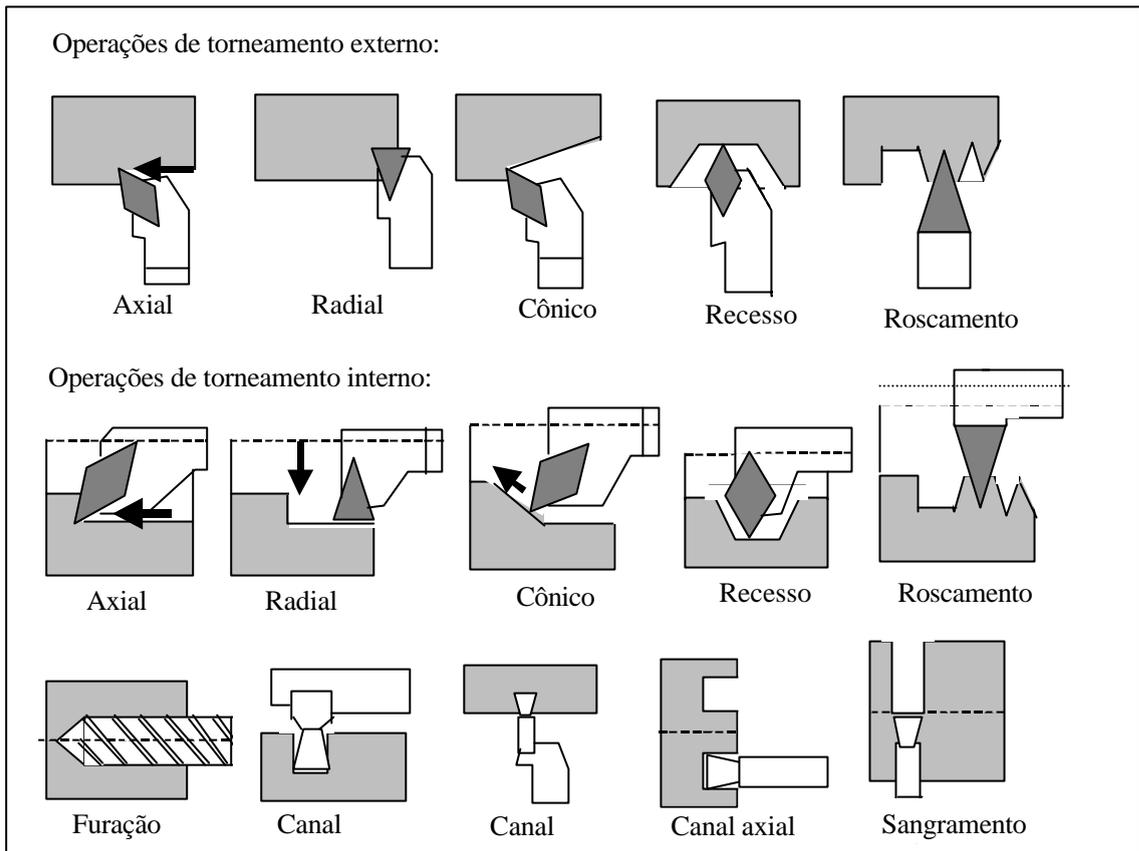


Figura 2.6 – Operações de torneamento (Andrade, 2001).

Tempo de corte para o torneamento cilíndrico externo ou interno, axial:

$$t_c = \frac{p \cdot x |z_2 - z_1|}{1000 \cdot v \cdot f} \quad (2.46)$$

Tempo de corte para o torneamento cônico externo ou interno, axial:

$$t_c = \frac{p}{1000 \cdot v \cdot f} \left| \frac{x_2^2 - x_1^2}{4 \cdot \text{sen} \mathbf{q}} \right| \quad (2.47)$$

Tempo de corte para o torneamento circular externo ou interno:

$$t_c = \frac{p}{1000 \cdot v \cdot f} \left[x_c \cdot (\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1) - r \cdot (\cos \mathbf{q}_2 - \cos \mathbf{q}_1) \right] \quad (2.48)$$

Tempo de corte para o torneamento radial:

$$t_c = \frac{p}{1000 \cdot v \cdot f} \left| \frac{x_2^2 - x_1^2}{4} \right| \quad (2.49)$$

Onde:

t é o tempo de corte;

z_1 e z_2 são os pontos inicial e final de deslocamento no eixo horizontal, f é o percurso de avanço no sentido axial;

v é a velocidade de corte;

f é o avanço;

x_1 e x_2 são os pontos inicial e final do percurso de avanço no sentido radial;

θ é o ângulo de inclinação do trecho cônico;

θ_1 e θ_2 são os ângulos em relação a uma reta horizontal passando pelo centro do círculo dos pontos inicial e final do trecho circular.

2.3 Linguagem de Programação

Uma linguagem capaz de gerar um aplicativo que possibilite o cálculo do custo de usinagem, e ao mesmo tempo seja de fácil programação e operação, é o Visual Basic. A referida linguagem foi desenvolvida pela Microsoft a partir da antiga linguagem Basic, (Perry, 1998). Seus aplicativos funcionam dentro do ambiente Windows que é o sistema operacional utilizado na grande maioria dos microcomputadores existentes.

As telas, denominadas de formulários, que aparecem no vídeo do computador durante o funcionamento de um aplicativo VB utilizam os mesmos componentes já bastante conhecidos do ambiente Windows, como por exemplo, do Word e do Excel que são na realidade aplicativos Visual Basic. Exemplos de controles de formulários são mostrados na figura 2.7.

Os códigos de programação VB são orientados a eventos, que geralmente são ações de interação do usuário através do mouse/teclado durante a operação de um aplicativo; como ocorre, por exemplo, no Excel e no Word. O programa deve oferecer uma gama de escolhas que vão de opções de menu a vários controles como os apresentados na figura 2.7, Perry (1998). Um pequeno exemplo de aplicativo VB é apresentado na figura 2.8.

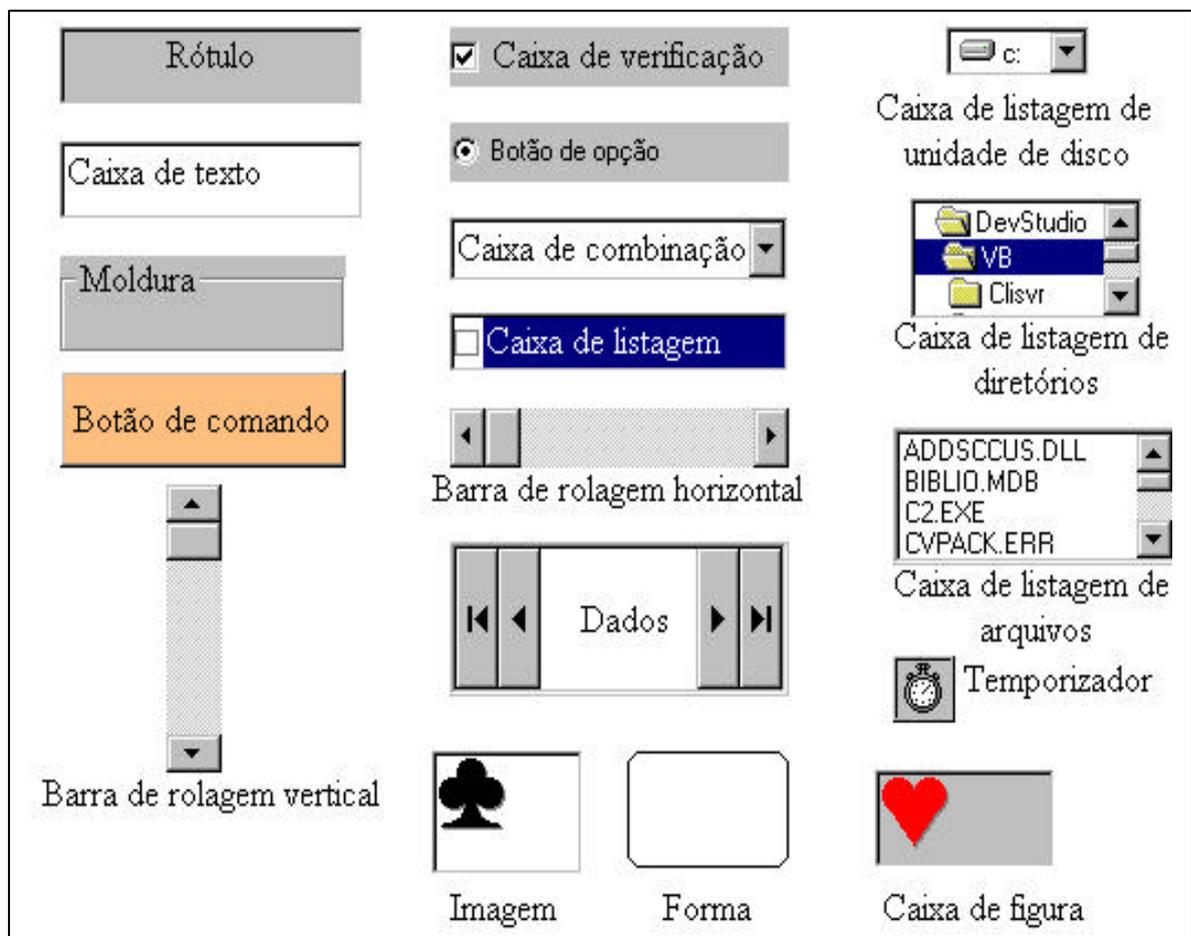


Figura 2.7 – Exemplos de controles dos aplicativos do Visual

Figura 2.8 – Tela (formulário) de aplicativo VB, Perry (1998).

No exemplo apresentado, o usuário introduz através do mouse ou teclado os dados solicitados dentro dos controle de “caixa de texto”. No caso, se trata de um aplicativo para o cálculo de juros e resultado de investimento a longo prazo; onde deverão ser introduzidos nas caixas de texto os dados de taxa de juros, tempo da aplicação e valor inicial do investimento. O código do programa apresentado faz com que após o click do usuário no botão de comando <CALCULAR JUROS>, o resultado final do investimento aparece na caixa de texto indicada no final do formulário. Para novos cálculos, existe a opção de limpar o formulário, para novas operações, após clicar no botão de comando <Limpar >. Para sair do aplicativo é só clicar em <Limpar>.

O código de programação para o aplicativo exemplificado é mostrado a seguir:

A linha no programa iniciada com apóstrofo (‘) é apenas explicativa, não sendo consideradas para o funcionamento do programa.

```
Private Sub cmdCompute_Click()
```

```
' intNum é uma variável de controle do loop
```

```
' sngIRate é a taxa anual de juros
```

```
' intTerm é o número de anos do investimento
```

```
' curInItInv é o valor do investimento inicial
```

```
' sngInterest é o rendimento com os juros
```

```
Dim sngIRate As Single, sngInterest As Single
```

```
Dim intTerm As Integer, intNum As Integer
```

```
Dim curInItInv As Currency
```

```
' Checando erros, ver código da função ErrorCheck() ao final do código de programa.
```

```
If ErrorCheck() = 1 Then
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
sngIRate = txtRate.Text / 100#
```

```

intTerm = txtTerm.Text
curInitInv = txtInvest.Text
sngInterest = 1# ' inicia valendo um

' Uso de um loop para calcular o valor total de juros sobre o investimento

For intNum = 1 To intTerm
    sngInterest = sngInterest * (1 + sngIRate)
Next intNum

' Agora temos o resultado final do investimento,
' calculado ao final de N anos

txtEnding.Text = Format(curInitInv * sngInterest, "$###,##0.00")

End Sub

Private Sub cmdClear_Click()

txtRate.Text = ""
txtTerm.Text = ""
txtInvest.Text = ""
txtEnding.Text = ""
txtRate.SetFocus

End Sub

Private Sub cmdExit_Click()
' Encerrando o aplicativo
Unload frmInterest
End
End Sub

```

Código do módulo da função de erro

```

Public Function ErrorCheck() As Integer
'Módulo de Checagem de erros
If Val(frmInterest.txtRate.Text) <= 0 Then
    frmInterest.txtRate.Text = InputBox("corrigir a taxa de juros", "Entre com a taxa")
    frmInterest.txtRate.SetFocus
    ErrorCheck = 1
    Exit Function
End If

If Val(frmInterest.txtTerm.Text) <= 0 Then
    frmInterest.txtTerm.Text = InputBox("Corrigir o tempo", "Entre com o tempo")
    frmInterest.txtTerm.SetFocus
    ErrorCheck = 1
    Exit Function
End If

If Val(frmInterest.txtInvest.Text) <= 0 Then

```

```

frmInterest.txtInvest.Text = InputBox("Corrigir o valor investido", "Entre o valor")
frmInterest.txtInvest.SetFocus
ErrorCheck = 1
Exit Function
End If
ErrorCheck = 0 ' Não havendo erro na checagem até este ponto
End Function

```

No exemplo na figura 2.8 se observa a inserção de alguns controles apresentados na figura 2.7, ou sejam, rótulos, caixas de texto, botões de comando e o próprio formulário. Cada tipo de controle é acompanhado de um conjunto extenso de propriedades, como apresentado na figura 2.9, que podem ser definidas na elaboração inicial do formulário (tela) ou podem ser alteradas durante a execução do aplicativo; neste caso, todas as possíveis alterações devem ser previstas no código do programa.

A relação de propriedades apresentada na figura 2.9 diz respeito ao controle “formulário”. Entre as mais importantes destacamos as relacionadas abaixo e suas respectivas funções:

BackColor: ajuda a definir a cor de fundo do formulário;

BorderStyle: especifica se o usuário pode redimensionar o formulário e o tipo;

Caption: exibe texto na barra de títulos do formulário;

Enabled: determina se o formulário é ativo. Esta propriedade é muito utilizada em código de programação para altera-la em tempo de execução;

Font: configura o nome, o estilo e o tamanho da fonte do texto;

ForeColor: define a cor do texto do formulário;

Height: define a altura do contorno do formulário;

Left: define o afastamento da borda esquerda do formulário até a margem esquerda da janela Form;

Picture: determina uma imagem que aparece ao fundo do formulário em tempo de execução;

StartPosition: determina o estado (centralizado ou padrão) do formulário na inicialização do aplicativo;

Top: define o afastamento da borda superior do formulário até a margem superior da janela Form;

Visible: determina se o formulário aparece ou fica oculto do usuário;

WindowState: determina o estado inicial em que aparece o formulário em tempo de execução, minimizado, maximizado ou normal.

Como se observa na figura 2.9, para um único controle, no caso o controle “formulário”, existem 44 características que podem ser incorporadas na fase de elaboração do formulário ou modificadas na fase de programação. Num aplicativo VB, existe a possibilidade de incorporar

mecanismos que facilitam o entendimento e auxiliam na introdução de dados, a exemplo das caixas de texto e de mensagem, que são inseridas no programa e aparecem na fase de execução para fazer perguntas ao usuário, ou exibir mensagens de erro e de informação sobre o uso do aplicativo.

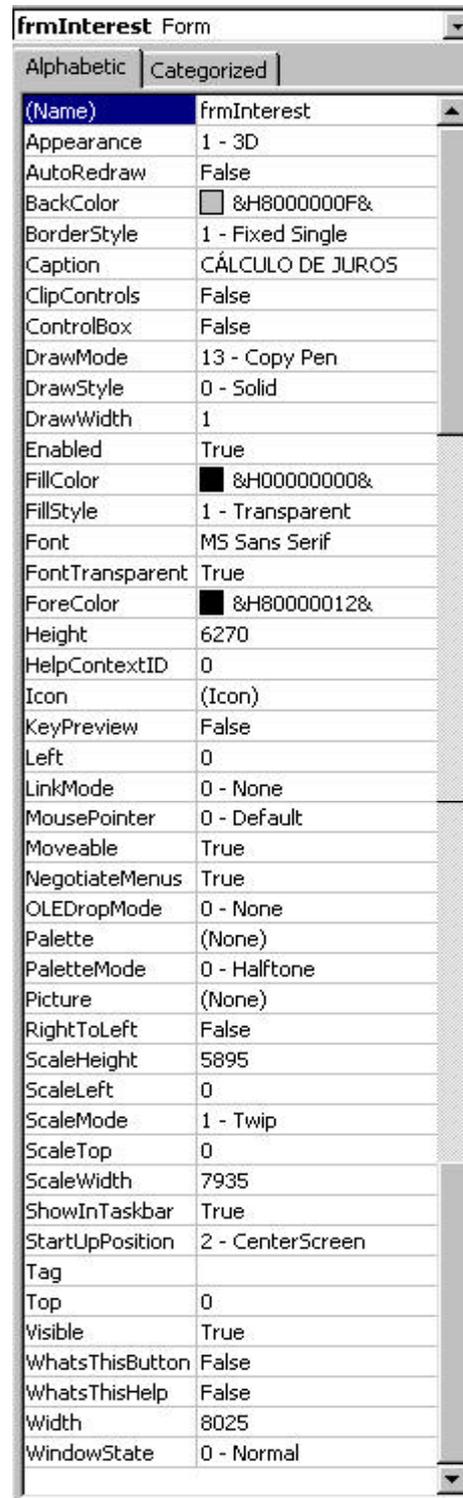


Figura 2.9 – Exemplo de propriedades de controles

3. OBJETIVO DO TRABALHO

Apesar da grande quantidade de trabalhos na área de custo de usinagem, alguns deles mostrados no capítulo 2, não se dispõe, principalmente, no mercado local, de um aplicativo de utilização simples e prático para calcular os custos de usinagem de torneamento de uma peça de formato qualquer. Por esta razão é que o objetivo deste trabalho será o desenvolvimento de um aplicativo para operacionalização, dentro do ambiente Windows, destinado ao cálculo do custo otimizado de usinagem por torneamento. Para se atingir o objetivo proposto é necessário que novas equações de custo sejam deduzidas a partir da equação (2.41), levando-se em consideração cada um dos estágios de usinagem para as sub-operações de torneamento mostradas na figura 2.6. A otimização do processo será realizada a partir das novas equações para um custo mínimo de fabricação; levando-se em consideração não só a variação da velocidade de corte, mas também do avanço e da profundidade de corte. Portanto, para se atingir o objetivo deste trabalho serão realizadas as seguintes etapas:

- a) Dedução de novas equações para cada estágio de torneamento de acordo com o tipo de operações de torneamento, considerando os custos com trabalhos produtivos e improdutivos (sem remoção de cavaco);
- b) Estudo dos principais parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade), para realizar a otimização do processo para um custo mínimo de fabricação;
- c) Elaboração do programa em Visual Basic, com apresentação dos formulários e orientações sobre a utilização do aplicativo de cálculo dos custos de usinagem.

4. DEDUÇÃO DE EQUAÇÕES DE CUSTO PARA OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO

A dedução das equações de custo de usinagem será feita para os três estágios da operação de torneamento: desbaste; pré-acabamento e acabamento.

4.1 Custo da Operação de Desbaste

No torneamento as operações de desbaste podem ser realizadas com passes: axiais, radiais ou mistos.

4.1.1 Equação dos Custos do Desbaste com Passes Axiais em Peça de Formato Cilíndrico

Considerando uma peça como mostrada na figura 4.1, composta de n diâmetros e desbastada em w_i passes. Uma vez realizada a otimização dos parâmetros de corte (velocidade de corte, v ; avanço, f ; e a profundidade, p), eles são considerados constantes em todos os passes.

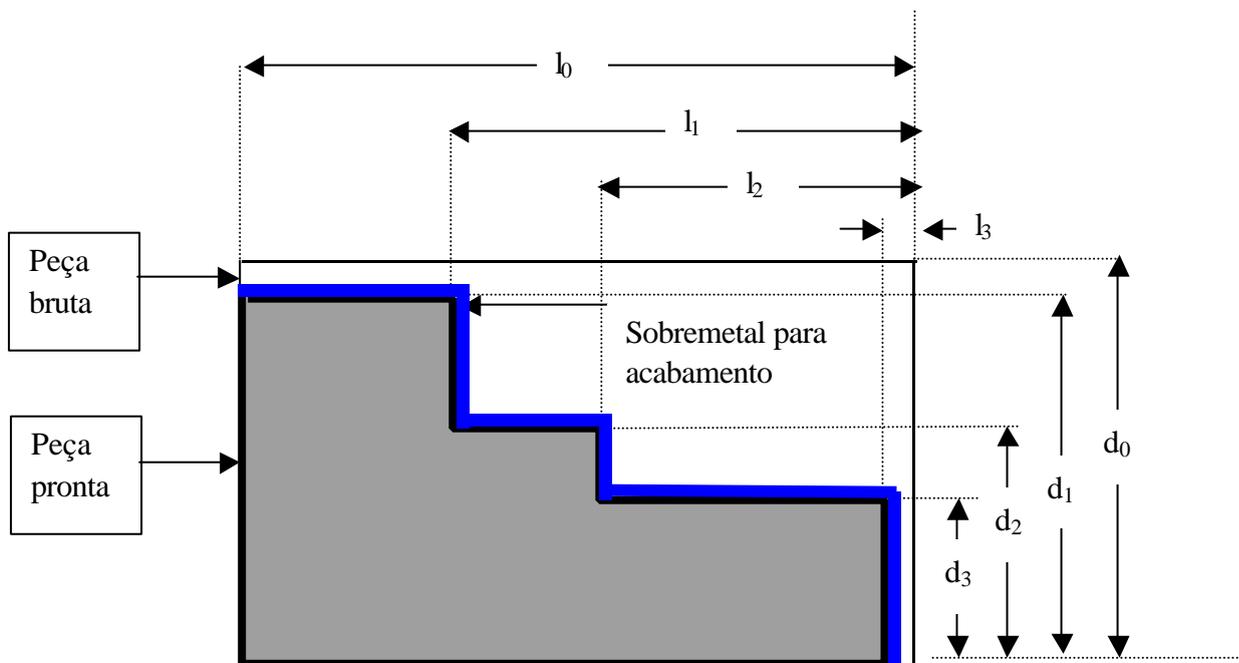


Figura 4.1 – Torneamento cilíndrico externo axial

Para um único passe em diâmetro determinado o custo de usinagem é dado pela equação (2.41). Para 02 passes o custo será:

$$K_{p1} = Kp + \frac{p \cdot (d - 2p) \cdot l}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot v} C_2 + \frac{p \cdot (d - 2p) \cdot l \cdot v^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} C_3 \quad (4.1)$$

Para 03 passes, temos:

$$K_{p2} = K_{p1} + \frac{p \cdot (d - 4p) \cdot l}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot v} C_2 + \frac{p \cdot (d - 4p) \cdot l \cdot v^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} C_3 \quad (4.2)$$

Portanto para n diâmetros e w_i passes temos:

$$K_{pn} = C_1 + \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^{w_i} [d - (2j - 2)p] l_i (y_1 + y_2) \right\} \quad (4.3)$$

Onde:

l_i são os percursos de avanço para cada diâmetro d_i ;

w_i é o número de passes para o diâmetro d_i e é dado por: $w_i = [d_i - (d_{i+1} + 1)] / 2p$,

p é a profundidade de corte;

$(+1)$ da expressão de w_i é a espessura do sobremetal de 1mm deixada para o acabamento da peça;

y_1 e y_2 são dados por;

$$y_1 = \frac{p}{60.1000.f.v} C_2 \quad (4.4)$$

$$y_2 = \frac{p.y^{x-1}}{1000.f.K} C_3 \quad (4.5)$$

Onde:

f é o avanço;

v é a velocidade de corte;

C_2 é a soma das despesas totais de mão-de-obra e salário máquina, em R\$/hora;

x e K são os parâmetros da fórmula simples de Taylor;

C_3 é a constante de custo relativa à ferramenta de corte, em R\$/peça.

De acordo com a equação (4.3) para o torneamento cilíndrico axial externo, no cálculo do custo de usinagem para cada passe, o diâmetro d_i varia de forma decrescente:

$$[d_i - (2.j - 2).p] \quad (4.6)$$

Portanto, para o torneamento cilíndrico axial interno a variação do diâmetro para cada passe é crescente, ou seja:

$$[d_i + (2.j - 2).p] \quad (4.7)$$

Logo o custo para o torneamento cilíndrico axial interno com n diâmetros e w_i passes é dada pela equação (4.8) abaixo:

$$K_{pn} = C_1 + \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^{w_i} [d + (2.j - 2)p] l_i (y_1 + y_2) \right\} \quad (4.8)$$

4.1.1.1. Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Axial com Peça de Formato Cilíndrico

Entre as parcelas que compõe o custo C_1 , existe o custo com trabalho improdutivo. Esta parcela é independente dos parâmetros de usinagem, é decorrente dos tempos improdutivos, ou sejam:

- Colocação, fixação, inspeção, retirada da peça. Estes custos podem ser preestabelecidos através da experiência de operações anteriores e obtidos do setor de controle da produção.

- b) Aproximação, afastamento, retorno e posicionamento da ferramenta de corte, são executados com elevadas velocidades de deslocamento, programadas. A seguir será desenvolvida a equação geral para a operação de torneamento cilíndrico externo, no 1º estágio de desbaste axial. De acordo com a figura 4.2, temos:

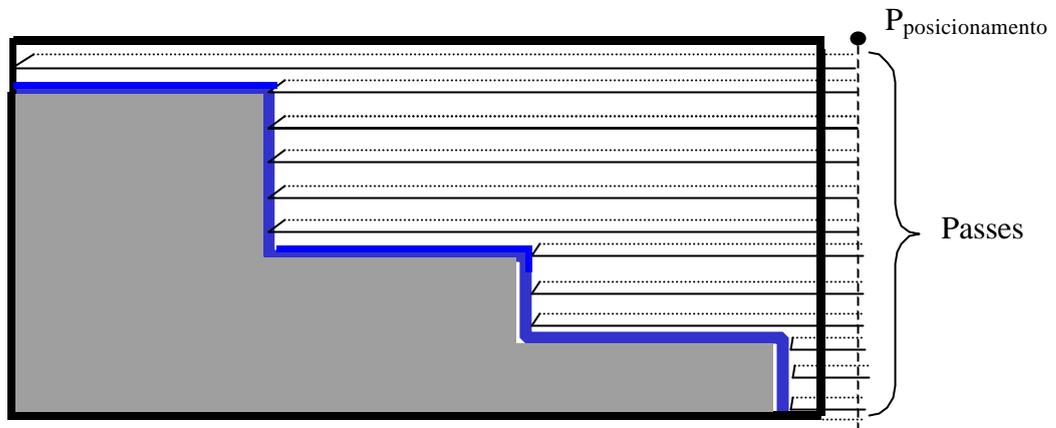


Figura 4.2 – Ilustração do movimento da ferramenta de corte em cada passe

O custo do trabalho improdutivo é dado pela equação (4.9) abaixo:

$$K_{pi} = \left(\frac{t_i}{60} \right) C_2 \quad (4.9)$$

Onde:

K_{pi} é o custo do trabalho improdutivo;
 t_i é o tempo do trabalho improdutivo;

O tempo de trabalho improdutivo, t_i , é dado pela equação (4.10) e representa cada um dos tempos de deslocamento da ferramenta de corte representados pelas linhas tracejadas (veja figuras 4.2 e 4.3).

$$t_i = \frac{d_i}{v_f} \quad (4.10)$$

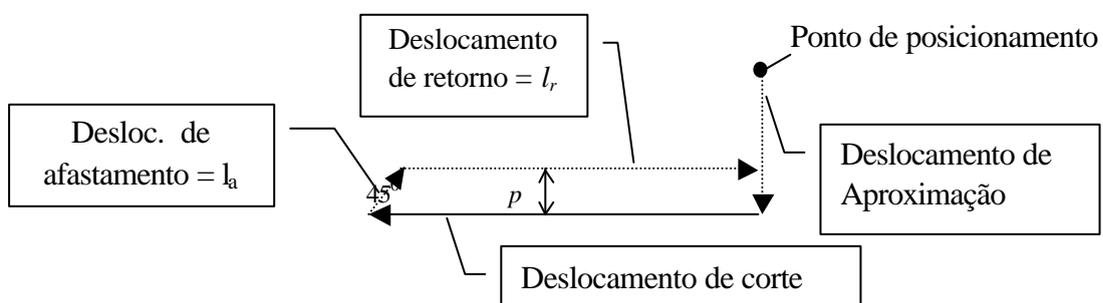


Figura 4.3 – Esquematização dos deslocamentos da ferramenta de corte

Onde:

v_f é a velocidade rápida de deslocamento em vazio na ordem de 7.500 m/min;
 d_i é o deslocamento improdutivo para cada passe, calculado com a ajuda da figura 4.3, dado pela equação (4.11).

$$d_i = l_a + l_r + 2p \quad (4.11)$$

$$l_a = \sqrt{p^2 + p^2} = \sqrt{2p^2} = p\sqrt{2} \quad (4.12)$$

l_a é o deslocamento de afastamento formando ângulo de 45° ;

l_r é o deslocamento de retorno, e

p é o posicionamento para o próximo corte, sendo p a profundidade de corte.

$$l_r = (l_j - p) \quad (4.13)$$

$$d_i = p\sqrt{2} + (l_j - p) + 2p = l_j + p(1 + \sqrt{2}) \quad (4.14)$$

Portanto, o tempo improdutivo total é dado pela equação (4.15) abaixo:

$$t_i = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{w_i} [l_j + p(1 + \sqrt{2})] \right)}{v_f} \quad (4.15)$$

Onde:

l_j é o percurso de avanço para o diâmetro d_i

n , w_i , l_j e p como definido na equação (4.3),

Logo o custo do trabalho improdutivo será dado pela equação (4.16) a seguir:

$$K_{pi} = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{w_i} [l_j + p(1 + \sqrt{2})] \right)}{60 \cdot v_f} \right] C_2 \quad (4.16)$$

4.1.2. Equação do Custo de Desbaste com Passes Axiais em Peça de Formato Cônico

No torneamento cônico externo axial, além da variação do diâmetro em cada passe, decrescente ou crescente, também ocorre a variação do percurso de avanço (l_j). Com a ajuda das figuras 4.4 e 4.5, se mostra a variação de l_j :

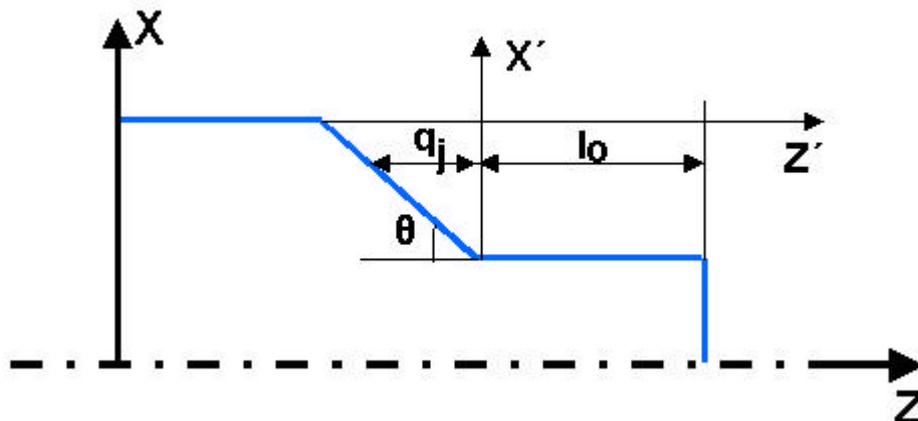


Figura 4.4 – torneamento cônico e os percursos de avanço

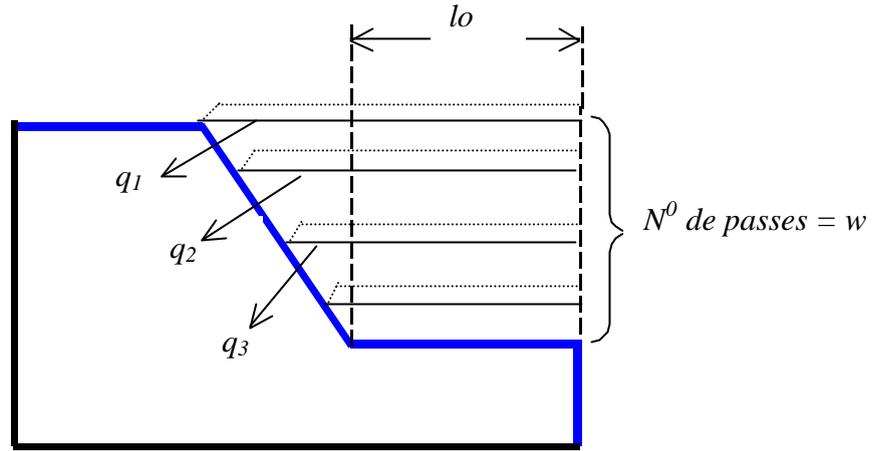


Figura 4.5 – Percursos de avanço l_j no torneamento cônico

$$l_1 = l_0 + q_1 \quad (4.17)$$

$$l_2 = l_0 + q_2 \quad (4.18)$$

$$l_3 = l_0 + q_3 \quad (4.19)$$

⋮

$$l_j = l_0 + q_j \quad (4.20)$$

$$q_1 = \frac{w \cdot p}{\operatorname{tg} \mathbf{q}} \quad (4.21)$$

$$q_2 = \frac{(w-1) \cdot p}{\operatorname{tg} \mathbf{q}} \quad (4.22)$$

$$q_3 = \frac{(w-2) \cdot p}{\operatorname{tg} \mathbf{q}} \quad (4.23)$$

$$q_j = \frac{[w - (j-1)] \cdot p}{\operatorname{tg} \mathbf{q}} \quad (4.24)$$

Portanto, as equações (4.25) e (4.26) representam os comprimentos dos percursos de avanço no torneamento cônico axial.

$$l_j = l_0 + q_j \quad (4.25)$$

$$q_j = \frac{[w - (j-1)] \cdot p}{\operatorname{tg} \mathbf{q}} \quad (4.26)$$

A equação 4.27 fornece o custo do torneamento cônico axial:

$$K_p = C_1 + \sum_{j=1}^w [d - (2j-2)p] \mathbb{V}_j (y_1 + y_2) \quad (4.27)$$

4.1.2.1 Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Axial de Peça com Formato Cônico

O custo do trabalho improdutivo é calculado através das equações (4.9) a (4.14), já utilizadas para o cálculo do trabalho improdutivo para torneamento cilíndrico axial. Porém, os tempos improdutivos e o custo do trabalho improdutivo são dados pelas equações (4.28) e (4.29).

$$t_i = \frac{\sum_{j=1}^w [l_j + p(1 + \sqrt{2})]}{v_f} \quad (4.28)$$

$$K_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^w [l_j + p(1 + \sqrt{2})]}{60 \cdot v_f} \cdot C_2 \quad (4.29)$$

Onde l_j é calculado através das equações (4.25) e (4.26).

4.1.3. Equação dos Custos de Desbaste com Passes Axiais em Peça com Formato Circular

As equações para os custos de torneamento no primeiro estágio de desbaste para peças que têm formato circular foram deduzidas com auxílio das figuras 4.6 e 4.7.

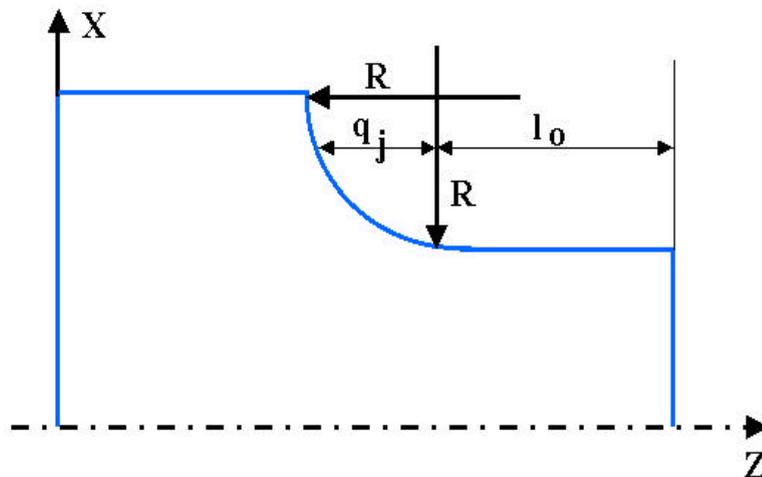


Figura 4.7 – Peça com torneamento circular

A exemplo do desenvolvimento das equações anteriores o comprimento de avanço de cada passe é dado pela equação (4.30), semelhante ao do torneamento cônico:

$$l_j = l_o + q_j \quad (4.30)$$

O que varia é o valor do comprimento q_j :

$$q_1 = \sqrt{R - (R - w \cdot p)^2} \quad (4.31)$$

$$q_2 = \sqrt{R - [R - (w - 1) \cdot p]^2} \quad (4.32)$$

$$q_3 = \sqrt{R - [R - (w - 2) \cdot p]^2} \quad (4.33)$$

$$q_j = \sqrt{R - \{R - [w - (j - 1) \cdot p]\}^2} \quad (4.34)$$

Onde:

R é o raio do trecho circular (mm)

w é o número de passes;

p é a profundidade de corte (mm).

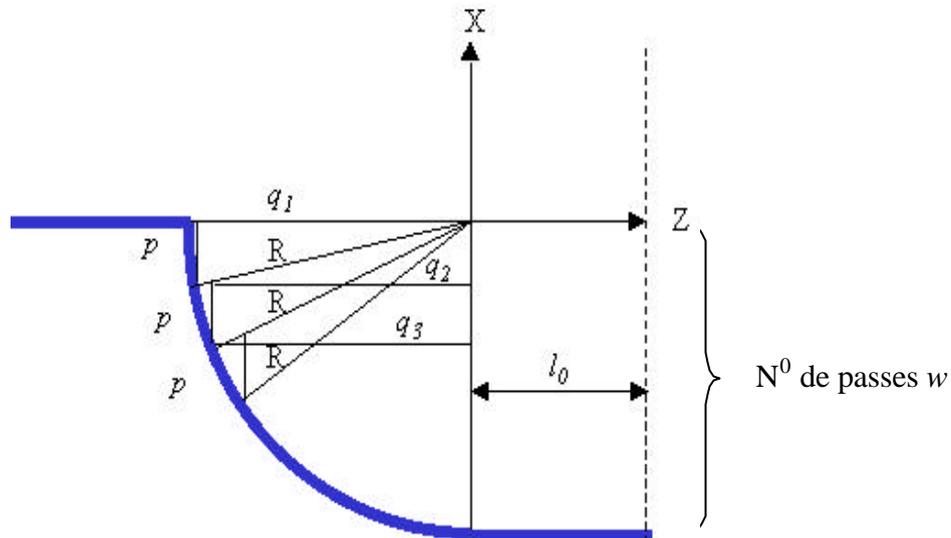


Figura 4.7 – Primeiro estágio de desbaste para peça com formato circular

Utilizaremos a mesma equação (4.27) do torneamento cônico axial para calcular o custo do torneamento circular axial.

$$K_p = C_1 + \sum_{j=1}^w [d - (2j - 2)p] l_j (y_1 + y_2)$$

4.1.3.1. Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Axial de Peça com Formato Circular

Para o cálculo do custo do trabalho improdutivo do torneamento circular axial também se utiliza a mesma equação (4.29) do custo do trabalho improdutivo do torneamento cônico axial, ou seja:

$$K_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^w [l_j + p(1 + \sqrt{2})]}{60v_f} C_2$$

Sendo aqui o l_j dado pelas equações (4.30) e (4.34)

4.1.4. Equação dos Custos de Desbaste com Passes Radiais em Peça com Formato Cilíndrico

O primeiro estágio de desbaste pode ser realizado com passes totalmente radiais para peças com diferentes formatos. Com o auxílio da figura 4.8, é desenvolvida a equação geral para o cálculo do custo de desbaste com passes radiais em peça de formatos cilíndricos.

Na figura 4.8, os comprimentos de C_0 a C_3 representam os comprimentos dos três diferentes diâmetros que a peça tem. A peça pode ter n número qualquer de diferentes diâmetros.

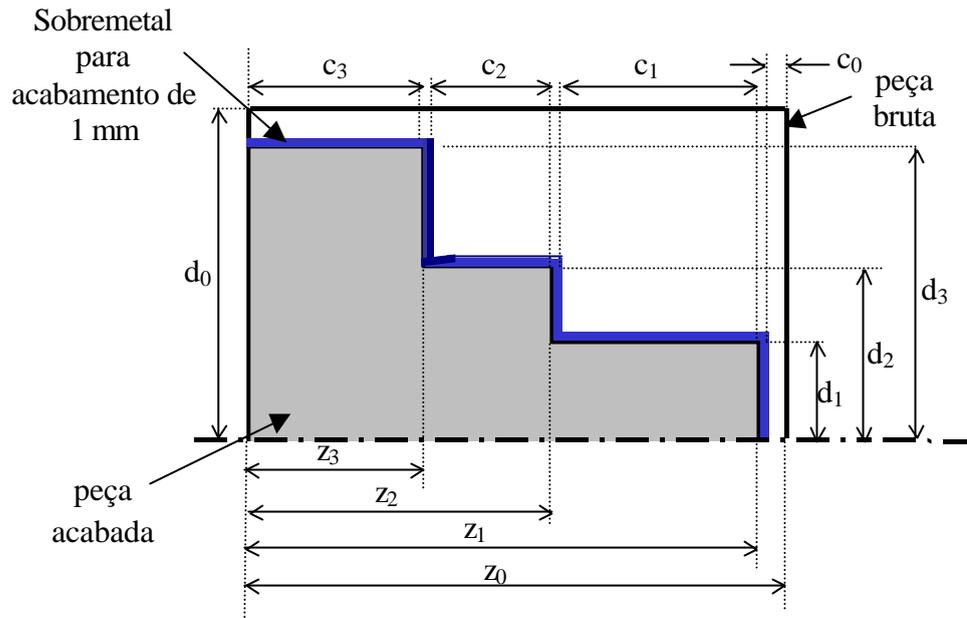


Figura 4.8 – Torneamento cilíndrico radial

As equações (4.35) a (4.38) dão os valores dos c_i em relação às abscissas z_i dos seus respectivos comprimentos.

$$c_0 = z_0 - (z_1 + 1) \quad (4.35)$$

$$c_1 = z_1 - (z_2 + 1) \quad (4.36)$$

$$c_2 = z_2 - (z_3 + 1) \quad (4.37)$$

$$c_3 = z_3 + 1 \quad (4.38)$$

$$w_0 = \frac{c_0}{p} \quad (4.39)$$

$$w_1 = \frac{c_1}{p} \quad (4.40)$$

$$w_2 = \frac{c_2}{p} \quad (4.41)$$

$$w_3 = \frac{c_3}{p} \quad (4.42)$$

w_i é igual ao número inteiro imediatamente superior ao resultado da fração c_i/p .

$$\text{para } i = 1, 2, \dots, n-1 \Rightarrow w_i = \frac{[z_i - (z_{i+1} + 1)]}{p} \quad (4.43)$$

$$\text{para } i = n \Rightarrow w_i = \frac{z_i + 1}{p} \quad \text{onde } n \text{ é o número de diâmetros da peça} \quad (4.44)$$

O custo de usinagem de peça cilíndrica através de torneamento com passes radiais é dado pela equação (4.45). A referida equação foi desenvolvida a partir da equação (2.41); com a substituição do valor do tempo de corte, t_c , dado pela equação (2.49) considerando $x_1 = d_i/2$ e $x_2 = d_e/2$ e, também, o valor de T (vida da aresta da ferramenta) dado pela equação (2.40).

$$K_p = C_1 + \frac{\mathbf{P}(d_e^2 - d_i^2)}{16.60.1000.v.f} C_2 + \frac{\mathbf{P}(d_e^2 - d_i^2)v^{x-1}}{16.1000.f.K} C_3 \quad (4.45)$$

Onde:

d_e é o diâmetro mais externo;

d_i é o diâmetro mais interno.

Para toda a peça da figura 4.8, temos:

$$K_p = C_1 + \frac{w_0 \mathbf{P}(d_0^2 + 1)}{16.60.1000.v.f} C_2 + \frac{w_0 \mathbf{P}(d_0^2 + 1)v^{x-1}}{16.1000.f.K} C_3 + \frac{w_1 \mathbf{P}(d_0^2 - d_1^2)}{16.60.1000.v.f} C_2 + \frac{w_1 \mathbf{P}(d_0^2 - d_1^2)v^{x-1}}{16.1000.f.K} C_3 \\ + \frac{w_2 \mathbf{P}(d_0^2 - d_2^2)}{16.60.1000.v.f} C_2 + \frac{w_2 \mathbf{P}(d_0^2 - d_2^2)v^{x-1}}{16.1000.f.K} C_3 + \frac{w_3 \mathbf{P}(d_0^2 - d_3^2)}{16.60.1000.v.f} C_2 + \frac{w_3 \mathbf{P}(d_0^2 - d_3^2)v^{x-1}}{16.1000.f.K} C_3 \quad (4.46)$$

Considerando:

$$y_1 = \frac{\mathbf{P}}{16.60.1000.f.a} C_2 \quad (4.47)$$

$$y_2 = \frac{\mathbf{P}v^{x-1}}{16.1000.f.K} C_3 \quad (4.48)$$

Substituído as equações (4.47) e (4.48) na equação (4.46), temos:

$$K_p = C_1 + (y_1 + y_2) \left[w_0(d_0^2 + 1) + w_1(d_0^2 - d_1^2) + w_2(d_0^2 - d_2^2) + w_3(d_0^2 - d_3^2) \right] \quad (4.49)$$

E a equação (4.50) fornece o custo do torneamento cilíndrico radial para qualquer peça com formato cilíndrico:

$$K_p = C_1 + (y_1 + y_2) \left[w_0(d_0^2 + 1) + \sum_{i=1}^n w_i(d_0^2 - d_i^2) \right] \quad (4.50)$$

Onde:

d_0 é o diâmetro da peça bruta;

w_0 é o número de passes para o faceamento na peça bruta.

4.1.4.1. Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Radial em Peça de Formato Cilíndrico.

Para o cálculo do custo do trabalho improdutivo utilizaremos as equações (4.9) a (4.12), e as figura 4.9. e 4.10.

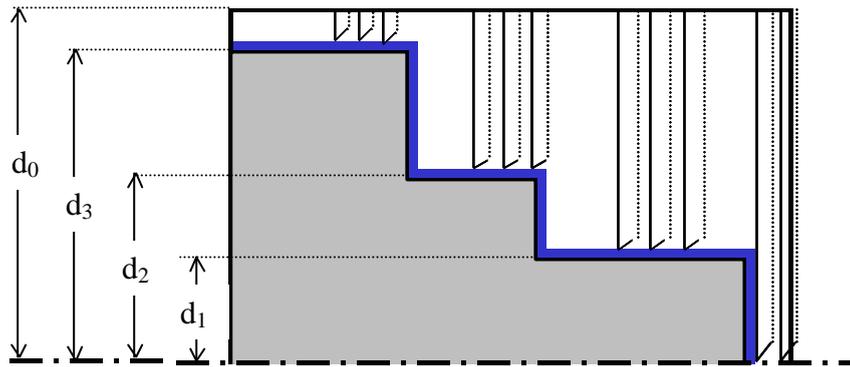


Figura 4.9 – Percursos da ferramenta no torneamento cilíndrico radial

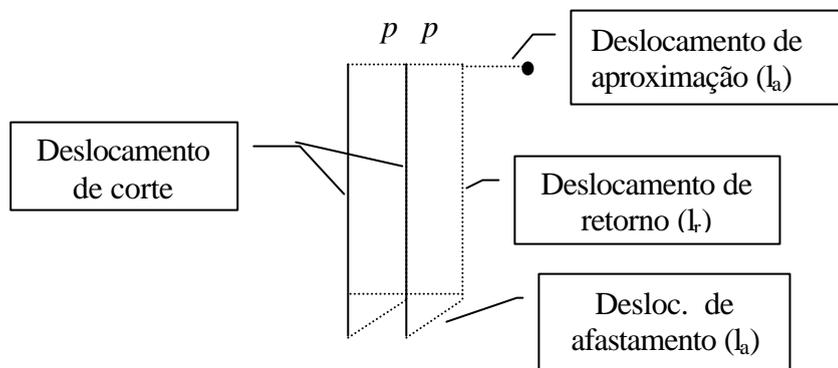


Figura 4.10 – Esquematização dos deslocamentos da ferramenta de corte

Para a peça apresentada na figura 4.9 tem-se quatro percursos de avanço: l_0 , l_1 , l_2 e l_3 ; que são dados pelas equações (4.51) a (4.54).

$$l_0 = (w_0 - 1) \left(p\sqrt{2} + \left(\frac{d_0}{2} + 1 - p \right) + p \right) = (w_0 - 1) \left(p\sqrt{2} + \frac{d_0}{2} + 1 \right) \quad (4.51)$$

$$l_1 = w_1 \left[p\sqrt{2} + \left[\frac{(d_0 - d_1)}{2} - 1 - p \right] + p \right] = w_1 \left[p(1 + \sqrt{2}) + \frac{(d_0 - d_1)}{2} - 1 \right] \quad (4.52)$$

$$l_2 = w_2 \left[p(1 + \sqrt{2}) + \frac{(d_0 - d_2)}{2} - 1 \right] \quad (4.53)$$

$$l_3 = w_3 \left[p(1 + \sqrt{2}) + \frac{(d_0 - d_3)}{2} - 1 \right] \quad (4.54)$$

A equação (4.55) representa o de avanço radial percurso para qualquer percurso, l_i , para um diâmetro genérico, d_i , realizado com w_i passes.

$$l_i = w_i \left[p(1 + \sqrt{2}) + \frac{(d_0 - d_i)}{2} - 1 \right] \quad (4.55)$$

Portanto, o deslocamento improdutivo total será dado pela equação (4.56).

$$d_i = (w_0 - 1) \left(p(1 + \sqrt{2}) + \frac{d_0}{2} + 1 \right) + \sum_{i=1}^n w_i \left[p(1 + \sqrt{2}) + \frac{(d_0 - d_i)}{2} - 1 \right] \quad (4.56)$$

O tempo improdutivo será dado pela equação (4.57).

$$t_i = \frac{\left\{ (w_0 - 1) \left(p(1 + \sqrt{2}) + \frac{d_0}{2} + 1 \right) + \sum_{i=1}^n w_i \left[p(1 + \sqrt{2}) + \frac{(d_0 - d_i)}{2} - 1 \right] \right\}}{v_f} \quad (4.57)$$

O custo do trabalho improdutivo para o torneamento cilíndrico radial é fornecido pela equação (4.58).

$$K_{pi} = \frac{\left\{ (w_0 - 1) \left(p(1 + \sqrt{2}) + \frac{d_0}{2} + 1 \right) + \sum_{i=1}^n w_i \left[p(1 + \sqrt{2}) + \frac{(d_0 - d_i)}{2} - 1 \right] \right\}}{60 \cdot v_f} C_2 \quad (4.58)$$

4.1.5. Equação de Custo de Desbaste com Passes Radiais em Peça com Formato Cônico.

A figura 4.11 apresenta uma peça a ser desbastada com passes radiais e que possui uma parte cônica.

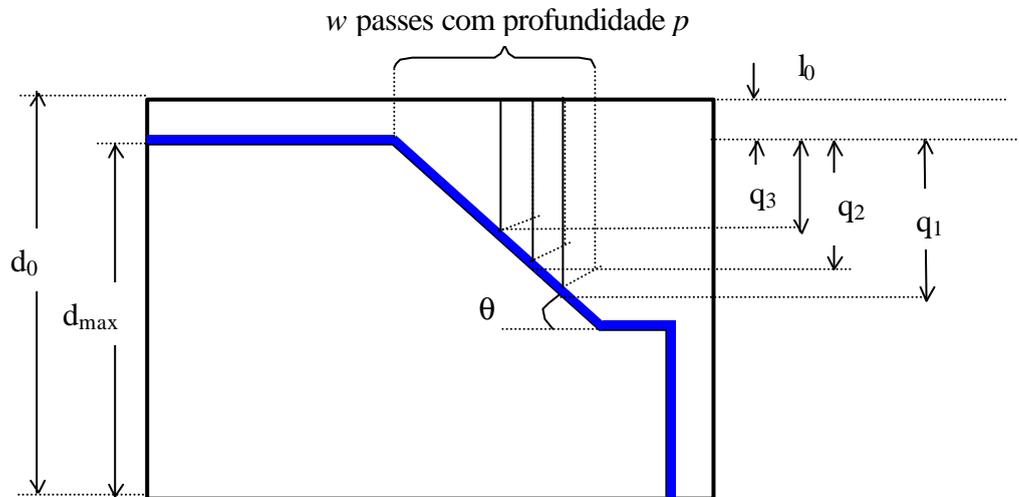


Figura 4.11 – Torneamento cônico radial

De acordo com a equação (4.25) temos:

$$l_j = l_0 + q_j$$

A figura 4.11 mostra que:

$$\operatorname{tg} \mathbf{q} = \frac{q_1}{w \cdot p} \Rightarrow q_1 = w \cdot p \cdot \operatorname{tg} \mathbf{q} \quad (4.59)$$

$$q_2 = [(w \cdot p - p) \operatorname{tg} \mathbf{q}] \quad (4.60)$$

$$q_3 = [(w \cdot p - 2 \cdot p) \operatorname{tg} \mathbf{q}] \quad (4.61)$$

$$\vdots$$

$$q_j = [w \cdot p - (j - 1) \cdot p] \operatorname{tg} \mathbf{q} \quad (4.62)$$

Portanto, a equação (4.63) fornece o comprimento do percurso de avanço para cada passe de torneamento.

$$l_j = (d_0 - d_{\max}) + [w \cdot p - (j-1) \cdot p] \cdot t g \theta \quad (4.63)$$

Para todos os passes, temos:

$$\sum_{j=1}^w l_j = \sum_{j=1}^w (d_0 - d_{\max}) + [w \cdot p - (j-1) \cdot p] \cdot t g \theta \quad (4.64)$$

Onde:

l_j é o j -ésimo percurso de avanço;

d_0 é o diâmetro da peça bruta;

d_{\max} é o maior diâmetro do trecho cônico;

w é o número de passes;

p é a profundidade de corte;

θ é o ângulo do cone.

Substituindo na equação (4.50) o termo entre colchetes pelo segundo membro da equação (4.64), temos para o custo do torneamento cônico radial a equação (4.65).

$$K_p = C_1 + (y_1 + y_2) \cdot \left[\sum_{j=1}^w (d_0 - d_{\max}) + [w \cdot p - (j-1) \cdot p] \cdot t g \theta \right] \quad (4.65)$$

4.1.5.1 Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Radial em Peça de Formato Cônico.

Para o cálculo do custo do trabalho improdutivo utilizaremos as equações (4.9) a (4.12) e a figura 4.12..

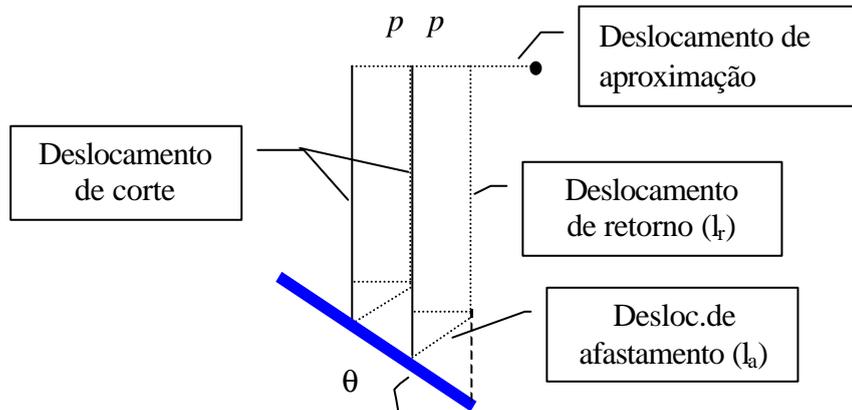


Figura 4.12 – Esquematização para o percurso improdutivo do torneamento cônico radial

$$l_r = l_j - p \quad (4.66)$$

l_j é dado pela equação (4.63), portanto,

$$l_r = \{(d_0 - d_{\max}) + [w \cdot p - (j-1) \cdot p] \cdot t g \theta\} - p \quad (4.67)$$

O deslocamento improdutivo total é dado pela equação (4.68),

$$d_i = \sum_{j=1}^w p(1 + \sqrt{2}) + \{(d_0 - d_{\max}) + [w.p - (j-1).p].tg\mathbf{q}\} \quad (4.68)$$

O tempo improdutivo será:

$$t_i = \frac{\sum_{j=1}^w p(1 + \sqrt{2}) + \{(d_0 - d_{\max}) + [w.p - (j-1).p].tg\mathbf{q}\}}{v_f} \quad (4.69)$$

E o custo do trabalho improdutivo é calculado pela equação (4.70).

$$Kpi = \frac{\sum_{j=1}^w p(1 + \sqrt{2}) + \{(d_0 - d_{\max}) + [w.p - (j-1).p].tg\mathbf{q}\}}{60v_f} C_2 \quad (4.70)$$

4.1.6. Equação dos Custos do Desbaste com Passes Radiais em Peça de Formato Circular

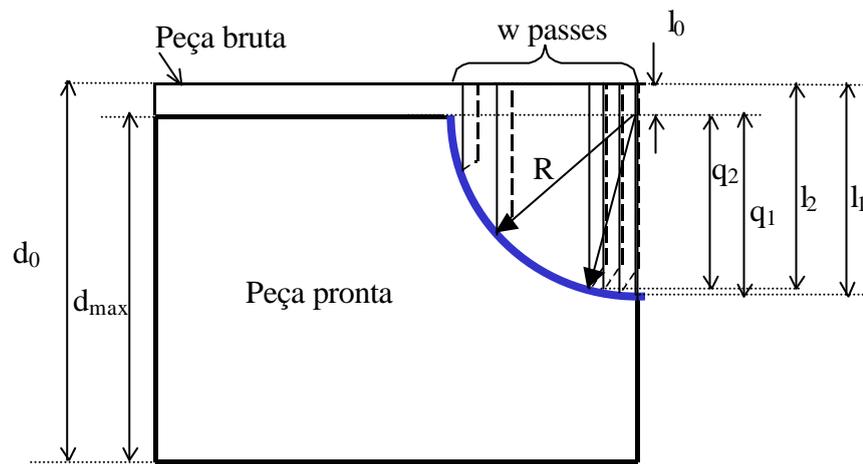


Figura 4.13 – Torneamento cônico radial

Para o cálculo dos percursos de corte utilizaremos a equação (4.25).

$$l_j = l_0 + q_j$$

$$l_0 = d_0 - d_{\max} \quad (4.71)$$

$$R^2 = q_1^2 + p^2 \quad (4.72)$$

$$q_1 = \sqrt{R^2 - (p)^2} \quad (4.73)$$

$$q_2 = \sqrt{R^2 - (2.p)^2} \quad (4.74)$$

$$q_j = \sqrt{R^2 - (j.p)^2} \quad (4.75)$$

Com as equações (4.71) e (4.75), encontramos o deslocamento de corte l_j .

$$l_j = (d_0 - d_{\max}) + \sqrt{R^2 - (j \cdot p)^2} \quad (4.76)$$

Substituindo na equação (4.65) o segundo termo, dos termos entre colchetes, pelo segundo termo da equação (4.76), temos o custo para o desbaste radial em uma peça com formato circular dado pela equação (4.77).

$$K_p = C_1 + (y_1 + y_2) \cdot \left[\sum_{j=1}^w (d_0 - d_{\max}) + \sqrt{R^2 - (j \cdot p)^2} \right] \quad (4.77)$$

Onde:

R é o raio da superfície circular. Os demais termos já foram definidos anteriormente.

4.1.6.1. Equação dos Custos Improdutivos no Desbaste Radial em Peça com Formato Circular.

Para o cálculo dos custos improdutivos utilizaremos as equações (4.9) a (4.12) e a figura 4.14.

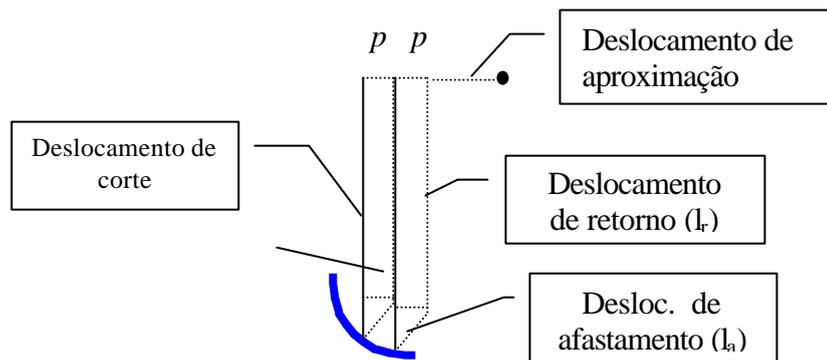


Figura 4.14 – Esquemática para o deslocamento improdutivo do torneamento circular.

$$d_i = p\sqrt{2} + \left\{ \left[(d_0 - d_{\max}) + \sqrt{R^2 - (j \cdot p)^2} \right] - p \right\} + 2p \quad (4.78)$$

$$d_i = p(1 + \sqrt{2}) + (d_0 - d_{\max}) + \sqrt{R^2 - (j \cdot p)^2} \quad (4.79)$$

O tempo improdutivo será:

$$t_i = \frac{\sum_{j=1}^w p(1 + \sqrt{2}) + (d_0 - d_{\max}) + \sqrt{R^2 - (j \cdot p)^2}}{v_f} \quad (4.80)$$

E os custos improdutivos para o torneamento circular radial é calculado pela equação (4.81).

$$K_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^w p(1 + \sqrt{2}) + (d_0 - d_{\max}) + \sqrt{R^2 - (j \cdot p)^2}}{60v_f} C_2 \quad (4.81)$$

4.2. Formulação de Equações para o 2^o Estágio de Desbaste e para o Acabamento.

No 2^o estágio de desbaste (ou pré-acabamento) e no acabamento o corte é realizado paralelamente ao perfil da peça com passe único, em cada estágio. Após o 2^o estágio de desbaste, fica 1mm de espessura para o acabamento. Nestas duas fases, a usinagem da peça poderá ser executada em diferentes processos de torneamento, de acordo com as formas da superfície da peça. Portanto, numa mesma peça podem ser realizadas operações de torneamento cilíndrico, torneamento radial, torneamento cônico e torneamento circular; a exemplo da figura 4.15. Os custos do 2^o estágio de desbaste e do acabamento serão os somatórios dos custos de todas as operações de torneamento.

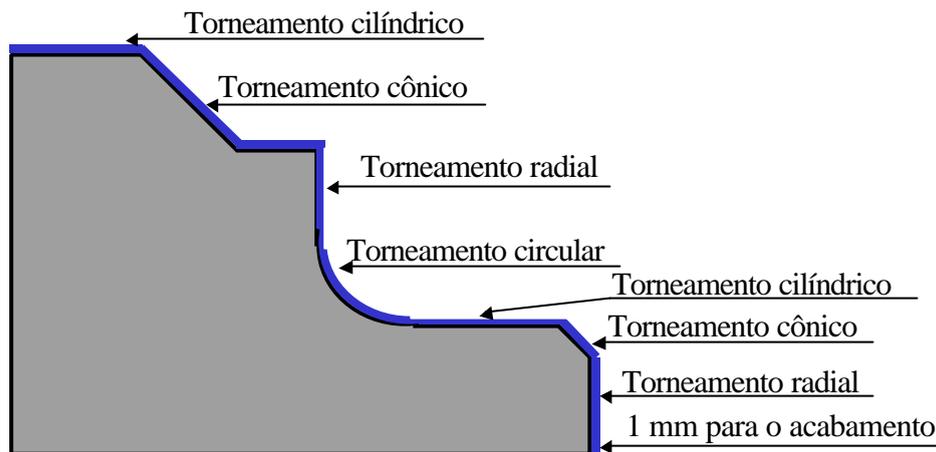


Figura 4.15 - Operações de torneamento

4.2.1 Equação para o Torneamento Cilíndrico do 2^o Estágio de Desbaste e o Acabamento.

O custo do torneamento para as superfícies cilíndricas no 2^o estágio de desbaste e no acabamento, considerando passe único axial paralelo ao perfil da peça, pode ser obtido a partir da equação (4.3), formulada para o torneamento de peça cilíndrica com n diâmetros e w passes axiais. Para o 2^o estágio e acabamento, o valor de C_1 , custo que independe das condições de corte, deve ser desconsiderado, pois já foi introduzido no 1^o estágio de desbaste.

Apesar da equação ser a mesma para os dois últimos estágios, os valores das variáveis são diferentes, portanto com a equação (4.82) se calcula o custo do torneamento cilíndrico do 2^o estágio e a equação (4.85) fornece o custo do acabamento.

$$K_{PCILdesbaste} = \sum_{i=1}^n d_i l_i (y_{1desbaste} + y_{2desbaste}) \quad (4.82)$$

Onde:

n é o número de diâmetros cilíndricos da peça;

$K_{PCILdesbaste}$ é o custo do torneamento ds formatos cilíndricos da peça do 2^o estágio em R\$/peça;

d_i é cada diâmetro cilíndrico da peça pronta mais 1mm;

l_i é o percurso de avanço da peça pronta de cada diâmetro d_i menos 1mm;

$y_{1desbaste}$ e $y_{2desbaste}$ são dados a partir das equações (4.83) e (4.84), abaixo representadas:

$$y_{1desbaste} = \frac{P}{60 \cdot 1000 \cdot f_1 \cdot v_1} C_2 \quad (4.83)$$

$$y_{2desbaste} = \frac{P \cdot v_1^{x_1-1}}{1000 \cdot f_1 \cdot K_1} C_3 \quad (4.84)$$

Onde:

C_2 é a soma das despesas totais de mão-de-obra e salário máquina, em (R\$);

C_3 é a constante de custo relativo à ferramenta de corte do 2^o estágio de desbaste, em (R\$);

x_1 e K_1 são os parâmetros da fórmula de Taylor para o 2^o estágio de desbaste;

f_1 é o avanço programado para o 2^o estágio de desbaste em mm/volta;

v_1 é a velocidade de corte programada para o 2^o estágio de desbaste em m/min.

Para o acabamento a equação é dada por:

$$K_{PCILacabamento} = \sum_{j=1}^n d_j \cdot l_j \cdot (y_{1acabamento} + y_{2acabamento}) \quad (4.85)$$

Onde:

$K_{PCILacabamento}$ é o custo das superfícies cilíndricas do estágio de acabamento em R\$/peça;

n é o número de diâmetros cilíndricos da peça;

d_j é cada diâmetro cilíndrico da peça pronta;

l_j é o percurso de avanço da peça pronta de cada diâmetro d_j ;

$y_{1acabamento}$ e $y_{2acabamento}$ são dados a partir das equações (4.86) e (4.87), abaixo representadas:

$$y_{1acabamento} = \frac{P}{60 \cdot 1000 \cdot f_2 \cdot v_2} C_2 \quad (4.86)$$

$$y_{2acabamento} = \frac{P \cdot v_1^{x_2-1}}{1000 \cdot f_2 \cdot K_2} C_3 \quad (4.87)$$

Onde:

C_3 é a constante de custo relativo à ferramenta de corte do estágio de acabamento, em (R\$);

x_2 e K_2 são os parâmetros da fórmula de Taylor para o acabamento;

f_2 é o avanço programado para o acabamento em mm/volta;

v_2 é a velocidade de corte programada para o acabamento em m/min.

4.2.2 Equação para o Torneamento Cônico do 2^o Estágio de Desbaste e do Acabamento

A partir das equações (2.38) e (2.40) para o custo de torneamento (K_p) e vida da aresta de corte (T); e da equação (2.47), para o tempo de corte no torneamento cônico; se encontra as expressões para os cálculos dos custos de torneamento de superfícies cônicas no 2^o estágio de desbaste, equações (4.88) e (4.89), e no acabamento equação (4.90) e equação (4.91). O valor de C_1 da equação (2.38) é desconsiderado devido a sua inclusão no 1^o estágio de desbaste.

$$K_{PCONdesbaste} = \frac{P(d_{e1}^2 - d_{i1}^2)}{16 \cdot 60 \cdot 1000 \cdot v_1 \cdot f_1 \cdot \text{sen } \mathbf{q}} C_2 + \frac{P(d_{e1}^2 - d_{i1}^2) v_1^{x_1-1}}{16 \cdot 1000 \cdot f_1 \cdot K_1 \cdot \text{sen } \mathbf{q}} C_3 \quad (4.88)$$

Portanto o custo no 2^o estágio de todas as superfícies cônicas da peça é dada pela equação (4.89).

$$K_{PCONdesbaste} = \sum_{j=1}^m \left[\frac{(d_{e1(j)}^2 - d_{i1(j)}^2)}{16 \cdot \text{sen } \mathbf{q}} \right] (y_{1desbaste} + y_{2desbaste}) \quad (4.89)$$

Onde:

m é o número de superfícies cônicas da peça;
 $d_{e1(j)}$ é o diâmetro maior do trecho cônico j da peça pronta (+1);
 $d_{i1(j)}$ é o diâmetro menor do trecho cônico j da peça pronta (+1);
 θ_j é o ângulo de conicidade do trecho cônico j ;
 $y_{1desbaste}$ e $y_{2desbaste}$ como definidos nas equação (4.83) e (4.84);

De forma análoga temos para o cálculo do custo de torneamento de acabamento, de uma única superfície cônica, a equação (4.90)

$$K_{PCONacabamento} = \frac{P(d_{e2}^2 - d_{i2}^2)}{16.60.1000.v_2.f_2.\text{sen } \mathbf{q}} C_2 + \frac{P(d_{e2}^2 - d_{i2}^2)v_2^{x_2-1}}{16.1000.f_2.K_2.\text{sen } \mathbf{q}} C_3 \quad (4.90)$$

Para todas as superfícies cônicas, temos:

$$K_{PCONacabamento} = \sum_{q=1}^m \left[\frac{(d_{e2(q)}^2 - d_{i2(q)}^2)}{16.\text{sen } \mathbf{q}_q} \right] (y_{1acabamento} + y_{2acabamento}) \quad (4.91)$$

Onde:

m é o número de superfícies cônicas da peça;
 $d_{e2(q)}$ é o diâmetro mais externo do trecho cônico q da peça pronta;
 $d_{i2(q)}$ é o diâmetro mais interno do trecho cônico q da peça pronta;
 \mathbf{q}_q é o ângulo de conicidade do trecho cônico q ;
 $y_{1acabamento}$ e $y_{2acabamento}$ como definidos nas equações (4.86) e (4.87)

4.2.3. Equação para o Torneamento Radial do 2^o Estágio de Desbaste e do Acabamento

Através da equação (4.45) formulada para um único passe no torneamento cilíndrico radial, com algumas considerações, se obtém as equações para o 2^o estágio de desbaste e para o acabamento no torneamento radial.

Para o 2^o estágio de desbaste são realizadas as seguintes considerações:

$C_1 = 0$, já introduzido no 1^o estágio de desbaste;
 $y_{1desbaste}$ e $y_{2desbaste}$ como definidos nas equação (4.83) e (4.84);

Portanto, a equação do custo para os torneamentos radiais no 2^o estágio existentes na peça é dada pela equação (4.92).

$$K_{PRADdesbaste} = \sum_{r=1}^s \frac{(d_{r+1}^2 - d_r^2)}{16} (y_{1desbaste} + y_{2desbaste}) \quad (4.92)$$

Onde:

$K_{PRADdesbaste}$ é o custo de todos os torneamentos radiais do 2^o estágio da peça em R\$;
 r é o r -ésimo torneamento radial;
 d_{r+1} é o diâmetro mais externo de cada trecho radial;
 d_r é o diâmetro mais interno de cada trecho radial;
 s é a quantidade de torneamentos radiais da peça;

Para o estágio de acabamento temos a equação (4.93).

$$K_{PRADacabamento} = \sum_{r=1}^s \frac{(d_{r+1}^2 - d_r^2)}{16} (y_{1acabamento} + y_{2acabamento}) \quad (4.93)$$

Onde:

$y_{1acabamento}$ e $y_{2acabamento}$ como definidos nas equações (4.87) e (4.88)

$K_{PRADacabamento}$ é o custo de todos os torneamentos radiais de acabamento da peça em R\$;

4.2.4. Equação para o Torneamento Circular do 2^o Estágio de Desbaste e do Acabamento

A partir das equações (2.38) e (2.40) para o custo de torneamento (K_p) e vida da aresta de corte (T); e da equação (2.48), para o tempo de corte no torneamento circular; se encontra as expressões para os cálculos dos custos de torneamento de superfícies circulares no 2^o estágio de desbaste, equações (4.94) e (4.97), e no acabamento equação (4.94) e equação (4.95). O valor de C_1 da equação (2.38) é desconsiderado devido a sua inclusão no 1^o estágio de desbaste.

$$K_{PCIRdesbaste} = \frac{\mathbf{p} \cdot [d_c(\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1) - r(\cos \mathbf{q}_2 - \cos \mathbf{q}_1)]}{60.2000.v_1.f_1} C_2 + \frac{\mathbf{p}.v_1^{x_1-1} [d_c(\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1) - r(\cos \mathbf{q}_2 - \cos \mathbf{q}_1)]}{2000.f_1.K_1} C_3 \quad (4.94)$$

Fazendo:

$$y_{1desbastCIR} = \frac{\mathbf{p}}{60.2000.f_1.v_1} C_2 \quad (4.95)$$

$$y_{2desbastCIR} = \frac{\mathbf{p}.v_1^{x_1-1}}{2000.f_1.K_1} C_3 \quad (4.96)$$

Temos para todos os torneamentos circulares da peça no 2^o estágio a equação (4.97)

$$K_{PCIRdesbaste} = \sum_{f=1}^t [(d_c - l)(\mathbf{q}_{+1} - \mathbf{q}) - (r - l)(\cos \mathbf{q}_{+1} - \cos \mathbf{q})] (y_{1desbastCIR} + y_{2desbastCIR}) \quad (4.97)$$

Onde:

$K_{PCIRdesbaste}$ é o custo das operações de torneamento circular do 2^o estágio em R\$/peça;

t é o número de operações de torneamento circular;

$d_c - l$ é o diâmetro do centro do círculo descontada a espessura para acabamento em mm;

$r - l$ é o raio do círculo descontada a espessura para acabamento em mm;

\mathbf{q}_{+1} é o maior ângulo do arco que forma a superfície circular medido em relação a uma reta horizontal passando pelo centro do círculo;

\mathbf{q} é o menor ângulo do arco que forma a superfície circular medido em relação a uma reta horizontal passando pelo centro do círculo;

f_1 , v_1 , x_1 e K_1 como definidos para a equação (4.82).

Para o acabamento, temos:

$$K_{PCIRacabamento} = \sum_{f=1}^t [d_c(\mathbf{q}_{+1} - \mathbf{q}) - r(\cos \mathbf{q}_{+1} - \cos \mathbf{q})] (y_{1acabamentoCIR} + y_{2acabamentoCIR}) \quad (4.98)$$

$$y_{1acabamentoCIR} = \frac{\mathbf{p}}{60.2000.f_2.v_2} C_2 \quad (4.99)$$

$$y_{2acabamentoCIR} = \frac{\mathbf{p}.v_1^{x_1-1}}{2000.f_2.K_2} C_3 \quad (4.100)$$

Onde:

$K_{PCIRacabamento}$ é o custo das operações de torneamento circular do acabamento em R\$/peça;

t é o número de operações de torneamento circular;

d_c é o diâmetro do centro do círculo da peça pronta em mm;

r é o raio do círculo da peça pronta em mm;

q_{+1} é o maior ângulo do arco que forma a superfície circular medido em relação a uma reta horizontal passando pelo centro do círculo;

q é o menor ângulo do arco que forma a superfície circular medido em relação a uma reta horizontal passando pelo centro do círculo;

f_2 , v_2 , x_2 e K_2 como definidos para as equações (4.86) e (4.87).

5. MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS DE USINAGEM POR TORNEAMENTO.

Para se otimizar o processo de torneamento quanto ao custo de usinagem é necessário testar todas as possíveis combinações dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) no primeiro estágio de desbaste, varrendo-se todas as alternativas possíveis entre passes axiais e radiais, conforme mostrado na figura 5.1, e verificando-se que combinações de parâmetros e percursos levará ao mínimo custo de usinagem.

As equações para os cálculos dos custos de usinagem foram desenvolvidas quanto ao custo apresentadas no capítulo anterior. São expressões para os tempos produtivos e improdutivos para os três estágios de torneamento, podendo ser externo ou interno, de superfícies cilíndricas, cônicas, circulares e radiais. Para estas equações, os dados tecnológicos como, o grau de acabamento superficial, o raio de ponta da ferramenta, o tempo de troca da aresta ou da ferramenta, a potência e o rendimento da máquina ferramenta são conhecidos. Quanto a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte; necessitam ser definidos de forma a ser obter a minimização de custos no processo de usinagem por torneamento, que é um dos objetivos do presente trabalho.

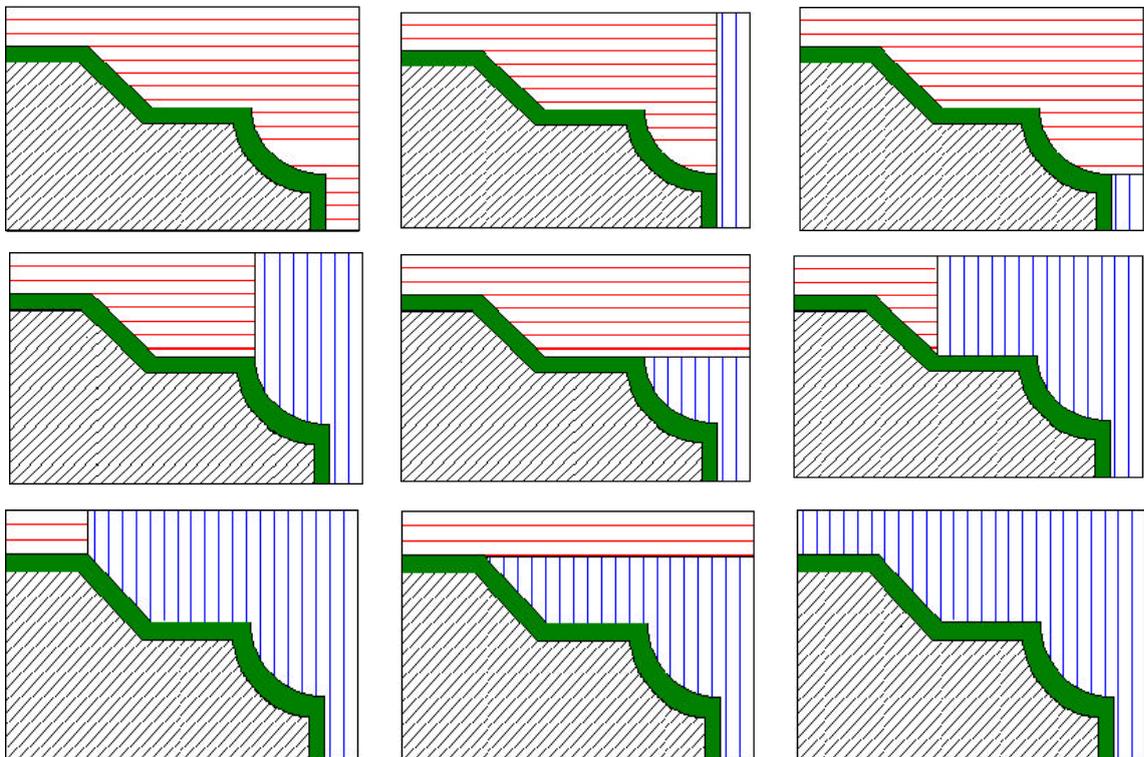


Figura 5.1 – Alternativas possíveis de combinações de passes axiais e radiais (Andrade, 2001)

5.1 Limitações dos Parâmetros de Corte

Os dados tecnológicos acima referenciados são inseridos nos formulários do aplicativo pelo usuário ou processados pelo programa. Através deles se calcula o custo de usinagem. No entanto os parâmetros de corte variam dentro de determinados intervalos, devido a algumas restrições que serão abordadas a seguir.

5.1.1 Faixa de Variação da Velocidade de Corte.

A velocidade de corte é sem dúvida o parâmetro que maior influência tem sobre a vida da ferramenta de corte. Por esta razão é que neste trabalho serão utilizados os valores da

velocidade de máxima produção e de mínimo custo (obtidos variando-se o avanço e a profundidade de corte) como valores limitantes da faixa de variação da velocidade de corte.

Os limites de variação para a velocidade de corte serão, portanto, dados pelas equações (5.1) e (5.2).

$$v_0 = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} \quad (5.1)$$

$$v_{mxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot (t_{ft} + t_{fa})}} \quad (5.2)$$

Onde:

v_0 é a velocidade de corte para o mínimo custo, em m/min;

v_{mxp} é a velocidade de corte para a máxima produção, em m/min;

C_2 é a soma das despesas totais de mão-de-obra e salário máquina, em (R\$)/hora;

x e K são os parâmetros da fórmula de Taylor. Trata-se de constantes que dependem do material da ferramenta e da peça e também das condições de corte;

C_3 é a constante de custo relativo à ferramenta, em (R\$)

$(t_{ft} + t_{fa})$ é o tempo de troca do inserto reversível ou o tempo de troca da aresta de corte do inserto, em minutos.

Portanto, a velocidade de corte deve ser variada entre v_0 e v_{mxp}

$$v_0 \leq v \leq v_{mxp} \quad (5.3)$$

Onde:

v é a velocidade a ser adotada como dado de entrada para a otimização do custo de usinagem.

5.1.2 Faixa de Variação do Avanço.

A limitação máxima do avanço a ser adotado depende do raio da ponta da ferramenta escolhida e do grau de acabamento desejado para a peça. O avanço máximo é fornecido pelo menor valor encontrado entre as equações (5.4) de Cassier (1986) e (5.5) de Moll e Brammertz appud König (1984), e (5.5) fornecida pelo fabricante da ferramenta de corte e que limita o uso do comprimento da aresta de corte.

$$f_{max} = \sqrt{31 \cdot R_a \cdot r_e \cdot 10^{-3}} \quad (5.4)$$

$$f_{max} = \sqrt{8 \cdot R_r \cdot r_e \cdot 10^{-3}} \quad (5.5)$$

$$f_{max} = G_{Fh} \cdot \frac{r_e}{\text{sen } \mathbf{c}} \quad (5.6)$$

Onde:

f_{max} é o avanço máximo permitido em mm/volta;

Dados de entrada:

r_e é o raio da ponta da ferramenta de corte em mm;

R_a é a rugosidade média aritmética em determinado comprimento, em μm ;

R_r é a rugosidade máxima, em μm ;

G_{Fh} é o fator limitante pela forma do inserto, referente a espessura do cavaco, ver tabela 5.1;

\mathbf{c} é o ângulo de posição, geralmente situado no intervalo: $10^\circ \leq \mathbf{c} \leq 100^\circ$

Tabela 5.1 – Fator limitante da espessura do cavaco - fonte: Oliveira (1999)

Forma do inserto	Fator limitante pela forma do inserto (G_{Fb})	
	Negativo	Positivo
DN  DP	0,70	0,60
IN  IP	0,70	0,60
CN  CP	0,75	0,65
SN  SP	0,80	0,70

5.1.3 Faixa de Variação da Profundidade de Corte.

A profundidade de corte máxima é fornecida pelo menor valor encontrado pelas equações (5.7) fornecida pelo fabricante da ferramenta de corte e que limita o uso desta e pela equação (5.8) decorrente da equação de Kienzle (1952) dada pela expressão:

$$p_{\max} = \frac{N_c \cdot 60 \cdot 75 \cdot \sin c}{K_{s11} \cdot (f \cdot \sin c)^{1-z} \cdot v}$$

$$p_{\max} = G_{Fb} \cdot l \cdot \sin c \quad (5.7)$$

Onde:

p_{\max} é a profundidade máxima de corte, dada em mm;

N_c é a potência de corte fornecida em Cavalos Vapor (CV). O limite máximo da potência de corte é estabelecido pela potência motor e pelo rendimento da máquina ferramenta:

$$N_c \leq N_m \cdot h$$

$$p_{\max} \leq \frac{N_m \cdot h \cdot 60 \cdot 75 \cdot \sin c}{K_{s11} \cdot (f \cdot \sin c)^{1-z} \cdot v} \quad (5.8)$$

Onde:

N_m é o dado de entrada da potência da máquina operatriz, em CV;

h é o rendimento da máquina ferramenta. Nas máquinas modernas situa-se em torno de 95%.

K_{s11} e $1-z$ são parâmetros tabelados da fórmula de potência de Kienzle (1951). K_{s1} é a constante específica de corte e $1-z$ é o coeficiente angular da reta;

f é o avanço em mm/volta;

v é a velocidade de corte em m/min;

c é o ângulo de posição como já definido;

60 e 75 são fatores de conversão de unidades;

G_{Fb} é o fator limitante pela forma do inserto, referente a largura de corte, dado pela tabela 5.2;

l é o comprimento da aresta da ferramenta de corte dado pelo fabricante, em mm.

Observação: Na equação (5.8) os valores da potência está dado em CV e o parâmetro K_{s11} em Kgf/mm^2 . No Sistema Internacional os valores de potência deverão ser indicados em Watt.

$$N_c = \frac{k_{s11} (f \cdot \text{sen } \mathbf{c})^{1-z} \cdot p \cdot v}{6120 \cdot \text{sen } \mathbf{c}} \quad (\text{Watt})$$

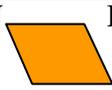
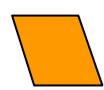
Assim sendo, a potência deverá ser multiplicado pelo fator 735,5 e K_{s11} pelo fator 10 ficando então sua unidade dada em N/mm^2 .

Como, $N_c \leq N_m \cdot \eta$, temos:

$$N_m \cdot \mathbf{h} \geq \frac{k_{s11} (f \cdot \text{sen } \mathbf{c})^{1-z} \cdot p \cdot v}{6120 \cdot \text{sen } \mathbf{c}} \quad (\text{Watt})$$

$$p_{\max} \leq \frac{N_m \cdot \mathbf{h} \cdot 6120 \cdot \text{sen } \mathbf{c}}{K_{s11} \cdot (f \cdot \text{sen } \mathbf{c})^{1-z} \cdot v} \quad (5.9)$$

Tabela 5.2 – Fator limitante da largura de corte - fonte: Oliveira (1999)

Forma do inserto	Fator limitante pela forma do inserto G_{Fb}	
	Negativo	Positivo
DN  DP	0,55	0,45
IN  IP	0,60	0,45
CN  CP	0,80	0,70
SN  SP	0,80	0,74

5.2 Sequência para Obtenção da Otimização dos Parâmetros de Corte:

1^o Definir o avanço máximo de corte: comparar os valores de avanço máximo, f_{\max} , encontrados a partir das equações (5.4) ou (5.5), com o valor obtido da equação (5.6). Considerar o menor valor. O valor definido de f_{\max} deve ser inserido na equação (5.7) de p_{\max} .

2^o Definir os valores de x e K da fórmula de Taylor: com avanço pré-fixado, e as informações referentes ao material da peça, ao tipo e previsão de vida da ferramenta de corte, se pode obter em livros de diferentes autores, os valores de x e K , através de tabelas de “Velocidades ótimas de corte e coeficientes auxiliares da fórmula de Taylor, $T \cdot v^x = K$, para diferentes materiais”, obtida através de dados fornecidos pela tabela de Opitz (1956). Porém, estas tabelas são compostas para situações predeterminadas, impossibilitando variações de alguns parâmetros de usinagem, ou sejam, avanço e profundidade, que permitam a minimização dos custos de usinagem.

Para se estudar as condições econômicas de usinagem, considerando as variações dos três citados parâmetros de corte, se deve empregar a fórmula expandida de Taylor, equação (5.10). Neste caso, a prefixação ocorre apenas com o desgaste da ferramenta de corte que é estabelecido pelas condições de trabalho, com ênfase, para o desgaste de flanco.

$$v = C \cdot f^E \cdot p^F \cdot T^G \cdot VB^H \quad (5.10)$$

Onde:

v é a velocidade de corte,

f é o avanço;

p é a profundidade de corte;

T é o tempo de vida da ferramenta de corte;

VB é o desgaste da ferramenta, e

C, E, F, G, H , são os parâmetros da fórmula expandida de Taylor, em função dos materiais da peça e da ferramenta, e das características da máquina ferramenta. Estes valores são levantados experimentalmente. Por exemplo, a tabela 5.3 apresenta os valores da fórmula de Taylor encontrados por Mesquita (1980) para os aços ABNT 1038 e ABNT 1045.

Tabela 5.3 – Parâmetros da fórmula expandida de Taylor (Mesquita, 1980)

Material	C	E	F	G	H
Aço ABNT 1038	910,64	-0,3297	-0,0366	-0,3808	0,8936
Aço ABNT 1045	799,90	-0,1108	-0,1885	-0,2480	0,5646

A fórmula simples de Taylor pode ser escrita conforme mostrado no desenvolvimento abaixo:

$$\begin{aligned} T \cdot v^x &= K \Rightarrow v^x = \frac{K}{T} \Rightarrow v = \sqrt[x]{\frac{K}{T}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow v = K^{\frac{1}{x}} \cdot T^{-\frac{1}{x}} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Comparando-se as equações (5.10) e (5.11) temos,

$$T^{-\frac{1}{x}} = T^G \Rightarrow x = -\frac{1}{G} \quad (5.12)$$

Temos também,

$$\begin{aligned} K^{\frac{1}{x}} &= C \cdot f^E \cdot p^F \cdot VB^H \Rightarrow \\ &\Rightarrow K = (C \cdot f^E \cdot p^F \cdot VB^H)^x \end{aligned} \quad (5.13)$$

Com as equações (5.12) e (5.13) temos os valores de x e K em função dos parâmetros da fórmula de Taylor expandida e em função do avanço (já fixado o valor máximo), da profundidade de corte e do desgaste de flanco da ferramenta.

3^o) O próximo passo é fixar o desgaste de flanco máximo para a tolerância desejada na peça

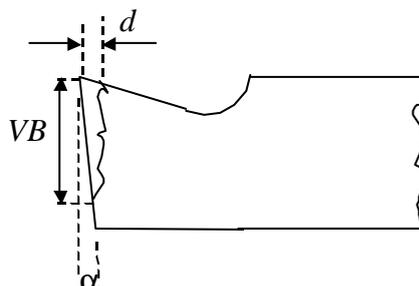


Figura 5.2 – Esquemática para o desgaste de flanco da ferramenta

De acordo com a figura 5.2, temos que:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{VB}$$

$$VB = \frac{d}{\operatorname{tg} \alpha}$$

Onde:

VB é o desgaste de flanco

α é o ângulo de folga

$$d \leq \frac{\text{tolerância}}{2}$$

Portanto o desgaste de flanco é dado pela expressão abaixo:

$$Vb \leq \frac{\text{tolerância}}{2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (5.14)$$

4^o) Fixando o valor do desgaste de flanco, VB , a equação (5.13) mostra que K é agora função unicamente da profundidade de corte, p , que é limitada pelas equações (5.7) e (5.8). Na equação (5.8) a máxima profundidade de corte está em função da velocidade de corte, mas na equação (5.7) não. Toma-se então o valor máximo da profundidade de corte dada pela equação (5.7), calcula-se o valor de K através da equação (5.13).

5^o) De posse de x , dado pela equação (5.12), e de K , encontrado pela equação (5.13) se pode agora calcular os valores da velocidade de mínimo custo, v_0 , e de máxima produção, v_{mxp} , através das equações (5.1) e (5.2), respectivamente.

6^o) O valor da velocidade para a máxima produção, de v_{mxp} , deve ser então substituído na equação da profundidade máxima de corte permitida pela potência da máquina, p_{max} , dada pela equação (5.8). Caso o valor encontrado de p_{max} seja maior do que o valor encontrado pela equação (5.7), o primeiro valor calculado deve ser mantido como a máxima profundidade de corte. Caso contrário, o valor de p_{max} deve ser aquele encontrado pela equação (5.8).

7^o) De posse dos valores máximos dos parâmetros de corte calcula-se o custo de usinagem da máxima produção fazendo-se no desbaste todas as combinações possíveis de passes axiais e radiais e armazenando-se o menor valor de custo.

8^o) Define-se os valores mínimos do avanço, f , da profundidade, p , pelas recomendações do fabricante da ferramenta de corte.

9^o) A partir daí realiza-se a variação da velocidade de corte, da profundidade de corte e do avanço, até se chegar no mínimo custo que garanta tempo de entrega do pedido, com tolerâncias dimensionais e grau de acabamento desejados. Os incrementos de variação dos parâmetros devem ser previamente definidos, por exemplo, 1 m/min para a velocidade de corte; 0.1 mm para a profundidade de corte e 0,1 mm/volta para o avanço.

5.3 Dados de Entrada do Aplicativo

São dados de entrada do aplicativo os seguintes parâmetros:

Rugosidade (Ra); raio da ponta da ferramenta (r_ϕ); fator limitante da espessura do cavaco (G_{Fh}); fator limitante da largura de corte (G_{Fb}); comprimento da aresta de corte da ferramenta (l); ângulo de posição (\mathbf{c}); ângulo de folga (α); parâmetros da fórmula expandida de Taylor

(C , E , F , G , H); tolerância da peça, em mm; componente do custo referente à máquina e ao operador (C_2); componente de custo referente à ferramenta de corte (C_3); potência motor da máquina (N_m); rendimento da máquina (h); parâmetros da fórmula de Kienzle (K_{sl} e $l-z$); tamanho do lote; tempo de entrega. O fluxograma do processo é mostrado na figura 5.3.

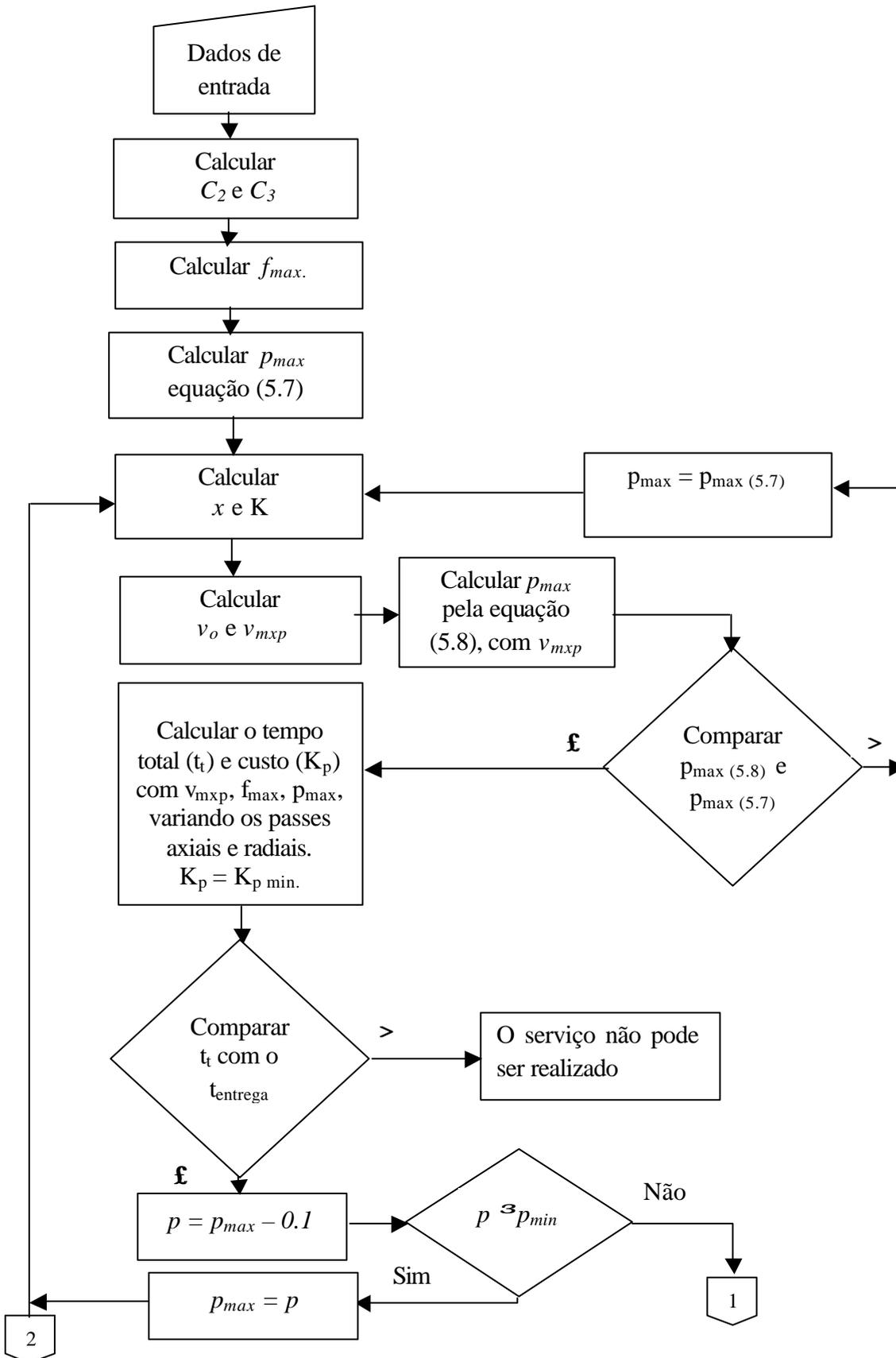


Figura 5.3 – Fluxograma do processo de minimização de custo de torneamento (continua prox. pág.)

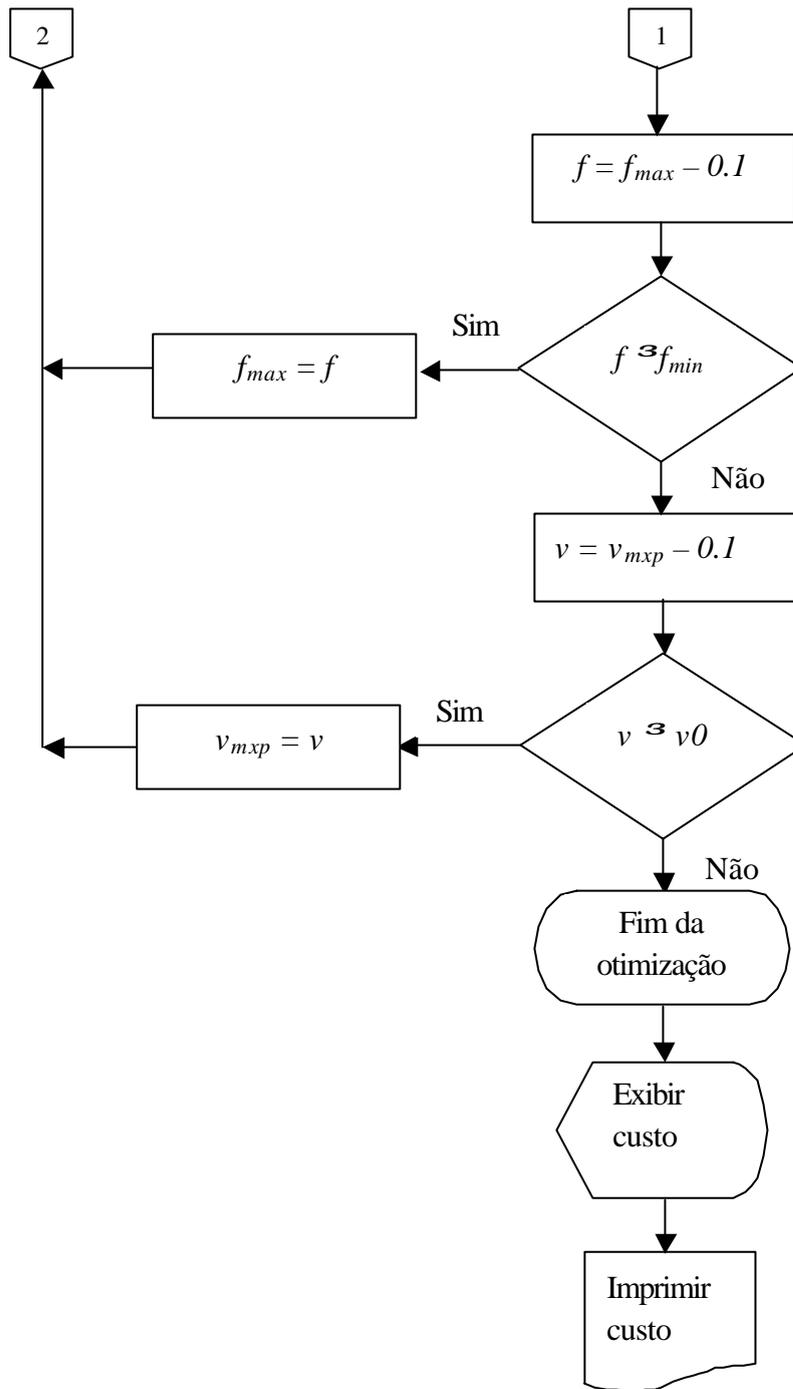


Figura 5.3 – Fluxograma do processo de minimização de custo de torneamento (continuação)

6. APLICATIVO PARA O CÁLCULO DO CUSTO DE TORNEAMENTO

O aplicativo para o cálculo do custo de usinagem é um projeto realizado na linguagem Visual Basic (VB), para ser executado no ambiente Windows. Trata-se de uma ferramenta a ser empregada na determinação do custo otimizado de fabricação de peças em torno de Comando Numérico Computadorizado (CNC).

O projeto VB é composto de vários formulários (telas) de entrada de dados e de processamento. Compõe também o projeto VB, diversos módulos, a exemplo daqueles criados para a detecção de erros de digitação, de cálculos e de outras funções. Para cada formulário ou módulo é desenvolvido o respectivo código de programação. Nos códigos dos formulários de processamento estão inseridas as equações deduzidas no Capítulo 4, para cada tipo de operação, em cada estágio do torneamento da peça, com otimização dos parâmetros de corte realizada de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 5.

Apesar do resultado final do custo ser otimizado para determinada fabricação, o aplicativo possibilita ao usuário interagir com o programa, com a possibilidade de alterações de dados nos diferentes formulários que se apresentarão na tela. Com isto, os resultados finais poderão ser alterados de acordo com as modificações introduzidas. Isto permite a obtenção prévia do custo de usinagem de acordo com as mudanças efetuadas, em determinada situação, antes do processo de fabricação.

Os mecanismos de orientação aos usuários do aplicativo são os mesmos já bastante conhecidos existentes no Word ou Excel; são caixas de mensagens incorporadas aos códigos dos programas, na forma de quadros: de erro, de aviso, de informação, de crítica e de questionamento. Outra ferramenta importante de informação é a “ToolTipText”, que permite a identificação do tipo de dado que deve ser inserido em determinada caixa de texto, ou que processamento é realizado ao acionar algum botão de comando. Para isto basta repousar o cursor do mouse sobre o respectivo controle.

Os módulos de programação de detecção de erros, têm a finalidade de evitar a digitação acidental de algum caracter impróprio para determinada caixa de texto, em qualquer formulário. Ao pressionar um botão de comando de adição de dados para processamento, uma mensagem de erro, como mostrada na figura 6.1, aparecerá forçando ao usuário efetuar a correção. Por exemplo, numa caixa de texto para caracter numérico positivo, se for digitado uma letra, um número negativo ou zero; aparecerá um quadro de mensagem, e ao pressionar o botão <OK>, do quadro, o cursor retorna à caixa de texto apagando o caracter digitado erradamente, para que o usuário efetue a digitação correta.

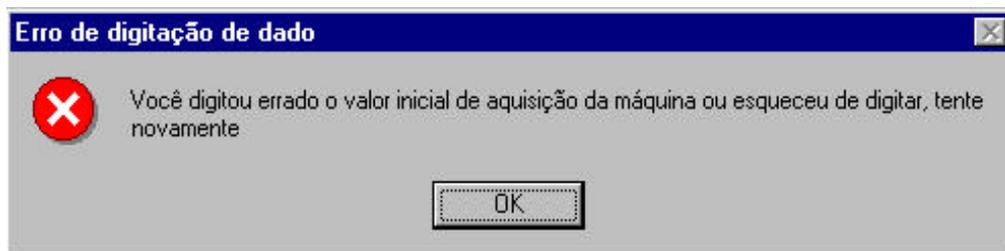


Figura 6.1 – Quadro de mensagem de erro

A figura 6.2 mostra a apresentação do aplicativo com a relação dos formulários que o compõe. Para conhecer antecipadamente os formulários do projeto, basta marcar o botão de opção do formulário com o mouse ou com as setas de direção do cursor do teclado, depois é só acionar o botão de comando <Apresentar Formulário>. Para retornar, clique o comando <Sair> do formulário que foi aberto. Todos os formulários têm os botões de minimizar, maximizar e fechar, localizados à direita da barra de título. Ao teclar <Iniciar>, começa o aplicativo, mostrando o primeiro formulário de entrada de dados. Teclando <Sair>, encerra o aplicativo.

Ao acionar o botão de comando <Adicionar>, existente em todos os formulários, os dados são armazenados para utilização nas operações de processamento ao longo do programa. Todos os formulários do aplicativo possuem os botões <Limpar> e <Retornar>, que possibilitam a digitação de novas série de dados sem necessitar sair do aplicativo. Para alterar apenas um ou parte dos dados de um formulário, basta apagar o(s) dado(s) existente(s) e digitar outro(s); clicar <Adicionar>, para que a alteração seja considerada pelo programa. Acionando o botão de comando <Sair>, o aplicativo retorna ao formulário de apresentação.

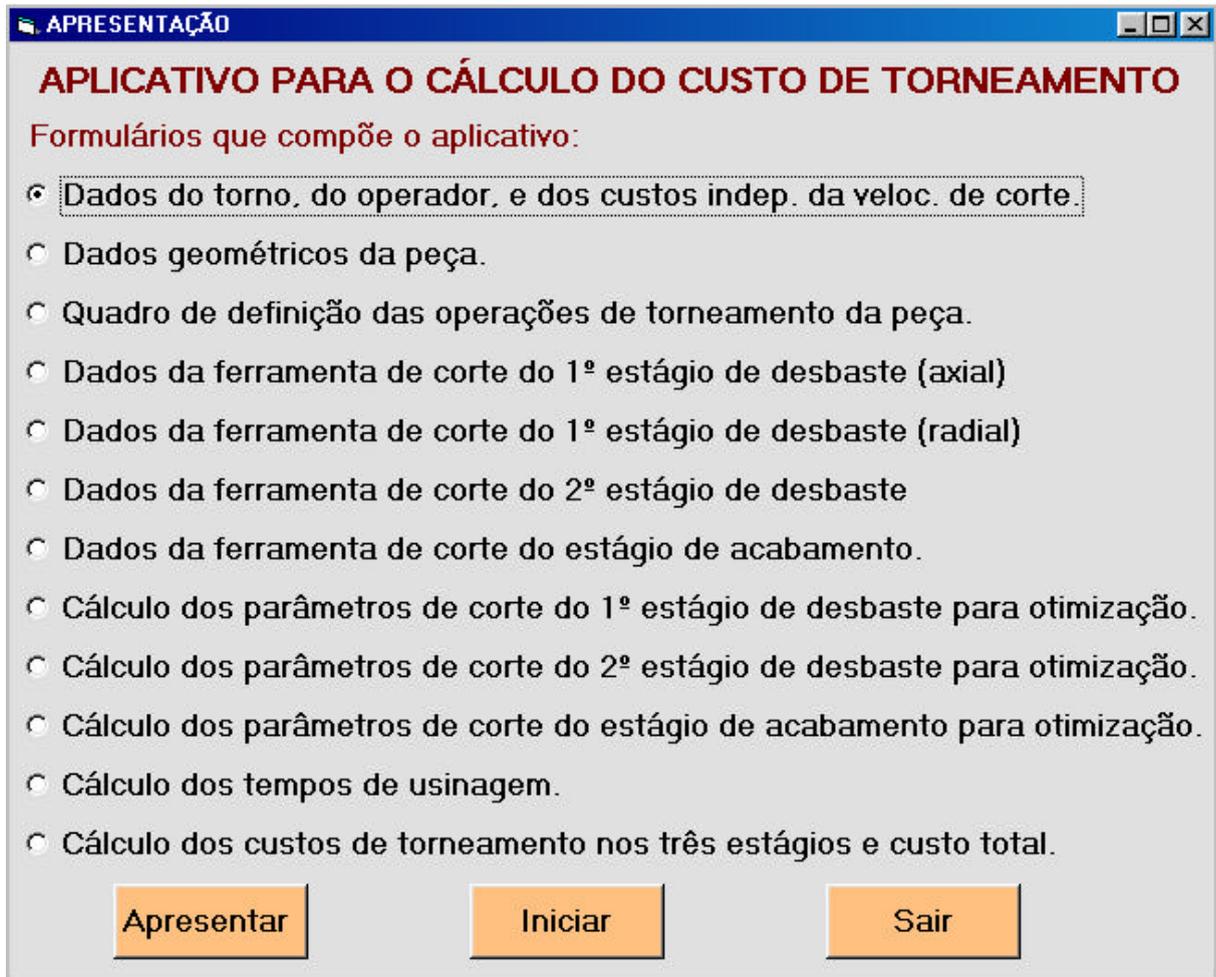


Figura 6.2 – Formulário inicial de apresentação do aplicativo.

A figura 6.3 apresenta o formulário de entrada de dados para o processamento dos valores dos componentes C_1 e C_2 das parcelas das equações de custo de usinagem deduzidas no capítulo 4. O componente, C_1 , é relativo aos custos que independem da velocidade de corte, por exemplo, o custo com a matéria prima, custo proporcional às variações de custo de operações anteriores ou posteriores, entre outros. O componente, C_2 , se refere ao salário-máquina e salário-homem. Estes dados são historicamente conhecidos e inseridos pelo usuário no formulário. Os dados sobre a máquina devem ser encontrados na “pasta da máquina”, que além das informações técnicas relativas a operação, manutenções (preditiva, preventiva e corretiva) e alterações, deve conter cópia da nota fiscal de aquisição, bem como, todas as especificações técnicas, a exemplo de potência, rendimento, entre outros. Os dados de custo do operador, composto de salário e encargos sociais, são colhidos no setor responsável pela folha de pagamento de pessoal da empresa. Outras informações sobre a máquina podem ser obtidas no setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP). Dados financeiros, a exemplo de taxa de juros, são informados no setor responsável pela contabilidade.

Os dados do formulário da figura 6.3 são considerados dados fixos, e são empregados em todo o processo de fabricação da peça. A parcela C_1 é inserida apenas uma única vez, isto é, no cálculo de custo do primeiro passe, do 1^o estágio de desbaste, em qualquer das operações de torneamento. Já a parcela C_2 está presente no custo de cada passe de qualquer operação de torneamento

Figura 6.3 – Dados relativos à máquina, ao operador, aos custos que independem da velocidade de corte.

O formulário apresentado na figura 6.4 é aquele em que são introduzidos os dados geométricos da peça que se deseja calcular o custo de usinagem. Estes dados são colhidos do desenho do projeto da peça. Inicialmente, de acordo com o desenho, o usuário do aplicativo através dos botões de opção existentes, assinala o(s) formato(s) da peça, já que para cada formato de superfície o custo é calculado através de equação própria. Ao acionar o comando <Confirmar>, do quadro relativo ao(s) “Formatos da peça“, o programa habilita para digitação os quadros do(s) formatos(s) escolhido(s), e desabilita os demais. Caso seja escolhida a opção “Formatos 1, 2 e 3”, todos os quadro ficam habilitados para digitação.

A digitação dos dados se inicia com as informações da peça bruta, posteriormente, com os dados relativos ao(s) formatos(s) cilíndrico(s) e/ou cônico(s) e/ou circular(es) existentes no desenho da peça pronta. Cada quadro do formulário, representativo de tipo de formato, se inicia com a informação do numero daquele formato existente na peça. Para cada um dos formatos existentes (seja cilíndrico, cônico ou circular), uma série de dados colhidos do desenho, do respectivo formato, deve ser digitada. Ao acionar o botão <Adicionar>, os dados de cada série aparecerão nas caixas de listagem identificadas com letras maiúsculas. Ao final da última série de cada formato, ao clicar o botão <Adicionar>, um “Quadro de Aviso” como o apresentado na figura 6.5 aparecerá. Ao clicar <OK>, um “Quadro de Informação”, como é mostrado na figura 6.6, indica o próximo passo a ser seguido pelo usuário. Ao final da

digitação dos dados geométricos da peça, aparecerá outro quadro como o apresentado na figura 6.7, avisando o fim da digitação dos dados e, indicando ao usuário para clicar no botão <Adicionar>, localizado no final do formulário, que depois de acionado, apresentará novo formulário de entrada de dados.

Figura 6.4 – Formulário de digitação dos dados geométricos da peça

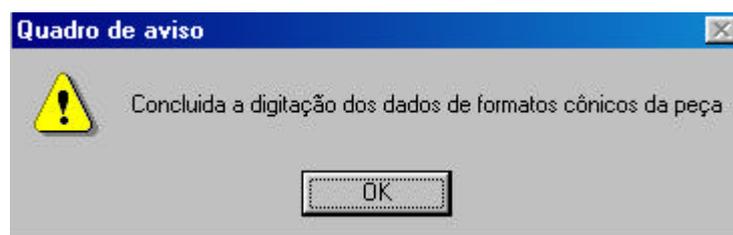


Figura 6.5 – Quadro de aviso de conclusão de dados

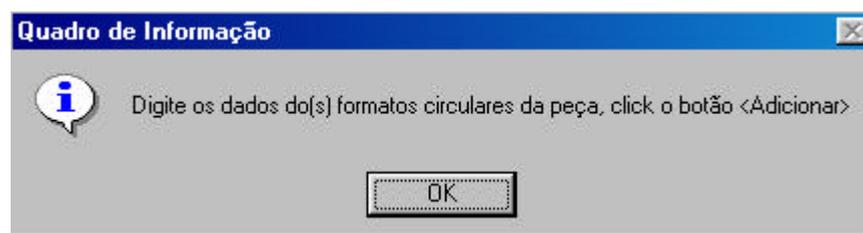


Figura 6.6 – Quadro de informação para inserção de dados

A figura 6.8 mostra o formulário seguinte que define as operações de torneamento a serem executadas. Para retornar ao formulário de dados geométricos, clicar em <Retornar>.

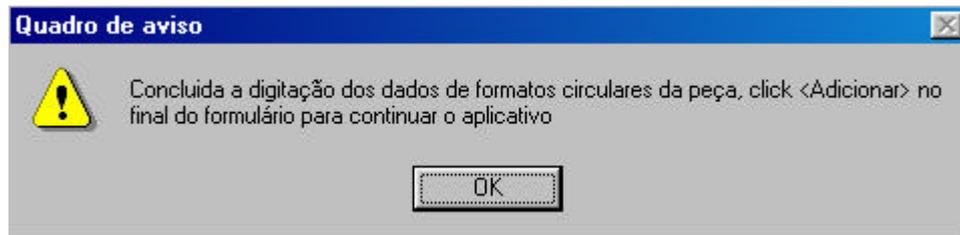


Figura 6.7 – Quadro de aviso de conclusão de dados

QUADRO DE DEFINIÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO DA PEÇA

1º estágio: marque a opção para o desbaste:

- Múltiplos passes de torneamento cilíndrico axial
- Múltiplos passes de torneamento cilíndrico radial.

○ 2º estágio de desbaste: marque abaixo as operações:

○ 3º estágio, acabamento: marque abaixo as operações:

Operações de Torneamento Externo:

					<input type="checkbox"/> Axial	<input type="checkbox"/> Radial	<input type="checkbox"/> Cônico	<input type="checkbox"/> Recesso	<input type="checkbox"/> Roscamento	<input type="button" value="Adicionar"/>

Operações de Torneamento interno:

					<input type="checkbox"/> Axial	<input type="checkbox"/> Radial	<input type="checkbox"/> Cônico	<input type="checkbox"/> Recesso	<input type="checkbox"/> Roscamento	<input type="button" value="Limpar"/>

Outras Operações de Torneamento:

					<input type="checkbox"/> Furação	<input type="checkbox"/> Canal Interno	<input type="checkbox"/> Canal Externo	<input type="checkbox"/> Canal Axial	<input type="checkbox"/> Sangramento	<input type="button" value="Retornar"/>

Figura 6.8 – Quadro de definição das operações de torneamento da peças

Antes do início da marcação das operações, o quadro de aviso apresentado na figura 6.9 é mostrado para a orientação da forma de procedimento do usuário.

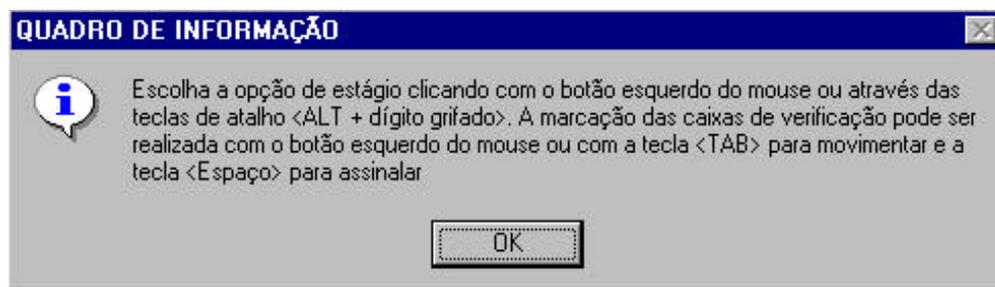


Figura 6.9 - Quadro de informação do formulário de definição das operações

O formulário da figura 6.8 é acessado nos três estágios de torneamento, para indicar as operações de cada estágio, com a finalidade de calcular seus custos. Se a opção foi “Múltiplos

passes de torneamento cilíndrico axial”, ao acessar o botão <Adicionar> pela primeira vez (as duas outras opções de 2^o estágio e acabamento ficam inabilitadas) o aplicativo apresentará o formulário da figura 6.10. Caso a opção seja “Múltiplos passes de torneamento cilíndrico radial”, o formulário que aparecerá será aquele da figura 6.11. A ferramenta que executa a operação de desbaste axial no 1^o estágio é diferente daquela que realiza o desbaste radial. Já a ferramenta que executa o 1^o estágio pode fazer o pré-acabamento, diferentemente daquela que realiza o acabamento da peça. As informações digitadas nestes formulários são armazenadas para o processamento das otimizações dos parâmetros de corte e para os cálculos dos custos.

Figura 6.10 – Formulário de dados da ferramenta de corte do 1^o estágio (Axial).

O formulário apresentado na figura 6.12 é o de processamento dos parâmetros de corte do 1^o estágio de desbaste visando a otimização do custo. Nesta tela também há inserção de dados, como as características do material da peça, os parâmetros da fórmula expandida de Taylor e da fórmula de Kienzle. O código do programa deste formulário utiliza as equações e a metodologia do processo de otimização constante no Capítulo 5. Com os dados fornecidos nos formulários anteriores e no presente, após acionar cada botão de comando, o respectivo cálculo é processado e aparece na caixa de texto ao lado. Os primeiros cálculos a serem realizados são os custos do salário máquina e salário homem (C_2) e os custos referentes à ferramenta de corte (C_3).

Os resultados dos cálculos anteriores são inseridos nos próximos. Após os resultados de C_2 e C_3 , a seqüência dos cálculos a serem efetuados é: avanço máximo, que utiliza no processamento as equações (5.4) e (5.6); os valores de x e K da fórmula de Taylor, fornecidos

DADOS DA FERRAMENTA DE CORTE DO 1º ESTÁGIO (DESBASTE RADIAL)

Dados da Ferramenta de corte do 1º estágio (Radial)

Vida do porta ferramentas [nº fios de corte]:

Custo de aquisição do porta-ferramentas [R\$]:

Custo de aquisição do inserto [R\$]:

Nº fios de corte do inserto [unidade]:

Tempo de troca da aresta [minutos]:

Características da ferramenta de corte do 1º estágio (Radial):

Angulos. (graus), Posição: Saída: Folga:

Raio da ponta (mm): Tipo de material:

Fator limitante da espessura do cavaco, Gfh:

Comprimento da aresta de corte, (mm):

Fator limitante da largura de corte, Gfb:

Tempo de troca da ferramenta:

Tempo, (minutos): Tolerância da peça, (mm):

Limpar **Dados** **Retornar** **Adicionar** **Sair**

Figura 6.11 – Formulário de dados da ferramenta de corte do 1º estágio (Radial).

pelas equações (5.12) e (5.13); os valores das velocidades limites do Intervalo de Máxima Eficiência (IME), velocidade para o mínimo custo, v_0 , e velocidade para a máxima produção, v_{mxp} , fornecidas pelas equações (5.1) e (5.2), respectivamente. Finalmente, é calculada a profundidade de corte máxima, p_{max} , cujo processamento utiliza as equações (5.7) e (5.8).

Como os valores de C_2 e C_3 são utilizados várias vezes ao longo do aplicativo, os respectivos cálculos estão inseridos em módulos de função. Para C_2 existe apenas um módulo, já para C_3 , existem módulos para desbaste axial, desbaste radial e acabamento. Para exemplificar como é composto o código de programa é apresentado a seguir o módulo da função C_2 .

Módulo da função C_2 :

Public Function FC2() As Currency

'Declaração dos tipos das variáveis

Dim Sm As Currency, Vmi As Currency, Sh As Currency

Dim Kme As Currency, Ke As Currency

Dim Vsi As Currency, Ks As Currency

Dim J As Single, Em As Single

Dim h As Long, Idade As Long, Vida As Long

Identificação das variáveis, que são dados de entrada do usuário.

Sh = CCur(frmDadosMaqOp.txtSh.Text)

h = CLng(frmDadosMaqOp.txth.Text)

Vmi = CCur(frmDadosMaqOp.txtVmi.Text)

Idade = CLng(frmDadosMaqOp.txtIdade.Text)

Vida = CLng(frmDadosMaqOp.txtVida.Text)

J = CSng(frmDadosMaqOp.txtJ.Text / 100!)

Kme = CCur(frmDadosMaqOp.txtKme.Text)

Em = CSng(frmDadosMaqOp.txtEm.Text)

Ke = CCur(frmDadosMaqOp.txtKe.Text)

'processamento

$$Sm = (1 / h) * (((Vmi - Vmi * (Idade / Vida)) * J) + (Vmi / Vida) + Kme + Em * Ke * J)$$

' Valor da função C2

FC2 = Sh + Sm

End Function

Figura 6.12 – Formulário de cálculo dos parâmetros de corte do 1^o estágio, para otimização.

Quando o botão <Adicionar> do formulário da figura 6.12 é acionado, o aplicativo retorna ao formulário do “Quadro de definição das operações de torneamento da peça”, mostrado na figura 6.8 para a definição do pré-acabamento (as opções de 1^o estágio e acabamento ficam inabilitadas). Ao clicar no botão <Adicionar> deste último formulário,

aparecerá a tela mostrada na figura 6.13, para a digitação dos dados da ferramenta de desbaste para o 2^o estágio.

Figura 6.13 – Formulário de dados da ferramenta de corte do 2^o estágio de desbaste.

Após a digitação dos dados da ferramenta do 2^o estágio de desbaste, ao clicar <Adicionar>, aparecerá o formulário mostrado na figura 6.14, para o “Cálculo dos parâmetros de corte do 2^o estágio de desbaste para otimização”. Neste formulário não há inserção de dados, nele são realizados apenas cálculos cujos resultados são mostrados nas caixa de texto ao lado de cada botão. Os dados dos parâmetros da fórmula expandida de Taylor e os parâmetros da fórmula de Kienzle, foram inseridos na tela referente ao 1^o estágio (figura 6.12) e ficam armazenados para futuros processamentos. No final ao acionar <Adicionar>, o aplicativo retorna a tela da figura 6.8 para a definição da última operação que é o acabamento (as opções de 1^o e 2^o estágios ficam inabilitadas); cujos dados da ferramenta devem ser digitados no formulário da figura 6.15. Após a digitação dos dados da ferramenta para o acabamento, ao clicar <Adicionar>, o aplicativo apresenta o formulário da figura 6.16, “Cálculo dos parâmetros de corte para o estágio de acabamento para otimização”, ao concluir este cálculos e, ao clicar <Adicionar> no final da tela, aparecerá o formulário da figura 6.17, “Cálculos dos tempos de usinagem”. Nele são calculados e apresentados os resultados dos tempos de corte, improdutivos e sub-totais por estágio, bem como o tempo total gasto na usinagem da peça.

Finalmente no formulário mostrado na figura 6.18 são apresentados os resultados dos cálculos de custo em cada estágio de torneamento e o custo final de usinagem da peça.

CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA O 2º ESTÁGIO DE DESBASTE PARA OTIMIZAÇÃO

Cálculo do custo da ferramenta de corte do 2º estágio:

C3:

Cálculo do avanço máximo (Amax): Amax:

Cálculo parâmetros da fórmula de Taylor simples: X:
K:

Cálculo de velocidades do I.M.E.: Vo: Vm_{xp}:

Cálculo da Profundidade máxima (Pmax): Pmax:

Figura 6.14 – Cálculo dos parâmetros de corte para o 2º estágio de desbaste para otimização.

DADOS DA FERRAMENTA DE CORTE DO ESTÁGIO DE ACABAMENTO

Dados da Ferramenta de corte para o acabamento da peça:

Vida do porta ferramentas [nº fios de corte]:

Custo de aquisição do porta-ferramentas [R\$]:

Custo de aquisição do inserto [R\$]:

Nº fios de corte do inserto [unidade]:

Tempo de troca da aresta [minutos]:

Características da ferramenta de corte para o acabamento:

Ângulos (graus). Posição: Saída: Folga:

Raio da ponta (mm): Tipo de material:

Fator limitante da espessura do cavaco, G_{fh}:

Comprimento da aresta de corte, (mm):

Fator limitante da largura de corte, G_{fb}:

Tempo de troca da ferramenta:

Tempo (minutos): tolerância da peça (mm):

Figura 6.15 – Formulário de dados da ferramenta corte para o acabamento da peça.

CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA O ESTÁGIO DE ACABAMENTO PARA OTIMIZAÇÃO

Rugosidade para o acabamento: Ra (micrometro):

Cálculo do custo da ferramenta de corte do acabamento: **Calcular C3** C3:

Cálculo do avanço máximo (Amax): **Calcular Avanço** Amax:

Cálculo parâmetros da fórmula de Taylor simples: **Calcular x e K** x:
K:

Cálculo de velocidades do I.M.E.: **Calcular Velocidades** Vo: Vm_{xp}:

Cálculo da Profundidade máxima (Pmax): **Calcular Pmax.** Pmax:

Retornar **Limpar** **Adicionar** **Sair**

Figura 6.16 – Cálculo dos parâmetros de corte do acabamento para otimização

CÁLCULO DOS TEMPOS DE USINAGEM

Tempos do 1º estágio (minutos):

Tempo de corte:

Calcular Tempo improdutivo:

Tempo de troca da aresta/ferramenta:

Tempo total do 1º estágio:

Tempos do 2º estágio (minutos):

Tempo de corte:

Calcular Tempo improdutivo:

Tempo de troca da aresta/ferramenta:

Tempo total do 2º estágio:

Tempos do acabamento (minutos):

Tempo de corte:

Calcular Tempo improdutivo:

Tempo de troca da aresta/ferramenta:

Tempo total do acabamento:

Tempos totais (minutos):

Calcular

T. corte:

T. improdutivo:

T. troca:

Tempo total (T_t):

Adicionar

Limpar

Retornar

Sair

Figura 6.17 – Formulário para o cálculo dos tempos de usinagem dos três estágios.

CÁLCULO DE CUSTO NOS TRÊS ESTÁGIOS DE TORNEAMENTO E CUSTO FINAL

Parâmetros de corte otimizados do 1º estágio:
Velocidade de corte (m/min.):
Avanço (mm/volta):
Profundidade de corte (mm): **Calcular**

Parâmetros de corte otimizados do 2º estágio:
Velocidade de corte (m/min.):
Avanço (mm/volta):
Profundidade de corte (mm): **Calcular**

Parâmetros de corte otimizados do acabamento:
Velocidade de corte (m/min.):
Avanço (mm/volta):
Profundidade de corte (mm): **Calcular**

Cálculo e resultado dos custos:
Calcular Custo
1º estágio de desbaste (R\$):
2º estágio de desbaste (R\$):
Acabamento da peça (R\$):
Custo total da peça (R\$):

Limpar **Retornar**
Imprimir **Sair**

Figura 6.18 – Formulário para o cálculo dos custos de usinagem dos três estágios e custo total

7. UTILIZAÇÃO PRÁTICA DO APLICATIVO PARA O CÁLCULO DE CUSTO DE TORNEAMENTO

Consideremos o torneamento da peça apresentada na figura 7.1.

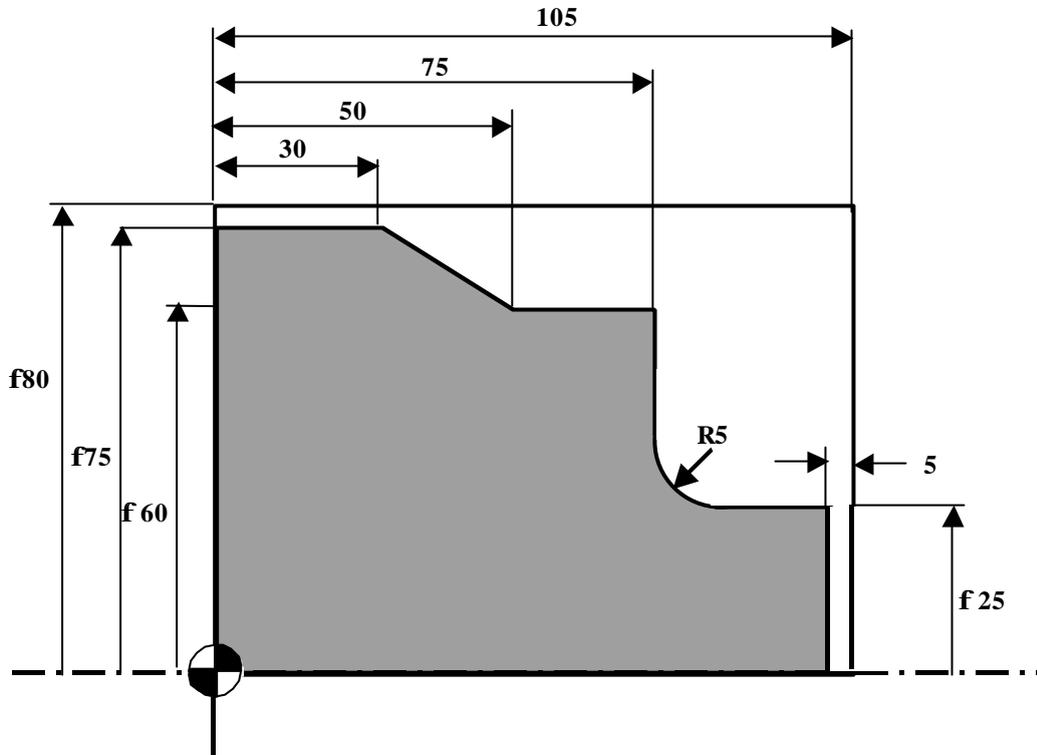


Figura 7.1. – Peça para exemplo de aplicação (medidas em milímetros)

Os dados para o torneamento da peça são abaixo apresentados:

1. Dados do torno, do operador e dos custos independentes da velocidade de corte:
 - Custo do operador (salário + encargos): R\$18,00/hora
 - Número anual de horas trabalhadas no torno: 2400 horas
 - Valor de aquisição do torno: R\$150.000,00
 - Idade do torno: 5 anos
 - Vida prevista do torno: 30 anos
 - Taxa de juros anual: 18,5%
 - Custo anual de conservação: R\$1.000,00
 - Espaço ocupado pelo torno: 25 m³
 - Valor do espaço do torno: R\$300,00/m³
 - Custo que independe da velocidade de corte: R\$25,00/peça
 - Características do torno:
 - Tipo: CNC
 - Potência: 10 C.V.
 - Rendimento: 95%
2. Considerando que o 1^o estágio de desbaste é realizado com passes axiais, os dados da ferramenta de corte são a seguir apresentados:
 - Vida do porta-ferramenta: 400 fios de corte
 - Custo de aquisição do porta-ferramentas: R\$400,00

- Custo de aquisição do inserto reversível: R\$40,00
- Número de fios de corte do inserto: 4
- Tempo de troca da aresta: 60 minutos
- Ângulo de posição: 70°
- Ângulo de saída: 6°
- Ângulo de folga: 5°
- Raio da ponta da ferramenta: 1,2 mm
- Tipo do material da ferramenta: metal duro P30
- Fator limitante da espessura do cavaco (Gfh): 0,6
- Comprimento da aresta de corte: 10 mm
- Fator limitante da largura de corte: 0,45
- Tempo para a troca da aresta ou do inserto: 1,3 min.
- Tolerância da peça: 0,3 mm

3. Dados da ferramenta para o 2^o estágio de desbaste ou pré-acabamento.

No exemplo, a ferramenta a ser utilizada para o pré-acabamento é a mesma do 1^o estágio.

4. Dados da ferramenta para o acabamento.

- Vida do porta-ferramenta: 420 fios de corte
- Custo de aquisição do porta-ferramentas: R\$480,00
- Custo de aquisição do inserto reversível: R\$40,00
- Número de fios de corte do inserto: 4
- Tempo de troca da aresta: 60 minutos
- Ângulo de posição: 90°
- Ângulo de saída: 5°
- Ângulo de folga: 4°
- Raio da ponta da ferramenta: 2,0 mm
- Tipo do material da ferramenta: metal duro P30
- Fator limitante da espessura do cavaco (Gfh): 0,6
- Comprimento da aresta de corte: 12 mm
- Fator limitante da largura de corte: 0,45
- Tempo para a troca da aresta ou do inserto: 1,3 min.
- Tolerância da peça: 0,1 mm

5. Dados complementares;

- Grau de acabamento da peça (Ra): $0,25\mu\text{m}$
- Material da peça: aço ABNT 1045
- Parâmetros da fórmula de Taylor, Mesquita (1980):
 - $C = 799,9$
 - $E = - 0,1108$
 - $F = - 0,1885$
 - $G = - 0,248$
 - $H = 0,5646$
- Parâmetros da fórmula de Kienzle, Ferraresi (1990):
 - $K_{S1} = 211$
 - $1-z = 0,83$

Com os dados apresentados e inseridos no aplicativo, considerando ainda os parâmetros ótimos de corte para o menor custo, encontramos os valores conforme discriminados abaixo:

Custo do 1^o estágio de desbaste: R\$27,93/peça (está inserido os custo de C_1)

Custo do 2^o estágio de desbaste: R\$ 0,82/peça

Custo do acabamento.....: R\$ 0,81/peça

Custo total: R\$ 29,56/peça

8. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado mostrou os procedimentos para o desenvolvimento de um aplicativo do Visual Basic para calcular os custos de fabricação por usinagem, em particular, do processo de torneamento. Apresentou novas equações de custo que abrangem as operações de torneamento do primeiro ao último passe, para todos os formatos de superfície da peça. Foram formuladas equações para superfícies cilíndricas, cônicas e circulares, entre outras; considerando sempre o trabalho produtivo, em que ocorre corte de metal, e o não produtivo, quando não há produção de cavaco. Para se atingir os objetivos deste trabalho, as operações de torneamento foram divididas em (três) estágios: o primeiro estágio composto de passes de torneamento axiais ou radiais; o segundo acompanhando o contorno do desenho da peça, permanecendo o sobremetal de 1 milímetro, e, finalmente, o último estágio de acabamento. Os parâmetros de corte, velocidade, avanço e profundidade, que interferem diretamente sobre os custos de usinagem, foram submetidos a um processo de otimização, objetivando a minimização dos custos de torneamento e, finalmente, foram apresentados os formulários que desenvolvidos para se obter os custos otimizados de torneamento, do primeiro, ao último passe.

No estágio atual do aplicativo, os dados fornecidos pelo usuário aos formulários apresentados são inseridos através do teclado do microcomputador. A indicação para trabalhos futuros é a utilização do aplicativo como parte integrante de um sistema CAD/CAPP/CAM, onde as informações financeiras e técnicas sejam introduzidas diretamente a partir de bancos de dados, e os dados geométricos, inseridos a partir do desenho final da peça.

REFERÊNCIAS

- AMAREGO, E.; BROWN, R. *The machining of metals*, NJ – USA, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1969.
- ANDRADE, S. M. V. Integração dos Processos CAD/CAPP/CAM com Geração Automática do Programa de Comando Numérico para Peças Rotacionais. Recife, 2001. 109p. (Mestrado do Centro de Tecnologia e Geociências/UFPE).
- ANSELMETTI, B.; LOUATI, H. Generation of manufacturing tolerancing with ISO standards. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Cachan - France, 45: p.1124-1131, 2005.
- BEM-ARIEH, D. Cost estimation system for machined parts. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis Ltda., Volume 38: p. 4481-4494, 2000.
- BHATTACHARYYA, A.; FARIA-GONZALEZ, R.; HAM, I. Regression analysis for predicting surface finish and its application in the determination of optimum machining conditions. *Journal of Engineering Industrial*, Volume 92: p. 711-714, 1970.
- BREWER, R. Parameter selection problem in machining. *CIRP*, Volume 14: p.11-17, 1966.
- CASSIER, Z. *Critérios de optimización de parâmetros de corte en el torneado de piezas utilizando sistemas CAD-CAM*. Venezuela, Departamento de Mecânica – Universidad Simón Bolívar, 1986.
- DA SILVA, A. D.; MEZZOMO, F. F. Geração automática de dados tecnológicos na programação CN. In: II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa – PB, 2002. Anais. 10p.
- DIPLARIS, S. C.; SFANTSIKOPOULOS, M. M. Cost-tolerance function. A new approach for cost optimum machining accuracy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer, Verlog London Ltd., Volume 16: p. 32-38, 2000
- ERMER, D.; PATEL, D. Maximization of the production rate with constraints by linear programming and sensitivity analysis. In: 2nd North American Metalworking Research conference, Madison - WI, 1974.
- FENG, C. X.; KUSIAK, A.; HUANG C. C. Cost evaluation in design with form features. *Computer-Aided Design*, Elsevier SCI Ltd, Volume 28: p.879-885, 1996.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. 8ª Edição. São Paulo – SP, Editora Edgard Blücher Ltda, 1990. 751p.
- HE, J. R. Tolerancing for manufacturing via cost minimization. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Pergamon-Elsevier Science Ltd., Volume 31: p.455-470, 1991.
- HUI, Y. V.; LEUNG, L. C.; LINN, R. Optimal machining conditions with costs of quality and tool maintenance for turning. *International Journal of Production Research*. Taylor & Francis Ltda., Volume 39: p.647-665, 2001.

IWATA, K.; MUROTSU, T.; IWATSUBO, T. ; FUJI, S. A probabilistic approach to the determination of the optimum cutting conditions. *Journal of Engineering Industrial, ASME*, Volume 94: p.1099-1107, 1972.

JHA, N. K. Probabilistic cost estimation in advance of production in a computerized manufacturing system through stochastic geometric programming. *Computer & Industrial Engineering*, Pergamon - Elsevier Science Ltd., Volume 30: p.809-821, 1996.

JUNIOR, R.; UBERTINO, R. S. Determinação de condições otimizadas de usinagem com aplicação em torneamento. Florianópolis, 1995. 131p. (Mestrado do Centro Tecnológico/UFSC).

KAYAN, R.K; AKTURK, M.S. A new bounding mechanism for the CNC machine scheduling problems with controllable processing times. *European Journal of Operational Research*, Turkey, Volume 167: p.624-643, 2005.

KEE, P.K Development of computer-aided machining optimization for multipass rough turning operations. *International Journal of Production Economics*, Australia, Volume 37: p.215-227, 1994.

KIENZLE, O. Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. VDI, Hannover, p.299-305, 1952.

KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren*. VDI, Verlag, Dusseldorf, Volume1: 179p, 1984,

MAROPOULOS, P. G.; HINDUJA, S. Automatic tool selection for rough turning. *International Journal of Production Research*., Taylor & Francis LTD., Volume 29: p.1185-1204, 1991.

MASTELARI, N.; COPPINI, N.L. Desenvolvimento de um Sistema de Informações para Manufatura utilizando Análise Orientada a Objetos. In: II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa – PB. 2002. Anais. 8p.

MESQUITA, N. G. M. Determinação dos parâmetros da Fórmula Expandida de Taylor. Florianópolis, 1980. (Mestrado do Centro Tecnológico/UFSC).

NICOLAOU, P; THURSTON, D. L; CARNAHAN, J. V. Machining quality and cost: Estimation and tradeoffs. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Transactions of the ASME, Volume 124: p.840-851, 2002.

OLIVEIRA, J. E. F. Otimização de Processos de Fabricação por Usinagem Via Programação Linear. Recife, 1999. (Mestrado do Centro de Tecnologia e Geociências/UFPE).

OPITZ, H. Der heutige Stand der Zerspanungsforschung. *Werkstattstechnik und Maschinenbau*, Berlin, p.210-217, 1956.

ORTH, A. Desenvolvimento de um sistema de visão para medir o desgaste de flanco de ferramentas de corte. Florianópolis, 2001. (Mestrado do Centro Tecnológico/UFSC).

PERRY, G. M. *Aprenda em 24 horas Visual Basic 5*. Rio de Janeiro, Editora Campus Ltda., 1998. 450p.

SARAVANAN, R; SANKAR, R. S.; ASOKAN, P; VIJAYAKUMAR, K; PRABHAHARAN, G. Optimization of cutting conditions during continuous finished profile machining using non-traditional techniques. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Coimbatore, India, p.30-40, 2005

TAYLOR, F. On the first art of cutting metals. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME , USA, Volume 28: p.31, 1907

WANG, P.; LIANG, M. Simultaneously solving process selection, machining parameter optimization, and tolerance design problems: A Bi-criterion approach. Journal of Manufacturing Science And Engineering, Transactions of The ASME, Ottawa, Canada, Volume 127: p.533-544, 2005.

WHITE, B.; HOUSHYAR, A. Quality and optimum parameter selection in metal cutting. Computers in Industry, Elsevier Science Publishers B.V., Volume 20: p.87-98, 1992.

B333d Batista, Alfredo José

Desenvolvimento de um aplicativo para cálculo dos custos de torneamento / Alfredo José Batista. - Recife: O Autor, 2005.

viii, 70 f., figs., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2005.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Processos de fabricação. 2. Torneamento. 3. Custos de usinagem. 4. Microcomputadores – Aplicativos. I. Título.

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2005-48