

2.2 Avarias, Desgaste e Mecanismos de Desgaste de Ferramentas no Fresamento

Nos processos de usinagem convencional existem duas causas principais para determinar a substituição de uma ferramenta de corte:

- a) A avaria, que acontece de maneira repentina e inesperada, é quando ocorre uma quebra, lascamento ou trinca. As avarias são mais comuns nos processos de corte interrompido, onde as ferramentas estão submetidas a exigências extremas, principalmente com relação a choques térmicos e mecânicos.
- b) quando ocorre o desgaste, que pode atingir níveis elevados e comprometer a qualidade do processo de usinagem. Pode ocorrer tanto no corte interrompido como no contínuo. Este desgaste ocorre de maneira progressiva, implicando na perda de material tanto da superfície de saída como da superfície de folga.

2.2.1 Desgaste de ferramenta

Uma ferramenta de corte, mesmo possuindo tenacidade suficiente para resistir as variações cíclicas de carregamento e temperatura que poderiam lhe impor uma avaria, não estará livre de uma perda progressiva de material. Esta perda progressiva ou desgaste fará com que a ferramenta aos poucos comprometa o processo. Portanto, sua reafiação ou substituição irá se tornar necessário.

Na literatura são encontrados nomenclaturas variadas e tratamentos diferentes para os mecanismos de desgaste de ferramentas, Trent e Wright (2000), por exemplo, definem seis mecanismos ou processos de desgaste: cisalhamento plástico a altas temperaturas, deformação sob tensões de compressão, desgaste por difusão, desgaste por aderência e arrastamento (*attrition*), desgaste abrasivo e desgaste de entalhe. Estes mecanismos podem ser esquematizados conforme mostrado na Fig. 2.22.

O mecanismo de deformação plástica superficial por cisalhamento ocorre devido às altas temperaturas desenvolvidas na ponta da ferramenta. Com o aumento da temperatura a resistência ao escoamento diminui, fazendo com que as tensões cisalhantes sejam suficientes para causar deformações plásticas. Estas deformações podem arrancar material da superfície da ferramenta e originar uma cratera, conforme o primeiro quadro da Fig. 2.22. Trent e Wright (2000) preferiram classificar este tipo de deformação como mecanismo, apesar de ser um processo de desgaste da ferramenta.

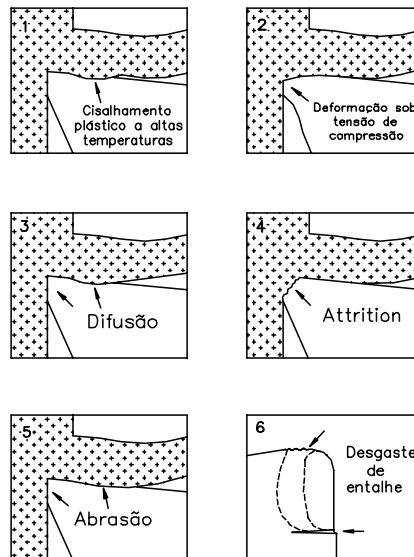


Figura 2.22 – Mecanismos e processos que podem promover o desgaste de uma ferramenta de corte (Trent; Wright, 2000).

A deformação da aresta de corte sob altas tensões de compressão é um mecanismo de desgaste que ocorre quando a ferramenta está submetida à altas velocidade de corte e avanço e também quando se usina materiais de elevada dureza. Este mecanismo é mais comum em ferramentas de aço-rápido e metal duro. Este também é mais um processo de desgaste do que propriamente um mecanismo.

O desgaste difusivo é um mecanismo que envolve transferência de átomos entre os materiais da ferramenta e da peça. Para que este processo ocorra, deve haver elevadas temperaturas na superfície de saída e também na superfície de folga. A existência de uma zona de aderência (ou de fluxo) na interface cavaco ferramenta é o que determina a existência também da difusão (Trent; Wright, 2000). Como na usinagem o tempo de contato entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco é muito curto, não haveria possibilidade de ocorrer difusão. Porém, a zona de aderência garante este contato mais prolongado, pois dentro dela há um gradiente de velocidades de fluxo do material do cavaco, que parte do zero na interface cavaco ferramenta. Um eventual problema de saturação poderia ocorrer na zona de aderência, obstruindo a difusão, se esta zona não fosse constantemente renovada durante o corte devido as altas taxas de deformação.

O mecanismo de desgaste por aderência e arrastamento (*attrition*) ocorre geralmente em baixas velocidades de corte ou em situações em que o fluxo de material sobre a superfície de saída se torna irregular. As situações que favorecem o aparecimento do *attrition* são quando

há a formação da aresta postiça de corte (APC), o corte interrompido, profundidade de corte variável, vibração no processo, dentre outros. Estas situações impõem fortes ligações na região de contato entre a ferramenta e o cavaco. Se a resistência local do material não for suficiente, fragmentos microscópicos da ferramenta serão arrancados e arrastados junto com o fluxo de material adjacente à interface, promovendo o desgaste. As superfícies desgastadas por *attrition* têm uma aparência rugosa se comparada com o desgaste por difusão, pois ela se processa em nível dos grãos.

O desgaste abrasivo é particularmente importante quando se usina materiais com elevadas concentrações de partículas de alta dureza relativa, que podem ser inclusões não metálicas tais como carbonetos, óxidos, nitretos e silicatos. Estas partículas, ao entrarem em contato com as superfícies da ferramenta durante a usinagem, retiram material por microsulcamento, microcorte e microlascamento. O desgaste abrasivo também pode ser provocado por partículas duras presentes na própria ferramenta. Estas partículas são fragmentos arrancados por *attrition* ou podem ser óxidos formados na região de escorregamento na interface cavaco-ferramenta. Quando o desgaste é provocado por partículas presentes no material da peça, é considerado abrasão a dois corpos. Quando o desgaste é proveniente de partículas que se fragmentaram da própria ferramenta, é considerado como abrasão a três corpos. Alguns aspectos como a concentração, dureza e tamanho das partículas tem significativa influência nos níveis de desgaste abrasivo.

Finalmente, apesar do desgaste de entalhe ser uma forma de desgaste, é considerado como um mecanismo devido à falta de unanimidade quanto a suas causas. Sua ocorrência se verifica principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas (ligas de níquel, titânio, cobalto e aços inoxidáveis).

Algumas das prováveis causas do entalhe citadas por Shaw (1984) podem ser:

- . Presença de uma camada abrasiva de óxidos na superfície a ser usinada;
- . Concentrações de tensão;
- . Trincas térmicas devido a gradiente de temperaturas;
- . Presença de rebarbas na aresta da superfície a ser usinada;
- . Presença de material encruado na superfície previamente usinada;
- . Fluxo da aresta postiça de corte paralelo à aresta de corte;
- . Fadiga do material da ferramenta causada pela flutuação de força na superfície livre que acompanha os pequenos movimentos laterais da aresta do cavaco.

A Figura 2.23 apresenta as principais áreas de desgaste de uma ferramenta e mostra as três formas de desgaste:

- a - desgaste de cratera;
- b - desgaste de flanco;
- c - desgaste de entalhe.

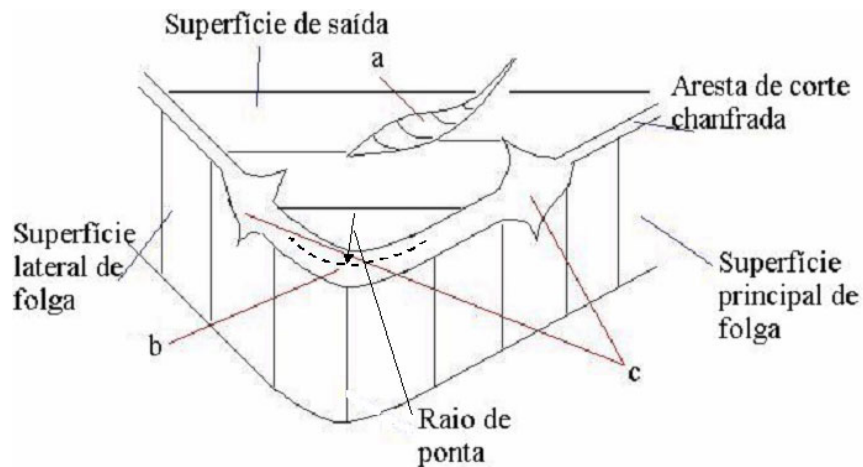


Figura 2.23 – Identificação das formas de desgaste em uma ferramenta de corte (Dearnley; Trent, 1982).

A Figura 2.24 apresenta exemplos de ferramentas desgastadas onde se pode identificar claramente as três formas básicas de desgaste definidas anteriormente. Na Figura 2.24a, a seta indica a área onde há a formação do desgaste de flanco. Normalmente, esta forma de desgaste é a principal na avaliação da vida de uma ferramenta de corte. No desgaste de flanco há uma perda do ângulo de folga, promovendo um aumento dos níveis de contato entre a ferramenta e a peça e conseqüentemente, crescimento nos níveis de atrito e todos os problemas por ele causados. Na Figura 2.24b, a seta indica a área onde há a formação do desgaste de cratera. Este tipo de desgaste está associado ao corte onde há formação de elevadas temperaturas na interface cavaco ferramenta, ocorrendo devido a uma combinação dos mecanismos de desgaste difusão e adesão (Aspinwall; Chen, 1978). Na Figura 2.24c, a seta indica a área onde há a formação do desgaste de entalhe. O desgaste de entalhe, como já comentado nos mecanismos de desgastes, ocorre principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas. Normalmente ocorre na aresta principal de corte, mas também pode aparecer na aresta secundária de corte com dimensões mais reduzidas. Pode ocorrer tanto em ferramentas de metal duro como em ferramentas de material cerâmico, que

são as mais indicadas para a usinagem de ligas de níquel, sofrendo forte influência das condições de corte.

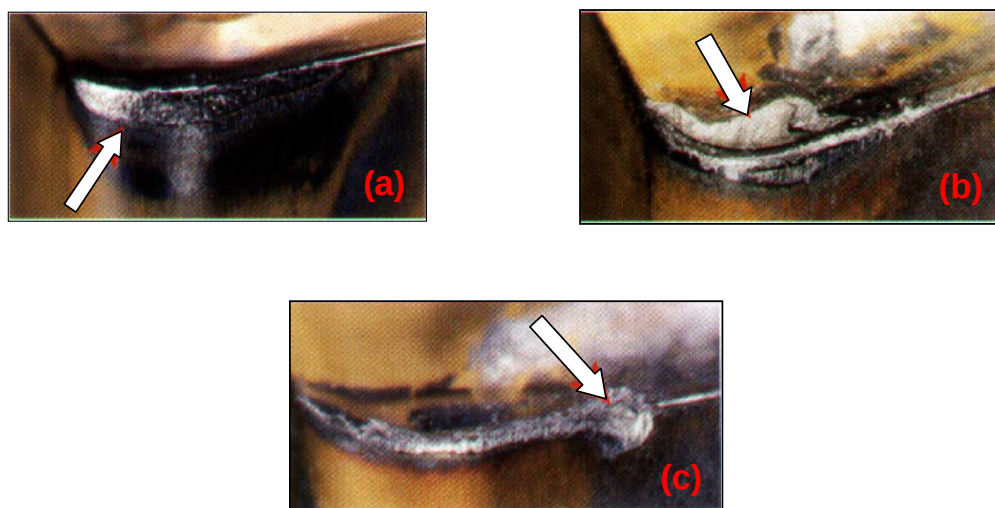


Figura 2.24 – Fotografias das três formas de desgaste. a) desgaste de flanco; b) desgaste de cratera; c) desgaste de entalhe, (Sandvik, 1999).

Ferramentas de metal duro revestidas são normalmente as ferramentas mais empregadas no fresamento frontal. Este tipo de ferramentas quando revestidas com TiC como última camada, são mais resistentes ao desgaste de flanco, pois são mais resistentes à abrasão. Se estas possuem o TiN como última camada, possuirão maior resistência ao desgaste de cratera pois possuem menores coeficientes de atrito, diminuindo assim os níveis de temperatura e dificultando a difusão (Chattopadhyay; Chattopadhyay, 1982).

Quando se avalia a vida de uma ferramenta, é necessário quantificar o nível de desgaste. Quando isto é possível deve-se seguir os parâmetros mostrados na Fig. 2.25 que são os principais utilizados para quantificar o desgaste de uma ferramenta de usinagem (Norma ISO 3685, 1977).

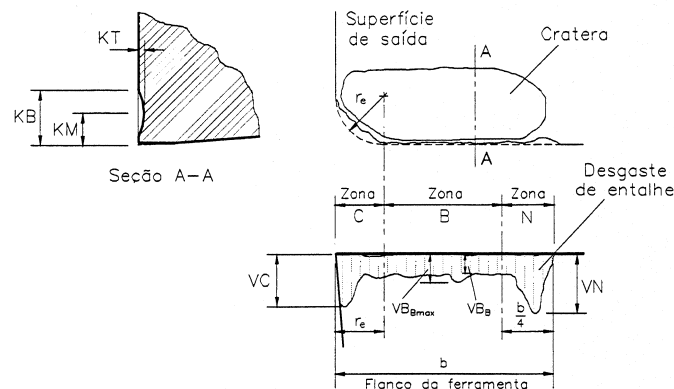


Figura 2.25 – Principais parâmetros utilizados para quantificar os três tipos de desgaste (Norma ISO 3685, 1997).

Onde:

KT = Profundidade da cratera;

VB_B = Desgaste de flanco médio;

$VB_{Bmáx}$ = Desgaste de flanco máximo;

VB_N = Desgaste de entalhe.

A evolução do desgaste da ferramenta até atingir o final de vida segue, na maioria das vezes, um padrão de comportamento como o mostrado na Fig. 2.26. A figura apresenta três estágios claros no desenvolvimento do desgaste na ferramenta. Segundo Machado e da Silva (2004), no primeiro trecho (estágio I), a ferramenta apresenta um rápido crescimento do desgaste, que é o resultado de uma acomodação tribológica do sistema. No final deste estágio há uma inflexão da curva que mostra uma diminuição da taxa de desgaste. Esta inflexão que ocorre no primeiro estágio irá se refletir no segundo trecho (estágio II), em que há uma acomodação da evolução do desgaste, que cresce muito lentamente e a uma taxa praticamente constante. O último trecho (estágio III) começará quando no estágio anterior houver uma nova inflexão na curva, indicando que a taxa de desgaste está aumentando. Neste estágio, a ferramenta atinge rapidamente o seu final de vida. Se neste estágio a ferramenta não for reafiada ou substituída, poderá rapidamente falhar, pois sua geometria de corte está comprometida devido ao desgaste, o que acarreta grandes níveis de atrito, geração de calor e elevadas tensões.

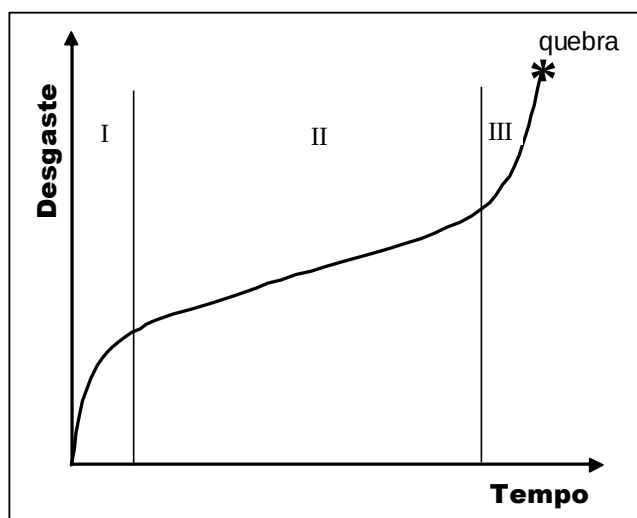


Figura 2.26 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta ao longo de sua vida (Lenz et all, 1978; Ber, Kaldor, 1982; Harris et all, 2003).

2.2.2 Avarias na ferramenta no processo de fresamento

O fresamento é um processo de corte interrompido sujeito a um ciclo de elevadas variações térmicas e mecânicas, e por isto mais exposto a falhas como quebras, trincas e lascamento. As flutuações de temperatura podem provocar trincas nas ferramentas que são provocadas pelas variações de tensões devido as dilatações do material da ferramenta. Os choques mecânicos podem ocorrer tanto durante a entrada da ferramenta na peça, início do ciclo ativo, quanto na saída da peça, início do ciclo inativo. A seguir são apresentados alguns comentários a respeito destas avarias típicas do fresamento.

Avarias de Origem Térmica:

Durante o processo de fresamento, cada dente da ferramenta experimenta uma fase ativa e uma fase inativa. Durante a fase ativa, o dente estará efetivamente cortando, o que faz com que este seja submetido a uma grande geração de calor e, portanto, altas temperaturas. Durante a fase inativa, este dente estará em vazio, não cortando material, fazendo com que haja perda de calor para o ambiente rapidamente. Então, cada dente da fresa estará submetido a uma grande variação cíclica de temperatura durante o processo de corte interrompido.

A Figura 2.27 mostra como ocorre a variação cíclica da temperatura no fresamento. A curva **a** representa o ciclo de aquecimento de uma ferramenta durante o corte contínuo. A curva **b** representa o ciclo de resfriamento de uma ferramenta. Alguns autores como Bathia (1986), Wang (1969) e Palmai (1987) realizaram investigações que mostram como o ciclo de temperatura flutua ciclicamente no fresamento. Esta variação é indicada pela curva **c** da figura.

Esta variação cíclica da temperatura na aresta da ferramenta pode levar a uma modificação, também cíclica, na distribuição de tensões, o que pode ocasionar o surgimento de trincas de origem térmica.

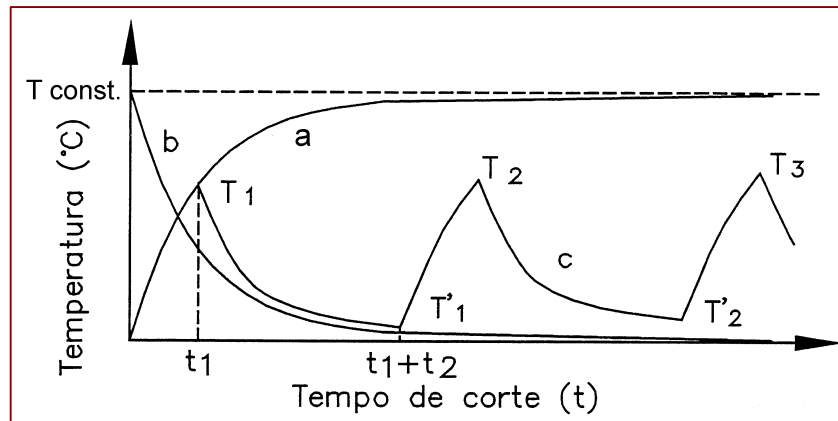


Figura 2.27 – Variação cíclica da temperatura de corte na operação de fresamento (Palmai, 1987).

Ferraresi (1977) explica este fenômeno da seguinte maneira: a Figura 2.28a apresenta a curva de distribuição da temperatura em relação à profundidade “x”, a partir do ponto de contato cavaco-ferramenta. A camada superficial, a uma temperatura bastante alta, se dilata. Porém, as camadas subseqüentes a temperaturas inferiores, terão uma dilatação bem menor. Como conseqüência, tais camadas impedirão o processamento de uma dilatação maior na camada superficial. Desta forma, origina-se na camada superficial tensões de compressão (Fig. 2.28b). Em conseqüência disto, haverá a determinada distância “x” da superfícies de contato, tensões de tração. Num instante de tempo seguinte, com a variação da temperatura de corte, isto é, com o resfriamento da camada de contato (devido ao tempo inativo), essa camada estará submetida à tração (processo inverso ao do tempo ativo), enquanto que as camadas subseqüentes passarão a ser solicitadas à compressão, e, em função do perfil da temperatura internamente, passa novamente à tensão de tração, à partir de uma determinada distância da superfície de saída. (figs. 2.28c e 2.28d).

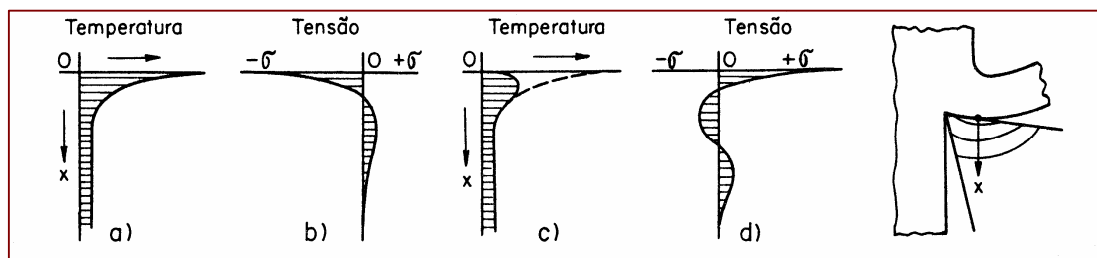


Figura 2.28 – Distribuição de temperatura e tensões em uma operação de fresamento com pastilha de metal duro (Ferraresi, 1987).

Em ferramentas de metal duro essas flutuações cíclicas favorecem o aparecimento de trincas de origem térmica. Essas trincas posteriormente, por um processo de erosão, se transformarão em sulcos, conhecidos como sulcos em forma de pente ou *combcracks*, na literatura inglesa (Machado; da Silva, 2004).

De Melo (2001) pesquisou a formação das trincas de origem térmica no fresamento com insertos de metal duro. Segundo o autor, as duas fases que compõem a matriz do metal duro (uma cerâmica à base de carbonetos e uma metálica à base de cobalto) possuem coeficientes de expansão térmica bastante diferente, o que gera elevadas tensões na interface do grão de carboneto com a matriz metálica durante os ciclos de aquecimento e resfriamento. Esta diferença de expansão irá gerar um deslocamento nas interfaces provocando a nucleação de uma trinca. Porém, se a força de coesão é maior do que as tensões geradas e estas são suficientes para provocar deformação plástica na matriz metálica próximo à interface, poderá haver acúmulo de defeitos (acúmulo de discordâncias) nesta região a cada ciclo, até que este material deformado já não mais suporte às tensões geradas durante a usinagem e se rompa, provocando a nucleação de uma trinca, o que caracteriza um processo de fadiga. Este processo de fadiga, até se chegar à abertura da trinca, será mais rápido ou mais lento dependendo da diferença de temperatura a cada ciclo (ΔT).

Outro questionamento levantado por este autor é o motivo das trincas surgirem igualmente espaçadas ao longo da aresta. Sua explicação é a seguinte: “O surgimento da primeira trinca térmica se dará no local mais propício para este evento, ou seja, o que apresentar menor resistência mecânica às tensões geradas. O aparecimento de uma trinca térmica em um determinado local da aresta de corte da ferramenta funcionará como um aliviador de tensões nas regiões próximas a esta, restando, portanto, que outras trincas sejam formadas em regiões mais afastadas. Isto poderia explicar o fato das trincas térmicas aparecerem com um espaçamento aproximadamente constante sobre a aresta de corte das ferramentas. Estas trincas irão continuar aparecendo até uma quantidade limite capaz de aliviar

qualquer tensão gerada na superfície de saída, restando, desta forma, somente a evolução destas à sulcos provocados por ação de diversos mecanismos de desgaste”.

Na Figura 2.29, é mostrada uma imagem obtida a partir de microscópio eletrônico de varredura (MEV) da aresta de uma ferramenta de metal duro classe ISO P45 com a formação da trincas que precedem a formação dos sulcos.

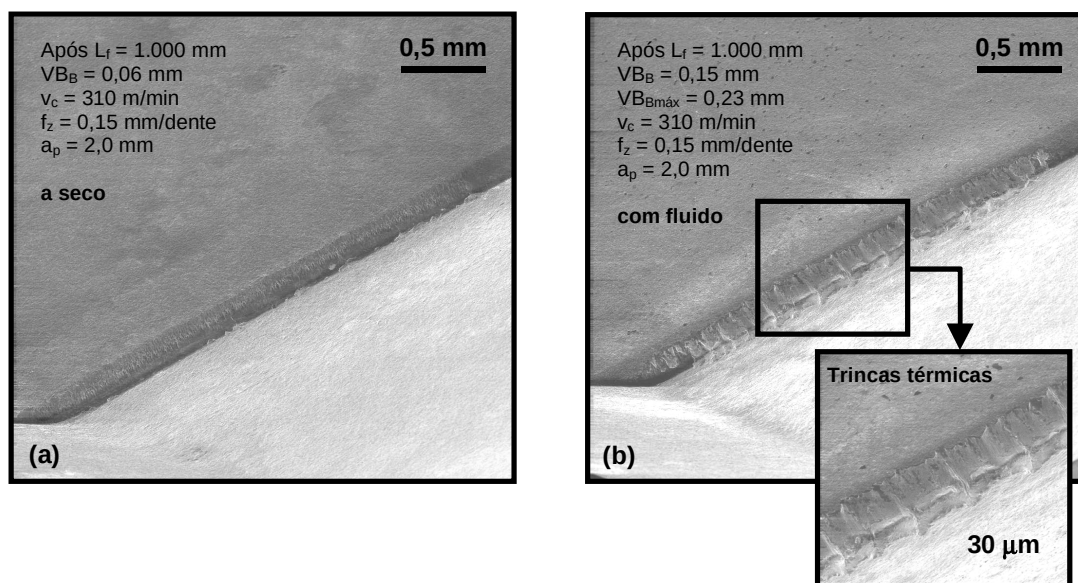


Figura 2.29 – Aresta de corte de uma ferramenta P45 ensaiada através de um percurso de avanço de 1.000 mm: (a) a seco; (b) com fluido de corte (de Melo, 2001).

Os sulcos aparecem perpendiculares à aresta de corte, desenvolvendo-se tanto na superfície de saída como na superfície de folga. Estes sulcos acabam fragilizando a aresta, facilitando o aparecimento de trincas de origem mecânica. As trincas de origem mecânica aparecem paralelas à aresta e a união destas duas formas de trincas promove a remoção de partes da aresta, prejudicando o bom andamento do processo e comprometendo a vida da ferramenta. A Figura 2.30 representa os sulcos em forma de pente.

Normalmente, o número de trincas se estabiliza pois o processo de fadiga é aliviado com o aparecimento das primeiras trincas. As cavidades das trincas absorvem o processo de dilatação e retração das superfícies da ferramenta, de tal forma que as tensões geradas não são suficientes para promover abertura de nova fissura (Ferraresi, 1977).

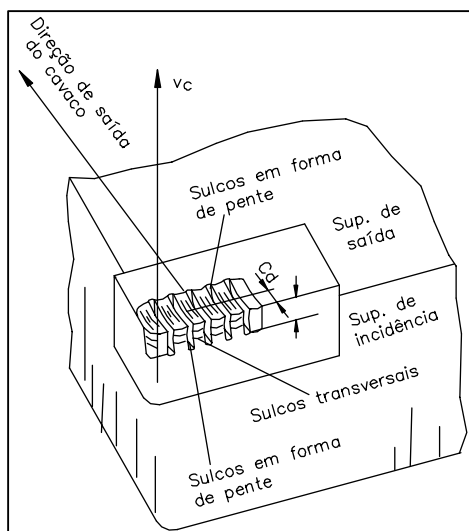


Figura 2.30 – Sulcos desenvolvidos na forma de pente (Ferraresi, 1977).

Avárias de origem mecânica:

As trincas de origem mecânica acontecem normalmente paralelas à aresta de corte, podendo aparecer tanto na superfície de saída como na superfície de folga. Elas ocorrem devido aos choques mecânicos tanto na entrada da ferramenta quanto na sua saída da peça. Estas trincas, aliadas às de origem térmica, podem resultar em lascamentos que comprometem a ferramenta.

A ferramenta, no corte interrompido, estará submetida a um ciclo de carregamento que varia dependendo da fase (ativa ou inativa) que esta se encontra. Durante a fase inativa, sobre a ferramenta não há nenhuma carga atuando. Porém, ao entrar na peça, um impacto irá ocorrer e a ferramenta estará submetida a um carregamento compressivo. O número de ciclos de carregamento que irá acontecer na ferramenta depende do número de rotações por minuto empregadas no corte.

Condições de corte mais severas favorecem o aparecimento de trincas de origem mecânica. Condições como maiores profundidades de corte, avanços e resistência da peça usinada aumentam o carregamento, acelerando o processo de fadiga e avaria da ferramenta de corte (Machado; da Silva, 2004).

Pekelharing (1978) foi um dos autores que mais investigou sobre problemas de lascamento excessivo de ferramentas de metal duro durante sua saída da peça no corte interrompido. Segundo este autor, quando a ferramenta se aproxima da saída da peça, promove uma rotação no plano de cisalhamento primário, tornando-o negativo, resultando na ocorrência do fenômeno, conhecido como “formação do pé” (*foot forming*), pela semelhança desse com um pé humano. A Figura 2.31 mostra a seqüência de formação desse fenômeno,

que é peculiar a determinadas geometrias de saída da peça. Observa-se que à medida que a ferramenta se aproxima da borda de saída da peça, o plano de cisalhamento, que inicialmente era positivo vai diminuindo, passando para valores negativos. Isto acontece porque ao se aproximar da borda de saída da peça, a ferramenta, com seu esforço de corte, não tem a restrição da resistência do material em condições normais. Devido à falta de apoio mecânico, a borda se deforma no sentido de cisalhamento negativo, até a ruptura, antes de atingir a borda, promovendo a formação do pé. Esta mudança do plano de cisalhamento primário, tornando-se negativo, gera uma variação das tensões compressivas para tensões trativas podendo resultar na quebra da cunha cortante. A separação desta forma de cavaco no exemplo da figura acontece quando ainda faltava 0,21mm para a ferramenta atingir a borda lateral da peça. Este problema pode ser solucionado se a ferramenta tiver tenacidade suficiente para resistir às inversões de tensão impostas à ponta da ferramenta.

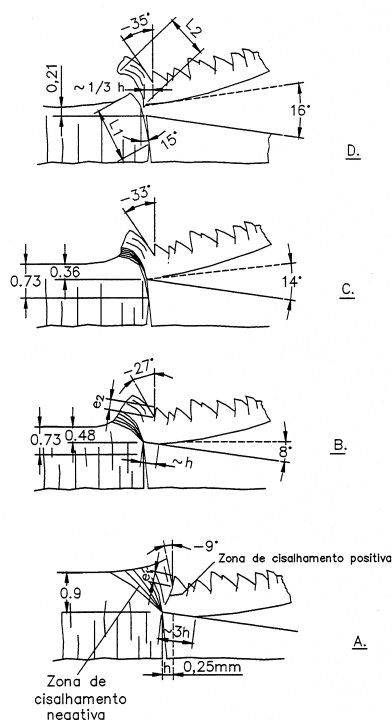


Figura 2.31 – Esquema representando a “formação do pé” (Pekelharing, 1978).

Ainda segundo Pekelharing (1978), em uma fresa com número par de dentes, este tipo de avaria irá ocorrer apenas naqueles que tem posição ímpar na fresa. Isto ocorre porque após a passagem do primeiro dente, a borda de saída da peça vai estar chanfrada, aliviando a saída e evitando este problema para o segundo dente. O dente seguinte já não encontrará esta

situação favorável e o ciclo então se repetirá. Quando a fresa possuir um número ímpar de dentes, após algumas rotações da ferramenta todos os dentes podem falhar.

2.2.3 – Vida da ferramenta e critérios de final de vida

Ferraresi (1977) define a vida de uma ferramenta como sendo o tempo em que a mesma efetivamente trabalha, sem perder sua capacidade de corte até que um critério de vida previamente estabelecido seja atingido.

Se o critério de final de vida for atingido e a ferramenta não for reafiada ou trocada, algumas das seguintes consequências podem ocorrer:

- . Acabamento superficial não satisfatório, o que é crítico em operações de acabamento;
- . Impossibilidade de atingir tolerâncias dimensionais requeridas em projeto;
- . Aumento excessivo nas forças de usinagem;
- . Elevadas temperaturas na região de corte;
- . Pode haver a quebra da aresta.

A norma ISO 8688-1 (1989), indicada para o fresamento frontal, recomenda alguns valores (pelo critério Normal) para estabelecer o final de vida de ferramentas independente de seu material:

- . Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,35 \text{ mm}$;
- . Desgaste de flanco máximo, $VB_{B_{\max}} = 1,0 \text{ mm}$;
- . Profundidade máxima da cratera, $KT = 0,1 \text{ mm}$;
- . Falha catastrófica.

Outras formas de expressar o final de vida, que normalmente são de maior praticidade para a indústria, podem ser estabelecidos, porém normalmente contêm implícitos na sua determinação os critérios citados acima:

- . Tempo efetivo de trabalho;
- . Percurso de corte;
- . Percurso de avanço;
- . Volume de material removido;
- . Número de peças produzidas;
- . Rugosidade da superfície gerada;
- . Vibração do sistema máquina-ferramenta, ferramenta e peça.

O percurso de corte (L_c) estabelecido através da vida da ferramenta (T) em minutos pode ser expresso pela Eq. (2.7) (Diniz; Marcondes; Coppini, 2001):

$$L_C = V_C.T/1000 \quad (\text{km}) \quad (2.7)$$

onde:

V_C = velocidade de corte.

O percurso de avanço (L_f) para uma vida da ferramenta (T) em minutos pode ser expresso pela Eq. (2.8) (Diniz; Marcondes; Coppini, 2001):

$$L_f = f.n.T \quad (2.8)$$

onde:

n = número de rotações em rpm

f = avanço em mm/rot.

2.3 Monitoramento do Processo de Usinagem

Uma maneira de se determinar o momento exato da troca de uma ferramenta de corte é adotar um critério de final de vida para esta, tais como a rugosidade da superfície usinada, valor máximo ou médio para o desgaste de flanco ($VB_{Bmáx}$ e VB_B), valor da profundidade (KT) para o desgaste de cratera, nível de vibração do conjunto, potência consumida, distância percorrida pela ferramenta durante o corte, dentre outros. A medição da evolução da intensidade destes valores torna-se então necessária. Para a operação de fresamento, a média dos valores de vida de uma ferramenta apresenta uma grande dispersão, o que torna necessário a utilização de valores mais baixos para as médias. Isto faz com que muitas ferramentas não sejam totalmente aproveitadas, gerando prejuízos com excessivas trocas de ferramentas, além do aumento do tempo de máquina parada.

Por outro lado, se for necessário adotar o procedimento de parada da produção para retirada da ferramenta e/ou peça com o objetivo de medir o parâmetro adotado para acompanhar o desgaste, este pode ser demorado, dispendioso e de baixa produtividade. Além disto, estes métodos não são capazes de prever ou detectar instantaneamente quebra ou lascamento da aresta de corte que são, geralmente, processos catastróficos e repentinos, fazendo com que aumente o número de peças recusadas na produção.

O problema principal quando o responsável pela troca da ferramenta é o operador é que ele nem sempre é capaz de identificar o momento exato em que se deve realizar a troca da ferramenta, levando-se em conta a qualidade da peça que está sendo produzida e o limite de aproveitamento da vida da ferramenta. Além disto, a introdução de controles automatizados nas máquinas-ferramenta tornou o monitoramento perceptivo extremamente difícil, além da impossibilidade física de se observar a região de corte, mesmo quando se fala em prevenção contra falhas repentinas e inesperadas da ferramenta (Dolinsk; Kopac, 1999).

Tendo a automação e otimização dos processos de fabricação uma importante função na melhoria da produtividade, o monitoramento e sistemas de controle dos processos se tornaram essenciais para a fabricação. Além disso, é um importante requisito no desenvolvimento de procedimentos de usinagem completamente automatizados a instalação de adequados sistemas de monitoramento *on-line* (Dolinsk; Kopac, 1999).

Dentre as principais funções de um sistema de monitoramento e controle do processo estão: estabelecer a velocidade de corte e o avanço, aproximação, afastamento, posicionamento e controle do percurso da ferramenta de corte. A maioria destas funções citadas é possível de realizar com o atual estágio de desenvolvimento tecnológico das máquinas CNC. Porém, certas funções tais como a inspeção do estado da ferramenta e da

peça e também a determinação do momento de sua troca ainda continuam nas mãos do operador e dependem de sua experiência.

O monitoramento pode ser realizado através de uma medição direta. Como algumas grandezas que são medidas diretamente, podem-se citar: análise de partículas e radioatividade, medidas ópticas, resistência elétrica da junção peça/ferramenta, alterações dimensionais da peça, distância ferramenta-peça. Este método não apresenta interferência de outros parâmetros. A Tabela 2.1 apresenta os processos de monitoramento direto e suas principais características.

Tabela 2.1 – Processos de monitoramento direto (Dan; Mathew, 1990).

Método	Processo	Medida	Sensor
Direto	Óptico	Forma ou posição da ponta da ferramenta	Câmera de TV
	Análise de partículas e radioatividade	Tamanho de partículas ou radioatividade	Espectrofotômetro Medidores de radioatividade
	Resistência elétrica da junção peça/ferramenta	Variação da resistência da junção	Voltímetro
	Alterações dimensionais da peça	Dimensão da peça	Micrômetros e transdutores eletromagnéticos

Em alguns casos, porém, não é possível o monitoramento da grandeza diretamente, sendo necessário a medição indireta, onde um outro parâmetro é medido e relacionado com o parâmetro estudado para a tomada de decisão. Alguns exemplos de medições indiretas são: força de corte para relacionar com a potência de corte, som para relacionar com desgaste, vibração para relacionar com a rugosidade, temperatura de corte para relacionar com o desgaste da ferramenta e emissão acústica para relacionar com rugosidade ou desgaste. A principal dificuldade do método indireto de monitoramento é estabelecer uma relação entre o que está sendo medido e o sinal adquirido, além da eliminação da interferência dos ruídos que vem junto com o sinal. Rangwala e Dornfeld (1991) afirmam que a maioria dos métodos indiretos tem baixa sensibilidade aos efeitos micro-mecânicos da deformação e do processo de atrito que ocorrem na zona de cisalhamento.

As principais características desejáveis de um bom sistema de monitoramento são (Dornfeld, 1988):

- . Confiabilidade;
- . Baixo custo;
- . Simplicidade;
- . Suportar ambiente industrial;
- . Não ser influenciado por ruídos externos;
- . O parâmetro medido deve ser dependente somente do que se quer monitorar;
- . Baixo tempo de resposta;
- . Ser pouco intrusivo, o sensor não deve interferir na operação de usinagem.

Na tentativa de conseguir um completo domínio do processo de usinagem, estudos realizados por Tlustý e Andrews (1983) classificaram como prioridades na atuação dos sensores de monitoramento do estado da ferramenta os seguintes fatores:

- . Verificar geometria, qualidade, orientação e dimensões das peças, compensando efeitos produzidos pelo desgaste na ferramenta e deformações dimensionais de origem térmica, tanto na peça como na ferramenta;
- . Identificar a ferramenta e fixar os parâmetros, verificação do estado de desgaste e detecção da quebra da ferramenta e sua troca;
- . Monitorar o correto funcionamento de elementos da máquina-ferramenta, tais como rolamento, guias e acionamento de avanço.

Jetly (1984) acrescenta ainda algumas características que sensores dedicados ao monitoramento devem ter para que a sua tarefa seja bem sucedida:

- . Fornecer um sinal de baixo ruído e confiável;
- . Ser suficientemente sensíveis para que consigam acompanhar a evolução do desgaste;
- . Ser robustos, baratos e seguros para operarem em ambiente de chão de fábrica;
- . Fornecer um sinal que possa ser conectado ao sistema de controle da máquina-ferramenta;
- . Ter uma resposta rápida o suficiente para que o sistema de controle tome decisões antes que eventos como quebras ocorram;
- . Ser flexíveis o suficiente para que possam ser aplicados na maioria dos processos de usinagem.

A Tabela 2.2, criada por Dornfeld (1992), apresenta o nível de atividades de pesquisa em alguns dos métodos empregados no monitoramento em usinagem e seus fenômenos no início da década de noventa, tendo mudado muito pouco nos últimos anos.

Tabela 2.2 – Atividades de pesquisa em diversos métodos de monitoramento da usinagem (Dornfeld, 1992).

método \ aplicação	diagnósticos	força/torque	potência	trepidação (chatter)	acabamento superficial	formação do cavaco	desgaste da ferram.	fratura da ferramenta
emissão acústica								
força								
resistência elétrica								
potência								
corrente do motor								
vibração								
ultrasom								
temperatura								
visual/ótico								
acústica								

baixo Nível de atividade em pesquisas alto

Du et al (1995) definiram uma clara distinção entre monitoramento e diagnósticos. Segundo estes autores, o monitoramento é a detecção de falhas enquanto que o diagnóstico é a sua localização. Ainda segundo estes autores, o monitoramento pode ser dividido em três partes principais: sensoriamento, processamento e tomada de decisão. Destas duas últimas partes do monitoramento, podem ser citados: reconhecimento de padrões, sistemas nebulosos ou “Fuzzy”, árvores de decisões ou redes neurais artificiais.

Os métodos de monitoramento podem ser divididos em duas categorias (Du et al., 1995):

1. Métodos de monitoramento baseados em modelos (que consideram o sinal como a saída de um sistema dinâmico na forma de uma série temporal). Este método apresenta a limitação de não identificar se uma mudança no sinal que vem do sensor é proveniente de alguma deterioração no processo (que é o esperado) ou se está relacionada a alguma mudança nas condições ou parâmetros de processo.
2. Métodos de monitoramento baseados em características apropriadas. Estas características podem ser representadas no domínio do tempo e/ou frequências (média, variância, simetria (skewness), achatamento (curtose), fator de crista e potência em uma banda específica de frequências). Este método é também subdividido em duas fases: aprendizado (treinamento) e classificação.

Segundo Dolinsk e Kopac (1999), os passos seguintes ao monitoramento frequentemente referem-se à aplicação de métodos de processamento de sinal e técnicas de inteligência artificial para facilitar na identificação de correlações entre os parâmetros de usinagem, os sinais adquiridos e os parâmetros pesquisados. Portanto, o sistema de monitoramento consiste na aquisição dos sinais dos parâmetros do processo, aplicar técnicas

de processamento destes sinais e aplicar um algoritmo que irá estimar as condições do processo, num processo similar ao mostrado na Fig. 2.32.

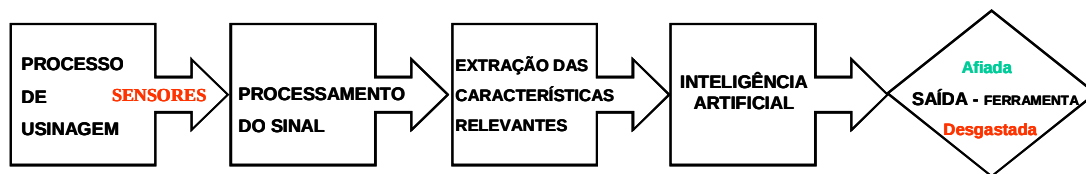


Figura 2.32 – Estrutura do sistema de processamento e tomada de decisão com relação ao estado de uma ferramenta (Dornfeld, 1990).

No projeto e construção de um sistema de monitoramento, a compreensão dos mecanismos de desgaste na ponta da ferramenta é um pré-requisito essencial para que se possa relacionar o fenômeno do desgaste com os sinais adquiridos. Vários esforços têm sido feitos no sentido de se desenvolver sistemas de aquisição realmente confiáveis, mas a ausência de sucesso pode-se dever à insuficiência de conhecimentos quanto aos mecanismos de desgaste nos novos materiais de ferramentas utilizados atualmente. Ferramentas de *cermet* e ferramentas que possuem revestimento com várias camadas, especialmente quando utilizadas em velocidades elevadas, não compartilham as mesmas explicações sobre os complexos processos de desgaste a qual estão submetidas ferramentas de materiais de emprego mais comum. Apesar de todas as instruções e experiências disponíveis, está óbvio que não se pode usar estas ferramentas com toda eficiência. Por isto, pesquisas no campo de desgaste de ferramentas ainda são de grande interesse (Dolinsk; Kopac, 1999).

Mesmo com muitas pesquisas sendo realizadas no sentido de desenvolver um sistema de monitoramento confiável, a utilização destes sistemas na indústria continua deficiente. Muitos fatores contribuem para isto, tais como a utilização de sistemas baseados em modelos matemáticos, que requerem enormes quantidades de dados empíricos (Dimla, 2000). Os sinais adquiridos geralmente são de natureza estocástica e não estacionário, difíceis de modelar. Esta natureza aleatória dos sinais pode ser atribuída à não-homogeneidade do material da peça, sensibilidade aos parâmetros de corte e a relação não linear destes parâmetros com o desgaste da ferramenta. Estes fatores podem levar a uma interpretação incorreta do processo, limitando a precisão e o controle da usinagem (Dimla, 2000).

A seguir será mostrado os principais métodos de monitoramentos indiretos aplicados à usinagem.

2.3.1 Monitoramento da usinagem através da temperatura

Grandes quantidades de calor são geradas na usinagem. A energia mecânica do processo é transformada em calor durante o corte através da deformação plástica no cavaco e o atrito entre a ferramenta e a peça. As altas temperaturas resultantes nas imediações da aresta de corte têm influência direta nas taxas e nos mecanismos de desgaste, no atrito entre o cavaco e a ferramenta e também entre a ferramenta e a superfície de folga (Dimla, 2000).

A Figura 2.33 mostra a distribuição das fontes de calor em um processo de usinagem ortogonal. O calor é gerado nas regiões de cisalhamento primário e secundário, resultado das intensas deformações plásticas que ali ocorrem. Outras fontes de calor são a interface ferramenta-peça e também na interface cavaco-ferramenta, gerados pelo intenso atrito.

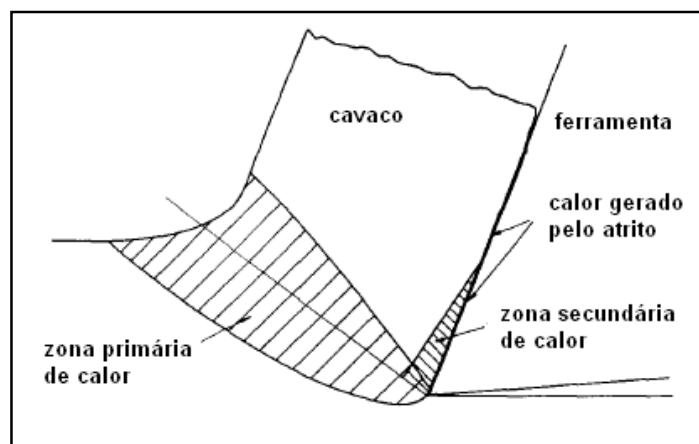


Figura 2.33 - Fontes de calor na usinagem (Tay, 1993).

A remoção do calor gerado é feita através do cavaco, da peça e da ferramenta. Como a distribuição de temperatura não é uniforme, não é fácil saber qual a quantidade exata de calor é passada à ferramenta. Porém, a quantidade de calor removida pelo cavaco do total gerado é considerada na literatura como cerca de 80 a 90%, o que implica que 10% ou até menos é absorvido ou dissipado pela ferramenta e a peça (Boothroyd, 1975). Se nenhum fluido refrigerante for empregado, a perda de calor para o ambiente é insignificante. Portanto, a medida da temperatura durante o corte é importante na investigação do comportamento da ferramenta, pois permite controlar os fatores que influenciam no seu uso, tais como vida e desgaste (de Carvalho, 2005).

Muitas técnicas experimentais tem sido aplicadas na medição de temperatura durante o corte. Entretanto, é difícil conseguir boa precisão. Mesmo quando se usina a velocidades convencionais, os gradientes de temperatura são extremamente altos, especialmente nas vizinhanças do plano de cisalhamento primário e na interface cavaco-ferramenta. Este aspecto

aliado ao fato que a espessura do cavaco é normalmente muito fina, torna a tarefa de medir com exatidão as distribuições de temperatura complicada. Qualquer tipo de interferência com o processo de usinagem tais como furos ou ranhuras no cavaco ou na ferramenta com a intenção de medir temperaturas provavelmente irá alterar a distribuição de temperaturas que seria obtida se não houvesse interferência. Conseqüentemente, métodos analíticos ou numéricos de solução vêm sendo empregados para calcular as temperaturas de usinagem.

Em pesquisas relativas à mecânica do processo de usinagem e ao desgaste de ferramenta, a compreensão dos fenômenos como a distribuição de temperaturas ao longo do plano e da interface cavaco-ferramenta é de fundamental importância. Tay (1993) cita alguns pesquisadores (Chao e Trigger, 1955; Balint e Brown, 1964; Usui et al, 1978) que afirmam que o início do desgaste de cratera na superfície de saída é altamente dependente da magnitude máxima e distribuição da temperatura nesta região.

A Eq. (2.9), que descreve a distribuição de temperatura na usinagem, é a equação da energia (Tay, 1993):

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla T \right) - k \nabla^2 T - \dot{q} = 0 \quad (2.9)$$

onde:

ρC = constante;

$\frac{\partial T}{\partial t}$ = indica a variação da temperatura no tempo;

∇T = gradiente da temperatura em x, y e z;

k = condutividade térmica do material;

$\nabla^2 T$ = laplaciano da temperatura que indica a variação espacial da temperatura;

$\dot{q}$ = taxa de geração de calor.

Segundo o autor, quando o processo de usinagem estiver estabilizado, o termo transiente ($\frac{\partial T}{\partial t}$), que indica a variação da temperatura no tempo, desaparece e o termo da condução permanece apenas na região da ferramenta. A taxa de geração de calor ($\dot{q}$) existe apenas nas regiões de cisalhamento primária e secundária (Tay, 1993).

Algumas das técnicas para medição da temperatura da ferramenta na usinagem mais utilizadas atualmente são (Machado; da Silva, 2004):

. Método do termopar ferramenta-peça;

- . Medição direta com inserção de termopares na ferramenta de corte, logo abaixo da região de corte;
- . Medição de calor de radiação através de sensores infra-vermelho;
- . Medição utilizando vernizes termosensíveis;
- . Medição por técnicas metalográficas;
- . Medição utilizando pós químicos;
- . Medição utilizando o método do filme PVD.

Tay (1993) cita, avalia e compara vários métodos de calcular a temperatura de usinagem. A seguir, os métodos classificados por este autor:

- . Método da fonte de calor móvel;
- . Método das fontes de imagem;
- . Método das diferenças finitas;
- . Métodos semi-analíticos;
- . Método de elementos finitos (FEM).

Em seu trabalho, Tay conclui que, dos métodos por ele avaliados, o FEM (*finite element method*) e o das diferenças finitas como os que apresentam a melhor precisão para estimarem a temperatura. Segundo este autor, estes dois métodos levam em consideração vários aspectos importantes tais como: as complexas distribuições de velocidades e fontes de calor nas zonas primária e secundária, variações da tensão com a deformação, taxa de deformação e temperatura e as variações das propriedades do material com a temperatura. Entre os dois métodos selecionados, Tay diz que o método de elementos finitos apresenta uma vantagem em relação ao método das diferenças finitas devido a maior simplicidade na preparação dos dados e a menor exigência em termos de esforços computacionais. Além disso, métodos que utilizam elementos finitos se mostraram mais promissores com relação à utilização de um programa computacional que estime as temperaturas de usinagem a partir dos parâmetros de corte (tais como a velocidade de corte, avanço e ângulo de saída).

El-Wardany; Mohammed; Elbestawi (1996) realizaram uma investigação experimental e analítica de diferentes fatores que influenciam na distribuição de temperatura na superfície de saída de uma ferramenta cerâmica ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) torneando materiais de difícil usinagem tais como o aço AISI 1552 e superligas a base de níquel (Inconel 718). As distribuições de temperatura foram estimadas através do método de elementos finitos. Segundo os autores, o aumento da velocidade, do avanço e da profundidade de corte aumentam as temperaturas na região da aresta de corte. Por outro lado, o aumento do raio de ponta e do ângulo de saída diminuem estas temperaturas, enquanto que o aumento da espessura do chanfro da aresta de

corte aumenta suavemente a temperatura. Os autores concluíram que, empregando a metodologia adotada, o método experimental e o analítico apresentaram resultados semelhantes, mostrando que ocorre uma rápida queda de temperatura dentro do inserto e que a maior parte do calor gerado durante o corte permanece nas vizinhanças da ponta da ferramenta. A Figura 2.34 mostra a distribuição de temperatura e isoterma do inserto, típico do material cerâmico, que apresenta baixa condutividade térmica.

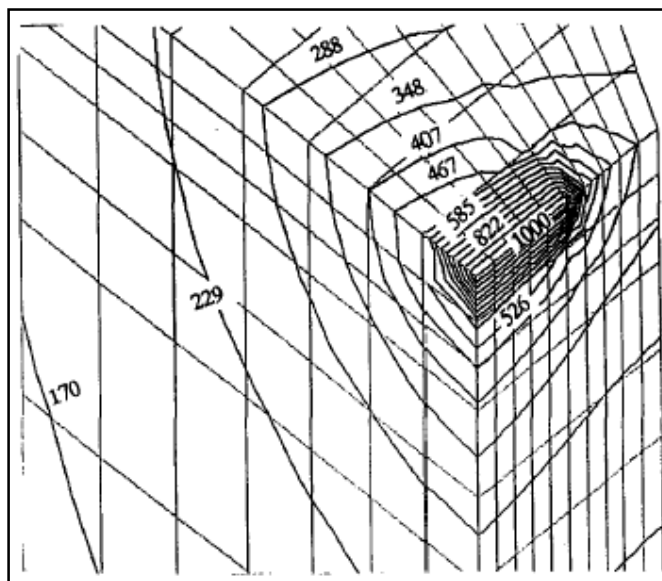


Figura 2.34 – Distribuição de temperatura e isoterma avaliadas por elementos finitos na ponta de um inserto de material cerâmico (El-Wardany; Mohammed; Elbestawi, 1996).

2.3.2 Monitoramento da usinagem através de sinais de força

A aplicação e interpretação desse parâmetro têm se concentrado no estudo da característica dinâmica do sinal da força de corte e na interpretação de sua relação com os níveis de desgaste. Este aspecto pode ser atribuído ao fato que o sinal de força é importante na avaliação das condições da ferramenta como resultado das variações dos níveis de atrito entre a superfície de folga e a peça (Dimla, 2000).

Considerações teóricas e pesquisas práticas indicam que os três componentes da força, mostradas na Fig. 2.35, respondem de maneira diferente para os diferentes tipos de desgaste que podem ocorrer em uma ferramenta. Por exemplo, a força de avanço (F_x ou F_f), segundo Dimla (2000), é insensível ao desgaste de cratera enquanto que as forças de avanço e radial (F_y ou F_r) devem ser mais influenciadas pelo desgaste de flanco da ferramenta que as forças principais (F_z ou F_t).

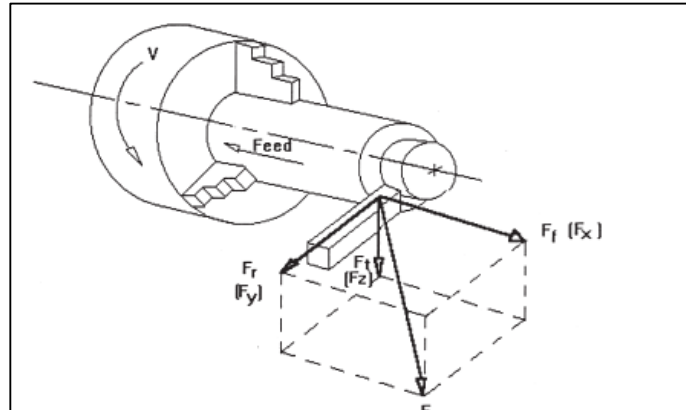


Figura 2.35 - Componentes da força em um ponto da ferramenta (Dimla, 2000).

Ravindra et al. (1993) desenvolveram um modelo matemático para estimar o desgaste em ensaios realizados no torneamento. Neste modelo, a progressão do desgaste foi estudada e foi realizado um modelamento das forças de corte através do método de múltipla regressão. Os resultados indicaram que o desgaste aumenta com o aumento da velocidade de corte e o aparecimento de inflexões na curva de desgaste mostram que há um predomínio de mecanismos termicamente ativados. O aumento nas componentes da força à medida que o desgaste aumenta ficou claro. Os gráficos de força-tempo e força-desgaste comportaram-se de maneira similar, evidenciando uma boa correlação entre o desgaste de flanco e as forças radiais.

As medições de forças durante a usinagem são realizadas através de uma plataforma dinamométrica. Dos Santos (1988), afirma que estas medições possibilitam a observação das componentes de corte com alta sensibilidade, além de mostrar de maneira clara a condição real da aresta cortante.

Ainda segundo dos Santos (1998), para se usar a plataforma dinamométrica, algumas restrições devem ser observadas:

- a) Custo relativamente elevado;
- b) A maneira com que se fixa o material sobre a plataforma deve ser cuidadosamente planejada, de modo que se evite indesejáveis interferências sobre o andamento normal do processo;
- c) A dimensão da plataforma é um fator limitante para as dimensões da peça que se usina, para o caso do fresamento;
- d) A distância do ponto de onde se está executando a usinagem até a superfície da plataforma, para o caso do fresamento, não podem superar a distância estabelecida pelo fabricante, o que limita o trabalho de usinagem de peças mais complexas.

Um dos maiores problemas na aplicação dos esforços de corte no monitoramento do desgaste consiste no fato que este parâmetro é extremamente sensível às condições de corte empregadas (Dimla, 2000). Qualquer mudança nos valores das condições de corte mudará também os valores das forças, tornando assim necessário uma recalibração do sistema de monitoramento.

Potência, forças de corte, corrente do motor e torque são todos métodos relacionados e dependentes uns com os outros. Isto quer dizer que a medição de apenas um destes parâmetros já é suficiente, sendo que a corrente do motor é o de mais fácil execução (Dimla, 2000).

2.3.3 Monitoramento da usinagem através da vibração

Vibração é definida como o movimento de um sistema dinâmico em torno de sua posição estática. Para que um sistema mecânico vibre é necessário, e suficiente, que o mesmo tenha capacidade de armazenar energia cinética (que tenha inércia), energia potencial elástica (que seja flexível) e uma excitação externa dependente do tempo. Conseqüentemente, na prática é muito difícil evitar a vibração. Geralmente ela ocorre por causa dos efeitos dinâmicos de tolerâncias de fabricação, folgas, contatos, o atrito entre peças de uma máquina e, principalmente, devido ao efeito de forças dinâmicas desequilibradas de componentes rotativos e alternativos de máquinas (Duarte, 2005).

Vibrações mecânicas resultam geralmente de movimentos ondulatórios periódicos. A natureza do sinal de vibração originado em processos de usinagem incorpora também aspectos de vibrações livres, forçadas e aleatórias.

Na usinagem, as vibrações são conseqüências das variações cíclicas nos componentes dinâmicos das forças de corte (Dimla, 2000). Normalmente, estas vibrações começam como pequenas trepidações (*chatter*), responsáveis pelo aspecto ondulado na superfície usinada e também por irregularidades na espessura do cavaco e, posteriormente, progride para a vibração propriamente dita.

Dimla (1998), em um trabalho de monitoramento do desgaste de uma ferramenta no torneamento, verificou que, no domínio do tempo, a amplitude dos sinais de vibração não era um bom indicador da evolução do desgaste, mas distinguiam claramente fraturas e lascamento. No domínio das frequências, as vibrações captadas na direção de corte (eixo z) se mostraram mais sensíveis às condições da ferramenta que os outros eixos, enquanto que o eixo x foi a que apresentou a pior correlação.

El-Wardany et al. (1996) investigaram o uso das características do sinal de vibração para monitorar o desgaste e a quebra de uma ferramenta de corte em operação de furação. Dentre os parâmetros que o autor empregou no domínio do tempo, a curtose dos valores