

DESGASTE E VIDA DAS FERRAMENTAS
DE USINAGEM

Prof. Dr. DINO FERRARESI

RESUMO

São apresentadas inicialmente as danificações que ocorrem nas ferramentas durante o processo de usinagem dos metais. Em seguida são abordados os principais métodos diretos e indiretos de medição dos desgastes em laboratório e na máquina ferramenta em trabalho. São traçadas breves considerações sobre o mecanismo do desgaste. É apresentado o processo convencional de obtenção, em laboratório, das curvas de desgaste e vida da ferramenta. É introduzida uma nova conceituação de curva de vida, tal seja, curva de vida para desgaste variável da ferramenta, pois para pastilhas de metal duro com revestimento, em operação de desbaste, a vida é definida pelo lascamento. São apresentadas uma série de fatores que mostram as divergências dos dados obtidos através de tabelas e catálogos de usinagem, isto é informações externas, e os valores reais obtidos com a máquina - ferramenta em operação na própria empresa. Para corrigir essa discrepância, é introduzida uma técnica de obtenção da curva de vida na empresa, durante a operação de usinagem da peça em trabalho. Através da curva de vida, a operação é otimizada com a determinação do intervalo de máxima eficiência, dentro do campo de velocidades permissíveis para a máquina-ferramenta em questão. É apresentada uma aplicação numa empresa de grande porte.

Membro da ABM. Engenheiro Mecânico e Eletricista pela Escola Politécnica da USP (1949). Doutor em Engenharia pela Universidade Técnica de Munique - Alemanha (1960). Professor Titular da Faculdade de Engenharia de Campinas da UNICAMP. Presidente do Comitê Brasileiro de Mecânica da ABNT. Membro do Conselho Diretor da ABNT. Membro do Conselho Consultivo da SOBRACON. Diretor Presidente (licenciado) da Mecânica Bonfanti S.A. Membro da Diretoria e do Conselho da Fundação Tropical de Pesquisa e Tecnologia André Tosello. Membro do Conselho do CREA, representando a Faculdade de Engenharia da UNICAMP. Consultor Técnico de Empresas no campo da usinagem dos metais.

1. PERDA DA CAPACIDADE DE CORTE DA FERRAMENTA DURANTE A USINAGEM

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

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

Em ferramentas frágeis, ferramentas com ângulo de ponta e de cunha pequenos, principalmente no corte interrompido, a vida pode ser limitada pelo aparecimento de quebras e trincas. Há ainda o caso de ferramentas tenazes, que sofrem deformações permanentes, quando sob ação de maiores forças de usinagem e, conseqüentemente, maior temperatura de corte. Nesses casos, a determinação de grandezas mensuráveis para exprimir diretamente a danificação da ferramenta é mais complexa, porém possível de ser efetuada na maioria das vezes.

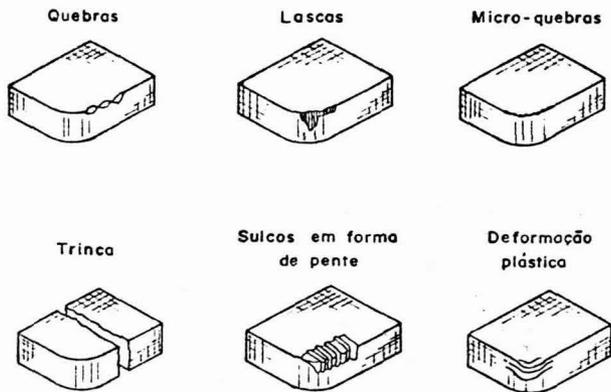
Desta forma, atribuem-se à perda da capacidade de corte da ferramenta, dois tipos de danificações: os *desgastes* e as *avarias* | 1 |. Como desgastes da ferramenta, consideram-se aqueles originados principalmente pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta e entre esta e a peça. Vários fatores intervêm neste desgaste, tais como cisalhamento de microsoldas, abrasão mecânica, difusão intermetálica e oxidação. A ação desses fatores está relacionada com a temperatura de corte, a qual depende principalmente da velocidade de corte.

Como avarias da ferramenta, consideram-se as *quebras*, *lascas*, *trincas* devido a variação de temperatura, *sulcos distribuídos em forma de pente* (corte interrompido) e as *deformações plásticas* (Figura 1).

São devidas principalmente a solicitações mecânicas e térmicas.

Em vários casos, a capacidade de corte da ferramenta, pode ser definida através de um determinado valor limite atribuído à avaria.

AVARIAS



DESGASTES

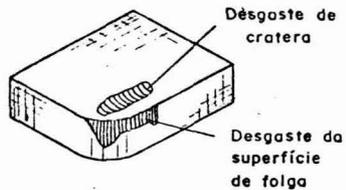


FIGURA 1 - Avarias e desgastes de uma ferramenta

2. DESGASTE DA FERRAMENTA E SUA MEDIÇÃO

Os desgastes são as danificações que mais ocorrem nas ferramentas de usinagem. A Figura 2 apresenta os desgastes convencionados pela Norma ISO | 2 |. A sua medição representa um papel importante no processo de usinagem. Permite:

- determinar as características de usinagem dos materiais;
- prever a quebra da ferramenta;
- prever vibrações do conjunto peça-ferramenta-máquina;

- controlar a rugosidade superficial da peça;
- controlar as dimensões geométricas da peça;
- traçar as curvas de desgaste da ferramenta e, conseqüentemente as curvas de vida para o par ferramenta-peça;
- alimentar os comandos adaptativos das máquinas ferramentas CNC.

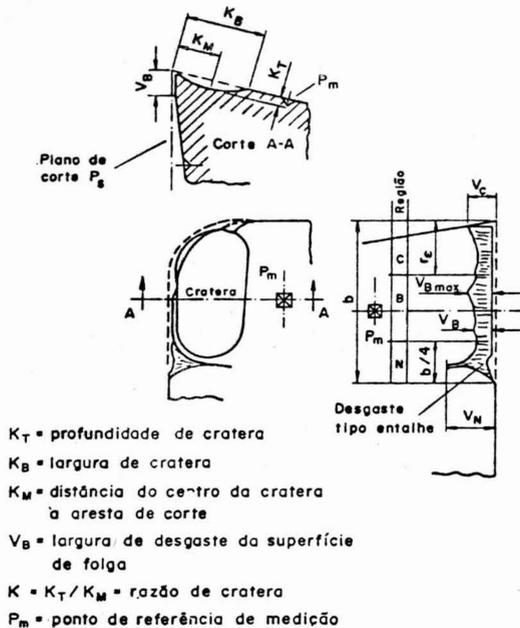


FIGURA 2 - Desgastes convencionais de uma ferramenta, segundo a Norma ISO 3685.

A Figura 3 fornece uma visão dos diferentes métodos empregados na medição dos desgastes. Vejamos os de maior interesse:

2.1 *Medição em oficina* - Trata-se de um método relativamente simples, no qual empregam-se lupa e relógio comparador (Figura 4). A lupa, com aumento de 8 vezes e escala em décimos de milímetro, permite medir o desgaste V_B da superfície de folga da ferramenta.

O relógio comparador, com leitura em centésimos de milímetro, ponta com raio de curvatura 0,2mm, suporte e alavanca de acionamento, permite medir o desgaste de cratera K_T . Os valores obtidos são aproximados, porém em certos casos permitem uma avaliação razoável dos desgastes.

MEDICÃO DOS DESGASTES DAS FERRAMENTAS DE USINAGEM

MÉTODOS DIRETOS

MEDICÃO EM OFICINA
 MEDICÃO EM LABORATÓRIO DE PESQUISA
 MEDICÃO POR FIBRAS ÓTICAS. OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO
 MEDICÃO ÓTICA EM OPERAÇÃO DE FRESAMENTO
 MEDICÃO EM TV INDUSTRIAL
 MEDICÃO ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DE SENSORES
 MEDICÃO POR MÉTODO RADIOATIVO
 MEDICÃO ATRAVÉS DA ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL DE DESGASTE
 MEDICÃO ATRAVÉS DA PESAGEM DA FERRAMENTA
 MEDICÃO DA VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DA FERRAMENTA

MÉTODOS INDIRETOS

MEDICÃO ATRAVÉS DO DESLOCAMENTO DA SUPERFÍCIE EM USINAGEM EM RELAÇÃO A FERRAMENTA
 MEDICÃO ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DA PEÇA
 MEDICÃO ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA
 MEDICÃO ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DA FORÇA DE USINAGEM
 MEDICÃO ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DE USINAGEM

FIGURA 3 - Métodos de medição do desgaste de ferramentas

2.2 *Medição em laboratório de pesquisa* - Neste caso a lupa é substituída por um *microscópio de medição* (aumento 50 a 100 vezes e mesa com avanço micrométrico); no lugar do relógio comparador emprega-se um *perfilômetro* ou um *rugosímetro registrador* para macro rugosidade.

2.3 *Medição por fibras óticas* - Permite a medição direta de V_B , na própria máquina ferramenta, de forma intermitente, durante a troca de peças [3]. Quando o sensor é posicionado em frente a região

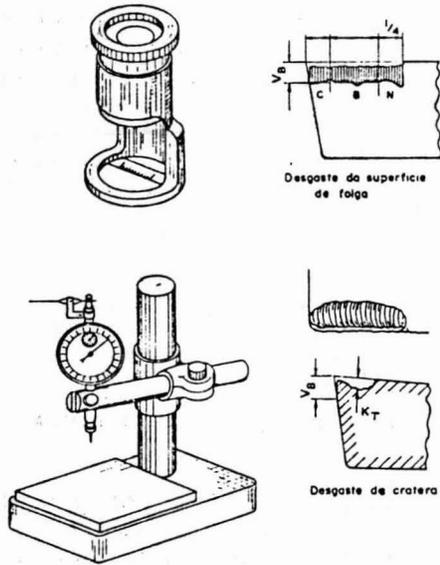


FIGURA 4 - Medição de desgaste através de lupa e re-
lógio comparador

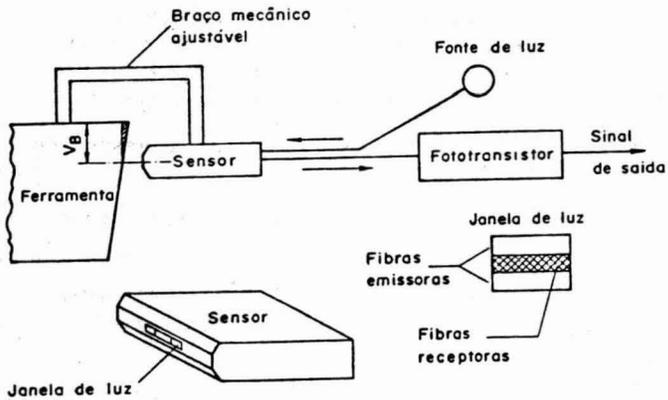


FIGURA 5 - Princípio de medição direta de desgaste a
través de fibras óticas

de desgaste (mais reflexiva), a energia luminosa proveniente de uma fonte de luz, é refletida e conduzida a um fototransistor. O sensor pode ser utilizado de duas maneiras:

- 1º- Emissão de um sinal de saída de alarme, quando o desgaste V_B atinge um valor prefixado.
- 2º- Fornecimento da medida V_B , através do movimento vertical de posicionamento do sensor, em frente a superfície de folga da ferramenta.

Através do sinal do fototransistor a máquina ferramenta para e aguarda o operador para ajustar ou trocar a ferramenta, ou a própria máquina executa esta função automaticamente.

O sensor pode ter a janela dividida em cinco compartimentos, possibilitando obter os valores mínimo, médio e máximo de V_B , ao longo da aresta de corte | 4 |.

2.4 *Medição ótica em operação de fresamento* - Permite uma medição do desgaste da superfície de folga do dente, através da sua iluminação pelo jato de luz, quando não está usinando a peça, porem sem parar a máquina. É necessário que o dente não se encontre em ação num intervalo de tempo superior ao correspondente a meia volta da fresa (Figura 6a) | 5 |.

A iluminação do dente é feita através de um estroboscópio, sincronizado com a rotação do eixo árvore da fresadora. Através de uma luneta observa-se a superfície gasta do dente, a qual é de certa forma nítida, tendo em vista a sua maior refletância em relação a superfície não gasta. Um sensor ótico fornece o sinal ao fototransistor, quando o dente está presente, tendo-se assim uma série de pulsos, cuja intensidade é proporcional ao valor de V_B . Permite detectar aumentos de desgaste da ordem de 0,003mm.

A Figura 6b apresenta uma variante do método; permite medir o desgaste da ferramenta em movimento e parada.

2.5 *Medição através da variação da resistência elétrica de sensores* - Trata-se de um método de medição contínua do desgaste V_B , através da variação da resistência elétrica de um sensor colado na superfície de folga da ferramenta (Figura 7). Com o aumento do desgaste, e conseqüente aumento do contato ferramenta-peça, tem-se uma redução progressiva da resistência elétrica do sensor | 6 |.

No preparo da ferramenta é aplicada na superfície de folga uma cama

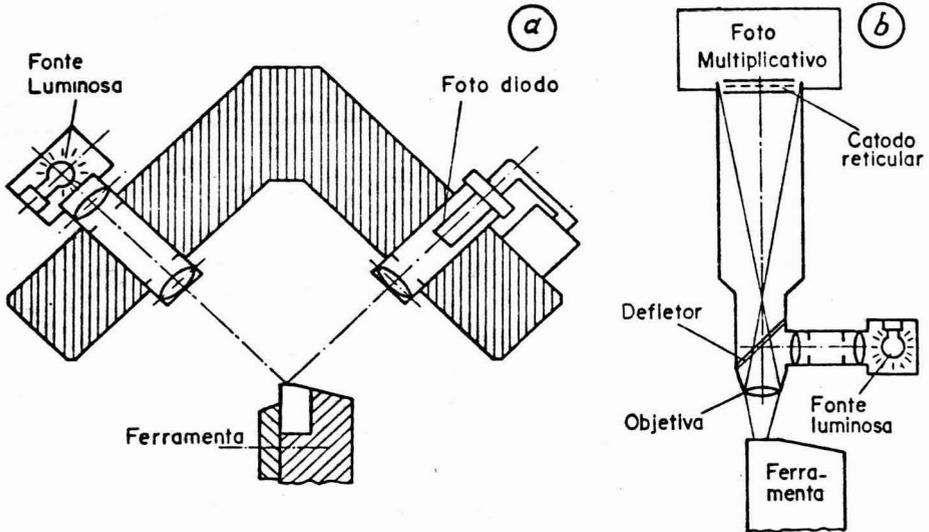


FIGURA 6 - Sistemas ótico-eletrônicos para a medida do desgaste de ferramentas

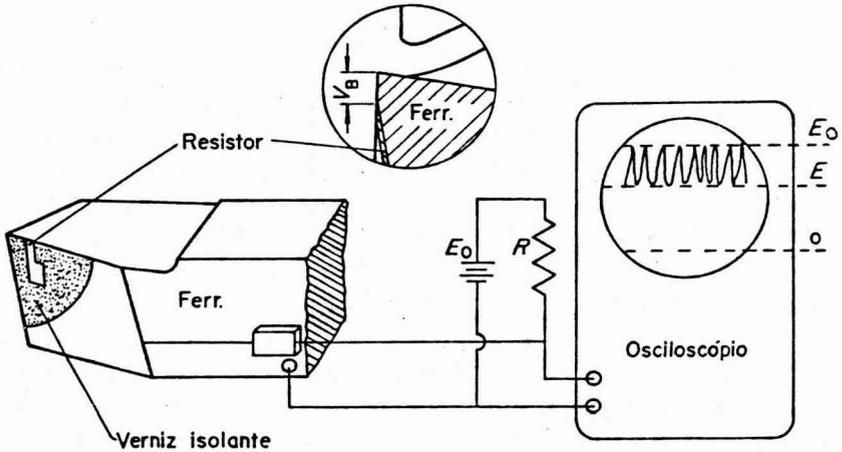


FIGURA 7 - Medição do desgaste através da variação da resistência elétrica de resistores colados em ferramentas

da de isolante resistente à temperatura, em seguida um transdutor resistivo (lamina de pó de grafite ou lamina metálica, obtida através da evaporação de cromo no vácuo). A Figura 7 apresenta ainda o circuito elétrico e o equipamento utilizado.

2.6 *Medição da variação das dimensões da ferramenta* - A Figura 8 apresenta o princípio de medição direta do desgaste da ferramenta, em processo, utilizado em máquinas-ferramentas CNC [7 e 8]. A ferramenta é deslocada em direção ao apalpador (leitor de posição de ferramenta), que se encontra em um ponto fora da região de trabalho ou é trazido a esta por ocasião da medição. A determinação automática da geometria da ferramenta é realizada e armazenada nas memórias de correção de ferramentas correspondentes, após a execução do ciclo. Com o desgaste V_B da ferramenta, haverá um deslocamento δ (portanto uma alteração da sua geometria), exigindo uma correção de posicionamento, realizado pela máquina, através CNC.

2.7 *Medição através do deslocamento da superfície em usinagem em relação a ferramenta* - O valor do desgaste V_B da ferramenta é medido indiretamente, através do deslocamento δ da superfície em usinagem da peça, em relação a ferramenta (Figura 9) [9]. Para tanto, utiliza-se a expressão $\delta = V_B \cdot \text{tg } \alpha$, onde α é o ângulo de folga da ferramenta. O valor de δ pode ser obtido através de apalpadores mecânicos, eletrônicos, pneumáticos e indutivos (sem contato).

2.8 *Medição através da variação das dimensões da peça* - A Figura 10 apresenta o sistema indireto de medição em processo, empregado em máquinas de comando numérico CNC. Após a usinagem de um certo número de peças, é realizado por um apalpador o controle das dimensões da peça. Através da variação das dimensões, obtém-se de forma indireta o desgaste da ferramenta V_B . Em seguida é corrigido o posicionamento da ferramenta, para compensar o desgaste [10]. O processo prossegue até a ferramenta perder a capacidade de corte, de acordo com um critério previamente estabelecido.

A Figura 11 apresenta um exemplo de torneamento com reajuste automático da ferramenta, de forma a garantir que o diâmetro da peça esteja sempre dentro das tolerâncias especificadas no desenho. Na parte superior da figura encontra-se a curva de desgaste V_B em função do tempo de usinagem. Para a operação em questão, foi imposta a condição que a rugosidade superficial da peça não deveria ultrapassar o

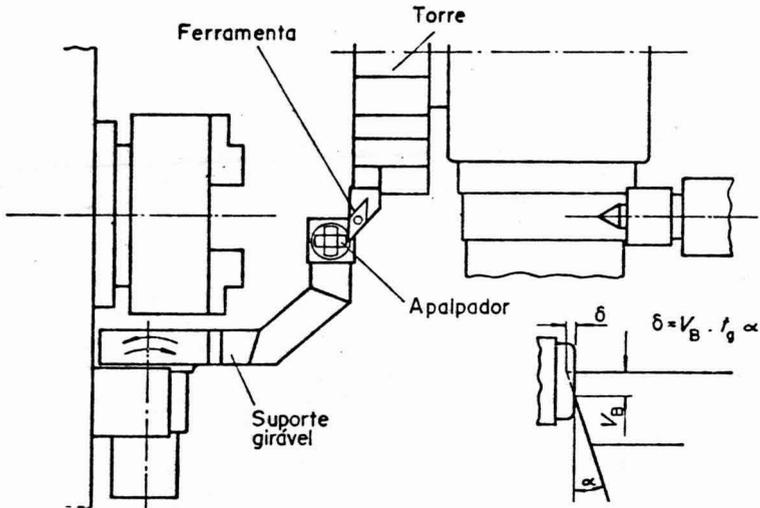


FIGURA 8 - Determinação do desgaste V_B através de a palpador em máquina ferramenta CNC.

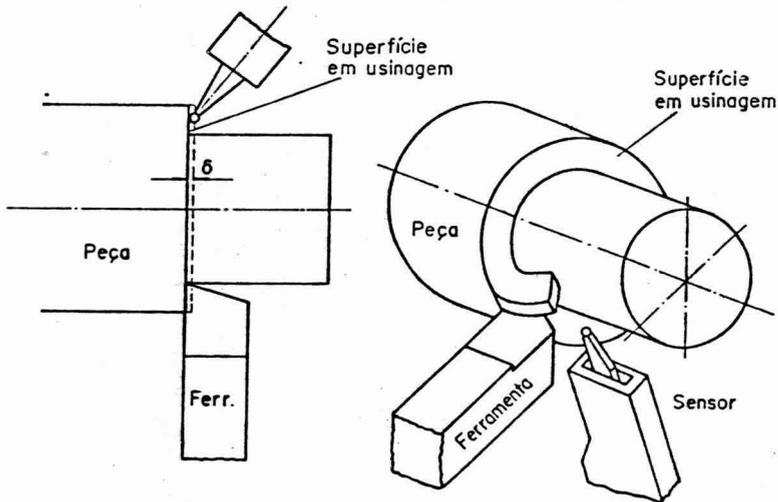


FIGURA 9 - Medição indireta do desgaste V_B da ferramenta, através do deslocamento δ da superfície em usinagem

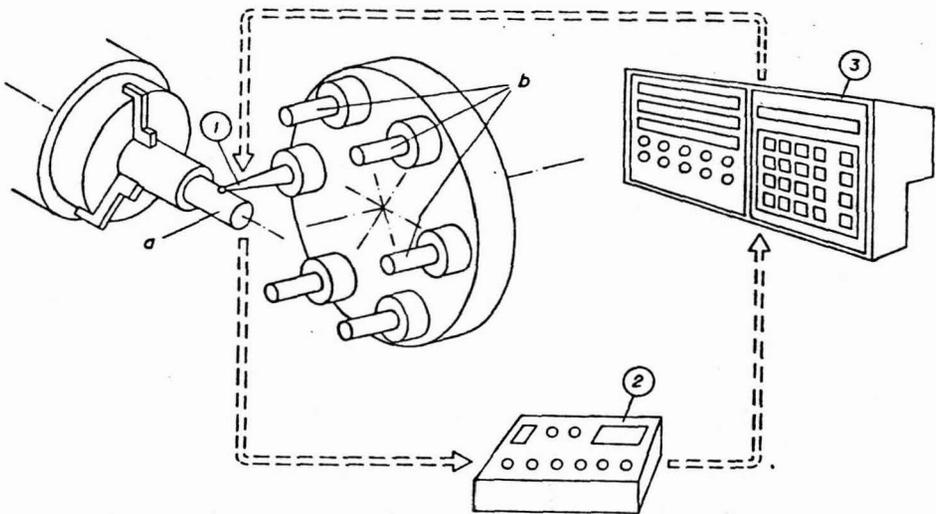


FIGURA 10 - Sistema indireto de medição de desgaste e posicionamento da ferramenta: 1- apalpador e transmissor de sinal; 2-interface; 3-CNC da máquina ferramenta; a- peça; b- ferramentas.

valor $R_a = 2,5\mu\text{m}$. Baseando-se neste dado, determinou-se a curva de vida da ferramenta, para o par ferramenta-peça e operação considerada. Através das condições de otimização (mínimo custo/máxima produção), calculou-se a velocidade de corte e a vida da ferramenta, a qual foi 24 minutos.

Devido ao desgaste V_B , haverá uma variação do diâmetro das peças usinadas (Figura 10 - curva de variação de ϕ sem correção). De acordo com a tolerância especificada no desenho, a variação permissível é $35\mu\text{m}$. Logo o sistema de reajuste de posicionamento da ferramenta deverá atuar de forma que os afastamentos estejam dentro de uma faixa de, por exemplo, $20\mu\text{m}$, para garantir com certa margem de erro, a tolerância desejada. Neste caso, os deslocamentos da ferramenta foram $-10\mu\text{m}$ (início de operação), $20\mu\text{m}$ (após 3 peças), $20\mu\text{m}$ (após 5 peças), $20\mu\text{m}$ (após 7 peças) e $20\mu\text{m}$ (após 7 peças). A máquina deverá trocar a ferramenta após 22 peças, para garantir o acabamento superficial.

O controle das medidas da peça pode ser efetuado no campo de traba

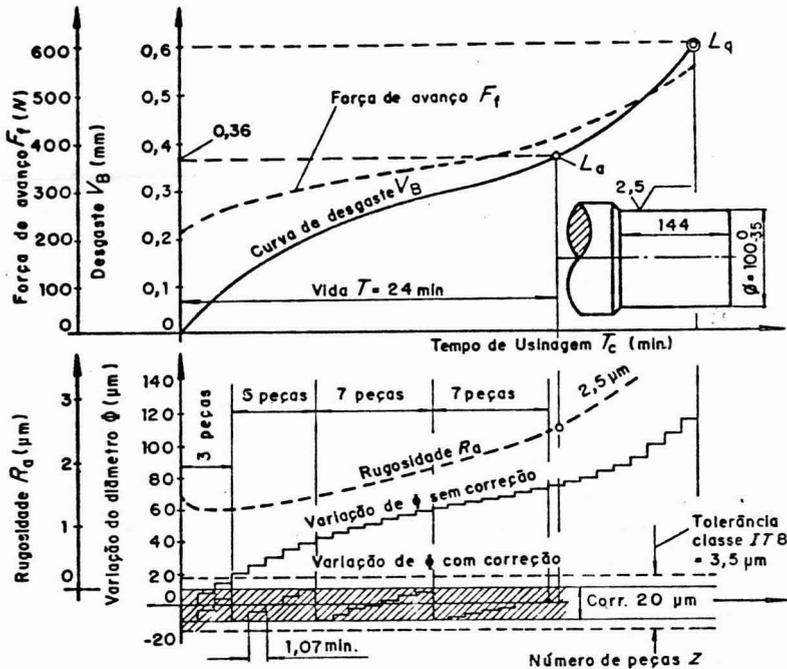


FIGURA 11 - Exemplo de reajuste automático da ferramenta, para manter as tolerâncias de usinagem

lho das ferramentas (*máquina CNC com sistema de medição interno*), ou fora da máquina ferramenta (*máquina CNC com sistema de medição externo*). Este segundo caso oferece maior precisão, porém o equipamento é mais dispendioso.

Comparando-se o método de medição direto do desgaste da ferramenta com o método indireto, este último baseia-se num princípio mais racional. Pois a exigência de grande precisão de medida reside na peça e não na ferramenta.

2.9 Medição através da variação da força de usinagem - Baseia-se no aumento progressivo da força de usinagem com o desgaste da ferramenta, possibilitando determinar de forma indireta a sua vida, na operação de desbaste. Das componentes da força de usinagem, as mais sensíveis ao desgaste são a força de profundidade P_p e de avanço P_a . Desta forma são instaladas células de carga nos mancais do eixo-árvo re da máquina-ferramenta (para medição da força radial e axial), ou no suporte da ferramenta [11 a 13].

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MECANISMO DO DESGASTE

O desgaste de uma ferramenta é o resultado da ação de vários fenômenos distintos, denominados *componentes do desgaste*. Dependendo do material da ferramenta, material da peça e das condições de usinagem, prevalece um ou outro dos componentes sobre os demais. A Figura 12 permite visualizar, de forma qualitativa, a ação dos diferentes componentes em função da temperatura ou velocidade de corte. Assim em baixas velocidades, o desgaste da ferramenta é relativamente elevado por causa da *aresta postiça de corte*. Em velocidades maiores, o desgaste é causado pelos fatores cuja intensidade depende da temperatura de corte, tais como *abrasão mecânica*, *difusão intermetálica* e *oxidação*.

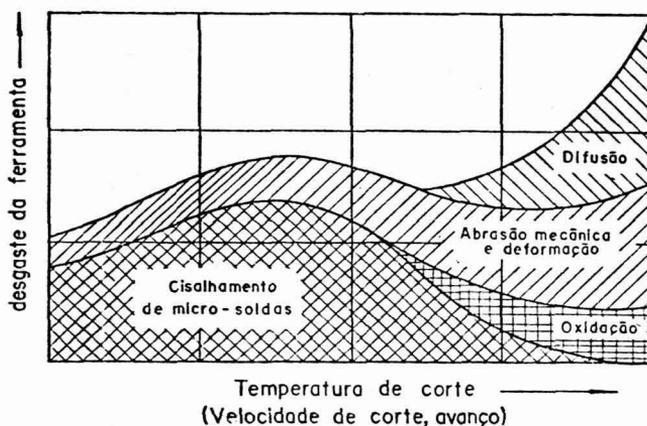


FIGURA 12 - Componentes do desgaste da ferramenta , para o caso de usinagem de aço com ferramenta de metal duro.

A assim chamada *aresta postiça de corte* é constituída de partículas de material usinado que, devido às condições reinantes de pressão e temperatura na formação do cavaco, aderem e acumulam na superfície de saída da ferramenta, formando *micro-soldas* (Figura 13). Em velocidades de corte baixas, a sua formação e conseqüente despreendimento, é grande. Na saída do material, parte adere ao cavaco e parte desliza entre a peça e a ferramenta, originando um desgaste acentuado na superfície de folga V_B . Com relação ao desgaste de cratera K_T ,

o seu valor nestas velocidades de corte é pequeno; a aresta postiça neste caso exerce uma ação protetora na superfície de saída da ferramenta.

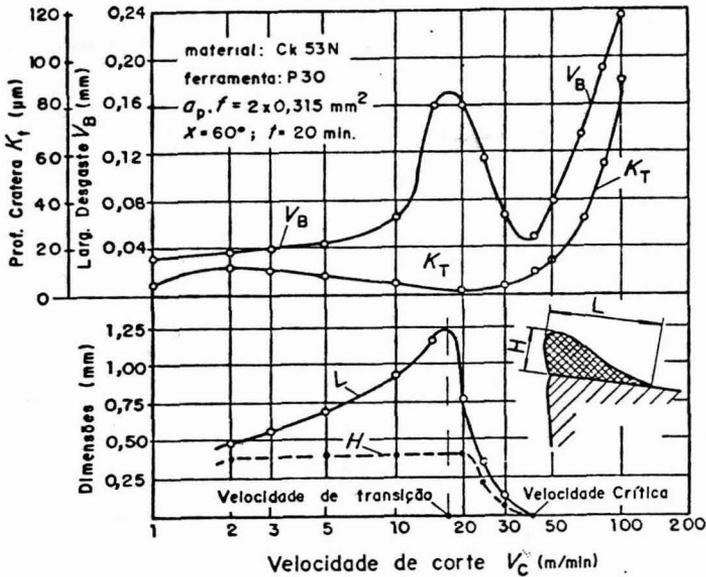


FIGURA 13 - Comparação entre os desgastes da ferramenta e dimensões da aresta postiça, para diferentes valores da velocidade de corte.

Com o aumento da velocidade de corte, haverá um aumento da temperatura, e conseqüentemente, um amolecimento da aresta postiça. Prevalece então os outros componentes do desgaste. Em velocidades de corte altas, praticamente não haverá mais aresta postiça, porém os desgastes de cratera são acentuados. Para diminuir estes desgastes, na usinagem de aços, acrescentam-se na composição do material das ferramentas de metal duro, TiC e TaC (pastilhas de metal duro da classe P). Em velocidades de corte elevadas, importante função desempenham os revestimentos de TiC Al_2O_3 , TiN, HFN, podendo formar colchoões duplos, triplos, etc. Neste caso a difusão intermetálica e a oxidação é reduzida significativamente ou mesmo eliminada. As pastilhas simples e mistas de material cerâmico contribuem mais para a diminuição dos desgastes, porém são sensíveis a vibrações do

conjunto máquina-ferramenta-peça.

4. CURVAS DE DESGASTE E VIDA DA FERRAMENTA, OBTIDAS EM LABORATÓRIOS DE USINAGEM

As curvas convencionais de desgaste da ferramenta são obtidas em ensaios de usinagem, medindo-se para diferentes tempos de corte, o desgaste da superfície de folga V_B e o desgaste da superfície de saída K_T . São válidas para um par ferramenta-peça e condições de usinagem' definidas: geometria da ferramenta, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, fluido de corte, além da rigidez do conjunto máquina-ferramenta-peça. A Figura 14 apresenta, por exemplo, as curvas' do desgaste V_B em função do tempo de usinagem, para diferentes velocidades de corte, obtidas em ensaios de torneamento.

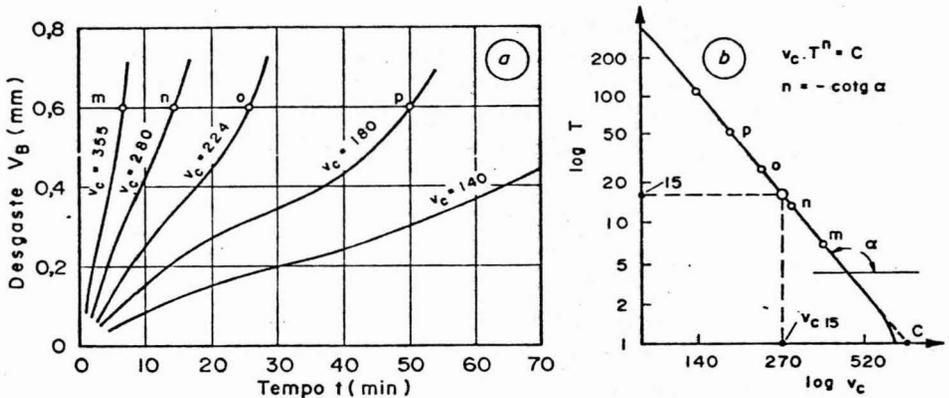


FIGURA 14 - Curvas de desgaste e de vida da ferramenta

Denomina-se *vida de uma ferramenta*, o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido | 1 |. Conforme foi dito anteriormente, para a determinação da perda da capacidade de corte da ferramenta, devemos, atendendo as exigências de operação (acabamento ou desbaste), e baseando-se nas curvas de desgaste, fixar os valores limites' de desgaste e de quebra.

Se nas curvas de desgaste, representadas na Figura 14a, fixarmos de acordo com um determinado critério de perda da capacidade de corte, o valor do desgaste limite, por exemplo $V_B = 0,6$ mm, teremos, para as velocidades de corte $v_c = 355, 280, 224$ e 180 m/min (pontos m, n, o, p)

e p), os tempos de usinagem $T = 7, 14, 26$ e 50 min, os quais serão as vidas da ferramenta, conforme definição anterior. A fixação do desgaste limite nos informa que o desgaste chegando a este valor, a ferramenta deve ser substituída para satisfazer as condições de acabamento ou desgaste.

Com os valores de v_c e T constrói-se a curva de vida $T-v$, para o desgaste $V_B = 0,6$ mm por exemplo (Figura 14b), nas condições de usinagem pré-fixadas, para o par ferramenta-peça. A representação gráfica desta função em coordenadas logarítmicas se aproxima de uma reta, permitindo escrever a equação:

$$v_c \cdot T^n = C \quad (1)$$

deduzida pela primeira vez por Taylor. De forma análoga pode-se determinar a equação de Taylor para o desgaste de cratera K_T , devendo-se construir inicialmente as curvas do desgaste da superfície de saída em função do tempo de usinagem.

A equação de Taylor fornece assim valores da vida T da ferramenta para diferentes velocidades de corte do par ferramenta-peça e uma determinada condição de usinagem. Para $T = 15$ min, tem-se a chamada velocidade de corte v_{c15} (Figura 6b), a qual se encontra nas tabelas dos fabricantes de ferramentas, para diferentes materiais, avanços e profundidades de corte. Com os valores de v_{c15} e n , tem-se o valor da constante C , ou seja, a equação de Taylor. Ela é de grande importância na determinação das condições econômicas de usinagem.

Na usinagem com pastilhas de material cerâmico, dada a sua elevada dureza e grande resistência à difusão e à abrasão, praticamente não há desgaste de cratera. Porém a vida poderá estar limitada ao aparecimento de pequenas quebras da aresta cortante, devendo este fator ser considerado no critério de perda da capacidade de corte.

Na usinagem com pastilhas de metal duro revestidas, frequentemente a vida é limitada pelo aparecimento de lascas; após o lascamento segue-se a ruptura da pastilha. A Figura 15a apresenta as curvas de desgaste de um ensaio de torneamento de aço ABNT 1055, com pastilhas de metal duro com revestimentos, realizado na UNICAMP [14]. No mesmo gráfico está representada a curva de quebra por lascamento, onde se observa que em velocidades de corte menores, os desgastes são limitados pelo aparecimento de lascas, provenientes principalmente por solicitações dinâmicas.

Baseando-se nestas curvas de desgaste e de lascamento, obtêm-se as curvas de vida (Figura 15b), que fornecem as equações:

Critério de desgaste
(desgaste constante)

$$V_B = 0,3\text{mm} \quad v_c \cdot T^{0,27} = 346$$

$$V_B = 0,7\text{mm} \quad v_c \cdot T^{0,23} = 413$$

Critério de lascamento
(desgaste variável)

$$v_c \cdot T^{0,77} = 1320 \quad (2)$$

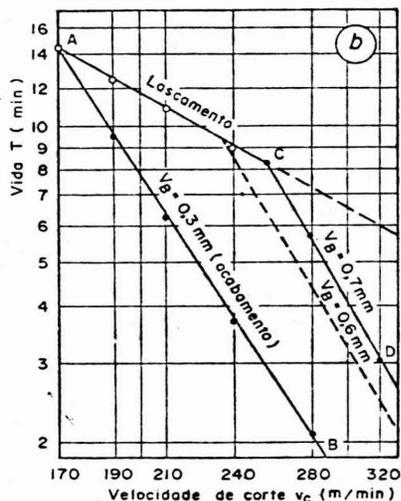
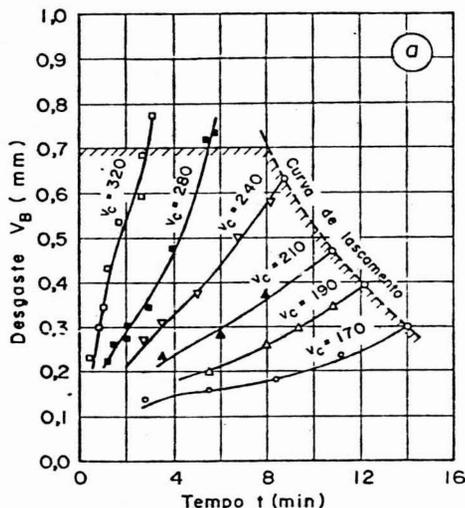


FIGURA 15 - Curvas de desgaste /quebra e de vida de pastilha de metal duro com revestimento, obtidas em laboratório.

No caso de lascamento, tendo em vista que nas pastilhas com revestimento o desgaste limite V_B varia com a velocidade de corte, tem-se uma nova concepção de curva de vida, isto é, curva de vida com desgaste variável, de grande interesse quando o desgaste não é limitado pela operação de acabamento. Isto possibilita um aproveitamento maior da pastilha, pois em velocidades maiores pode-se adotar desgastes maiores.

Se fixarmos como desgaste limite $V_B = 0,7\text{mm}$, teremos a curva de vida quebrada ACD, onde AC representa a curva para desgaste variável entre 0,3 a 0,7mm (velocidade de corte compreendida entre 170 e 260 m/min), e CD representa a curva para desgaste constante, 0,7mm, com

velocidade de corte variando entre 260 e 320 m/min. No caso de restrições quanto ao acabamento da peça (rugosidade superficial e tolerâncias geométricas), poderá ser utilizada a curva de vida AB. Quanto ao desgaste de cratera, os valores foram mínimos, não influenciando na vida da ferramenta.

Introduzindo-se na equação de Taylor (1) a influência do avanço f , profundidade de corte a_p e admitindo-se que o desgaste varie exponencialmente com o tempo de usinagem, chega-se as chamadas equações expandidas de Taylor | 15 e 16 |

$$v_c \cdot f^y \cdot a_p^z \cdot T^n = C \cdot v_B^m \quad (\text{para o desgaste } v_B) \quad (3)$$

$$v_c \cdot f^{y'} \cdot a_p^{z'} \cdot T^{n'} = C \cdot K_T^{m'} \quad (\text{para o desgaste } K_T) \quad (4)$$

Estas expressões admitem que os expoentes sejam independentes.

Porém a experiência não comprova este fato: variando-se f os expoentes n e z variam; variando-se a_p os expoentes y e n variam.

Apesar disso, estas equações são muito úteis, quando se quer adaptar tabelas de fabricantes de ferramentas a diferentes avanços.

Para o critério de lascamento, tem-se por analogia a equação:

$$v_c \cdot f^{y''} \cdot a_p^{z''} \cdot T^{n''} = C'' \quad (5)$$

Infelizmente os valores da velocidade de corte dependem ainda de uma série de fatores de difícil controle. As pesquisas mostram que, materiais especificados como iguais pelas normas técnicas (ABNT, DIN, AISI, SAE, etc), submetidos aos mesmos tratamentos térmicos, utilizados nas mesmas máquinas-ferramentas, podem gerar desgastes diferentes em ferramentas de metal duro, quando provenientes de correntes ou siderúrgicas diferentes | 1, 17 a 20 |. A rigidez do conjunto máquina-ferramenta-peça, a idade e estado de conservação da máquina, são outros fatores de difícil determinação, quanto a sua influência na vida da ferramenta. Tem-se constatado também influência do tipo de porta pastilha, sua fabricação e sua fixação na máquina-ferramenta. O formato da pastilha de simples ou dupla face, triangular ou quadrangular, a forma do quebra cavaco e a geometria influem significativamente no desgaste. O diâmetro da peça, influenciando sobre o grau de recalque e força de usinagem, também influe no desgaste. Por outro lado, os diferentes materiais de revestimento das pastilhas de metal duro, número de camadas de revestimento, espessura

das camadas, tipos de sub-extratos, originam também vidas diferentes. Tem-se constatado diferenças de comportamento do desgaste de pastilhas do mesmo tipo e fornecedor, porém provenientes de diferentes lotes de fabricação. A manutenção da homogeneidade das pastilhas de metal duro revestidas é outro problema que ainda não foi solucionado. Consequentemente a vida da ferramenta pode sofrer variações significativas, em certos casos na relação 1:8. Consequentemente as curvas de vida estão sujeitas a essas variações, tanto no coeficiente C como também expoente n da fórmula de Taylor (1). A diferença do valor n encontrado em catálogos e bancos de dados e o valor real, obtido experimentalmente, chega a 100% | 14 e 20|.

Desta forma os valores da velocidade de corte, fornecidos por diferentes fontes de informação, devem ser considerados apenas como índices recomendados, porém sujeitos a grandes alterações.

Quanto aos valores limites dos desgastes para diferentes ferramentas, a Tabela I fornece uma indicação.

TABELA I- Valores limites recomendáveis de desgastes para diferentes materiais das ferramentas

FERR	DESGASTE	OP. ACABM.	OP. DESBT.	FERR	DESGASTE	OP. ACABM.	OP. DESBT.
A.R.	V_B (mm)	0,2 - 0,3	0,35 - 1,0	M.C.	V_B (mm)	0,1 - 0,2	0,25 - 0,3
	V_{Bmx} (mm)	—	0,4 - 1,4	(Al_2O_3)	K_T (mm)	—	0,1
	K_T (mm)	—	0,1 - 0,3				
M.D.	V_B (mm)	0,1 - 0,25	0,3 - 0,5*	M.C.	V_B (mm)	0,1 - 0,2	0,25 - 0,5
	V_{Bmx} (mm)	—	0,5 - 0,8*	(Si_3N_4)	K_T (mm)	—	0,1 - 0,15
	K_T (mm)	—	0,1 - 0,2				
M.D.	V_B (mm)	0,1 - 0,25	0,3 - 0,5	AR= Aço Rápido; MD =Metal Duro;			
com	V_{Bmx} (mm)	—	0,4 - 0,7	MC= Material Cerâmico			
Revest	K_T (mm)	—	0,1 - 0,15	*) Para pastilhas soldadas, aumentar 30%			

5. DETERMINAÇÃO DIRETA DAS CURVAS DE VIDA NA EMPRESA.

Para a escolha das condições otimizadas de usinagem, torna-se necessário o conhecimento da curva de vida do par ferramenta-peça. Conforme mencionado anteriormente, há uma discrepância entre a vida da fer

ramenta, obtida através de informações externas, e a vida real da ferramenta em trabalho. Em se tratando de produção seriada, esta discrepância poderá resultar na escolha de condições inadequadas de usinagem, ocasionando um aumento de custo de fabricação. Desta forma, é recomendável que a curva de vida seja determinada com a própria peça em operação na Empresa. Este procedimento é viável em lotes maiores de 1000 peças, porém as peças não são danificadas durante ensaios.

Constatou-se que na maioria dos casos, a representação em papel logarítmico das curvas de vida se aproxima de uma reta. Tal fato simplifica sua construção gráfica (para outros casos é utilizado o método de reiteração). Para uma determinada operação, conta-se o número de peças usinadas Z_T , até a ferramenta perder a capacidade de corte, para diferentes velocidades de trabalho (geralmente 4). A figura 16 mostra a construção gráfica da curva de vida e as equações envolvidas. No eixo das abcissas poderão ser colocadas as velocidades de corte ou as rotações da máquina.

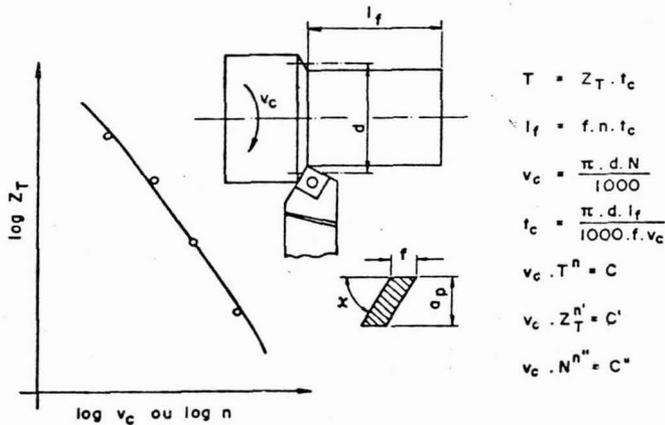


FIGURA 16 - Curva de vida da ferramenta, obtida em Empresas, e parâmetros relacionados

Quanto ao critério da perda da capacidade de corte da ferramenta, de vem ser considerados dois casos:

a) *Operação de acabamento*- São examinadas as peças usinadas' e medida a rugosidade superficial. Quando esta não for mais satisfa-

tória, a ferramenta completou sua vida, definindo desta forma o número de peças usinadas Z_T , para a velocidade de corte considerada. Em seguida repetem-se os ensaios para outras velocidades, a fim de se obter os diferentes pontos da curva de vida. Geralmente o valor limite do desgaste V_B para operação de acabamento é de 0,2 - 0,3mm.

b) *Operação de desbaste*- Normalmente é determinado o desgaste V_B da ferramenta, através de medição direta na máquina (lupa, fibras óticas, apalpador), ou indiretamente pelo aumento da força de usinagem (carga nos mancais, vibrações). A Tabela apresentada fornece informações do valor limite de V_B . Quando prevalece o lascamento, esta danificação definirá o número de peças por vida Z_T .

A Figura 17 apresenta as curvas de vida obtidas na usinagem em produção seriada de uma empresa de grande porte; para a faixa de velocidades entre 170 e 240 m/min, prevaleceu o lascamento da pastilha. O material da peça foi do mesmo lote do ensaio realizado no Laboratório do Departamento de Manufatura da FEC - UNICAMP, (Figura 15) [11]. A pastilha e porta pastilha utilizados foram também do mesmo tipo do ensaio de laboratório. Porém, a máquina ferramenta da empresa foi um torno CNC Index, potência do motor 22Kw, alimentado por barras, com variação contínua de velocidades. As condições de usinagem foram as mesmas. Através da curva $Z_T = f(v_c)$, determinou-se a curva convencional $T = f(v_c)$.

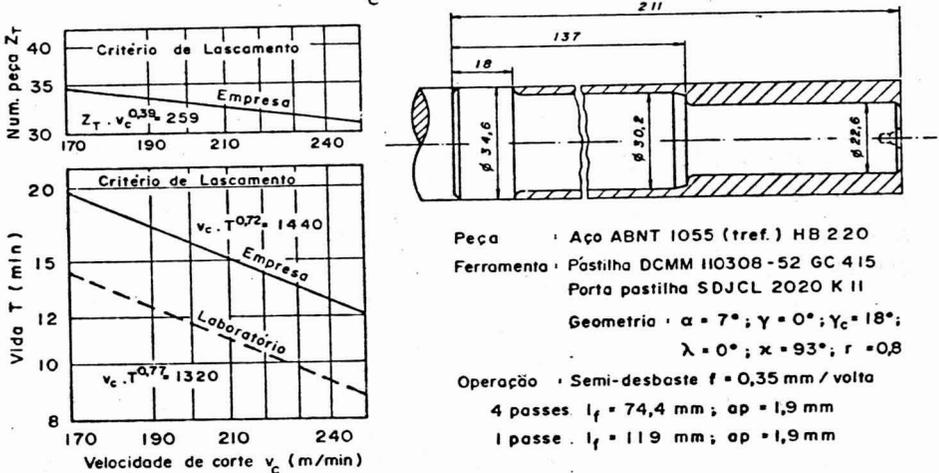


FIGURA 17 - Curva de vida da ferramenta obtida em Empresas de produção seriada

Comparando-se as curvas de vida obtidas na empresa com as de laboratório, constata-se que as inclinações foram praticamente as mesmas, porém as vidas da ferramenta na empresa foram maiores. Esta desigualdade é atribuída a uma diferença de rigidez das máquinas ferramentas utilizadas e uma provável diferença de lote de fornecimento das ferramentas.

6. CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS SOBRE A ESCOLHA DA VELOCIDADE DE CORTE

No estudo da otimização das condições de usinagem, tres grandezas de interesse devem ser consideradas: *velocidade de máxima produção*, *velocidade de mínimo custo* e *velocidade de máximo lucro*. Estas grandezas não são iguais, assim como os seus conceitos são diferentes. Se baseiam no fato que, com o aumento da velocidade de corte, diminuem o tempo de corte, e conseqüentemente os custos relativos à máquina e ao operador. Porém diminuem simultaneamente a vida da ferramenta, ocasionando um aumento do tempo relativo as suas trocas e um aumento relativo a parte de custo da ferramenta. Desta forma devem existir condições em que o tempo total de fabricação por peça seja mínimo, assim como condições em que o custo seja mínimo (Figura 18).

Define-se *velocidade de máxima produção* aquela na qual o tempo total de fabricação por peça é mínimo, o que corresponde a produção máxima. É dada pela equação (Figura 18a) |1|:

$$v_{cmxp} = C \left[\frac{n}{(1-n) \cdot t_f} \right]^n, \quad (6)$$

onde C e n são obtidos da fórmula de Taylor (1), para um determinado avanço, profundidade de corte e geometria da ferramenta.

A *velocidade de mínimo custo* é aquela na qual o custo total de usinagem por peça é mínimo. É dada pela equação (Figura 18b) |1|:

$$v_{cminc} = C \cdot \left[\frac{n \cdot (S_h + S_m)}{(1-n) \cdot 60 \cdot K_{fT} + t_f \cdot (S_h + S_m)} \right]^n \quad (7)$$

Para ferramentas com pastilha intercambiável

$$K_{fT} = \frac{K_p}{n_p} + \frac{K_{pp}}{n_{pp}}, \quad \text{onde} \quad (8)$$

K_p = custo da pastilha;

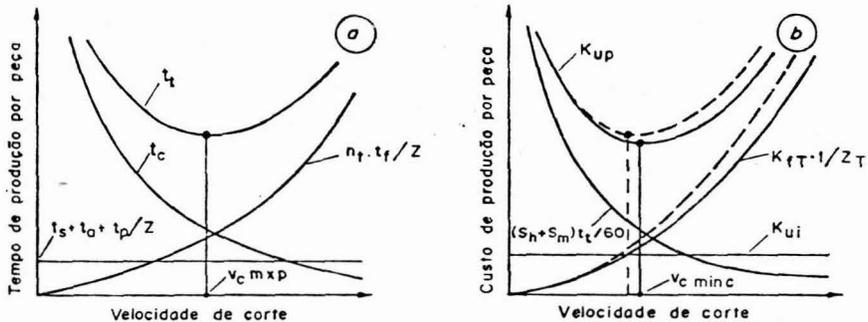


FIGURA 18- Determinação das condições econômicas de usinagem
 a) Velocidade de máxima produção ($v_{c\text{m}xp}$): t_t = tempo total de fabricação por peça; t_c = tempo de corte; t_f = tempo de troca da ferramenta; Z = número de peças do lote; n_f = número de trocas da ferramenta no lote; t_s = tempo de colocação e retirada da peça; t_a = tempo de aproximação e afastamento da ferramenta; t_p = tempo de preparo da máquina. b) Velocidade de mínimo custo ($v_{c\text{min}}$): K_{up} = custo de usinagem por peça; S_h = salário do operador + encargos; S_m = salário máquina; K_{fT} = custo da ferramenta por vida; Z_T = número de peças usinadas por vida; K_{ui} = custos indiretos de usinagem.

n_p = número de arestas de corte ativas da pastilha;

K_{pp} = custo do porta pastilha;

n_{pp} = vida média do porta pastilha, em quantidade de arestas de corte ativas, = 400 a 800 (depende do tipo de porta pastilha).

O campo de velocidades compreendido entre $v_{c\text{min}}$ e $v_{c\text{m}xp}$, é denominado *intervalo de máxima eficiência* (Figura 19). A velocidade de corte escolhida deverá se localizar neste intervalo, satisfazendo porém a condição de estar contida no campo de variação de velocidades permissíveis pela máquina e pela ferramenta.

A Figura 20 apresenta a determinação do intervalo de máxima eficiência, através de dados obtidos diretamente na empresa, para a operação indicada na Figura 17. Através da curva de vida (critério de lascamento), calcula-se a velocidade de mínimo custo $v_{c\text{min}}$ (7). Para a velocidade de máxima produção $v_{c\text{m}xp}$ (6), utilizou-se a curva de vida baseada no desgaste, pois empregando-se a curva para lasca-

mento, o valor de v_{cmaxp} estaria fora do campo de validade da curva de Taylor para lascamento. Sendo o diâmetro da peça relativamente pequeno (d variável de 23 a 35 mm), as rotações correspondentes são altas. Para a máquina-ferramenta e a operação considerada, a rotação foi limitada para um valor máximo 3.500 r.p.m., correspondendo a uma velocidade de corte máxima 250m/min. Logo o intervalo de máxima eficiência ficou entre as velocidades 217 e 250 m/min.

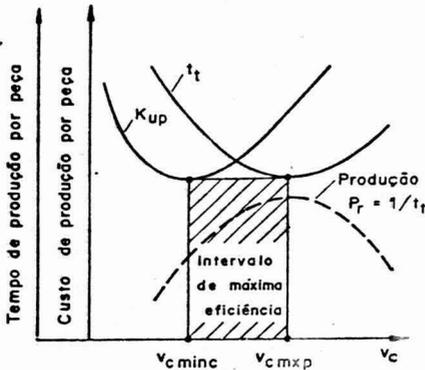
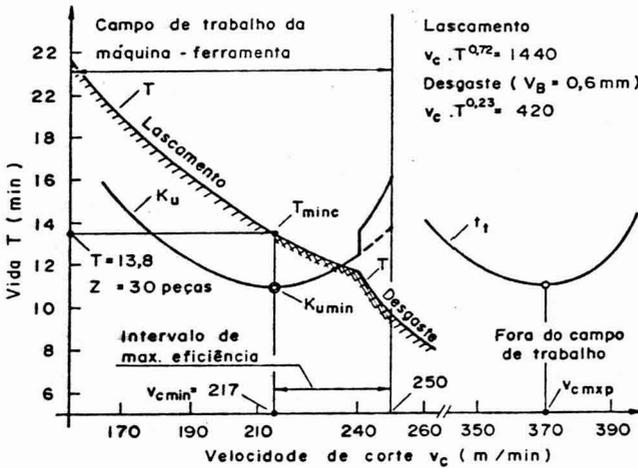


FIGURA 19- Intervalo de máxima eficiência.



Lascamento
 $v_c \cdot T^{0,72} = 1440$
 Desgaste ($V_B = 0,6mm$)
 $v_c \cdot T^{0,23} = 420$

Dados econômicos

- Pastilha:
 $K_p = NCz \$ 9,26, n_p = 2$
 Porta pastilha: $n_{pp} = 800$
 $K_{pp} = NCz \$ 111,06$
 $K_{fT} = K_p / n_p + K_{pp} / n_{pp}$
 $K_{fT} = NCz \$ 4,75 / vida$
 $S_h = NCz \$ 1,48 / hora$
 $S_m = NCz \$ 7,40 / hora$
 $v_{cmin} = 217 m/min$
 $v_{cmaxp} = 370 m/min$

FIGURA 20 - Determinação do intervalo de máxima eficiência para o exemplo considerado. Nota: Os preços indicados referem-se a janeiro de 1989.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - Ferraresi, D. "Fundamentos da Usinagem dos Metais". Editora Edgard Blücher, S. Paulo, 1970. [2] - ISO-3685-"Tool-life testing with single-point turning tools", 1977. [3] - Essel, K. "Entwicklung einer Optmierregulung für das Drehen". Dissertation T. H. Aachen, 1972. [4] - Giusti, F. & Santochi. "Development of a fibre optic sensor for in process measurement of tool flank wear". "Institut of Mechanical Technology, Pisa University:351-360, 1980 . [5] - Micheletti, G. F. et alli." In process tool wear sensors for cutting operation". CIRP Annals, vol. 25/2. 1976. [6] - Uehara, K. "New attempts for short time tool-life testing. CIRP Annals, vol. 23/23, 1973. [7] - Rocco, F. "Medição em processo na ferramentaria". Seminário Brasileiro de Tecnologia de Usinagem, SOBRACON, 1989. [8] - Romi-Mazak."Centro de Torneamento CNC . Cosmos. Publicação de Industrias Romi S/A, 1989.[9] - Takeyama, H. et alli. "Optmierende Steuerung bei Drehbearbeitungen". Werkstatt und Betrieb, 103 (9), pg. 627-637, 1970.[10] - Zeppelin, W. "Medição e correção automática das ferramentas em máquinas CNC. Traub GmbH. Publicação da Traubomatic Ind. Com., 1984.[11] -Traub. "Tornos automáticos CNC séries TNS 42/60. Publicação de Traubomatic Ind. e Com, 1988. [12] - Sandvik-Coramant."Tool Monitoring System. Publicação Sandvik 342.TMS: 904-Eng, 1987. [13] - Wolpert Werkstoffprüfmaschinen GmbH. "Axial lod sensors for rotating shafts. 3.01/AKS". Schaffhausen. (Suíça). [14] - Novaski, O. "Determinação das condições de usinagem através de parâmetros obtidos diretamente na empresa." Tese para obtenção do título de doutor. orientador Prof. Dr. Dino Ferraresi, 1989. [15] - Gilbert et alli. "Analyse der Standzeitgleichungen". Industrie Anzeiger, 94(5): 92-93, 1972. [16] - Barrow, G. "Tool life equations and machining economics." Proceedings of the 12th. J.M.T.D.R.C.: 481-493, 1971. [17] - Ferraresi, D. "Otimização das condições de usinagem em uma empresa de produção seriada". 1º Simposio Brasileiro sobre Tecnologia de Usinagem, SOBRACON: 14.01-14.22, 1989. [18] - Schaumann, R. "Streuwertuntersuchungen der Zerspanbarkeit von Stahlwerkstoffen". Der Maschinenmarkt. Wurzburg, 43 (62 : 1-16, 1956. [19] - Zielonkowski, W. "Die Auswirkung Oxydischer Einschlüsse in Stahlwerkstoffen auf den Verschleiss von Hartmetall-Dreerwerkzeugen". Maschinenmarkt. Wursburg, 62:19-31, 1962. [20] - Kegg, R. L. "Selection of cutting speeds based on uncertain data". MTDR: 459-498, 1971. [21] - Ferraresi, D. "Aspectos económicos da Usinagem dos Metais". Apostilas do curso Pós-graduação. Faculdade de Engenharia de Campinas- UNICAMP, 1987.

