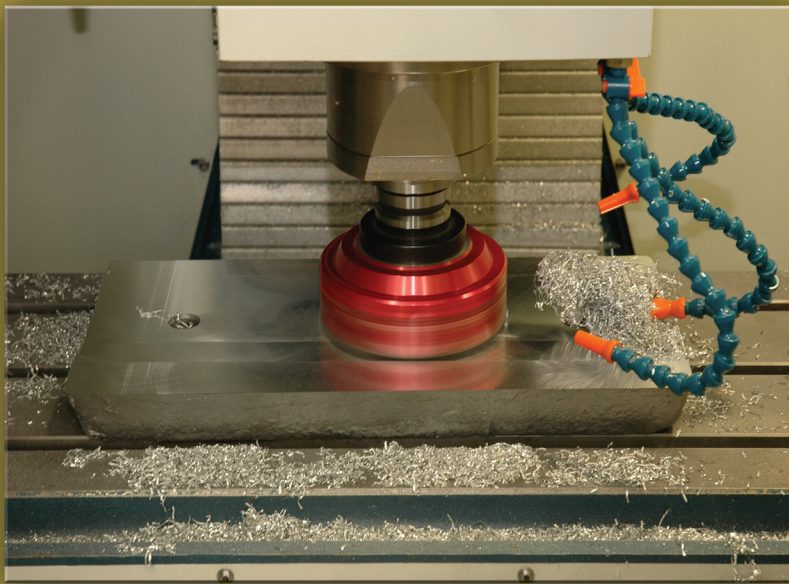


ASPECTOS TRIBOLÓGICOS DA USINAGEM DOS MATERIAIS



Sandro Cardoso Santos
Wisley Falco Sales

Sandro Cardoso Santos

Wisley Falco Sales

ASPECTOS TRIBOLÓGICOS DA USINAGEM DOS MATERIAIS

Copyright© 2007 by Artliber Editora Ltda.

Revisão:

Fernanda Foja

Capa e composição eletrônica:

Espaço Editorial

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Santos, Sandro Cardoso

Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais /
Sandro Cardoso Santos, Wisley Falco Sales. -- São Paulo:
Artliber Editora, 2007.

1. Usinagem 2. Engenharia 3. Indústria II. Santos,
Sandro Cardoso, Sales, Wisley Falco III. Título.

07-18935

CDD-621.9

Índices para catálogo sistemático:

1. Usinagem. Engenharia 621.9

2007

Todos os direitos desta edição reservados à

Artliber Editora Ltda.

Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 3.294

05083-010 - São Paulo - SP - Brasil

Tel.: (11) 3832-5223 Fax: (11) 3832-5489

info@artliber.com.br

www.artliber.com.br

SUMÁRIO

Apresentação	13
1 – Introdução	15
2 – Grandezas físicas e parâmetros de corte	23
2.1 – Movimentos	23
2.2 – Direções dos movimentos	24
2.3 – Percursos da ferramenta na peça	25
2.4 – Velocidades	25
2.5 – Conceitos auxiliares	25
2.6 – Grandezas de corte	26
3 – Geometria da cunha cortante	31
3.1 – Definições	31
3.2 – Sistemas de referência utilizados para a definição dos ângulos da cunha cortante	32
3.2.1 – Planos do sistema de referência da ferramenta	33
3.2.2 – Planos do sistema de referência efetivo	36
3.3 – Principais ângulos da cunha cortante	36
3.3.1 – Ângulos medidos no plano de referência Pr	36
3.3.2 – Ângulo medido no plano de corte P_s	37
3.3.3 – Ângulos medidos no plano ortogonal P_o	38
3.3.4 – Funções e influência dos principais ângulos da cunha cortante	40
3.3.5 – Considerações finais	41
4 – Formação do cavaco e interface cavaco-ferramenta	43
4.1 – O corte ortogonal	43
4.2 – A formação do cavaco	45

4.3 – Interface cavaco-ferramenta	48
4.3.1 – Zona de aderência	53
4.3.2 – Zona de escorregamento	55
4.3.3 – Aresta postiça de corte	55
4.4 – Ângulo de cisalhamento e grau de recalque	57
4.5 – Classificação dos cavacos	58
4.5.1 – Classificação dos cavacos quanto ao tipo	59
4.5.2 – Classificação dos cavacos quanto à forma	61
4.6 – Controle de cavacos	62
5 – Força e potência de corte	67
5.1 – Forças de usinagem	67
5.1.1 – Fatores que influenciam a força de usinagem	68
5.1.2 – Métodos de medição da força de usinagem	74
5.1.3 – Forças de usinagem no corte ortogonal	74
5.2 – Potência de usinagem	77
6 – Temperatura de usinagem	81
6.1 – Calor gerado na zona de cisalhamento primária	83
6.2 – Calor gerado na zona de cisalhamento secundária	84
6.3 – Calor gerado na zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta	86
6.4 – Medição da temperatura de usinagem	86
7 – Materiais para ferramentas de corte	99
7.1 – Aços-carbono e aços liga	101
7.2 – Aços-rápido	102
7.3 – Ligas fundidas	103
7.4 – Ferramentas de metal duro	103
7.5 – Ferramentas de cermet	107
7.6 – Ferramentas de cerâmica	108
7.7 – Materiais de ferramentas ultraduros	111
8 – Revestimentos para ferramentas de corte	127
8.1 – Breve histórico	128
8.2 – Composições químicas dos revestimentos	131
8.3 – Propriedades dos revestimentos	137
8.4 – Ensaio de laboratório para caracterização de revestimentos	139
8.5 – Perspectivas para o futuro	147
8.6 – Avaliação do desempenho de ferramentas revestidas	148
9 – Avarias, desgaste e vida das ferramentas	151
9.1 – Avarias nas ferramentas de corte	151

9.2 – Desgaste nas ferramentas de corte	154
9.3 – Mecanismos de desgaste	155
9.3.1 – Deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas	156
9.3.2 – Deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão	156
9.3.3 – Desgaste difusivo	157
9.3.4 – Desgaste por aderência e arrastamento (<i>attrition</i>)	157
9.3.5 – Desgaste abrasivo	157
9.3.6 – Desgaste de entalhe	158
9.4 – Vida das ferramentas	160
9.5 – Estudo das formas de desgaste	161
9.5.1 – Desgaste de cratera	162
9.5.2 – Desgaste de entalhe	162
9.5.3 – Desgaste de flanco	162
9.6 – Critérios para a medição de desgaste de uma ferramenta	163
9.6.1 – Quantificação da vida da ferramenta	164
10 – Fluidos de corte: fundamentos, aplicações e tendências	167
10.1 – Introdução	167
10.2 – Funções dos fluidos e aditivos utilizados	167
10.2.1 – Como agem os fluidos de corte	167
10.2.2 – Lubrificantes sólidos	171
10.3 – Benefícios proporcionados pelos fluidos de corte	172
10.4 – Classificação dos fluidos de corte	175
10.4.1 – Óleos integrais	175
10.4.2 – Emulsões	176
10.4.3 – Fluidos emulsionáveis convencionais	177
10.4.4 – Fluidos semi-sintéticos (microemulsões)	177
10.4.5 – Soluções	177
10.4.6 – Fluidos sintéticos	178
10.5 – Métodos de aplicação de fluidos de corte	178
10.5.1 – Jato de fluido a baixa pressão ou por gravidade	178
10.5.2 – Mínima quantidade de fluido (MQF)	179
10.5.3 – Sistema a alta pressão	180
10.6 – Problemas causados ao meio ambiente e à saúde	181
10.7 – Fluidos de corte e suas relações com o meio ambiente	182
10.7.1 – Fluidos biodegradáveis e bioestáveis	182
10.7.2 – Técnicas para a análise da contaminação industrial	183
10.7.3 – Partículas de fluido de corte suspensas no ar	187
10.7.4 – Processos de descarte dos fluidos de corte	187

10.8 – Seleção do fluido de corte	188
10.8.1 – Material da peça	189
10.8.2 – Material da ferramenta	191
10.8.3 – Outros fatores	192
10.9 – Alguns trabalhos visando avaliar o desempenho dos fluidos	193
10.9.1 – Testes que não envolvem usinagem	193
10.9.2 – Testes que envolvem usinagem	196
11 – Integridade superficial em usinagem	199
11.1 – Introdução	199
11.2 – Textura superficial	201
11.3 – Medição da textura superficial	201
11.4 – Quantificação da textura superficial	202
11.4.1 – Parâmetros de rugosidade	205
11.4.2 – Parâmetros da curva de Abbott-Firestone	209
11.4.3 – Efeitos de alguns parâmetros de usinagem no acabamento superficial	211
11.5 – Integridade superficial	215
11.5.1 – Modificações nas superfícies	216
11.5.2 – Fluxo lateral de material (<i>side flow</i>)	216
11.5.3 – Abertura de cavidades (<i>open grain</i>)	218
12 – Usinabilidade dos metais	221
12.1 – Introdução	221
12.2 – Ensaio de usinabilidade	222
12.2.1 – Ensaio com aplicação de pressão constante	223
12.2.2 – Faceamento rápido	225
12.2.3 – Torneamento cônico	225
12.2.4 – Ensaio de vida: determinação da equação de Taylor	225
12.3 – Usinabilidade dos materiais	227
12.3.1 – Usinabilidade do alumínio e suas ligas	227
12.3.2 – Usinabilidade dos ferros fundidos	229
12.3.3 – Usinabilidade dos aços	232

5 - Força e potência de corte

5.1 - Forças de usinagem

O conhecimento das forças que atuam na cunha cortante, e o estudo de seus comportamentos, são de grande importância. De posse de suas grandezas, determina-se a potência requerida para executar o corte. A força de usinagem é responsável pelo colapso da ferramenta de corte, por deformação plástica da aresta, além de influenciar no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste. Também representa um índice de usinabilidade do material da peça, e também ser utilizada como parâmetro para controle adaptativo do processo. A Figura 5.1 mostra, com corte tridimensional, as componentes da força de usinagem no de torneamento e no fresamento.

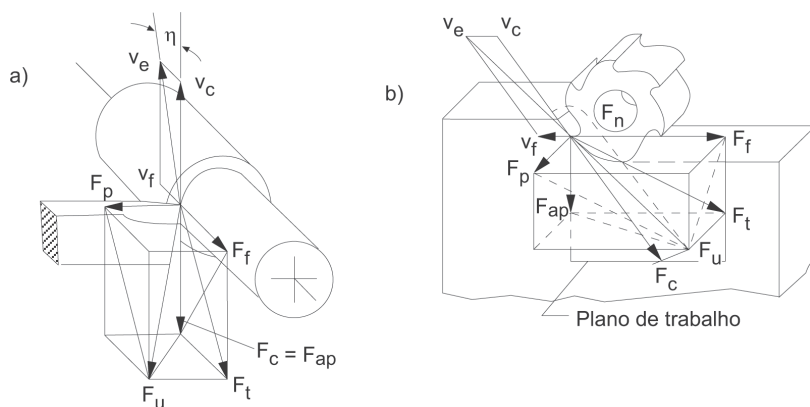


Figura 5.1 – Componentes da força de usinagem: a) torneamento e b) fresamento

Onde:

F_{ap} = força de apoio (projeção de F_u sobre o plano de trabalho);

F_f = força de avanço;

F_t = força ativa;

F_p = força passiva;

F_c = força de corte;

F_n = força normal;

F_u = força de usinagem;

v_e = velocidade efetiva de corte;

v_c = velocidade de corte;

v_f = velocidade de avanço.

Segundo a notação vetorial, as componentes são representadas pela equação 5.1.

$$\vec{F}_u = \vec{F}_c + \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad (5.1)$$

5.1.1 - Fatores que influenciam a força de usinagem

Afirma-se que os fatores que contribuem para a movimentação livre do cavaco, sobre a superfície de saída, atuam com o objetivo de diminuir a força de usinagem. Se as condições da interface se tornarem uma restrição ao escoamento livre do cavaco, a ação da ferramenta sobre a superfície inferior da cunha tem que ser maior (Machado e da Silva, 1993).

Trent (1991) afirma que a força de usinagem depende de dois fatores principais:

- a) Áreas das zonas de cisalhamento primária e secundária;
- b) Resistência ao cisalhamento do material da peça nesses planos.

Assim, qualquer parâmetro pode ser analisado com base nos seus efeitos sobre estes fatores. Muitos atuarão nos dois sentidos, e o resultado dependerá da predominância de um sobre o outro.

a) Material da peça

De uma maneira geral, quanto maior a resistência do material da peça, maior é a resistência ao cisalhamento e as forças de usinagem serão superiores. No entanto, materiais extremamente dúcteis, como ferro e alumínio comercialmente puros, alteram a área da seção de corte, modificando a força de usinagem.

b) Material da ferramenta

A afinidade química dos materiais da ferramenta e da peça pode atuar, principalmente, na área da seção de corte. Se a tendência for produzir uma zona de aderência estável e forte, a força de usinagem poderá ser aumentada. Caso seja reduzir o atrito na interface, a área de contato deverá ser menor, diminuindo a força de usinagem.

c) Velocidade de corte

Na faixa de valores empregados na indústria, a velocidade apresenta influência discreta na força de usinagem. De acordo com Ferraresi (1977), as baixas velocidades de corte, e na ausência de aresta postiça de corte, ocorre queda acentuada nos valores da força de corte com o aumento da velocidade. Esse comportamento é atribuído à redução da resistência ao cisalhamento do material, devido ao aumento da temperatura nas zonas de cisalhamento primária e secundária. Com o aumento da velocidade de corte, a força de corte tende a estabilizar, fato justificado pela redução da dureza do material provocada pela elevação da temperatura e que promove o aumento da zona de aderência (área da zona de cisalhamento secundária). Conclui-se que as velocidades de corte elevadas o efeito da redução da resistência ao cisalhamento — que provoca a redução da força de corte — é compensado pelo aumento da área da zona de cisalhamento secundária, que tende a elevar o valor da força de corte. O resultado desses dois fatores é a tendência de estabilização da força de corte. O efeito da velocidade de corte sobre a força de corte é mostrado na figura 5.4.

d) Avanço e profundidade de corte

O aumento destes dois fatores eleva a força de usinagem, numa proporção direta, quase linear. A área da seção de corte (A_c) é definida pelo produto entre o avanço e a profundidade de corte. A Figura 5.2 ilustra a influência destes parâmetros e da resistência do material da peça. Isso ocorre porque as áreas dos planos de cisalhamentos primário e secundário são aumentadas com a elevação dessas grandezas.

e) Geometria da ferramenta

O ângulo mais influente é o de saída (γ_0). Uma redução tende a tornar a área de contato maior e impor mais restrição ao escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída, elevando a força de usinagem. O ângulo de posição (χ_p) também influencia a força de usinagem. O seu aumento, desde que o ângulo de posição lateral não se torne pequeno o suficiente para que a aresta lateral de corte entre em ação, promove uma ligeira redução nas forças de usinagem. A influência destes ângulos é mostrada na Figura 5.3.

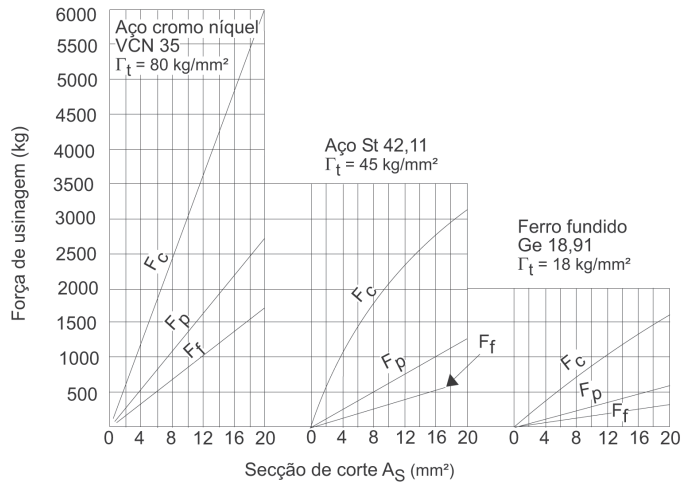


Figura 5.2 – Influência da seção de corte e da resistência do material da peça nas componentes da força de usinagem (Ferraresi, 1977)

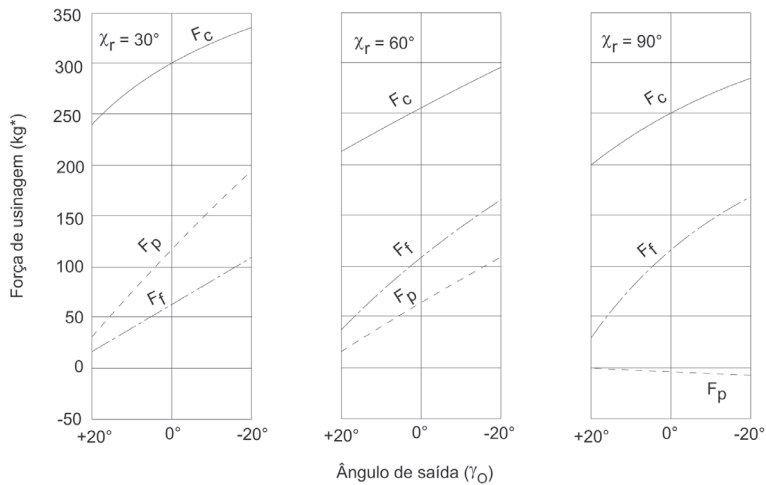


Figura 5.3 – Influência dos ângulos de saída (γ_0) e de posição (χ_p) nas forças de usinagem (Ferraresi, 1977)

f) Estado de afiação da ferramenta

O desgaste da ferramenta altera a sua geometria. Porém, o efeito maior deve-se ao aumento da área de contato com o cavaco ou com a peça, causando a evolução do desgaste de cratera e de flanco. Normalmente, há um aumento da força de usinagem. Mas, nas situações em que o desgaste de cratera é predominante, a sua evolução aumenta o ângulo de saída (γ_0) reduzindo a força de corte.

g) Uso de fluido de corte

Se na ação do fluido predominar a lubrificação, a área de contato se restringe e a força de usinagem se torna menor. No entanto, se prevalecer a refrigeração, o fluido aumenta a força de usinagem, promovendo maior resistência ao cisalhamento do material, devido a uma redução da temperatura.

Os resultados mostrados nas Figuras 5.4 a 5.8 exemplificam a influência do material da peça e das condições de corte na força de corte.

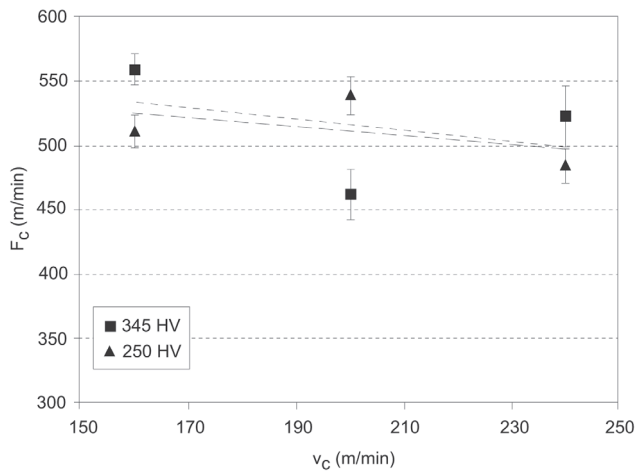


Figura 5.4 – Influência da velocidade de corte nos valores de força de corte para o aço ABNT 4340 temperado e revenido (durezas 250 HV e 345 HV)

A influência da velocidade de corte na força de corte é apresentada na Figura 5.4. Como os ensaios foram realizados fora da faixa de velocidade de corte em que ocorre a APC, os sinais de sua presença não foram observados. Nota-se, que a força de corte sofre pouca influência da velocidade de corte, mesmo com as linhas de tendência indicando decréscimo da força, com o aumento da velocidade de corte. Esses resultados estão de acordo com os

apresentados por Machado e da Silva (1993), que os atribuem à redução da tensão de cisalhamento resultante da crescente temperatura nas zonas de cisalhamento primária e secundária que, por sua vez, são consequência da alta taxa de deformação do material da peça.

Nas Figuras 5.5 e 5.6 são apresentadas as influências do avanço e da profundidade de corte na força de corte, respectivamente.

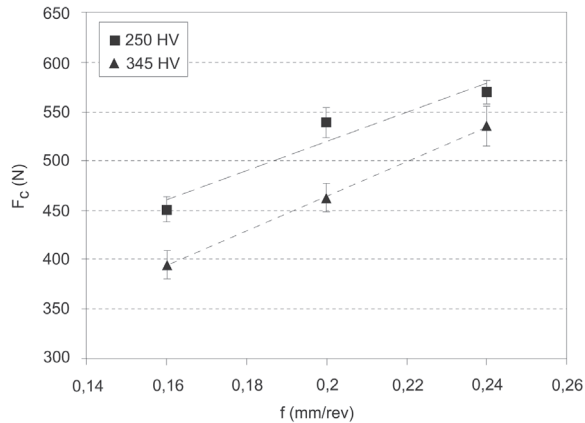


Figura 5.5 – Influência do avanço nos valores de força de corte para o aço ABNT 4340 temperado e revenido (durezas 250 HV e 345 HV)

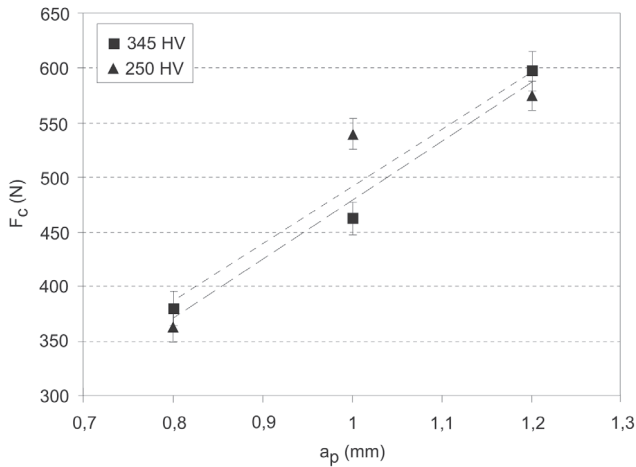


Figura 5.6 – Influência da profundidade de corte nos valores de força de corte para o aço ABNT 4340 temperado e revenido (durezas 250 HV e 345 HV)

O aumento do avanço e da profundidade de corte torna maior a área das zonas de cisalhamento primária e secundária.

Nas Figuras 5.7 e 5.8 são expostos os valores de força de corte em função da área de contato cavaco-ferramenta, na usinagem do aço ABNT 4340 com durezas de 345 HV e 250 HV, respectivamente.

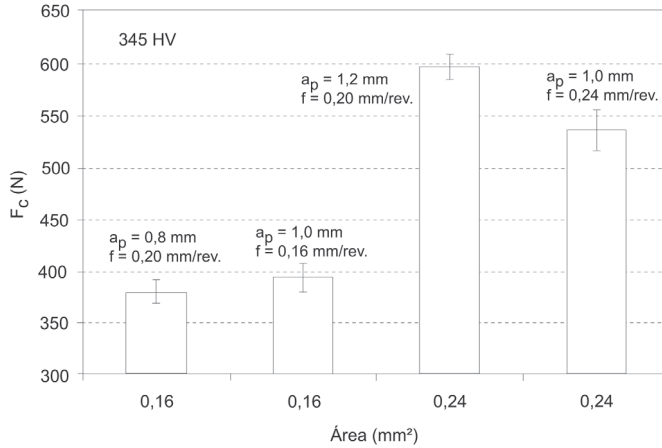


Figura 5.7 – Força de corte em função da área de contato cavaco-ferramenta na usinagem do aço ABNT 4340 temperado e revenido (dureza de 345 HV)

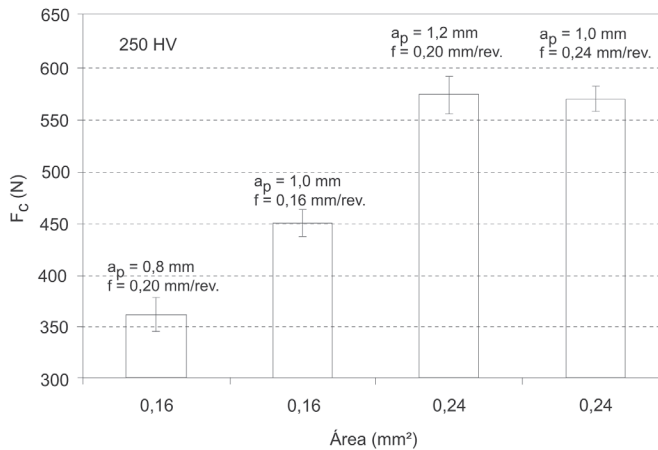


Figura 5.8 – Força de corte em função da área de contato cavaco-ferramenta na usinagem do aço ABNT 4340 temperado e revenido (dureza de 250 HV)

Na usinagem do material de maior dureza, nota-se que os valores de força de corte não apresentam diferença significativa para a área cavaco-ferramenta de 0,16 mm². Já na área de 0,24 mm², a profundidade de corte contribuiu mais para o aumento da força de corte que o avanço. No aço de

menor dureza o comportamento foi inverso, pois a profundidade de corte foi mais influente na elevação da força de corte para a menor área de contato cavaco-ferramenta. Para os valores maiores, os resultados foram estatisticamente iguais.

5.1.2 – Métodos de medição da força de usinagem

A força de usinagem pode ser medida de forma direta ou indireta. Na indireta, avalia-se o deslocamento de molas, utilizando meios mecânicos, elétricos, pneumáticos e hidráulicos. Através de correlações previamente estabelecidas, mede-se a força. Já na forma direta, o cálculo é baseado na piezeletricidade, na magneto-estricção ou na magneto-elasticidade (Ferraresi, 1977). A evolução dos sistemas de medição de força de usinagem conduziu aos atuais dinamômetros piezelétricos, com resolução, sensibilidade e faixa de operação adequada às aplicações práticas e acadêmicas (Ballato, 1995). Um dinamômetro piezelétrico é demonstrado na Figura 5.9.

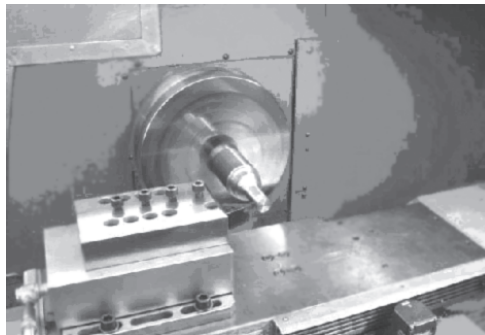


Figura 5.9 – Dinamômetro piezelétrico

5.1.3 – Forças de usinagem no corte ortogonal

A força de usinagem é definida como a resultante das forças exercidas pela ferramenta sobre a peça (ou da peça sobre a ferramenta). A determinação (intensidade, direção e sentido) é feita através da medição de suas componentes em direções conhecidas. No corte ortogonal, é definida pela soma vetorial das forças de corte e de avanço, que podem ser calculadas com a utilização dos métodos apresentados anteriormente. As forças de corte, de avanço e a de usinagem resultante para o corte ortogonal são mostradas na figura 5.10.

A determinação de componentes da força de usinagem em outras direções também apresenta grande interesse prático. As forças F_z e F_{NZ} atuam, respectivamente, nas direções tangencial e normal ao plano de cisalhamento primário. A componente F_z é responsável por cisalhar o material, e a F_{NZ} comprime o plano de cisalhamento primário, além de impedir a propagação da trinca ao longo de sua extensão e contribuir com a formação do cavaco contínuo.

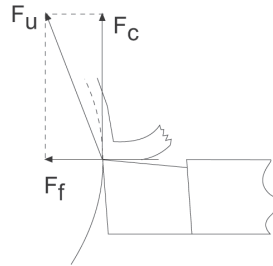


Figura 5.10 – Forças de corte e de avanço

A representação esquemática das forças que atuam no plano de cisalhamento primário é mostrada na Figura 5.11.

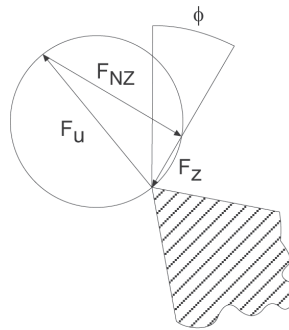


Figura 5.11 – Componentes F_z e F_{NZ} da força de usinagem

As mesmas considerações podem ser feitas em relação ao plano de cisalhamento secundário. Nesse caso, a componente F_T é a força de atrito e a F_N a força normal. As componentes F_T e F_N são representadas na figura 5.12.

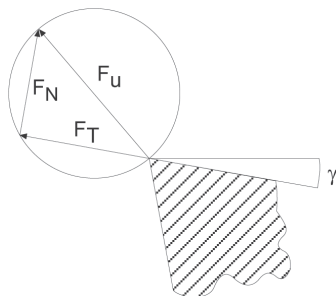


Figura 5.12 – Componentes F_T e F_N da força de usinagem

As principais componentes da força de usinagem são representadas através do círculo de Merchant (Merchant, 1954) e mostradas na figura 5.8. Para a construção desse círculo, primeiro desloca-se a força de usinagem F_u para a ponta da ferramenta e, na seqüência, se constrói uma circunferência, de modo que o vetor F_u corresponda ao seu diâmetro. Com os valores dos ângulos de cisalhamento (ϕ) posicionam-se as componentes F_T e F_N e, a partir do ângulo de saída da ferramenta (γ), as F_Z e F_{NZ} .

O círculo de Merchant é exposto na figura 5.13.

A partir das relações apresentadas pelo círculo de Merchant, pode-se decompor a força de usinagem nas principais direções e calcular o módulo dessas forças, utilizando fundamentos de geometria ou de trigonometria. A força de usinagem é determinada a partir da soma vetorial das forças de corte e de avanço. Definida a força de corte e os ângulos de saída da ferramenta e de cisalhamento (fixado pelas relações 4.3 e 4.4) as demais componentes podem ser alimentadas.

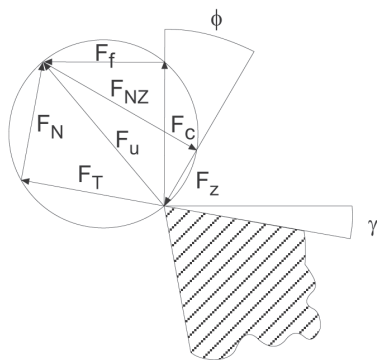


Figura 5.13 – Círculo de Merchant

5.2 – Potência de usinagem

As potências de usinagem resultam dos produtos das componentes de força e de velocidade:

Potência de corte (N_c), é representada pela equação 5.2:

$$N_c = F_c * v_c \quad (5.2)$$

Onde:

F_c = força de corte;

v_c = velocidade de corte.

Potência de avanço (N_f), é indicada pela equação 5.3:

$$N_f = F_f * v_f \quad (5.3)$$

Onde:

F_f = força de avanço;

v_f = velocidade de avanço.

Potência efetiva de corte (N_e), é dada pela equação 5.4:

$$N_e = N_c + N_f \quad (5.4)$$

A potência consumida na operação de usinagem é medida diretamente no motor elétrico da máquina operatriz. Um sensor de corrente elétrica, do tipo Hall, é instalado na fonte de alimentação do motor, responsável pelo suprimento de potência no eixo principal da máquina-ferramenta. Através da corrente elétrica consumida, calcula-se a potência efetiva. As máquinas equipadas com CNC, normalmente têm motores individuais para os movimentos de corte (rotação do eixo-árvore) e de avanços (eixos X, Y e Z), permitindo a medição de diversas componentes da potência total.

Na figura 5.14, são apontados os valores de potência efetiva de corte ao longo da vida de brocas helicoidais de aço-rápido com diferentes revestimentos na usinagem do ferro fundido cinzento GH 190.

Observa-se que as curvas têm comportamento semelhante. Os valores de potência efetiva de corte são mantidos estáveis até que, próximo ao final da vida das ferramentas, apresentam crescimento acentuado. O comportamento das curvas deixa claro que a potência efetiva de corte é um bom parâmetro para monitorar o desgaste de brocas.

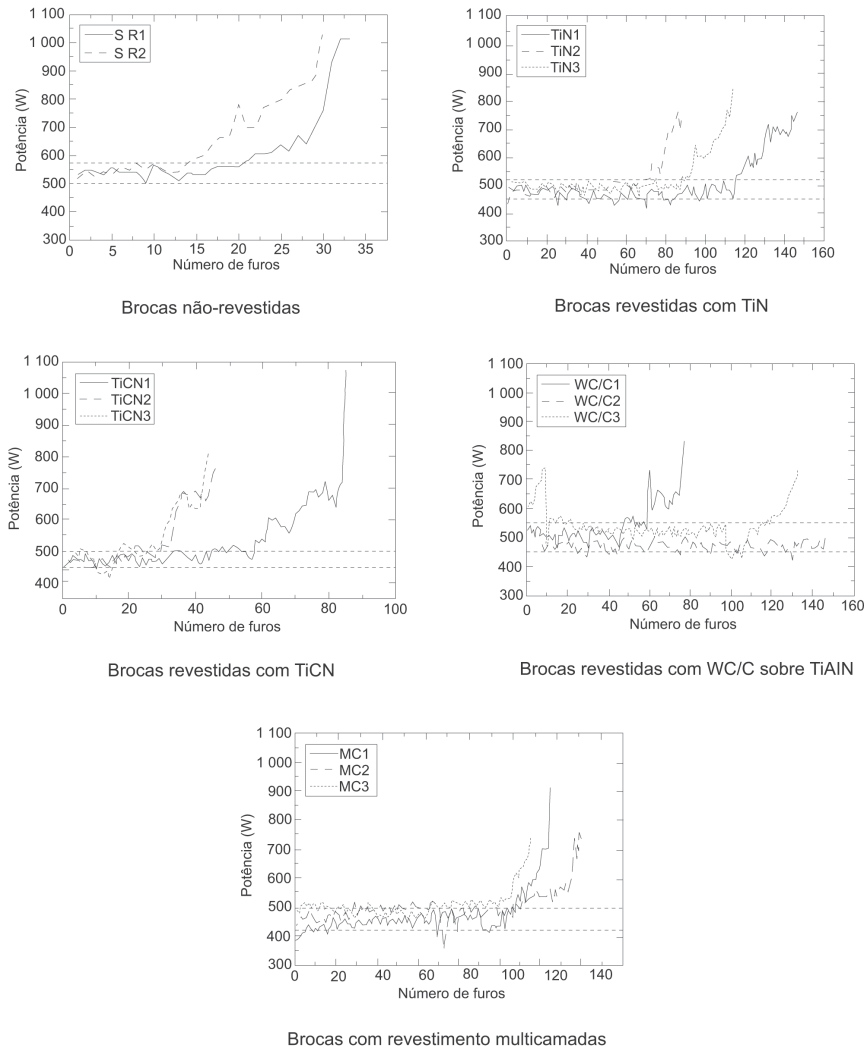


Figura 5.14 – Curvas de potência efetiva de corte na furação do ferro fundido GH190 utilizando brocas de aço-rápido com diferentes revestimentos (Santos, 2002)

Outro aspecto observado é a diferença entre o comportamento das médias e dos desvios-padrão dos valores de potência, avaliados também na fase estável, conforme a figura 5.15.

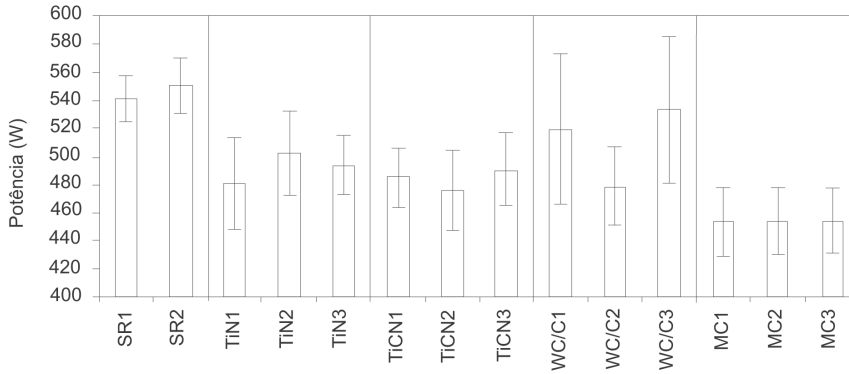


Figura 5.15 – Valores médios da potência efetiva de corte durante a fase de pequena variação (Santos, 2002)

Os resultados indicam que o revestimento multicamadas foi responsável por uma queda entre 9 e 25% da potência efetiva de corte, se comparado com os valores obtidos para as brocas não-revestidas. Pode-se destacar, ainda, a repetibilidade dos resultados da potência efetiva de corte para as três ferramentas com o mesmo revestimento.

9 - Avarias, desgaste e vida das ferramentas

9.1 - Avarias nas ferramentas de corte

As ferramentas usadas no corte interrompido (fresamento) apresentam freqüentemente problemas como lascamento, trincamento ou quebras. O desenvolvimento do desgaste uniforme, na superfície de folga ou saída, será dominante se a ferramenta possuir tenacidade suficiente para resistir aos choques mecânicos e térmicos do processo. No corte interrompido, uma aresta de corte pode sofrer avarias na entrada, no meio ou na saída, durante um ciclo ou revolução da ferramenta.

A influência da temperatura no tipo de falha da ferramenta de corte é bem conhecida. As temperaturas no corte interrompido flutuam ciclicamente, aumentando durante o tempo ativo e diminuindo no inativo. As condições térmicas dessas ferramentas têm sido investigadas por vários pesquisadores (Bathia *et ali*, 1986 e Palmai, 1987). A variação cíclica desta temperatura é ilustrada na figura 9.1. A curva (a) representa o corte contínuo, onde a temperatura sobe rapidamente entrando em regime, a curva (b) mostra como o resfriamento ocorre quando cessado o corte Já a curva (c) é a resultante no corte interrompido e durante o ciclo ativo, há geração de calor, aumentando a temperatura da ferramenta, seguido do ciclo inativo, resfriando-a. Assim, a temperatura flutua ciclicamente.

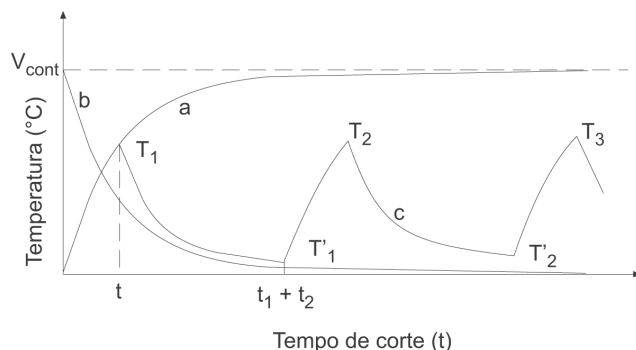


Figura 9.1 – Variação cíclica da temperatura no corte interrompido (Palmai, 1987)

Resultados destas investigações mostram que a distribuição da temperatura depende das condições de corte (principalmente velocidade, avanço e relação entre o tempo ativo e inativo de um ciclo), dos materiais da ferramenta de corte e da peça.

A flutuação cíclica da temperatura na interface cavaco-ferramenta leva a uma modificação, também cíclica, da distribuição da tensão na região de corte da ferramenta, podendo provocar a formação de trincas térmicas (figura 9.2).

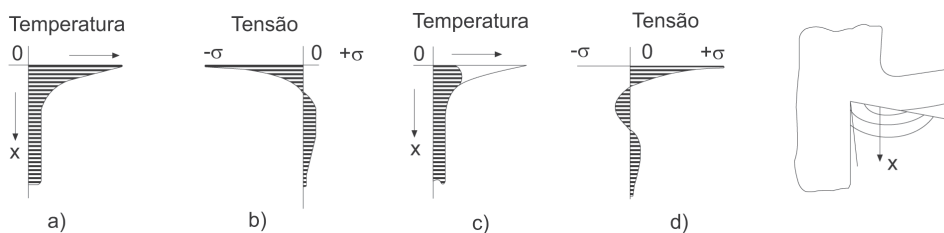


Figura 9.2 – Distribuição da temperatura e de tensões em pastilhas de metal duro, no corte interrompido (Ferraresi, 1977)

Ferraresi (1977) explica da seguinte maneira: “... a figura 9.2a mostra a curva de distribuição de 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 subseqüentes, a temperaturas inferiores, terão uma dilatação bem menor. Como conseqüência, estas impedirão o processamento de uma dilatação muito maior na camada superficial (contato cavaco-ferramenta) gerando tensões de compressão

(figura 9.2b). Haverá tensões de tração a certa distância da superfície de contato. No instante seguinte, com a variação da temperatura de corte, isto é, com o resfriamento da camada de contato (devido ao tempo inativo), essa estará submetida à tração, enquanto que as subseqüentes serão solicitadas à compressão (figura 9.2 c e d)”.

Recentemente, Wang *et alli* (1996) apresentaram um estudo teórico e experimental sobre a temperatura da ferramenta e o desenvolvimento de trincas no fresamento. Concluiu-se que a queda de temperatura na superfície da ferramenta, durante o ciclo inativo, pode ser desconsiderada. As tensões diminuem gradualmente dentro da ferramenta após sair do movimento de corte e perder contato com a peça. As trincas térmicas não ocorrem nesse período. Os ciclos de entrada e saída de calor são os responsáveis pelas trincas e fadigas de origem térmicas.

Além da ação cíclica, este fenômeno é provocado por variação da temperatura causada por acesso irregular do refrigerante de corte (Ferraresi, 1977). Essa flutuação de tensão promoverá o aparecimento de trincas por fadiga nas ferramentas de metal duro (já as de aço-rápido têm tenacidade suficiente para suportarem as variações de tensões sem nucleação de trincas). Essas trincas, térmicas, levarão ao aparecimento de sulcos desenvolvidos em forma de pente (figura 9.3).

Pesquisadores como Kakino *et alli* (1984) e Chandrasekaram (1985), têm se dedicado ao estudo da origem destas trincas. Concluíram que elas se tornam a maior causa de falhas na ferramenta, em velocidades de corte elevadas. Já em velocidades baixas, são as responsáveis pelas falhas das ferramentas de corte.

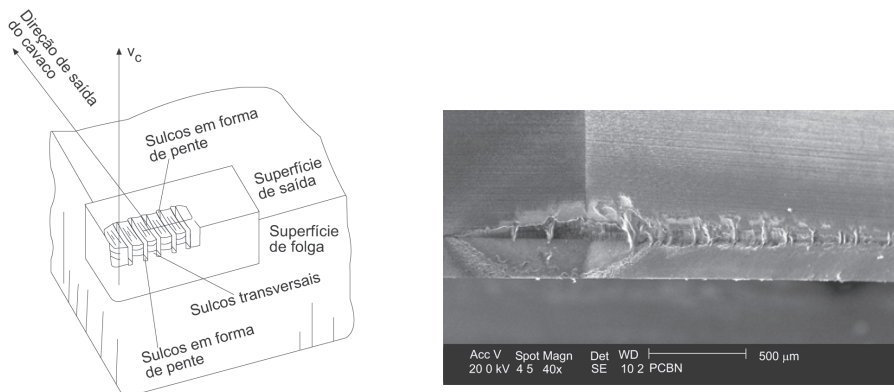


Figura 9.3 – Sulcos desenvolvidos em forma de pente

9.2 – Desgastes nas ferramentas de corte

Durante o processo de usinagem, a ação de cortar muda a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte. Verifica-se um desgaste progressivo nas superfícies de folga e de saída da ferramenta. A figura 9.4 apresenta as principais áreas de desgaste.

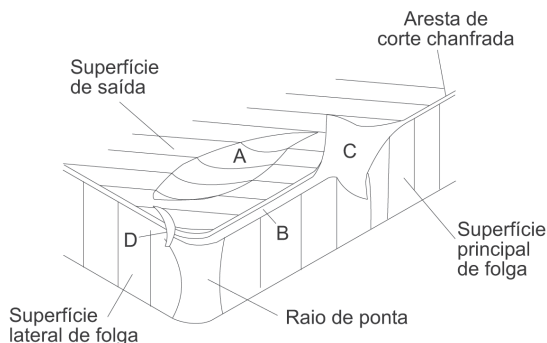


Figura 9.4 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Dearnley e Trent e Wright, 1982)

Pode-se distinguir pelo menos três formas de desgaste, de acordo com a figura 9.4:

- 1) De cratera (área A);
- 2) De flanco (área B);
- 3) De entalhe (áreas C e D).

As fotografias mostradas na figura 9.5 foram obtidas através de microscopia eletrônica de varredura, permitindo identificar o desgaste de cratera nas ferramentas de corte.

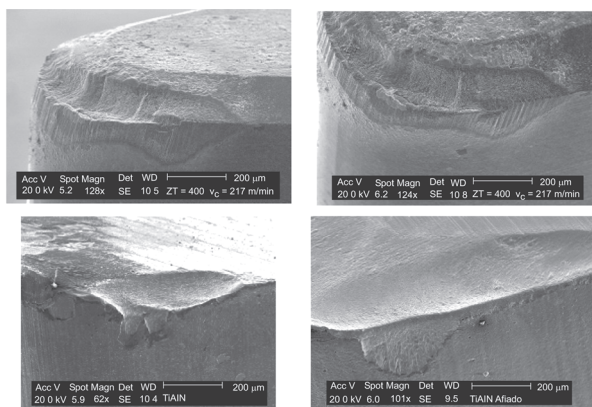


Figura 9.5 – Desgaste de cratera nas ferramentas de corte

Antes que um desses desgastes ganhe grandes proporções, colocando o processo de corte em risco, a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída.

9.3 - Mecanismos de desgaste

Em condições normais de corte, uma das formas de desgaste apresentadas na figura 9.6 irá prevalecer e se desenvolver por diversos mecanismos. A literatura apresenta variações na classificação dos mecanismos de desgaste, porém, grande parte considera pelo menos seis diferentes (Ferraresi, 1977 e Palmi, 1987), mostrados na figura 9.6.

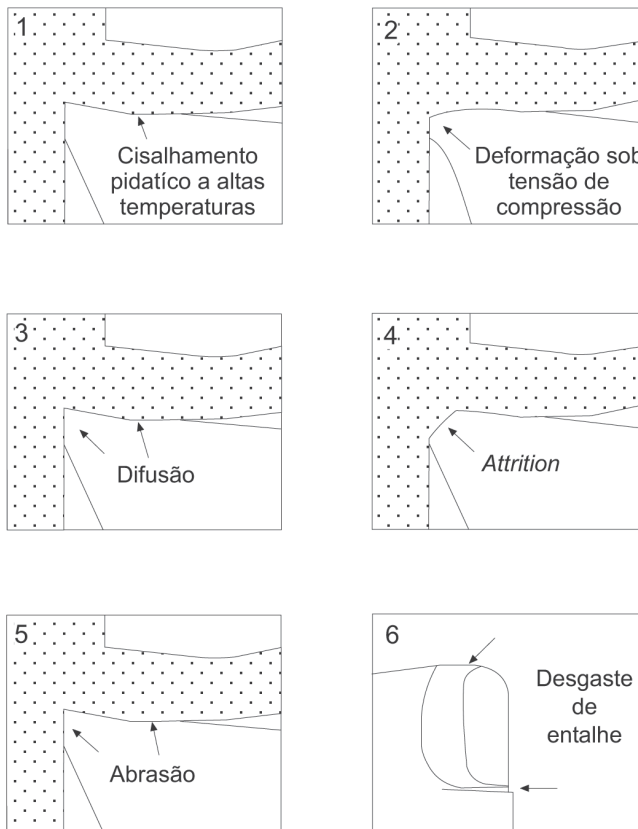


Figura 9.6 – Mecanismos e processos de desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte (Trent e Wright, 1991)

Os mecanismos como difusão, abrasão ou *attrition*, atuam tanto isoladamente quanto em conjunto, promovendo desgastes através de deformação plástica por cisalhamento, altas tensões de compressão ou entalhe. No quadro da figura 9.6 podem ser considerados mecanismos os de numerais 3, 4 e 5, enquanto são formas de desgaste os de números: 1, 2 e 6. Na seqüência, são definidos cada um destes:

9.3.1 – Deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas

Não é propriamente um mecanismo, mas sim um processo de desgaste, ocorrendo mais provavelmente na usinagem com alto ponto de fusão em ferramentas de aço-rápido. As tensões cisalhantes na interface cavaco-ferramenta são suficientes para causar deformação plástica superficial. Devido às altas temperaturas desenvolvidas, a resistência ao escoamento do material da ferramenta, próximo à interface, é reduzida. Como consequência, material é arrancado da superfície, formando uma cratera (figura 9.6 1).

9.3.2 – Deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão

É mais um processo do que um mecanismo de desgaste, que ocorre na usinagem dos materiais de alta dureza. A combinação de altas tensões de compressão com elevadas temperaturas na superfície de saída, pode provocar deformação plástica da aresta de corte das ferramentas de aço-rápido e metal duro. Geralmente acontece a altas velocidades de corte e avanço, levando a uma falha catastrófica (figura 9.6 2). A deformação plástica da aresta pode ser observada na figura 9.7.

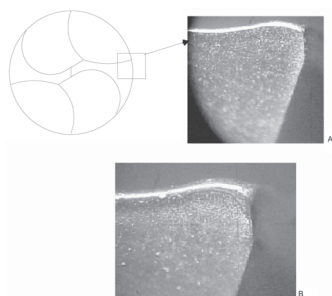


Figura 9.7 – Aspecto da aresta de corte de uma broca de metal duro deformada plasticamente. A – ferramenta nova; B – ferramenta após chegar ao final de vida (Santos, 2002)

9.3.3 - Desgaste difusivo

Este mecanismo envolve a transferência de átomos de um material para outro e é dependente da temperatura e solubilidade dos elementos da zona de fluxo. A área desgastada, quando observada no microscópio, é lisa. Na usinagem, as velocidades relativas entre ferramenta e peça ou cavaco e ferramenta são altas, e o tempo de contato entre estes materiais é muito pequeno. Isso tornaria desprezível o mecanismo de difusão se não fosse a existência de uma zona de aderência (morta ou de fluxo) na interface cavaco-ferramenta (Trent e Wright, 1991). A saturação desta zona de aderência pode funcionar como uma barreira à difusão.

Essa zona não é estável e se renova periodicamente, garantindo, assim, o fluxo difusivo. Este mecanismo de desgaste pode atuar nas superfícies de saída e de folga, e a taxa de desgaste aumentará com a elevação da velocidade de corte e avanço (figura 9.6 3).

9.3.4 - Desgaste por aderência e arrastamento (*attrition*)

Ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída torna-se irregular. A APC aparece e o contato com a ferramenta torna-se menos contínuo. Sob estas condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto com o fluxo de material. Este fenômeno acontece na zona de escorregamento, durante o fresamento, com uso de profundidade de corte irregular ou falta de rigidez do equipamento (figura 9.6 4). No microscópio, as áreas desgastadas por *attrition* têm aparência áspera.

9.3.5 - Desgaste abrasivo

Envolve a perda de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento, causado por partículas de elevada dureza relativa. Estas partículas podem estar contidas no material da peça (óxidos, carbonetos e carbonitretos), ou são as partículas da própria ferramenta arrancadas por *attrition*, por exemplo. Este mecanismo de desgaste é muito importante na usinagem com pastilhas revestidas, cerâmicas puras e mistas (figura 9.6 5). Marcas de desgaste abrasivo são identificadas na figura 9.8.

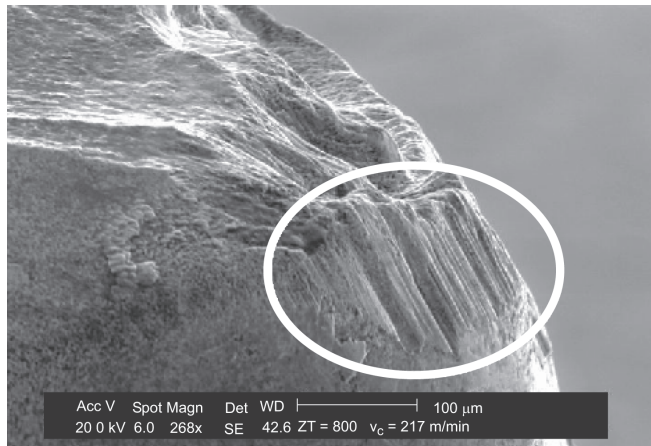


Figura 9.8 – Identificação de marcas de desgaste abrasivo (Campos, 2004)

9.3.6 - Desgaste de entalhe

Não é propriamente um mecanismo, mas sim uma forma de desgaste. Porém, ainda não existe um consenso na literatura que explique exatamente o que provoca esse desgaste. Ele ocorre, principalmente, na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas e com elevado grau de encruamento (tais como: ligas de níquel, titânio, cobalto e aço inoxidável). Nas regiões onde acontece este tipo de desgaste, as condições de escorregamento prevalecem e o mecanismo envolve abrasão e transferência de material (difusão e *attrition*). São bastante influenciados por interações com a atmosfera. Existem evidências que óxidos se formam continuamente e aderem na ferramenta naquelas regiões. A quebra das junções de aderência entre os óxidos e a ferramenta pode, ocasionalmente, remover material da superfície desta última (Wright e Biaggi, 1981).

Shaw *et al* (1966), afirmam que o entalhe na forma de V é formado pelas rebarbas produzidas nas arestas laterais do cavaco, envolvendo um mecanismo de aderência e arrancamento (figura 9.6 6). Richards e Aspinwall (1989) concordam com esta teoria.

König e Schemmel (1975) classificam o desgaste por oxidação como um mecanismo. Segundo eles, a formação de óxidos é dependente da liga do material da ferramenta e da temperatura de aquecimento. Para materiais de aço-ferramenta e de aço-rápido, a oxidação quase não tem importância, já que a resistência a quente é ultrapassada antes que a superfície apresente

oxidação mais acentuada, embora Trent e Wright (1999) mostrem evidências de formação de óxidos nestas ferramentas. Para as de metal duro, compostos a base de carbonetos de tungstênio e de cobalto, a oxidação inicia-se na faixa de temperatura entre 700 e 800°C. A adição de óxido de titânio e outros carbonetos dificultam o processo. A região de oxidação se processa na zona de escorregamento da superfície de saída da ferramenta e na parte inferior da superfície de folga (nos limites do desgaste de flanco). São originados óxidos complexos de tungstênio, cobalto e ferro, que em decorrência da sua expansão volumétrica, em relação ao carboneto de tungstênio, constituem-se elevações na superfície da ferramenta, facilitando o lascamento e a quebra da aresta de corte.

Todos estes mecanismos ou processos são observados na prática. Certamente, um deles prevalecerá sobre os demais, dependendo do material da peça e da ferramenta, da operação de usinagem, das condições de corte, da geometria da ferramenta de corte e do emprego do fluido de corte. Em geral, os três primeiros mecanismos, somados ao desgaste por oxidação, são mais importantes a altas taxas de remoção de material, onde há o desenvolvimento de elevadas temperaturas. Os últimos são essenciais a baixas velocidades, pois as temperaturas de corte são baixas o suficiente para prevenir a ocorrência dos três primeiros (Machado e da Silva, 1999).

Na figura 9.9 mostra-se uma curva de desgaste de flanco em função do número de peças produzidas. Neste caso, são blocos de motores de ferro fundido cinzento GH 190 (Souza Jr., 2001).

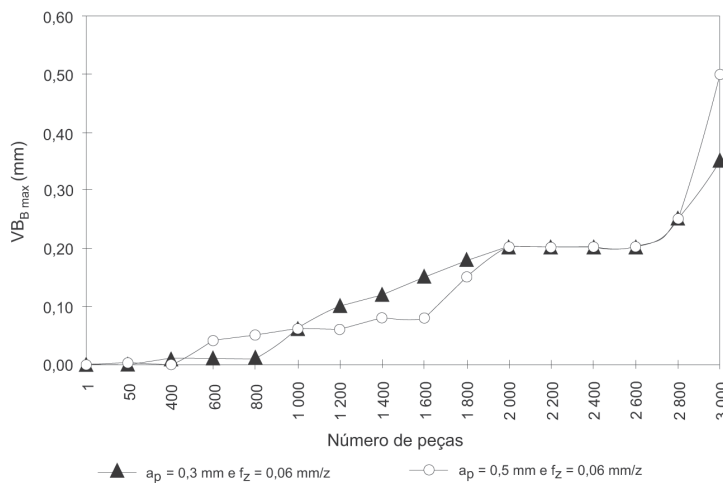


Figura 9.9 – Desgaste pás pastilhas de PCBN com o número de blocos de motores (Souza Jr., 2001)

9.4 – Vida das ferramentas

No capítulo 8 são mostradas as formas de desgaste predominantes na ferramenta de corte e os possíveis mecanismos atuantes que as promovem. Já neste capítulo, serão abordados tópicos relativos à quantificação do desgaste da ferramenta.

Antes, é preciso definir o que significa vida da ferramenta (Ferraresi, 1976):

“Vida da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido”

O fim de vida de uma ferramenta de corte é definido pelo grau de desgaste previamente estabelecido. O tamanho deste desgaste dependerá de inúmeros fatores. Entre outros, pode-se citar:

- Receio de quebra da cunha cortante;
- Elevadas temperaturas na interface cavaco-ferramenta;
- As tolerâncias dimensionais estabelecidas no projeto já estão comprometidas;
- O acabamento da superfície usinada não é mais satisfatório;
- Aumento nas dimensões das rebarbas;
- Elevação da força de usinagem;
- Nível de ruído maior;
- Crescente nível de vibrações;
- Outros.

Como expressar a vida da ferramenta

Fixado um critério para fim de vida como, por exemplo, o estabelecido na norma ISO 3685, ou em experiências acumuladas anteriormente, a vida da ferramenta pode ser expressa de diversas maneiras:

- Número de peças produzidas;
- Percurso de avanço (mm);
- Percurso efetivo de corte (km);
- Velocidade de corte para determinado tempo de vida (exemplo: $v_c 60 = 150 \text{ m/min}$);

- Volume de material removido;
- Outros.

9.5 - Estudo das formas de desgaste

Neste tópico, serão discutidos os aspectos das formas dominantes de desgaste, como flanco, cratera e entalhe.

Durante a usinagem, ocorre o contato físico da ferramenta com a peça e do cavaco com a ferramenta, em um determinado meio e condições dinâmicas de corte. Isso, conseqüentemente, acarretará em mudanças na geometria e na forma original da aresta da ferramenta, em virtude da ocorrência de desgaste progressivo.

Na figura 9.4, descreveu-se as principais áreas de desgaste e as três diferentes formas: flanco, cratera e entalhe. Na seqüência, são apresentados os mecanismos associados a cada uma dessas formas.

9.5.1 - Desgaste de cratera

Segundo Aspinwail e Chen (1978), este tipo de desgaste geralmente está associado às elevadas temperaturas geradas na interface cavaco-ferramenta. Isso ocorre em razão da combinação dos mecanismos de desgaste denominados difusão e adesão, na superfície de saída da ferramenta durante o deslizamento do cavaco. A máxima profundidade de cratera está próxima ao ponto médio do comprimento de contato entre o cavaco e a superfície de saída, onde a temperatura atinge seu maior valor. A posição varia de acordo com o material usinado, ocorrendo, normalmente, atrás da aresta de corte. A profundidade e a largura da cratera, formada na superfície de saída da ferramenta, estão relacionadas à velocidade e ao avanço empregado durante o corte (Ferraresi, 1977).

Pode não ocorrer em alguns processos, principalmente quando são utilizadas ferramentas de metal duro recobertas (a cobertura de Al_2O_3 é a mais eficiente contra a craterização), cerâmicas e quando o material da peça é frágil (gera cavacos curtos). O crescimento do desgaste de cratera gera a quebra da ferramenta quando se encontra com o desgaste frontal (Diniz *et al*, 1999).

9.5.2 - Desgaste de entalhe

Conforme citado no capítulo anterior, o mecanismo de formação do entalhe não está bem explicado. Portanto, considera-se que, sob certas circunstâncias e condições de operação, um grande entalhe é formado na APC (detalhe 6 da figura 9.6), na extremidade livre do cavaco, levando ao enfraquecimento da aresta.

Entalhes menores também são constituídos na aresta secundária de corte, influenciando principalmente o acabamento superficial produzido.

9.5.3 - Desgaste de flanco

Geralmente, é o principal fator a limitar a vida das ferramentas de corte. Decorre da perda do ângulo de folga da ferramenta, ocasionando um aumento da área de contato entre a superfície de folga e o material da peça, tornando maior o atrito naquela região. Todo processo de usinagem causa desgaste de flanco, provocando a deteriorização do acabamento superficial e a perda das características dimensionais da peça. Este desgaste é incentivado pelo aumento da velocidade de corte.

Beloni (2001) descreveu em sua tese o modelo gráfico que Smith (1989) usou para representar a evolução do desgaste de flanco $VB_{B_{\max}}$ com o tempo de usinagem (curva da figura 9.10). Nesta curva, destaca-se a evolução do desgaste por regiões, denominadas de primária ou inicial, secundária ou progressiva e terciária ou catastrófica.

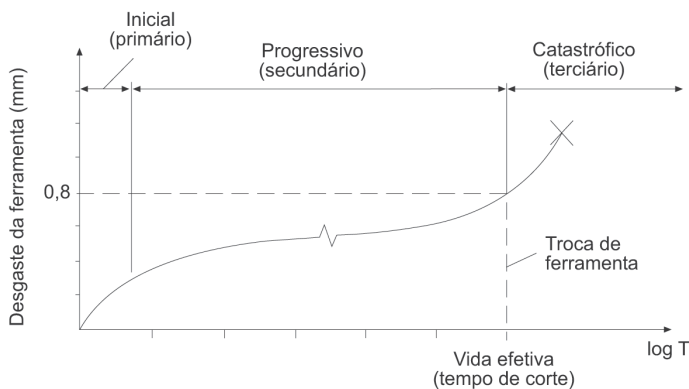


Figura 9.10 – Curva da evolução do desgaste de flanco de uma ferramenta (Smith, 1989)

Como justificativa para a ocorrência dessas regiões, Smith (1989) apresentou a própria evolução do desgaste durante o corte. A região inicial, no começo do processo de corte, é caracterizada pelo acerto das arestas cortantes ainda novas sobre a peça. Nesta etapa, tem-se um crescimento bem acelerado do desgaste de flanco. Com o decorrer da usinagem, já na região secundária da figura 9.11, verifica-se uma evolução menos acentuada, justificada pela uniformidade que o contato das arestas da ferramenta passam a ter com a peça. Mas, com o aumento do tempo de trabalho, à medida que a ferramenta vai se desgastando, a evolução do desgaste $VB_{B_{\max}}$ cresce rapidamente. Essa nova etapa é denominada região terciária ou catastrófica. Normalmente, é iniciada quando a ferramenta atinge desgaste de flanco máximo de 0,8 mm, caracterizando a necessidade de substituição das ferramentas.

9.6 - Critérios para medição de desgaste de uma ferramenta

A norma ISO 3685 utiliza os parâmetros K_T , VB_B , $VB_{B_{\max}}$ e VB_N para quantificar o desgaste nas ferramentas de corte (figura 10.2). O critério recomendado para avaliar as de aço-rápido, metal duro e cerâmica é:

- a) Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3$ mm;
- b) Desgaste de flanco máximo, $VB_{B_{\max}} = 0,6$ mm;
- c) Profundidade de cratera, $K_T = 0,06 + 0,3 f$, onde f é avanço em mm/rev;
- d) Falha catastrófica.

Mede-se, ainda, o valor dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes (VB_N e VB_C). Na superfície de saída têm-se: profundidade de cratera (K_T), largura (K_B) e distância do centro à aresta de corte (K_M), como na figura 9.11.

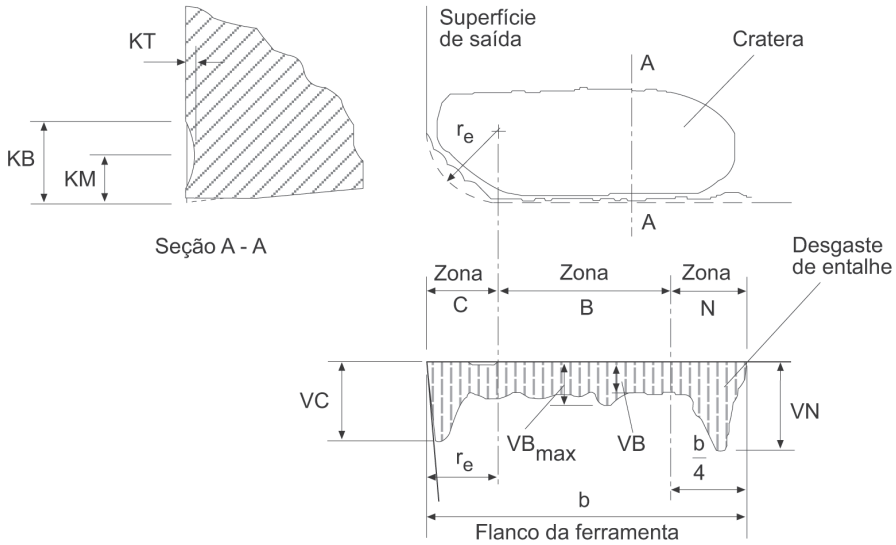


Figura 9.11 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (Trent e Wright, 1999)

9.6.1 – Quantificação da vida da ferramenta

Uma metodologia para expressar a vida da ferramenta (T) em função da velocidade de corte (v_c), mantendo os demais parâmetros (f , a_p , geometria, materiais da ferramenta e da peça, processo, máquina e fluido) constantes, consiste em levantar pelo menos três curvas de desgaste, para três distintas v_c (figura 9.12).

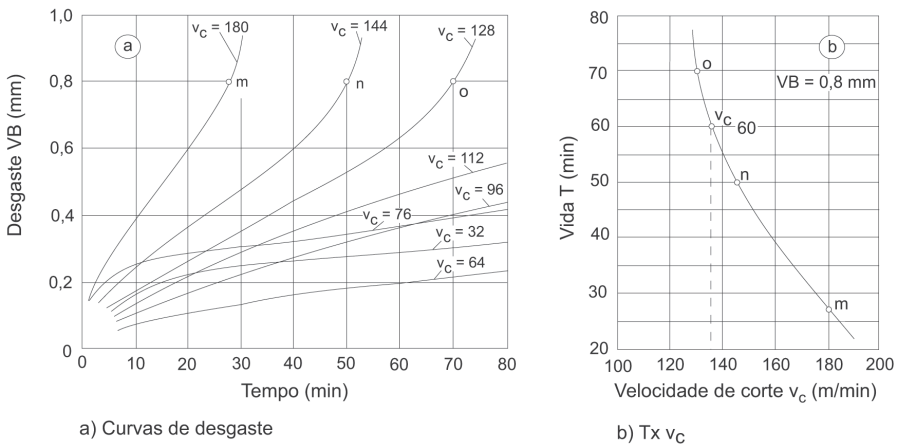


Figura 9.12 – Gráficos utilizados para expressar a vida da ferramenta em função de v_c (Ferraresi, 1977)

Conseguida a parte “a” da figura 9.13, é estabelecido o critério de fim de vida da ferramenta e, neste caso, foi $VB_{Bm\acute{a}x} = 0,8$ mm, obtendo-se três pontos “m”, “n” e “o”. Cada um tem as suas coordenadas relativas ao eixo x, correspondentes à vida, T em min e, em relação ao eixo y, correspondentes à v_c em m/min. De posse destes pontos, constrói-se o gráfico apresentado na figura 9.13 b. Para tornar linear a curva, aplica-se no próximo passo logaritmo nos dois eixos, obtendo-se, assim, um gráfico (figura 9.13).

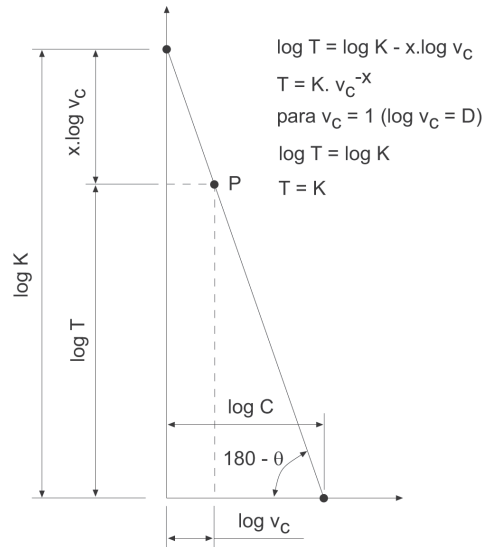


Figura 9.13 – Gráfico logT x logvc

A partir deste gráfico, demonstra-se matematicamente que T pode ser expressa em função de v_c pela equação simplificada de Taylor (equação 9.1).

$$T = K.v_c^{-x} \tag{9.1}$$

As análises da equação e da figura conduzem a observações de que K é a vida da ferramenta para $v_c = 1$ m/min, e x é correspondente à inclinação da reta. Esta equação é bastante simplificada em razão de diversos parâmetros serem constantes. Portanto, só tem utilidade dentro da faixa de v_c avaliada. Se for menor do que o limite inferior ensaiado, não é recomendada sua utilização já que, por regra geral, somente se aplica à região fora da APC.

Uma análise mais realista pode ser feita para se estabelecer a relação da vida da ferramenta com os diversos parâmetros que influenciam na usinagem. Isso pode ser definido através da equação expandida de Taylor (9.2).

$$T = K.v_c^{-a} . f^{-b} . a_p^{-c} . V_{BBm\acute{a}x}^d . fluido^e . processo^g . vibra\c{c}\tilde{a}\tilde{o}^h \quad (9.2)$$

Nesta equação, são incorporados os diversos parâmetros de influência, mas, o grande inconveniente, é o enorme tempo de obtenção. São necessários inúmeros ensaios experimentais, consumindo horas de máquina, mão-de-obra e materiais, fazendo com que os custos sejam muito elevados.

Em ambientes industriais, a forma expandida não tem praticamente nenhuma aplicação. Já a simplificada é freqüentemente obtida, principalmente pelos coeficientes K e x serem utilizados na determinação das condições econômicas de corte: velocidade de corte de máxima produção (v_{cmxp}) e de mínimo custo ($v_{cmincus}$), que definem o intervalo de máxima eficiência (IME).

11 - Integridade superficial em usinagem

11.1 - Introdução

A fabricação de componentes pelo processo de usinagem, devido ao modo de retirada de material da peça envolvendo cisalhamento, apresenta as superfícies danificadas. As peças para aplicações na indústria automobilística e aeronáutica têm particularidades que tornam complexos seu dimensionamento e fabricação. Principalmente na aeronáutica, onde devem apresentar alta confiabilidade, pois uma falha pode trazer conseqüências catastróficas. Por outro lado, o peso excessivo tem que ser evitado por implicar em redução da capacidade de carga e aumentar o consumo de combustível da aeronave. Como grande parte desses componentes é submetida a cargas cíclicas, para que os critérios de segurança sejam atingidos sem excesso de peso, é comum serem projetados para suportar um determinado número de ciclos ao longo de sua vida, sendo substituído posteriormente. No início da década de 1960, a falha prematura de algumas peças foi motivo de profundas investigações. Como não se constataram erros de projeto, fabricação ou na matéria-prima utilizada, foi investigada a possibilidade de as falhas terem sido provocadas por alterações nas características do material da peça durante a usinagem. Na época, os pesquisadores verificaram que durante o processo de fabricação ocorrem alterações na superfície ou em uma camada subsuperficial da ordem de micrometros, reduzindo a resistência à fadiga da peça. Assim surgiu a linha de pesquisa conhecida como integridade superficial.

Esse termo foi citado pela primeira vez em 1964 por Field e Kahles, como definição para o conjunto de alterações na superfície das peças devido à ação das ferramentas de corte ou de outros processos de fabricação. As alterações são de natureza mecânica, metalúrgica, química ou outros tipos de transformação. A integridade superficial tornou-se oficialmente um campo de estudos durante a 21ª assembléia geral do CIRP (Setembro de 1971).

A natureza de uma superfície é caracterizada pela superficial e transformações metalúrgicas ocorridas na região subsuperficial da peça. O estudo da integridade superficial é dividido em três níveis (figura 11.1). O conjunto mínimo de informações que permitem a caracterização da natureza da camada superficial da peça, feita através da textura, das macro e microestruturas e microdureza. O padrão inclui informações sobre o comportamento da peça usinada, como a resistência à fadiga, à corrosão sob tensão e às tensões residuais. O completo contém os dois primeiros e ainda complementos sobre a resistência à fadiga, além de resultados de ensaios mecânicos.

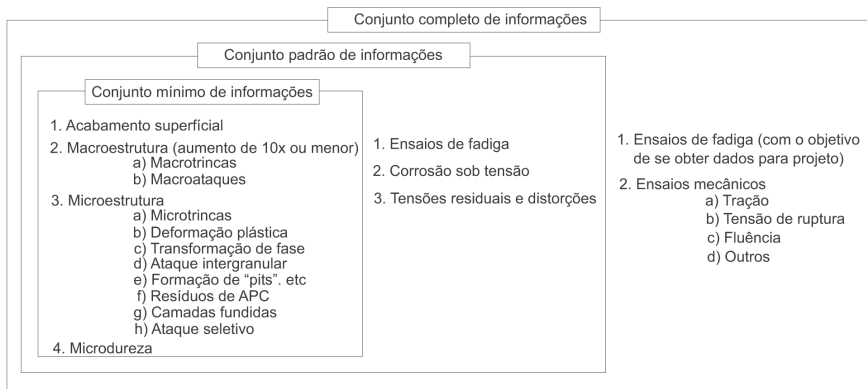


Figura 11.1 – Níveis de informação para a determinação da integridade superficial de uma superfície e os seus efeitos

O nível de conhecimento da integridade superficial depende de quanto crítica é a sua aplicação, pois cada item avaliado contribui para a elevação do custo final da peça.

As situações onde a análise é necessária são as que envolvem peças de elevado custo de fabricação, com vida pré-determinada ou quando a falha representa riscos à integridade física de usuários.

11.2 - Textura superficial

Uma superfície, por mais lisa que pareça, possui irregularidades do próprio processo de geração. O desenho de uma superfície real é mostrado na figura 11.2.

As características da superfície são definidas em três níveis: erros de forma, ondulação e rugosidade, de acordo com a distância entre as irregularidades.

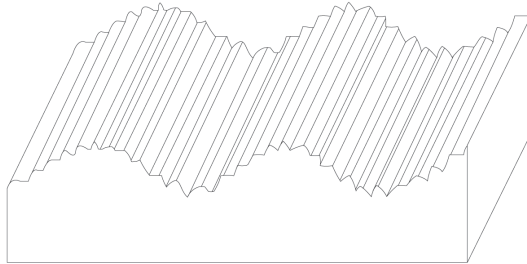


Figura 11.2 – Aspecto geral de uma superfície

A textura da peça (figura 11.2) é caracterizada por dois níveis de irregularidades: um perfil de rugosidade (linha cheia) e outro de ondulação (linha pontilhada), como mostrado na figura 11.3.



Figura 11.3 – Perfis de rugosidade e ondulação de uma superfície

A rugosidade é distinguida por irregularidades de menor espaçamento, enquanto a ondulação tem as irregularidades mais espaçadas.

11.3 - Medição da textura superficial

Uma série de fatores justifica a medição da textura superficial de uma peça: a qualidade obtida está relacionada com as características do processo

de fabricação. Assim, qualquer alteração, como uma eventual mudança na dureza ou na composição química da matéria-prima, desgaste excessivo da ferramenta de corte, adoção de parâmetros inadequados e instabilidade da máquina apresentam reflexos na textura da peça. Em outras palavras, a textura superficial é a impressão digital do processo de manufatura.

Pode estar relacionada ao desempenho do componente fabricado, no que diz respeito à capacidade de operação dentro dos padrões de qualidade e à aparência. Nesse aspecto, é importante ressaltar que o acabamento da superfície deve manter o custo de produção dentro de valores aceitáveis.

A função na qual o componente é destinado também está intimamente com a textura da superfície. Um bom exemplo é o caso de duas superfícies em movimento relativo. Imagina-se que quanto mais lisas, mas essa afirmação nem sempre é verdadeira. Quando são lubrificadas, o óleo deve ser mantido nas superfícies e para isso elas devem apresentar sulcos que retêm o lubrificante. Uma mais lisa que o necessário representa custos adicionais sem melhorar o desempenho. Peças destinadas à pintura são um exemplo da relação da textura superficial com a aparência do produto final. A resistência térmica é dependente da área real de contato entre duas superfícies e, em aplicações que necessitam dissipação de calor, pode ser um fator determinante do desempenho.

A delimitação de parâmetros que definam a textura de uma superfície é uma tarefa difícil, devido a sua complexidade. Na seqüência são apresentados alguns parâmetros que fornecem informações sobre o perfil de rugosidade.

11.4 - Quantificação da textura superficial

Uma vez citada a importância de controlar a textura superficial de uma peça, é preciso estabelecer quais grandezas permitem caracterizá-la, bem como as técnicas empregadas com essa finalidade.

A medição da textura de uma superfície pode ser feita através de instrumentos de contato ou ópticos. No primeiro caso, utiliza-se um apalpador, que percorre a superfície deslocando de acordo com a topografia da região. Os deslocamentos são ampliados e registrados e, então, é determinado o perfil da superfície. Na figura 11.4 mostra-se o princípio de funcionamento do método de medição por contato. A amostra e o papel se movimentam em sentidos opostos. O apalpador segue na direção vertical, acompanhando

a topografia da superfície. O perfil da superfície é ampliado e registrado no papel. A construção de um equipamento (figura 11.4) apresenta uma série de problemas como o comprimento da haste, que deve ser grande o suficiente para uma ampliação perceptível, dificuldades de determinar parâmetros para descrever a topografia com base no perfil impresso.

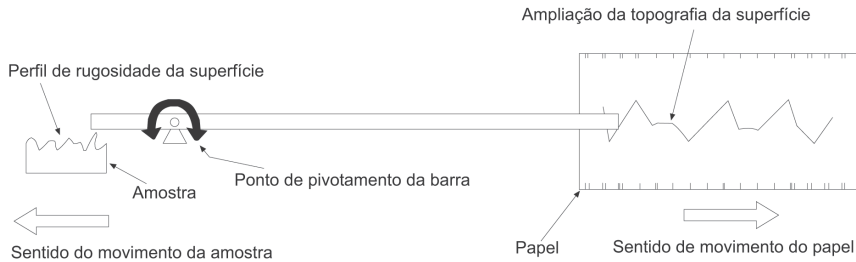


Figura 11.4 – Princípio de funcionamento do método de medição da textura superficial por contato

Os instrumentos usados na medição da rugosidade de superfícies por contato seguem o mesmo princípio mostrado na figura 11.4, com a diferença que o deslocamento do apalpador é convertido em sinais elétricos amplificados, armazenados e utilizados para a determinação dos parâmetros.

A topografia de uma superfície influencia no comportamento do feixe luminoso que incide sobre ela. Os instrumentos que empregam o princípio óptico funcionam com base nele.

Existe um grande número de parâmetros que delimitam a rugosidade de uma superfície. São divididos em três grupos, de acordo com o perfil de rugosidade quantificado:

- 1) *Parâmetros de amplitude*: são determinados pela altura dos picos e/ou profundidade dos vales, a partir de um referencial na horizontal;
- 2) *Parâmetros de espaçamento*: definidos de acordo com a distância entre as irregularidades ao longo da superfície;
- 3) *Parâmetros híbridos*: combinação dos parâmetros de amplitude e espaçamento.

Para medir a rugosidade é preciso antes apresentar algumas definições fundamentais.

Comprimento de avaliação

Os comprimentos avaliados na quantificação da textura de uma superfície são três, como mostrados na figura 11.5.

O comprimento de amostragem corresponde a cada trecho utilizado no cálculo dos parâmetros. Este deve assegurar a significância estatística sem incluir detalhes desnecessários.

O de análise corresponde à soma de todos os comprimentos de amostragem.

Já o total é o de amostragem acrescido de dois trechos nas extremidades, que não são considerados no cálculo dos parâmetros de rugosidade e ondulação. Os comprimentos inicial (*run up*) e final (*overtravel*) são desprezados, pois a agulha do instrumento percorre esses trechos com velocidade variável.

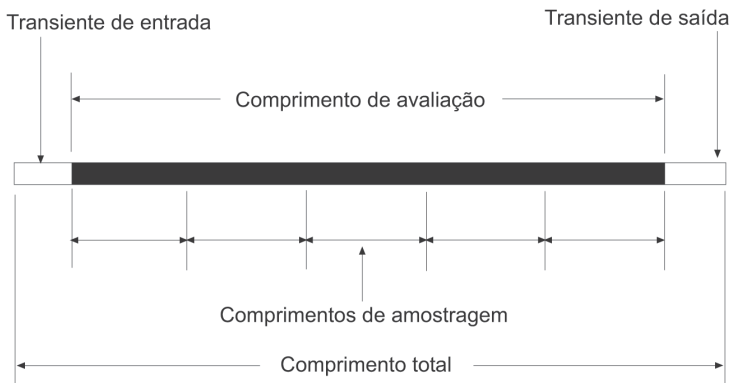


Figura 11.5 – Comprimentos de análise para cálculo da rugosidade

Linha de centro

A medida dos parâmetros de rugosidade é feita com base em uma linha imaginária, chamada de centros. Esta corta a superfície na posição em que a área dos picos, acima da linha, e equivale à dos vales, abaixo. Na figura 11.6 observa-se o posicionamento da linha de centros.

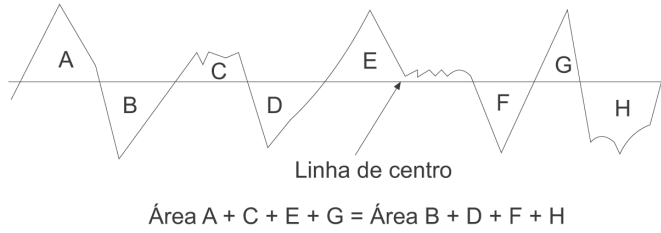


Figura 11.6 – Posicionamento da linha de centro

Cut-off

O perfil de rugosidade de uma superfície é complexo e pode ser comparado a um sinal de ruído branco, ou seja, formado por ondas de diferentes frequências. Antes de determinar a rugosidade da superfície, é necessário definir quais perfis serão considerados no cálculo. Essa seleção é feita através do *cut-off*, que representa o máximo espaçamento entre as irregularidades que serão parte do cálculo. Irregularidades maiores são consideradas ondulações. O *cut-off* atua, então, como um filtro para separar a rugosidade da ondulação. O comprimento é selecionado no próprio instrumento de medição e recomenda-se que seja pelo menos 2,5 vezes superior à distância entre picos do perfil de rugosidade.

11.4.1 - Parâmetros de rugosidade

Rugosidade média (R_a)

O tamanho da rugosidade média de uma superfície é o parâmetro mais difundido. É determinado a partir da média das distâncias entre os pontos da superfície e a linha de centro, ao longo do comprimento de amostragem (figura 11.7).

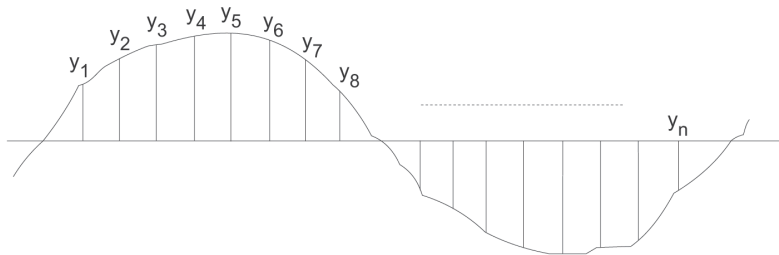


Figura 11.7 – Derivação matemática de R_a e R_q

O valor da rugosidade média de uma superfície é calculado da seguinte forma (equação 11.1).

$$R_a = \frac{|y_1| + |y_2| + \dots + |y_n|}{n} \quad (11.1)$$

Onde

Y_1, \dots, Y_n = alturas (ou profundidades) de picos (ou vales) avaliados no comprimento da amostragem.

n = número de eventos avaliados.

Superfícies com diferentes aspectos podem apresentar o mesmo valor de R_a . A figura 11.8 demonstra superfícies com características distintas com o mesmo valor de R_a .

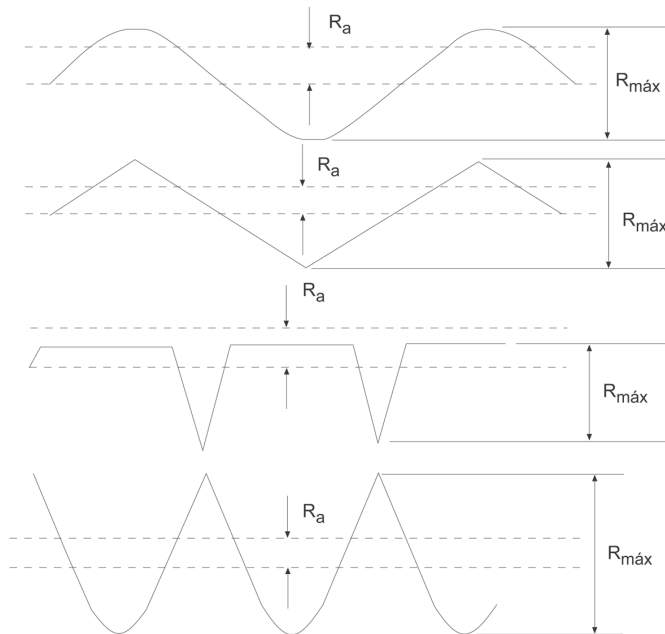


Figura 11.8 – Perfis com o mesmo valor de R_a e diferentes geometrias

Como R_a não caracteriza a geometria das irregularidades da superfície, outros parâmetros foram definidos.

Rugosidade média quadrática (R_q) (RMS)

O parâmetro R_q é calculado segundo a equação 11.2:

$$R_q = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n}} \quad (11.2)$$

Verifica-se que o parâmetro R_q representa melhor a natureza de uma superfície. Na tabela 11.1 são apresentadas cinco seqüências de números cuja média aritmética é 5, com diferentes médias quadráticas, dependendo da dispersão dos valores.

Tabela 11.1 – Seqüências de valores com as mesmas médias aritméticas e diferentes médias quadráticas

Seqüências			Média (R_a)	Média Quadrática (R_q)	Desvio padrão
5	5	5	5	5	0
4	5	6	5	5,07	1
3	5	7	5	5,26	2
2	5	8	5	5,57	3
1	5	9	5	5,97	4

A dificuldade de estabelecer um parâmetro que represente o aspecto geral da topografia de uma superfície fez com que vários outros surgissem, definidos para destacar uma característica específica da superfície que é importante para uma aplicação. A seguir, são citados alguns parâmetros.

Parâmetros que especificam a altura entre picos e vales

Em alguns casos é desejável especificar a máxima altura dos picos e/ou vales de um perfil de rugosidade. Como mostra a tabela 11.1, o R_a é pouco sensível à variação dessa característica e, com isso, surgem parâmetros que representam melhor o perfil de picos e vales da superfície, como os $R_{\text{máx}}$, R_p e R_t (figura 11.9).

O R_t expressa a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo, medida na direção perpendicular à linha de centro, em todo o comprimento de análise. A determinação do $R_{m\acute{a}x}$ é semelhante a do R_p , só que dentro do comprimento de amostragem.

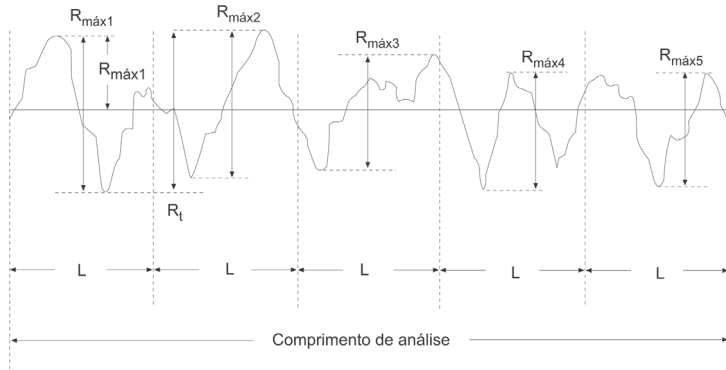


Figura 11.9 – Representação dos parâmetros $R_{m\acute{a}x}$, R_p e R_t

Razão de material – curva de Abbott-Firestone

A razão de material (fração de contato) simula o desgaste de um componente que fornece uma superfície de contato para outro, movendo-se relativamente a ele. Um exemplo é visto na figura 11.10a, onde uma superfície plana (uma placa de polimento) repousando sobre o pico mais alto de um perfil. À medida que o pico se desgasta, a linha de topo de perfil remanescente (linha de contato) move para baixo o perfil, e o comprimento da superfície em contato com a placa de polimento aumenta. A razão de material é a do comprimento da superfície de contato, em qualquer profundidade do perfil, em relação ao tamanho de avaliação e, é expressa com uma porcentagem (figura 11.10b).

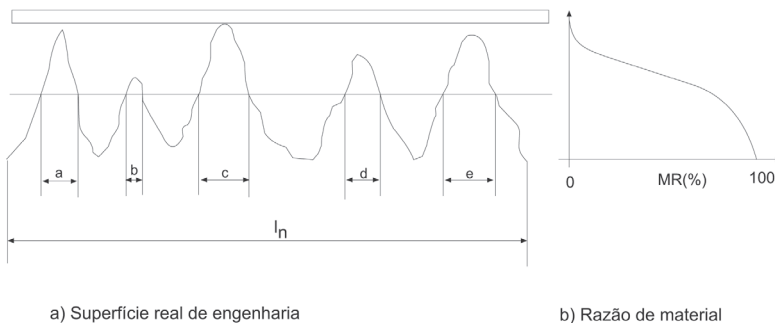


Figura 11.10 – Razão de material/fração de contato/ T_p

Mostrando na forma gráfica o valor da razão de material (r_m), contra a profundidade abaixo do pico mais alto (ou a distância a partir da linha média), entre os limites 0 e 100%, a curva de razão de material (ou Abbott-Firestone) é obtida. Esta representa a razão da superfície do perfil em função da profundidade.

A taxa de apoio é definida pela razão (Equação 11.3):

$$\text{Taxa de apoio} = \frac{a + b + c + d + e}{l_n} \quad (11.3)$$

À medida que a linha horizontal avança, os valores da taxa de apoio aumentam até atingir 100%.

11.4.2 - Parâmetros da curva de Abbott-Firestone

São determinados cinco parâmetros principais na curva de Abbott-Firestone, conforme a figura 11.11. Na tabela 11.2 são mostradas as definições obtidas diretamente da curva de Abbott-Firestone e outras derivadas.

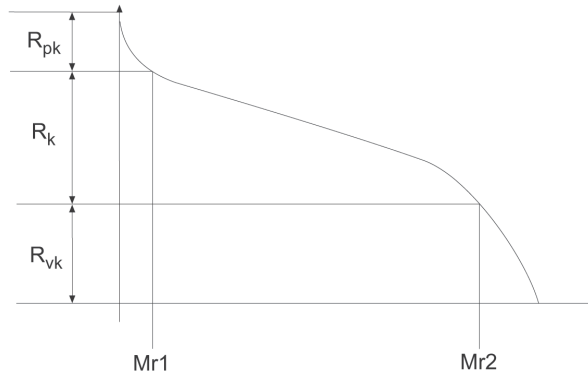


Figura 11.11 – Parâmetros da curva de Abbott-Firestone

Tabela 11.2 – Descrição dos parâmetros da curva de Abbott-Firestone

Parâmetro	Descrição / Equação
Rpk	Corte dos picos mais altos, parte superior da superfície, que rapidamente se desgasta na primeira rodagem. Obs.: Parâmetro para cálculo de V_{sf}
Rk	Parte intermediária da rugosidade. Obs.: Parâmetro para cálculo de V_{sf}
Rvk	Remanescente dos sulcos principais. Obs.: Parâmetro para cálculo de retenção de fluidos de lubrificação V_r
Mr₁	Valor em percentual de fração de corte da superfície quando se desgasta o material de primeira rodagem (Rpk). Obs.: Parâmetro para cálculo de V_{sr}
Mr₂	Valor em percentual de fração de corte da superfície quando se desgasta o material intermediário (Rk). Obs.: Parâmetro de cálculo de retenção de fluido lubrificante (V_r)
V_r	Volume de retenção de fluido de lubrificação por unidade de superfície $V_r = (100 - Mr_2) * Rvk / 2000$
V_{sr}	Volume de sobremetal de (primeira) rodagem por volume de superfície $V_{sr} = Mr_1 * Rpk / 2000$
V_{sf}	Volume de sobremetal de funcionamento por unidade de superfície $V_{sf} = 100 * Rk / 2000$

A textura superficial e a razão de contato são importantes para o desempenho de peças usinadas ou dos equipamentos nelas montadas. Um exemplo é a textura gerada na superfície interna de cilindros de motores de combustão (figura 11.12). Na figura 11.12a aparece o bloco do motor, evidenciando os cilindros após a operação de brunimento, enquanto na figura 11.12b está a ferramenta abrasiva utilizada no processo.

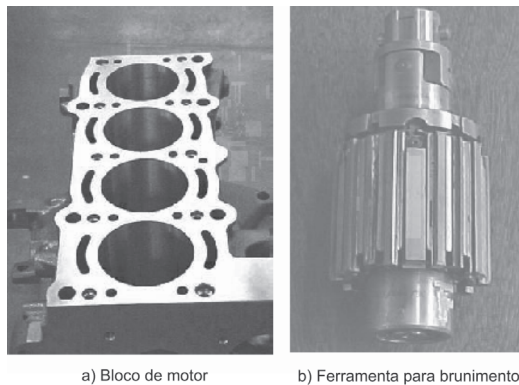


Figura 11.12 – Cilindro de motor de combustão interna

A superfície das paredes do cilindro deve favorecer a fixação do óleo lubrificante, impedindo o contato direto com os anéis dos pistões, mas ao mesmo tempo o par anel-cilindro tem que garantir a vedação para evitar a passagem dos gases provenientes do ciclo de combustão. A geração de uma topografia adequada, conferindo lubrificação e vedação, é obtida através da operação de brunimento a platô.

A textura superficial de cilindros de motores de combustão interna tem influência nos parâmetros relacionados ao funcionamento do motor, consumo de lubrificante, potência e torque (figura 11.13).

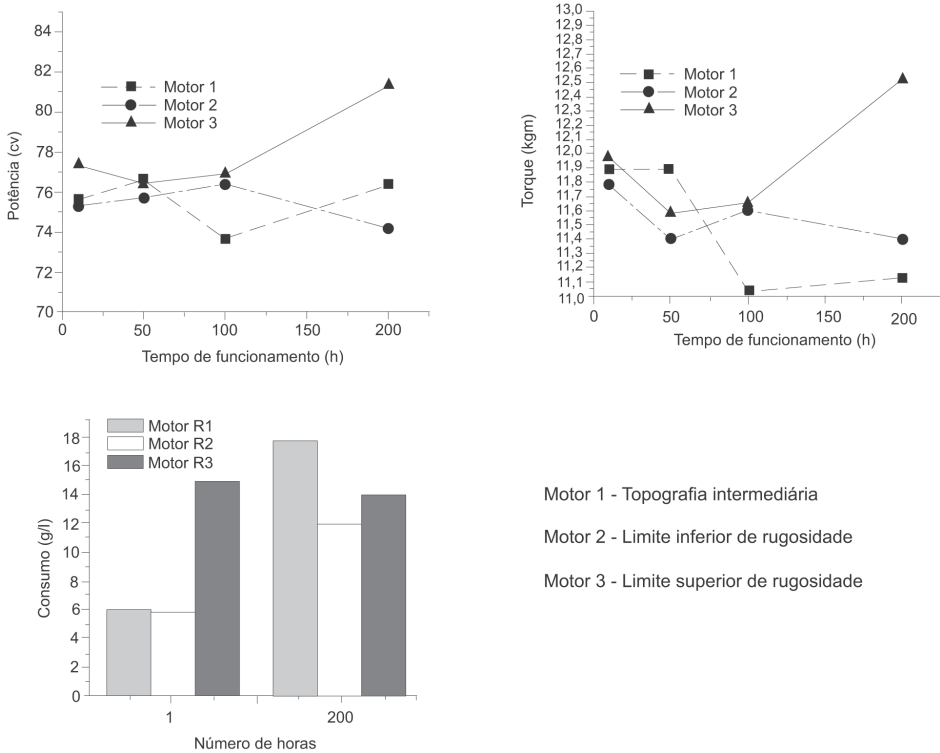


Figura 11.13 – Influência da textura superficial das paredes de cilindros de motores de combustão interna na potência, torque e consumo de lubrificante (Machado, 2002)

Com base nos resultados da figura 11.13, superfícies de cilindros com rugosidade próxima ao limite superior, estabelecidos em projeto, originam motores com maiores potência, torque e consumo de lubrificante.

11.4.3 - Efeitos de alguns parâmetros de usinagem no acabamento superficial

O acabamento superficial sofre influência de diversos parâmetros de usinagem, incluindo: geometria da ferramenta de corte e da peça, rigidez da máquina-ferramenta, material da peça e da ferramenta, condições de corte.

Em geral, a rugosidade é menor (ou o acabamento é melhor) quando:

- As deflexões produzidas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas;
- A ponta da ferramenta não é aguda;
- A ferramenta e a peça estão posicionadas e centradas (evitando desvios);
- O material da peça é inerentemente puro, livre de defeitos (trincas, bolhas e inclusões);
- O eixo principal da máquina-ferramenta está alinhado e as guias sem desgastes;
- A aresta de corte sem quebras;
- Corte sem APC.

Geometria da ferramenta

São:

γ_o - quanto maior o ângulo de saída, menores as forças de usinagem e as alturas das ondulações e deflexões.

α_o - o ângulo de folga deve prevenir o atrito entre a ferramenta e a superfície usinada, pois esse contato imprime o perfil do desgaste da ferramenta na superfície usinada. Devem ter valores adequados para ajudar na saída de fragmentos da APC, evitando que fiquem grudados nas superfícies usinadas.

r_n - o raio de ponta da ferramenta deve ser grande o suficiente para diminuir o efeito dos dentes de serra das marcas de avanço, com melhora no acabamento. No entanto, um raio excessivo pode gerar vibrações.

χ_r e χ'_r (ângulo de posição) - o efeito destes é pequeno, mas uma redução no ângulo de posição diminui as marcas de avanço, melhorando o escoamento do cavaco e acabamento. χ_r muito pequeno, pode causar vibrações. O aumento do ângulo de posição lateral eleva as alturas das marcas de avanço e prejudica o acabamento. É comum usar $\chi_r = 0^\circ$ por um comprimento de $1,5 \times f$ para remover parcialmente ou totalmente as marcas de avanço. Este método, porém, pode originar vibrações.

Porta-ferramenta

Deve ter suficiente seção transversal para minimizar deflexões e sua base precisa ser de boa qualidade quanto a superfícies e geometrias, para que a ferramenta tenha apoio. Aliado a isso, o sistema de fixação utilizado, seja por grampos ou pino central, necessita de rigidez. Todos esses fatores devem atuar simultaneamente, proporcionando adequada rigidez à ferramenta.

Porta-ferramentas delgados são mais sensíveis às forças estáticas e dinâmicas e, como resultado, as ondulações podem ser pronunciadas. Por outro lado, peças maiores (grandes seções transversais) são rígidas, e as alturas das ondulações pequenas, pois as deflexões geradas durante o corte são sensivelmente reduzidas.

Rigidez e precisão da máquina-ferramenta

A máquina operatriz rígida, sem erros de alinhamento e com movimentos precisos, não interfere no acabamento superficial. Vale ressaltar que todo componente mecânico que trabalha com fonte de excitação tem comportamento peculiar em relação à sua estabilidade dinâmica. No caso da usinagem, a ferramenta excita a peça, e vice-versa, mas ambas excitam a estrutura da máquina.

Fatores como massa e rigidez, além da sua forma e materiais, são determinantes no comportamento modal da máquina. Assim, o conceito de máquina rígida torna-se bastante abstrato, pois somente com o seu comportamento modal e dinâmico, conhecidos e entendidos, é que esta será utilizada em faixas de operação dinamicamente consideradas como estável (Rezende, 2006 e Gurgel, 2006). Mas, de qualquer forma, as seguintes características são desejáveis:

- Potência suficiente para manter a velocidade e o avanço requerido, sem problemas;
- Adequada resiliência para evitar deflexões;
- Rigidez e amortecimento contra vibrações;
- Base (fundação) adequada para minimizar vibrações e transmissão para outras máquinas;
- Precisão na fabricação, reduzindo ao mínimo o desalinhamento;
- Meios adequados para suportar rigidamente a peça e a ferramenta.

Material da peça

Composição química, dureza, microestrutura e a consistência metalúrgica são fatores que afetam o acabamento superficial. Em geral, este pode ser melhorado com:

- Composição química que desfavorece o aparecimento da APC;
- Alta dureza e baixa ductilidade;
- Granulação fina e alta dureza dos microconstituintes;
- Alta consistência nas propriedades (ao longo de toda seção transversal).

Condições de corte

A velocidade melhora o acabamento superficial. Em baixas velocidades, as forças são maiores, podendo acontecer a APC. Nas mais elevadas, o acabamento superficial torna-se insensível à velocidade de corte.

O avanço e a profundidade de corte são mais influentes no acabamento superficial. Dos dois, o avanço se destaca. A altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas são proporcionais ao quadrado do avanço. A profundidade de corte aumenta as forças e, portanto, as deflexões. A altura das ondulações também é elevada com a profundidade.

Material da ferramenta de corte

Materiais mais resistentes suportam velocidades mais altas, permitindo a eliminação da APC. Assim, metais duros e cerâmicos são melhores que aço-rápido e aço-carbono.

Em aplicações onde a tenacidade é primordial para manter a aresta de corte livre de falhas, o aço-rápido é mais adequado. Quanto menor o atrito entre a peça e a ferramenta, melhor o acabamento superficial. Neste ponto, os metais duros e as cerâmicas são superiores. Entre os dois primeiros, as diferenças são pequenas.

Fluido de corte

Como refrigerante, diminui o desgaste, e como lubrificante reduz o atrito entre a ferramenta e a peça ou cavaco, diminuindo a geração de calor e, conseqüentemente, a temperatura de corte. Normalmente, a rugosidade da

peça melhora. A eficácia dos fluidos de corte aplicados em abundância muitas vezes é comprovada, mas, em outras, isso não é evidente. Dessa forma, a usinagem com fluido aplicado em MQL, em alta pressão (acima de 50 bar) e mesmo o corte a seco, tem sido amplamente pesquisados e testados em inúmeras universidades e empresas do mundo.

Na usinagem, é grande o número de fatores que influenciam os resultados. A simples alteração do processo, do material da ferramenta ou da peça modifica totalmente os resultados encontrados, caracterizando-o como altamente sistêmico não-linear e de alta sensibilidade. O entendimento do processo permite que, para cada nova situação, se reflita e tome a decisão mais sensata.

Existem na literatura diversos trabalhos referentes a desgaste da ferramenta, temperatura na interface e rugosidade da peça. A análise de cada um, de forma isolada, já é relativamente difundida, mas faltam estudos que os correlacione simultaneamente.

11.5 - Integridade superficial

Além da textura, outro aspecto importante da integridade superficial de peças usinadas é relacionado a possíveis transformações metalúrgicas que ocorrem nas proximidades da superfície devido aos esforços mecânicos e elevadas temperaturas, em consequência da ação da ferramenta de corte. Essas alterações podem ser relacionadas a:

- Deformações plásticas resultantes de deformações a quente ou a frio;
- Micro e macrotrincas;
- Transformações de fase;
- Fragmentos da APC;
- Tensões residuais;
- Ataque intergranular.

Essas modificações podem provocar distorções, reduzir a resistência à fadiga e à corrosão sob tensão.

Os materiais mais propensos a sofrerem alterações nas camadas subsuperficiais são os aços endurecidos, inoxidáveis e ligas de titânio e níquel. Uma mudança comum na usinagem de aços endurecidos é a formação da

chamada camada branca, que recebe essa denominação por não reagir com as substâncias utilizadas em ataques para revelação de microestrutura. Na figura 11.14 são expostas fotografias de camadas brancas em superfícies do aço AISI 52100 geradas pelos processos de torneamento e retificação.

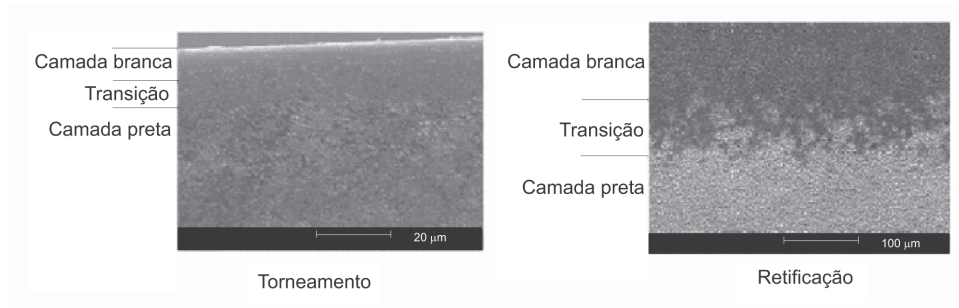


Figura 11.14 – Camadas brancas originadas no torneamento e retificação do aço AISI 52100

11.5.1 - Modificações nas superfícies

As condições reais da superfície não são expressas pelos parâmetros de medição da topografia. São apresentados dois fenômenos que alteram o aspecto e não necessariamente são detectados pela medição, ou modificam os seus valores, dando uma falsa impressão do real estado. Neste tópico, são abordados o fluxo lateral de material (*side flow*) e abertura de cavidades (*open grain*). Cada um desses fenômenos é detalhado a seguir.

11.5.2 - Fluxo lateral de material (*side flow*)

Também conhecido como *side flow*, é a movimentação do material da peça no sentido contrário ao do avanço. Fotografias tiradas com microscópio eletrônico de varredura, como a da figura 11.15, evidenciam a ocorrência de fluxo lateral de material. A superfície mostrada é a de um disco de freio de ferro fundido cinzento, e a região em destaque evidencia a movimentação de material no sentido contrário ao do avanço.

O avanço é o parâmetro de corte que mais influencia o fluxo lateral. Outros relacionados à geometria da ferramenta, como o raio de ponta, e as condições de corte, como a profundidade e a velocidade, também são relevantes.

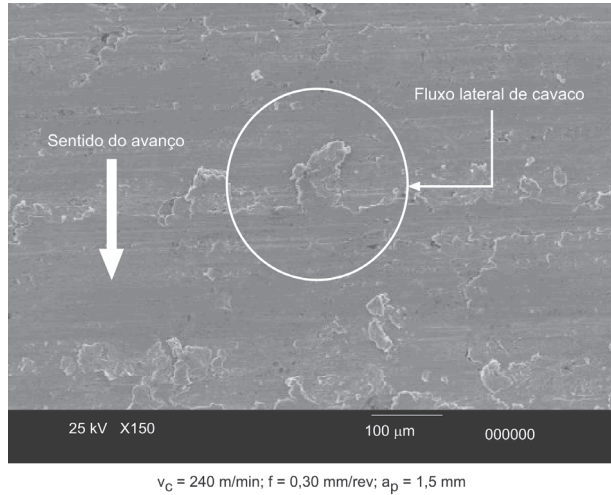


Figura 11.15 – Superfície torneada de um disco de freio de ferro fundido cinzento, mostrando o fluxo lateral de material

A ocorrência do fluxo lateral de cavaco pode ser comprovada pela comparação entre os valores teóricos e experimentais da rugosidade. Tomando como base o R_a , pode-se confrontar valores teóricos com resultados experimentais (figura 11.16). O valor teórico de R_a é determinado pela equação 11.4.

$$R_a = \frac{f^2}{18 \cdot \sqrt{3 \cdot r_\xi}} \quad (11.4)$$

Onde:

f = avanço

r_ξ = raio da ponta da ferramenta

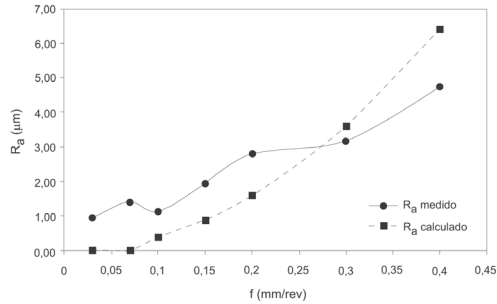


Figura 11.16 – Gráfico comparativo entre valores de R_a teórico e experimental (Souto, 2003)

De acordo com a figura 11.16, verifica-se que para baixos valores de avanço, os valores de R_a calculados são menores que os determinados em ensaios experimentais, fato justificado pela influência de fatores como instabilidade da máquina-ferramenta, vibrações, folgas, presença de fragmentos da APC, etc. Com o aumento do avanço, os valores reais e teóricos de R_a convergem para acima de 0,3 mm/rev. Os R_a teóricos passaram a ser maiores que os experimentais. Para que isso ocorra, é necessário que as marcas de avanço sejam parcialmente cobertas pelo material da peça, que (figura 11.17) é deslocado no sentido contrário ao do avanço, durante a passagem da ferramenta.

11.5.3 – Abertura de cavidades (*open grain*)

O fenômeno conhecido como *open grain* ocorre na usinagem de materiais frágeis e forma cavidades ao longo da superfície (Souto, 2003). Na imagem do microscópio eletrônico de varredura (figura 11.17), identifica-se a presença de cavidades cobertas por material da peça.

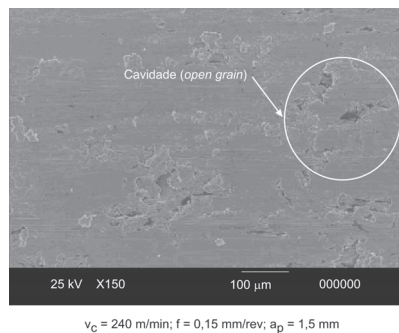
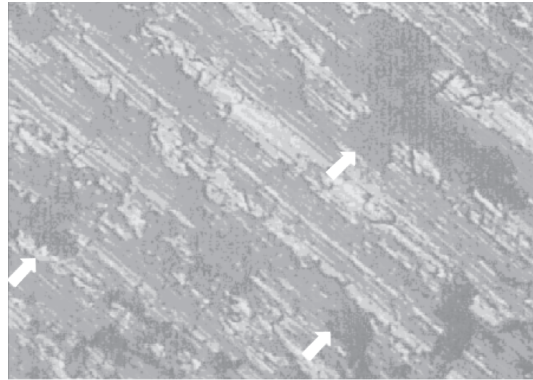


Figura 11.17 – Superfície de um disco de freio de ferro fundido cinzento

A presença das cavidades na superfície é visualizada através de imagens de microscópio óptico (figura 11.18), que corresponde a uma superfície gerada com as mesmas condições de corte adotadas para a exposta na figura 11.17.



$v_c = 240 \text{ m/min}$; $f = 0,15 \text{ mm/rev}$; $a_p = 1,5 \text{ mm}$

Figura 11.18 – Imagem da superfície de um disco de freio de ferro fundido cinzento com cavidades identificadas pelas setas

Dependendo de suas dimensões e distribuição, as cavidades não são evidenciadas apenas pela interpretação de medidas de rugosidade, mas principalmente pelos parâmetros de amplitude média (R_a e R_q). A presença dessas cavidades determina o desempenho da peça usinada de várias maneiras, como no valor do coeficiente de atrito, na geração de pontos de concentração de tensão. As cavidades criadas durante o desbaste impossibilitam a obtenção de superfícies com topografias suaves em operações de acabamento. No *open grain*, o avanço é o que mais influencia a quantidade, quanto à área média das cavidades geradas em superfícies torneadas de ferro fundido cinzento.

Tanto a textura quanto a integridade superficial, são fatores decisivos para a vida e o desempenho de peças usinadas, principalmente na resistência à fadiga.

As características da peça em relação às propriedades requeridas, em termos de vida útil, dimensões, tolerâncias, vedação e retenção de fluido, são fundamentais para a seleção do processo de fabricação, da geometria da ferramenta, do uso de fluido e, por fim, dos parâmetros de corte que serão utilizados. Portanto, o conhecimento e entendimento da usinagem são essenciais para fabricar componentes dentro dos parâmetros estabelecidos no projeto.

