

Usinagem por Abrasão

Diferentemente das operações executadas com arestas de geometria definida, na usinagem por abrasão o material da peça é removido por meio da ação de grãos abrasivos, os quais são partículas não-metálicas, extremamente duras, com arestas que apresentam forma e orientação irregular. Exemplos típicos de operações abrasivas são o lixamento, a retificação, a lapidação e o brunimento, entre outros. Embora haja registros do uso da remoção de material por abrasão no antigo Egito (2000 a.C.) e no Antigo Testamento (Samuel 13:20), a utilização de máquinas retificadoras industriais começou na década de 1860, inicialmente com a produção de peças para máquinas de costura, seguida de componentes para bicicletas (Malkin, 1989).

A retificação merece destaque dentre os processos abrasivos devido à sua importância para a indústria metal-mecânica, visto que esta operação é capaz de assegurar a produção de componentes com tolerâncias dimensionais e geométricas superiores àquelas obtidas em operações que utilizam ferramentas de corte com geometria definida (torneamento, fresamento, furação, etc). Por outro lado, a retificação é considerada uma operação pouco eficiente, pois nela um elevado consumo de energia é revertido em uma baixa taxa de remoção de material, se comparada às citadas operações com ferramentas de geometria definida.

A Figura 11.1 apresenta as principais das operações de retificação (Kalpakjian, 1995). Observa-se que as operações podem ser agrupadas de acordo com a superfície usinada (cilíndrica externa, cilíndrica interna ou plana) e com o movimento relativo entre peça e rebolo (de passagem ou de mergulho).

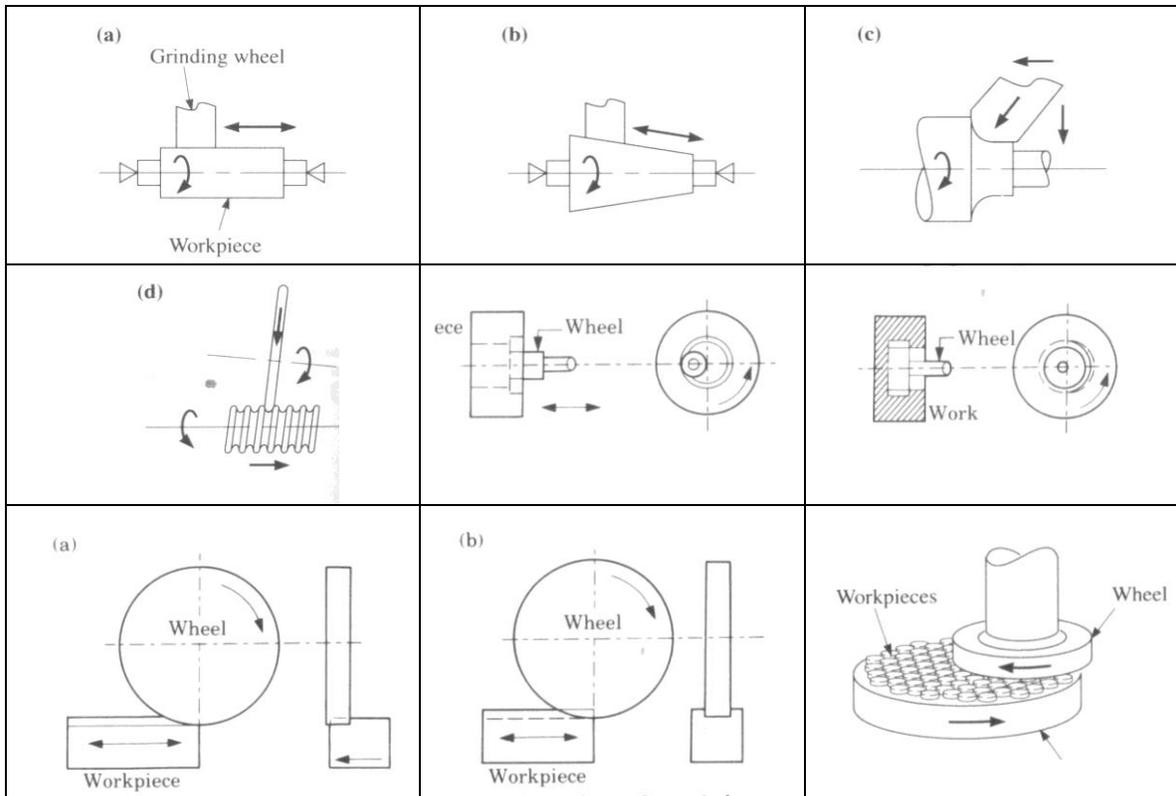


Figura 11.1: Principais operações de retificação.

Além das operações descritas na Figura 11.1, outras de usinagem por abrasão merecem destaque por sua aplicação em importantes segmentos da indústria metal-mecânica. A Figura 11.2 ilustra algumas dessas operações, a saber: lapidação de esferas de mancais de rolamentos, brunimento de cilindros, retificação de engrenagens e afiação de ferramentas de corte.

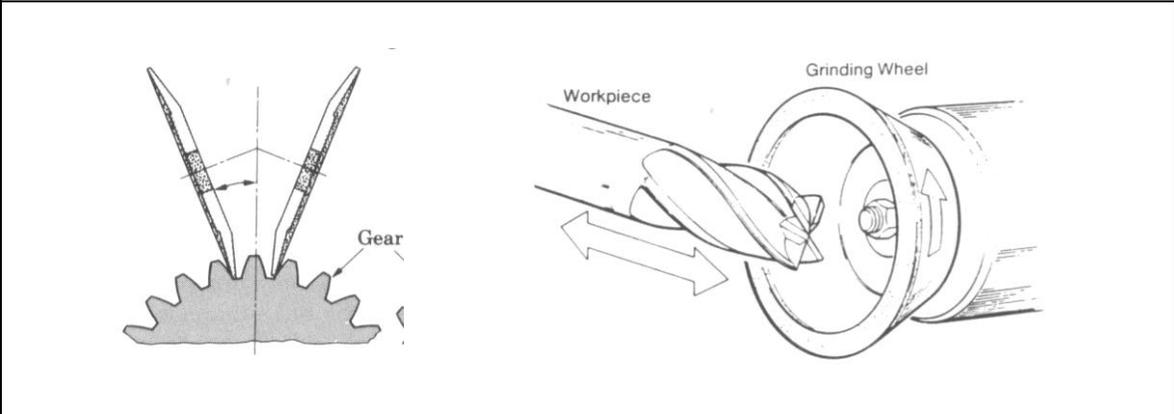
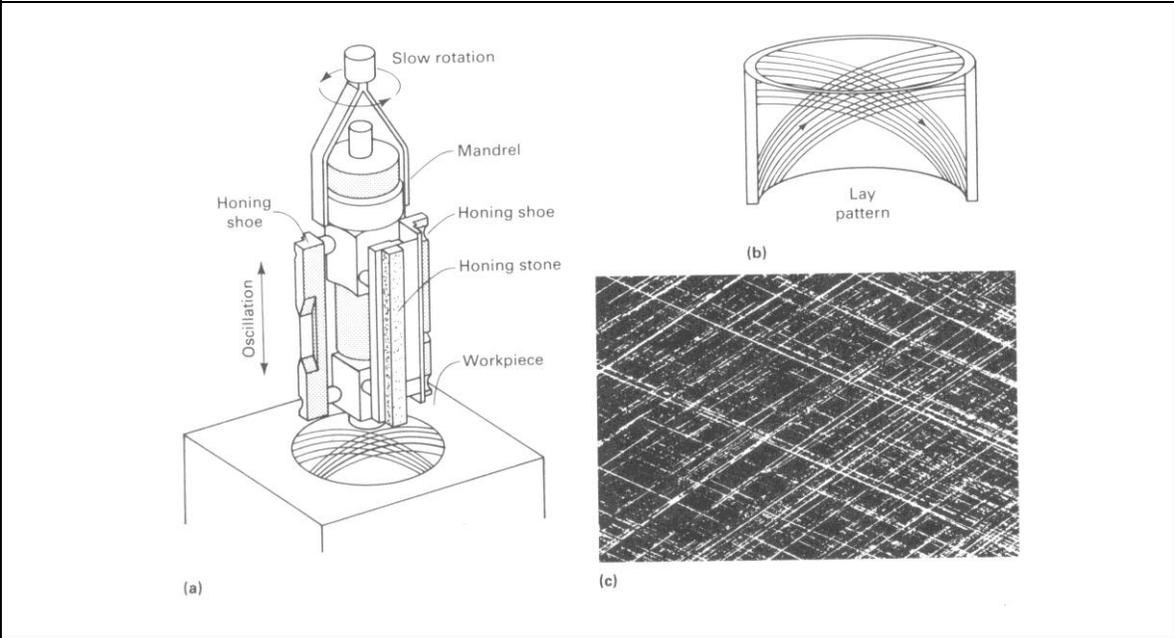
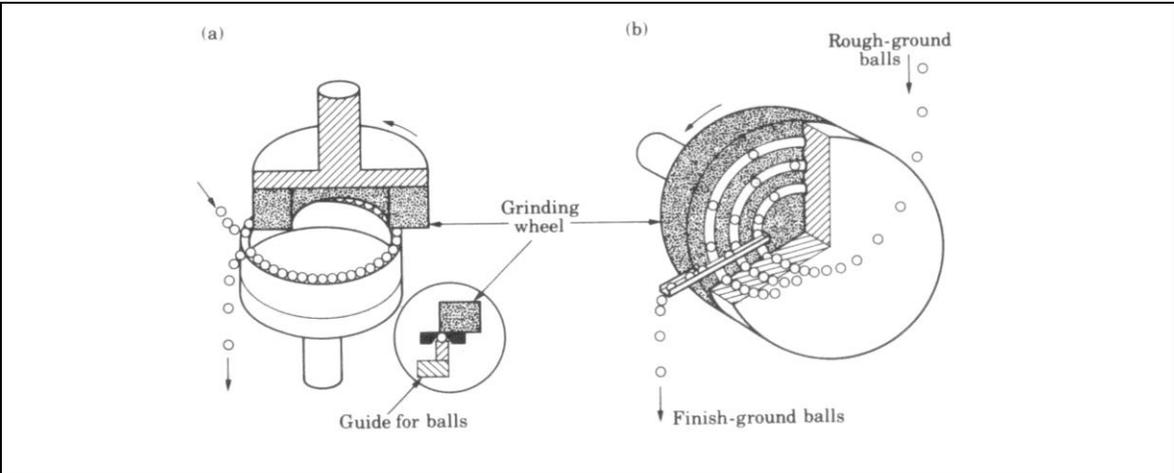


Figura 11.2: Exemplos de operações de usinagem por abrasão: (a) lapidação de esferas de rolamento, (b) brunimento, (c) retificação de engrenagens e (d) afiação de ferramentas de corte.

11.1 Grandezas físicas das operações de retificação

As principais grandezas físicas relativas às operações de retificação são apresentadas a seguir e ilustradas na Figura 11.3 para as operações cilíndrica e plana:

- v_s : Velocidade periférica do rebolo (m/s);
- v_w : Velocidade periférica da peça (mm/min);
- a_p : Profundidade de usinagem (mm);
- a_e : Penetração de trabalho (mm);
- l_c : Comprimento de contato rebole-peça (mm).

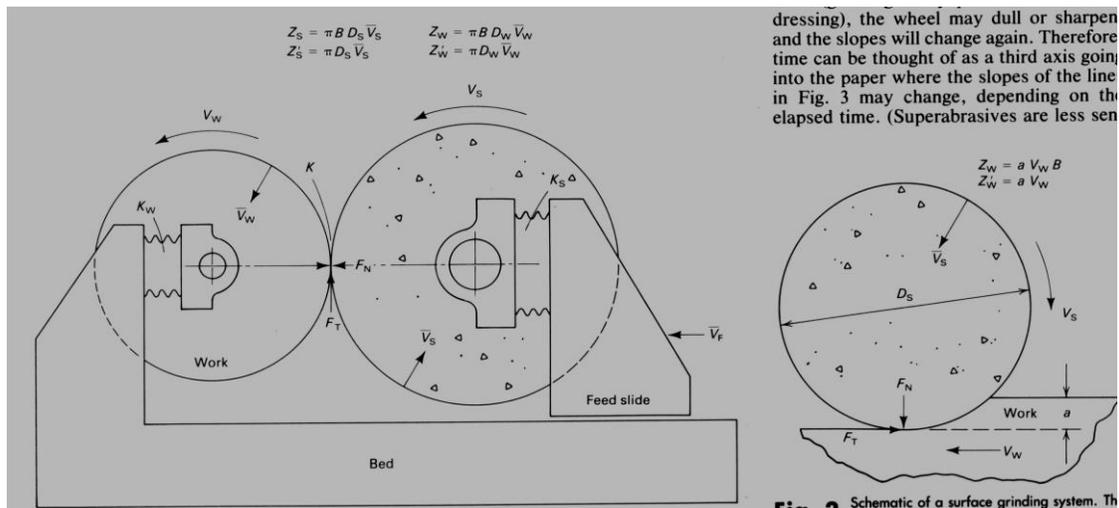


Figura 11.3: Grandezas físicas na retificação.

A velocidade periférica do rebolo, normalmente, varia entre 10 e 45 m/s para rebolos com abrasivos convencionais, mas pode chegar a 90 ou 120 m/s no caso de rebolos superabrasivos. Isto por implicar em valores de rotação do eixo-árvore superiores a 10.000 rpm. Já a velocidade da peça assume valores mais modestos, na faixa de 10 a 25 mm/min (Nussbaum, 1988).

A profundidade de usinagem normalmente é selecionada em função da largura do rebolo, sendo recomendado que o valor daquela não ultrapasse um terço do valor deste. A penetração de trabalho, exceto em situações especiais, situa-se na faixa de centésimos de milímetros, podendo, porém, variar de milésimos a décimos de milímetros. Estes baixos valores de penetração de trabalho contribuem para a obtenção de tolerâncias estreitas (qualidades de trabalho IT4 ou IT3) Já em operações com ferramentas de geometria definida são empregados, obrigatoriamente, valores mais elevados de profundidade de usinagem e de penetração de trabalho. Com isso tem-se a elevação das forças de usinagem e, conseqüentemente, a obtenção de tolerâncias mais abertas (qualidades de trabalho iguais ou superiores a IT7).

Finalmente, o comprimento de contato rebolo-peça define a extensão de contato entre ambos, sendo particularmente elevado na operação cilíndrica interna quando o diâmetro do rebolo se aproxima do diâmetro da peça. Por outro lado, no caso da operação cilíndrica externa a extensão do contato do rebolo-peça resumir-se-ia a uma reta, não fossem as deformações elásticas impostas ao par.

De forma a correlacionar as operações de retificação plana, cilíndrica externa e cilíndrica interna, Hahn (apud Oliveira,1989) propôs uma grandeza denominada diâmetro equivalente (d_e), que representa o grau com que a superfície do rebolo e da peça se adaptam, vide Equação 11.1. O sinal positivo representa a operação cilíndrica externa e o negativo a operação cilíndrica interna.

$$d_e = \frac{d_s}{\left[1 \pm \left(\frac{d_s}{d_w} \right) \right]} \quad (11.1)$$

Onde d_s é o diâmetro do rebolo;

d_w é o diâmetro da peça.

Conhecendo o valor do diâmetro equivalente é possível determinar o comprimento de contato rebolo-peça e, conseqüentemente, a pressão exercida pelo rebolo, parâmetro de

fundamental importância na seleção da dureza do rebolo. A Figura 11.4 ilustra essa situação.

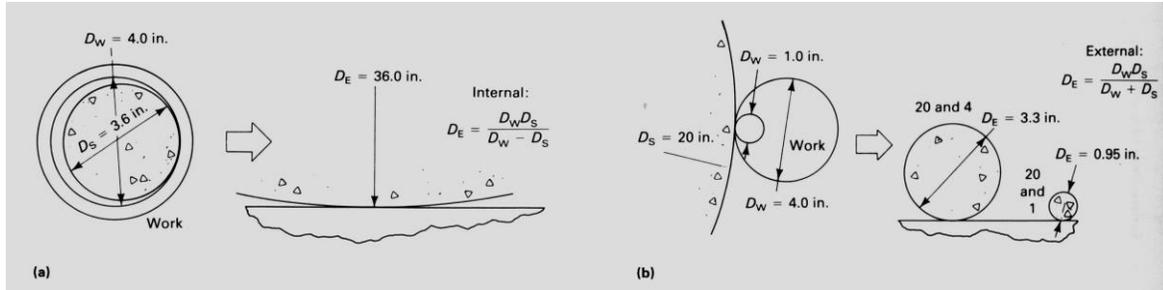


Figura 11.4: Equivalência entre diâmetros de rebolos nas operações cilíndrica interna e externa.

Outra grandeza bastante empregada é a espessura de corte equivalente (h_{eq}), proposta por Peters (apud Oliveira, 1989) e que representa a espessura da camada de material arrancado pelo rebolo, vide Equação 11.2:

$$h_{eq} = v_w \frac{a_e}{v_s} \quad (11.2)$$

A Figura 11.5 mostra a influência da espessura de corte equivalente sobre a rugosidade e forças norma e tangencial específicas (Lindsay, 1995). Nota-se que com o aumento de h_{eq} , essas três grandezas também têm seus valores elevados.

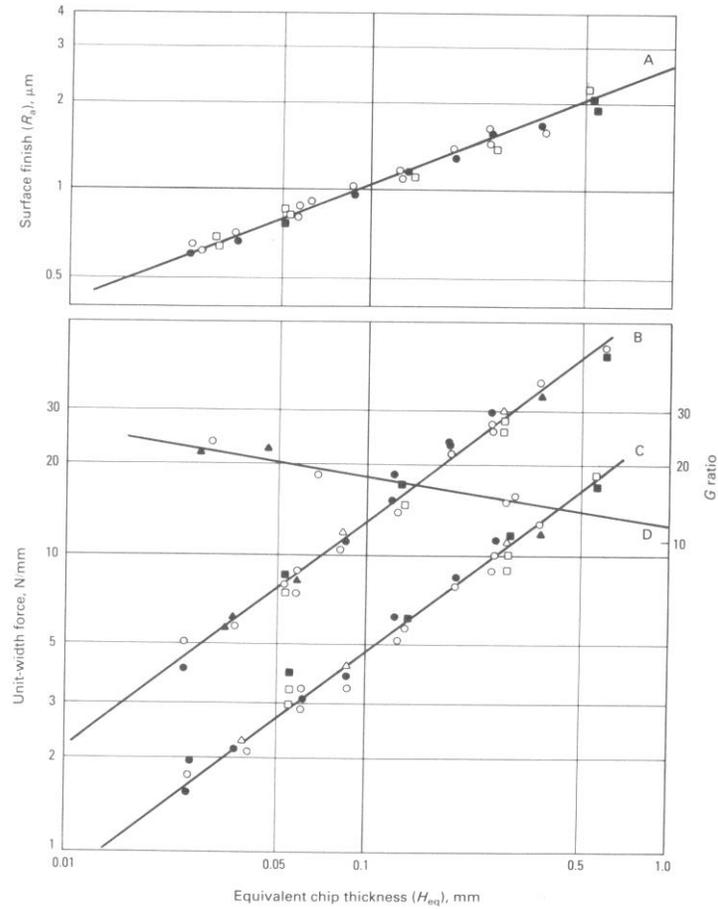


Figura 11.5: Influência da espessura de corte equivalente sobre a rugosidade e forças específicas de retificação.

11.2 O rebolo

A ferramenta de corte empregada na retificação – o rebolo - é constituída de abrasivos e material ligante (também chamado aglomerante). Além disso, o rebolo deve ser relativamente poroso de modo a permitir o alojamento do fluido de corte e de cavacos, principalmente em operações nas quais o comprimento de contato rebolo-peça é mais extenso. O diagrama da Figura 11.6 representa um rebolo com grãos abrasivos, ligante (formando pontes entre os abrasivos) e poros.

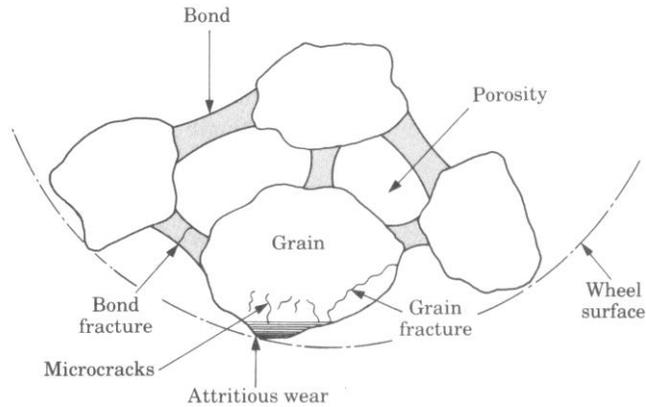


Figura 11.6: Estrutura do rebolo.

O rebolo possui algumas características que determinam sua correta especificação, a saber:

- Material abrasivo;
- Tamanho dos grãos abrasivos (granulometria);
- Material ligante;
- Estrutura (ou porosidade);
- Dureza do rebolo.

Com tantas características que podem variar, a correta especificação de um rebolo resulta em uma ampla gama de opções no momento da escolha do rebolo mais indicado para uma determinada operação. Na Figura 11.7 é mostrada a chave de código utilizada na seleção de rebolos (Salmon, 1992) de acordo com a norma ANSI B74.13 (1982). Um sistema similar também é apresentado pela Federação Européia dos Fabricantes de Produtos Abrasivos (FEPA). A primeira letra denota o material do abrasivo e pode ser precedida de um número que especifica este abrasivo. Em seguida tem-se a indicação do tamanho médio (granulometria) do abrasivo em número de fios por polegada linear da peneira utilizada no processo de separação dos abrasivos. Depois se tem a dureza do rebolo representada por letras de A até H e a indicação da estrutura do rebolo em

números naturais. Finalmente, o último dígito representa o tipo de aglomerante utilizado no rebolo.

| Abrasivo | Granulometria | Dureza | Estrutura | Ligante |
|--|---|---------------------|--|--|
| 38A | 60 | K | 2 | V |
| A: óxido de alumínio C: carboneto de silício B: cBN D: diamante | 8-14: muito grosseiro 16-36: grosseiro 46-80: médio 90-220: fino 240-1200: muito fino | A: macio Z: duro | 0-3: denso 4-6: médio 7-9: poroso 10+: altamente poroso | V: vitrificado B: resinóide R: elástico M: metálico |

Figura 11.8: Chave de código para seleção de rebolos.

Dentre os principais materiais abrasivos empregados industrialmente destacam-se o óxido de alumínio (Al_2O_3), o carboneto de silício (SiC), o diamante e o nitreto cúbico de boro (cBN). Os dois primeiros são considerados abrasivos convencionais, ao passo que os dois últimos são chamados superabrasivos. A Tabela 11.1 apresenta algumas propriedades e as principais aplicações desses abrasivos (Malkin, 1989, Oliveira, 1989 e Lindsay, 1995). Observa-se que o óxido de alumínio e o cBN podem ser utilizados nas mesmas situações, da mesma forma que o carboneto de silício e o diamante.

Tabela 11.1: Propriedades e aplicações de abrasivos.

| Abrasivo | Estrutura cristalina | Dureza Knoop (kgf/mm ²) | Condutividade e térmica relativa | Estabilidade térmica (°C) | Afinidade química | Recomendado para: |
|-----------|----------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|--|
| Al_2O_3 | Hexagonal | 2100 | 1 | 1750 | Cerâmicas, óxidos, vidros, rocha | Aços em geral, aço rápido, aços temperados e cementados, aços inoxidáveis e ligas aeronáuticas |
| cBN | Cúbica | 4700 | 35-120 | 1400 | Nenhuma | Aços temperados, ligas aeronáuticas, ferrosos de alta dureza |
| | | | | | Materiais | Não-metálicos, vidro, |

| | | | | | | |
|----------|-----------|------|---------|------|---------------------------------|--|
| SiC | Hexagonal | 2400 | 10 | 1500 | que assimilam carbono | ferros fundidos, carboneto de tungstênio |
| Diamante | Cúbica | 8000 | 100-350 | 800 | Materiais que assimilam carbono | Cerâmicas duras, não-metálicos, não-ferrosos, metal duro brasado |

O tamanho médio dos grãos abrasivos é o principal responsável pela rugosidade da peça, cujos valores típicos de R_a variam de 0,15 a 2,5 μm , isto é, quanto menor o tamanho do abrasivo, menor será a rugosidade da superfície retificada (altas velocidades do rebolo e baixas velocidades da peça também contribuem para redução da rugosidade da peça). Dois processos de separação e classificação de abrasivos são normalmente utilizados (Salmon, 1992): grãos abrasivos com tamanho entre 8 e 220 são separados por sucessivos peneiramentos, ao passo que abrasivo de tamanho inferior são separados por flotação, ou seja, os abrasivos são adicionados a água e após períodos pré-estabelecidos os abrasivos que sedimentaram são recolhidos (quanto mais longo o tempo necessário para sedimentação, menor será a granulometria do abrasivo recolhido). No caso do peneiramento, o tamanho médio do abrasivo é de cerca de 60% da distância entre dois fios adjacentes da última malha pelo qual ele passou (Malkin, 1989).

A dureza do rebolo não está associada à dureza dos seus grãos abrasivos, mas à capacidade do ligante de manter o abrasivo unido ao corpo do rebolo. Desta forma, é considerado duro o rebolo capaz de reter o abrasivo sob condições severas. Macio é considerado o rebolo que permite o desprendimento dos abrasivos com facilidade. Uma regra prática aplicada na indústria sugere o uso de rebolos macios para a retificação de materiais duros, e vice-versa. Esta recomendação justifica-se pelo fato de que durante a retificação de materiais duros exige-se muito da capacidade de corte dos abrasivos, que se desgastam com maior rapidez. Assim, o desprendimento destes abrasivos desgastados permite que novos abrasivos afiados entrem em ação. No entanto, a capacidade do processo em manter a tolerância dimensional é reduzida se a correta dureza não for utilizada.

A estrutura do rebolo diz respeito à relação densidade/porosidade. Desta forma, se uma grande quantidade de abrasivos de pequeno tamanho é misturada ao ligante e

prensada sob elevada pressão, isto resultará em um rebolo extremamente denso. Entretanto, rebolos com ligante resinóide e metálico apresentam porosidade mínima. Com relação ao material ligante, existem basicamente quatro opções principais: vitrificado, resinóide, elástico e metálico. Malkin (1989) descreve brevemente o método de fabricação e algumas aplicações de cada tipo de aglomerante. O ligante vitrificado é o mais utilizado devido ao custo reduzido, porém, normalmente a velocidade do rebolo é menor ($v_s=30$ m/s) a menos que o rebolo seja reforçado. A matéria-prima é a argila ou o feldspato, que são misturados ao abrasivo e prensados na forma do rebolo. A porosidade do rebolo vitrificado é garantida pela adição de paradiclorobenzeno (ou mesmo serragem). Após a secagem o rebolo é submetido a temperaturas acima de 1260°C por vários dias (de 1 a 2 dias para atingir a temperatura máxima, mantida por 12 horas, seguida de resfriamento lento para se evitar que as tensões térmicas resultem em trincas). Sob altas temperaturas o ligante se funde e une os abrasivos e durante o resfriamento tem-se a formação de pontes entre os abrasivos.

O ligante resinóide é composto por resina fenólica termo-resistente. Após a prensagem na forma final o rebolo é submetido à cura sob temperaturas de 150 a 200°C . Rebolos resinóides são largamente empregados em operações de retificação de desbaste pesado devido à sua elevada resistência mecânica e capacidade de suportar choques (com a aplicação de reforço de fibras de vidro é possível atingir $v_s=100$ m/s). Entretanto, o aglomerante resinóide é suscetível ao ataque químico causado por fluidos de corte alcalinos, provocando a deterioração do rebolo ao longo do tempo.

O aglomerante elástico é composto por borracha (natural ou sintética) vulcanizada. O processo de fabricação do rebolo consiste na mistura de borracha crua, enxofre e o material abrasivo seguida da prensagem na forma de placas com a espessura desejada e, finalmente, da vulcanização em temperaturas de 150 a 275°C . São largamente empregados em operações de corte e como rebolos de arraste na retificação sem-centros.

Por fim, o ligante metálico é empregado quase que exclusivamente em rebolos de diamante e cBN. O ligante mais usado é o bronze produzido por metalurgia do pó. Ferro e níquel também são frequentemente usados. Uma maneira de se produzir rebolos

abrasivos de menor custo é por meio da eletrodeposição, permitindo a produção de rebolos de forma com cantos vivos e pequenos raios, além de rebolos extremamente finos. O abrasivo é depositado em camadas que atingem uma espessura máxima de 6 mm. O núcleo do rebolo pode ser alumínio, bronze, aço, etc.

Um rebolo pode ser considerado um sistema ternário composto de abrasivos (V_g), ligante (V_b) e poros (V_p), vide Equação 11.3. O diagrama da Figura 11.7 (Malkin, 1989) representa este sistema no qual cada vértice do triângulo corresponde a uma concentração de 100% de cada um dos componentes e frações intermediárias são obtidas proporcionalmente a partir da distância do vértice medida no eixo correspondente. As retas paralelas aos eixos (e, portanto, perpendiculares às arestas) representam composições específicas dos componentes, isto é, o intervalo ① representa $75\% < V_p < 86\%$, o intervalo ② representa $38\% < V_g < 68\%$ e o intervalo ③ corresponde a $54\% < V_b < 68\%$. A área escura na Figura 11.7 indica a faixa de composição de rebolos vitrificados factível tanto do ponto de vista prático quanto tecnológico. Desta forma é possível determinar as proporções máximas e mínimas entre os componentes.

$$V_g + V_b + V_p = 100 \quad (11.3)$$

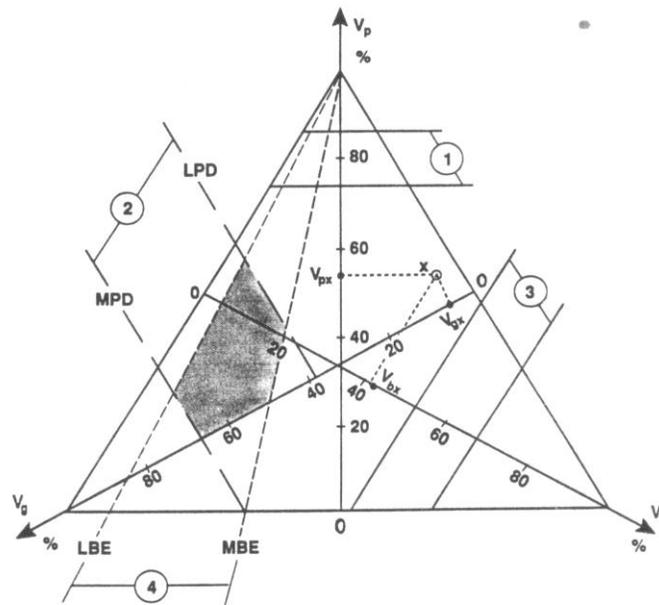


Fig. 2.6 — Grinding wheel phase diagram [26].

Figura 11.7: Diagrama ternário de rebolos.

11.3 Mecanismo de corte na retificação

Durante a ação de um único abrasivo três situações podem ocorrer de acordo com o estado de afiação da ferramenta, conforme representado na Figura 11.8 (Salmon, 1992): corte, riscamento e atrito. O corte diz respeito à efetiva remoção de cavaco por cisalhamento pela ação do grão abrasivo. O riscamento (ou sulcamento) representa a etapa de deformação plástica sem a produção de cavaco (formação de rebarbas) e o atrito provém do contato da área plana (desgastada) do abrasivo com a peça. Esta última etapa é a mais prejudicial ao processo visto que a energia consumida não é revertida na produção de cavaco. Além disso, o calor gerado provoca a elevação da temperatura da peça, podendo levar a alterações metalúrgicas.

Portanto, ao contrário das operações com ferramentas de geometria definida, nos processos abrasivos não se observa a ocorrência de uma zona de aderência, isto é, o cisalhamento do material ocorre na presença da zona de escorregamento apenas.

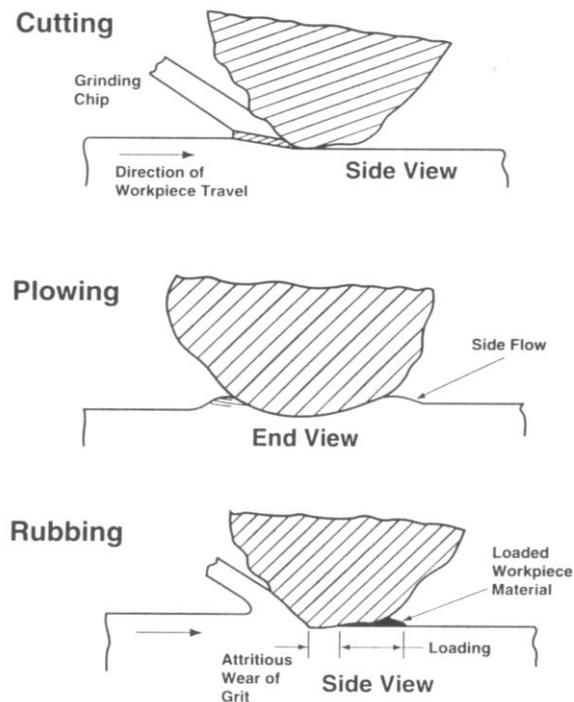


Figura 11.8: Etapas do processo de remoção do cavaco.

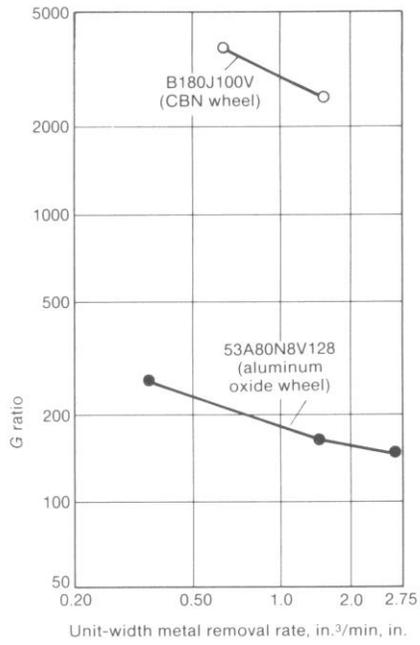
Após algum tempo de retificação, os grãos abrasivos perdem a capacidade de corte e com isso tem-se a elevação das forças de retificação, as quais podem provocar a fratura do abrasivo ou mesmo sua extração completa. A capacidade de produção de uma fratura frágil, na qual novas arestas de corte afiadas são geradas, é chamada de friabilidade do abrasivo. Embora pareça contraditório, o abrasivo deve ser duro o suficiente para penetrar e cisalhar o material da peça, tenaz para suportar as variações cíclicas de tensões e temperatura e ao mesmo tempo friável para produzir arestas afiadas na fratura.

A agressividade de um rebolo, proposta por Nakayama (apud Oliveira, 1989), representa a taxa de penetração do rebolo contra a pressão normal de corte. Dimensionalmente, a agressividade tem unidade de volume por tempo e força, ou seja, taxa de remoção de cavaco por unidade de força. Desta forma, quanto maior a agressividade de um rebolo, maior é a sua capacidade de remoção de cavaco à custa de baixa força normal de retificação. A razão G é a relação entre o volume de material usinado (Z_w) e o volume de rebolo desgastado (Z_s), vide Equação 11.4. Uma razão G baixa indica que há o desgaste excessivo do rebolo e que, conseqüentemente, o rebolo permanece agressivo durante a retificação. Por outro lado, uma razão G alta indica que a perda de grãos é menor, entretanto ocorre a perda progressiva da agressividade do rebolo durante a operação e, conseqüentemente, de sua capacidade de remoção. Assim, a situação ideal é aquela na qual o desgaste dos grãos provoca o aumento da força de retificação e o desprendimento dos grãos desgastados dando lugar a novos grãos afiados.

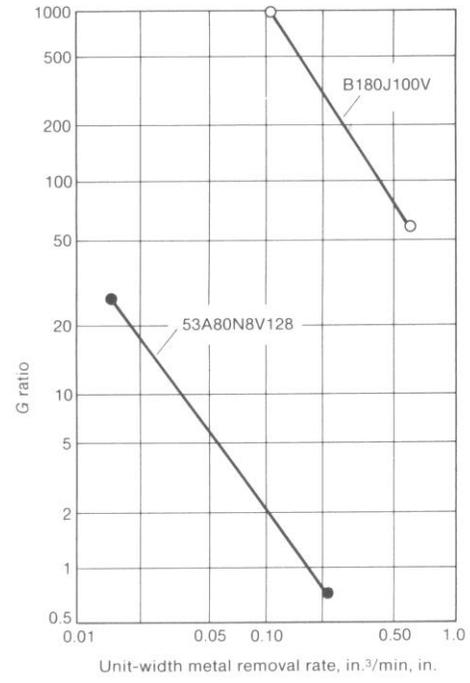
$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (11.4)$$

A Figura 11.9 (Lindsay, 1995) compara os valores de G entre rebolões de cBN e de óxido de alumínio na retificação de materiais diversos. Nota-se que

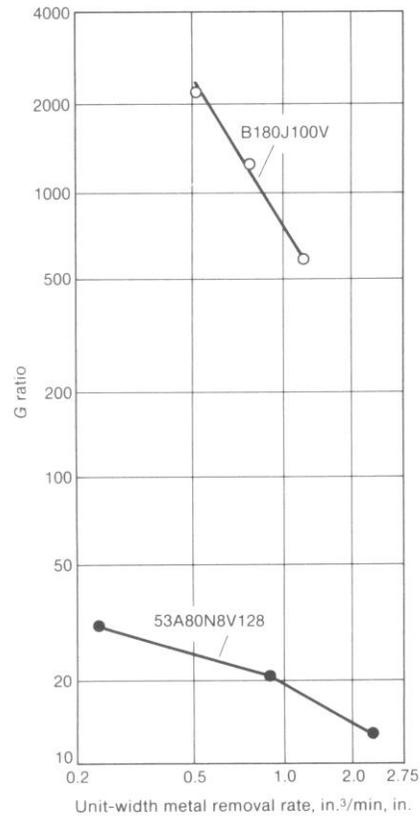
independentemente do material da peça, o rebolo de cBN assegura valores bem mais elevados de G.



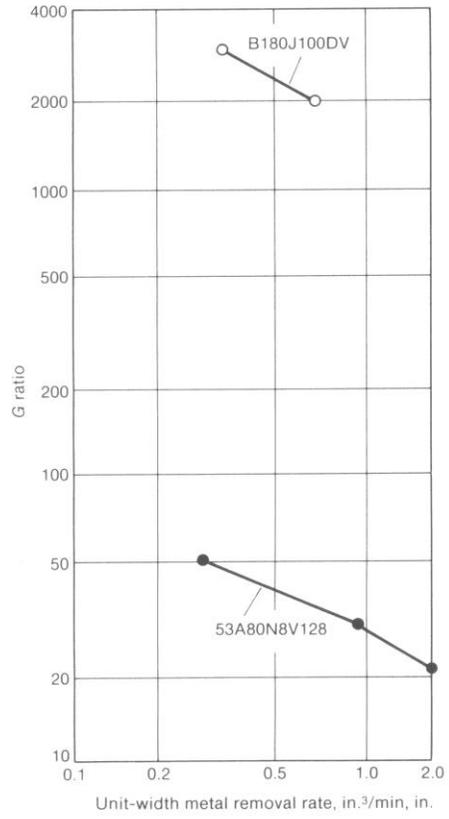
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11.9: Comparação entre os valores da razão G para rebolos de cBN e de Al₂O₃ na retificação de: (a) aço rolamento AISI 52100, (b) aço rápido AISI M50, (c) aço rápido AISI M7 e (d) Inconel 718.

11.4 Dressagem

O aumento da força de retificação nem sempre é suficiente para arrancar os grãos desgastados, tornando necessária a dressagem do rebolo. A dressagem (também conhecida como dressamento, afiação ou retificação do rebolo) consiste em preparar o rebolo através da usinagem da superfície de trabalho, normalmente utilizando uma ferramenta de diamante (dressador). As principais finalidades desta operação são (Oliveira, 1989):

- Obtenção de concentricidade entre a superfície de trabalho e o eixo de rotação do rebolo;
- Perfilamento da face de trabalho para uma operação de forma;
- Remoção dos grãos abrasivos para aumentar a agressividade do rebolo.

Retificadoras mais modernas, ou especiais, podem realizar a dressagem simultaneamente à operação de retificação, entretanto, muitas máquinas exigem a interrupção da operação de retificação para que a dressagem seja realizada. Assim, a identificação do momento adequado para a realização da dressagem é de vital importância para o êxito da retificação, pois caso a dressagem seja realizada prematuramente tem-se a retirada de grãos abrasivos que ainda mantêm sua capacidade de corte, além da elevação do tempo improdutivo. Em ambos os casos aumenta-se o custo de retificação. Por outro lado, caso a dressagem do rebolo seja retardada, corre-se o risco de se usar um rebolo sem capacidade de corte, o que poderá provocar danos à integridade da peça, que na maioria dos casos resulta no seu refugo.

O dressador, geralmente de diamante, pode ser uma ferramenta de ponta única dotada de movimento de avanço, ou uma ferramenta metálica (estática ou rotativa) com camadas de diamantes incrustados (sem movimento de avanço). A Figura 11.9 representa a operação de dressagem com um dressador de ponta única (Oliveira, 1989). Após a

definição do valor da profundidade de dressagem ($a_d=50-200 \mu\text{m}$), o dressador se desloca longitudinalmente enquanto o rebolo gira. O avanço do dressador é chamado de passo de dressagem (S_d) e a largura de atuação do dressador é representada por b_d .

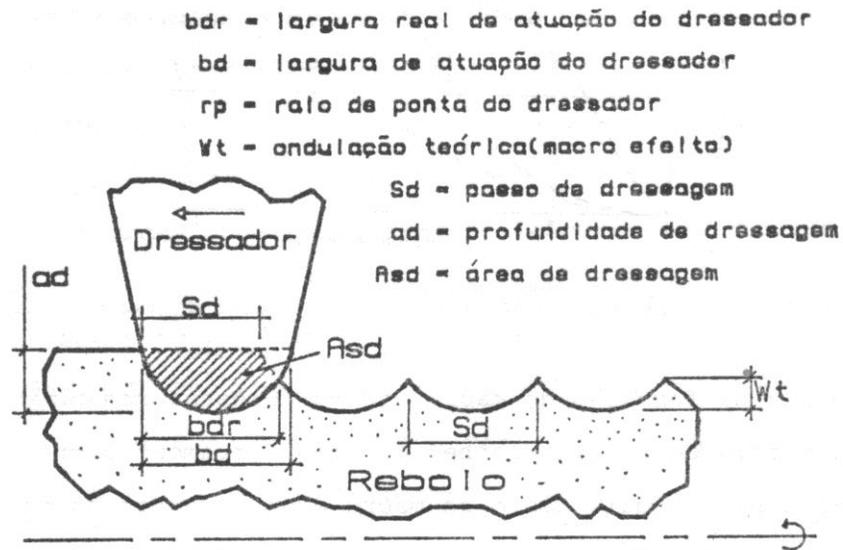


Figura 11.9: Esquema da dressagem de rebolos.

Embora o número de parâmetros envolvidos na dressagem não seja pequeno, esta operação pode se mais facilmente quantificada em função do grau de recobrimento (U_d). Conforme mostrado na Equação 11.5, o grau de recobrimento é a razão entre a largura do dressador e o passo de dressagem.

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (11.5)$$

Quando $U_d=1$ produz-se na superfície de trabalho do rebolo uma rosca com largura igual ao passo. Já $U_d<1$ representa uma largura do dressador inferior ao passo de dressagem. Nesta situação, não aplicada industrialmente, o dressador não atua sobre toda a superfície de trabalho, deixando grãos abrasivos gastos no rebolo. Finalmente, quando se tem $U_d>1$ a largura do dressador é superior ao passo de dressagem, produzindo uma

“rosca fina” na superfície de trabalho. Neste caso há um número elevado de grãos abrasivos atuantes, contribuindo para o aumento da agressividade do rebolo e melhoria do acabamento da peça. Em contrapartida, tem-se a elevação da temperatura de retificação. A Figura 11.10 ilustra estas três situações e a Tabela 11.2 mostra os principais efeitos das diversas condições de dressagem sobre o desempenho da retificação (Diniz, s.a.):

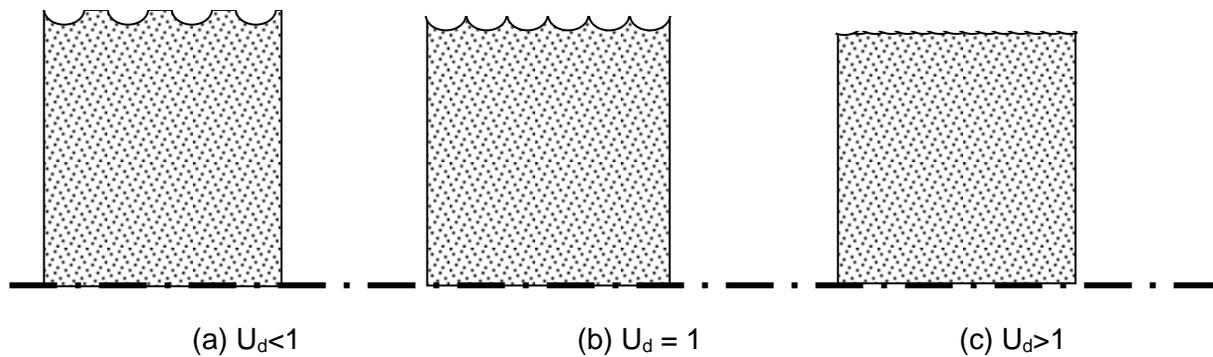


Figura 11.10 – Exemplos do efeito do grau de recobrimento.

Tabela 11.2: Efeito das condições de dressagem sobre o desempenho da retificação.

| $1 < U_d < 2,5$ | $2,5 < U_d < 4$ | $4 < U_d < 6$ |
|--|--|--|
| Agressividade máxima; Rugosidade alta e uniforme; Vida do rebolo longa. | Agressividade intermediária; Rugosidade média e variável; Vida do rebolo intermediária. | Agressividade baixa; Rugosidade baixa e variável; Vida do rebolo curta. |

11.5 Forças e potência de retificação

O conhecimento e controle das forças atuantes na retificação são de extrema importância para a determinação da potência motriz do rebolo e para o dimensionamento

estrutural da máquina. Além disso, as forças influenciam a qualidade dimensional e geométrica da peça, sua rugosidade, o desgaste do rebolo e o tempo de retificação. A força de retificação pode ser decomposta em uma componente normal e outra tangencial á superfície sendo retificada, entretanto, por se tratar de uma situação na qual se tem apenas a condição de escorregamento, a força tangencial pode ser facilmente obtida quando se conhece a força normal e o coeficiente de atrito entre o rebolo e a peça, ou ainda a partir da potência de retificação. Em geral a força tangencial varia de 25 a 40% do valor da força normal (Lindsay, 1995). Conhecendo-se a força tangencial e as velocidades do rebolo e da peça é possível determinar a potência de retificação por meio da Equação 11.6:

$$P = F_t (v_s \pm v_w) \quad (11.6)$$

O sinal positivo é empregado no caso de retificação discordante e negativo para a operação concordante, todavia, devido ao fato de v_w ser muito inferior a v_s , a contribuição de v_w normalmente é desprezada.

Quando o rebolo toca a peça, no primeiro momento todo o conjunto máquina-rebolo-peça se deforma elasticamente. Conseqüentemente, na primeira passagem do rebolo não se atinge a penetração de trabalho previamente estabelecida, sendo necessárias passagens subseqüentes. A cada nova passagem do rebolo (sem a alteração da penetração de trabalho inicial) tem-se o alívio progressivo das deformações elásticas, até que a penetração de trabalho inicialmente programada seja atingida. Este procedimento é chamado faiscamento (ou *spark out*) e graças a ele a retificação é considerada uma operação capaz de remover quantidades infinitesimais de material, o que assegura tolerâncias dimensionais e geométricas inatingíveis por meio de operações com ferramentas de geometria definida, conforme citado anteriormente. Figura 11.11 (Malkin, 1989) ilustra exemplos de desvios de forma e geométrico decorrentes da deformação elástica dos componentes do sistema.

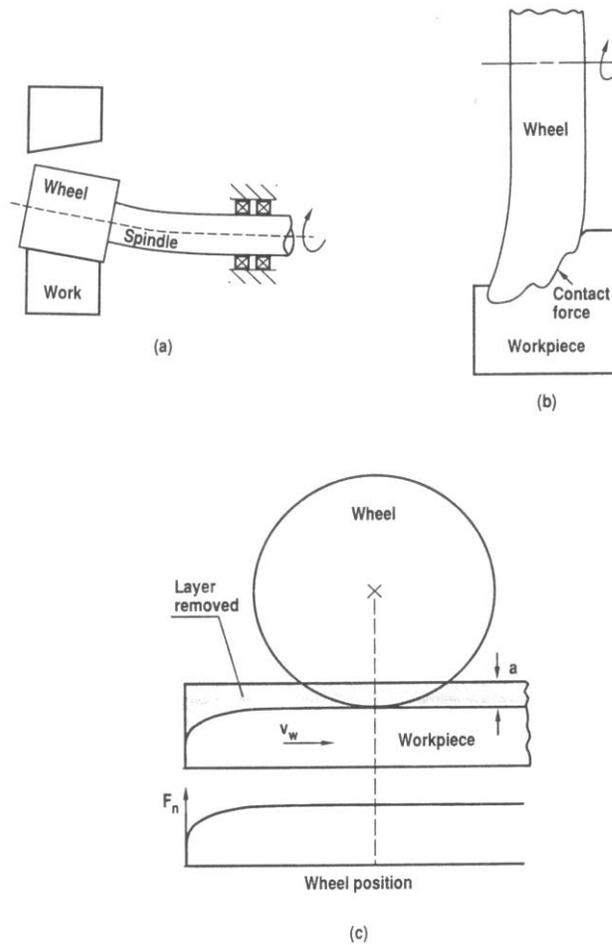


Figura 11.11: Desvios na retificação: (a) conicidade na retificação interna, (b) desvio de forma na retificação plana e (c) planicidade na retificação plana.

11.6 Temperatura de retificação

Se por um lado a ação simultânea de centenas de grãos abrasivos contribui para garantir a qualidade da peça retificada, por outro lado o atrito entre cada abrasivo e a superfície da peça e a deformação plástica associada à produção do cavaco contribuirão para a elevação da temperatura na interface rebo-lo-peça. Este é um dos pontos mais críticos da operação, agravado ainda pelas seguintes situações:

- A extensão do contato rebo-lo-peça dificulta o acesso do fluido de corte;

- Os materiais empregados na confecção do rebolo muitas vezes são refratários, o que dificulta a dissipação do calor;
- A pequena massa e a natureza descontínua do cavaco também dificultam a dissipação do calor.

Os principais problemas decorrentes da elevação excessiva da temperatura da peça são:

- Alterações dimensionais relacionadas ao coeficiente de expansão térmica do material;
- Alterações micro-estruturais (*queima*) da peça;
- Indução de tensões residuais de tração;
- Surgimento de trincas.

No primeiro caso corre-se o risco de perda do componente devido ao fato do sobremetal a ser removido na retificação situar-se na faixa centesimal. Assim, materiais com elevado coeficiente de expansão térmica podem ter removida uma penetração de trabalho superior àquela pré-estabelecida.

Com relação às alterações micro-estruturais, merecem destaque o aparecimento de uma fina camada de martensita não revenida na superfície de aços, seguida de uma camada de martensita revenida, como mostra a Figura 11.12 (Field et al., 1995). A camada de martensita revenida (também chamada de camada branca) surge quando a temperatura de retificação excede a temperatura de austenitização, seguida de resfriamento rápido, o que resulta no aparecimento da camada martensítica, que é extremamente dura e frágil. Abaixo da superfície da peça a velocidade de resfriamento é menor, promovendo o aparecimento da camada martensítica revenida, que possui baixa dureza. A interface entre estas duas camadas é uma região extramente propícia ao aparecimento de trincas. Em virtude da mudança de cor da peça observada nesta situação, devido à formação de óxidos na superfície, esse fenômeno é comumente chamado de *queima* da peça.

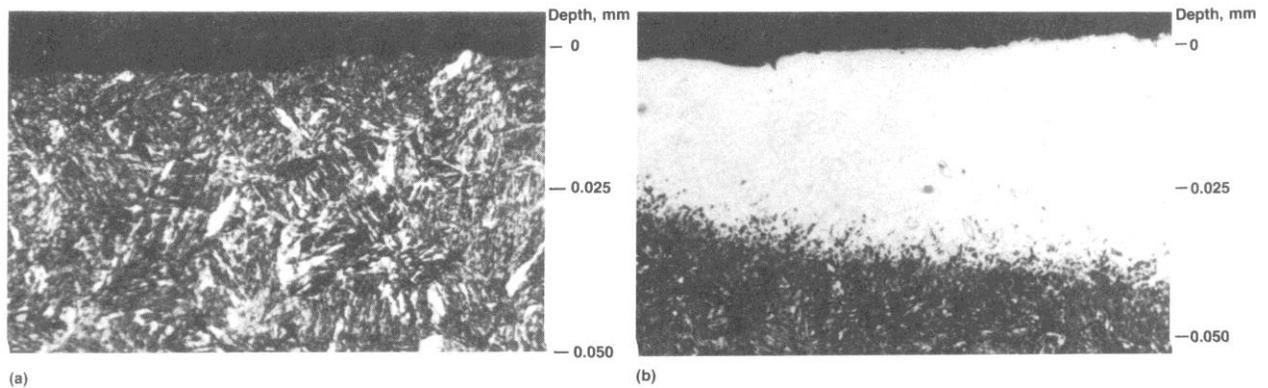


Figura 11.12: Microestrutura do aço AISI 4340 submetido à: (a) retificação de acabamento (sem alterações micro-estruturais) e (b) retificação de desbaste (com alterações micro-estruturais).

Essas alterações micro-estruturais podem ser identificadas por meio do perfil de microdureza da peça. Além disso, a presença de tensões residuais de tração e trincas contribui para a redução da resistência à fadiga do componente retificado. A Figura 11.13 apresenta essas duas situações (Field et al., 1995).

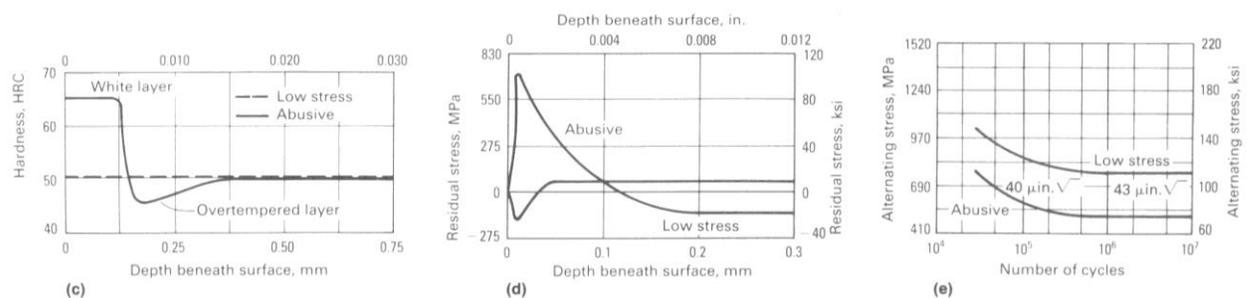


Figura 11.13: (a) variação de microdureza, (b) tensões residuais e (c) resistência à fadiga de peças retificadas.

Embora tensões residuais compressivas (devido à interação mecânica entre os grãos abrasivos e a superfície da peça) possam ser observadas em componentes retificados, as tensões residuais de tração têm conseqüências mais graves para a peça. As tensões de tração surgem devido à variação de temperatura na peça, uma vez que durante a passagem do rebolo a camada mais externa é submetida à temperaturas mais altas que

as camadas mais internas, o que resulta em valores diferentes de expansão térmica. Entretanto, após a passagem do rebolo a temperatura nas camadas superficiais cai mais rapidamente que a das camadas mais internas, provocando o aparecimento de tensões de tração. Além disso, as transformações de fase mencionadas anteriormente estão associadas a alterações volumétricas, o que também contribui para o surgimento de tensões de tração.

O controle da temperatura de retificação dentro de níveis aceitáveis depende, principalmente, da manutenção da agressividade do rebolo e do emprego adequado de fluidos de corte. Mantendo-se a agressividade do rebolo evita-se que grãos abrasivos já desgastados e portanto, sem capacidade de corte, entrem em atrito com a peça promovendo a elevação da temperatura sem a geração de cavacos.

11.7 Fluidos de corte

O emprego de fluidos de corte na retificação deve atender aos requisitos de refrigeração e lubrificação de acordo com as necessidades específicas de cada operação. Operações com elevada área de contato rebolo-peça e que produzam cavacos mais longos exigem fluidos de corte com ação predominantemente lubrificante (óleo integral), ao passo que em operações com áreas de contatos menos extensas ou que produzam cavacos na forma de pó devem ser empregados fluidos refrigerantes.

Fluidos de corte com elevado poder lubrificante reduzem o atrito entre rebolo e peça, evitando assim a elevação da temperatura da peça e tornando a operação mais eficiente. Além disso, óleos integrais possuem ponto de ebulição superior ao da água em aproximadamente 200°C, portanto suportam temperaturas mais elevadas. Entretanto, além do custo desfavorável, fluidos de corte com alto poder lubrificante apresentam viscosidade elevada, o que dificulta seu acesso à interface cavaco-ferramenta, mesmo empregando bombas potentes. Com isto, o que normalmente se observa na indústria é o uso de fluidos de corte a base água, pois estes permitem variações na ação refrigerante ou lubrificante de acordo com a proporção água/óleo (Lindsay, 1995).

Salmon (1992) afirma que o aspecto mais importante a respeito do emprego de fluidos de corte na retificação é assegurar que este seja fornecido a uma velocidade igual ou superior a velocidade do rebolo de forma a garantir que os poros sejam preenchidos com fluidos para uso ao longo do comprimento de contato. O projeto do bocal para aplicação do fluido de corte também é relevante não só para garantir a lubri-refrigeração como também a remoção de cavacos incrustados no rebolo.

11.8 Operações especiais de retificação

Além das operações de retificação apresentadas da Figura 11.2, outras duas merecem destaque: a retificação *creep feed* e a retificação sem-centros (ou *centerless*).

11.5.1 Retificação *creep feed*

A retificação *creep feed*, ilustrada na Figura 11.14 é caracterizada por baixa velocidade da peça e elevada penetração de trabalho, promovendo assim altas taxas de remoção de material. Desta forma é possível produzir perfis complexos ou canais profundos em poucas (ou mesmo uma única) passagens do rebolo. Exemplos típicos de aplicação desta operação são: a retificação de canais de brocas e o perfilamento da raiz de lâminas de turbinas. A Tabela 11.3 compara os principais parâmetros das operações convencional e *creep feed* (Kalpakjian, 1995).

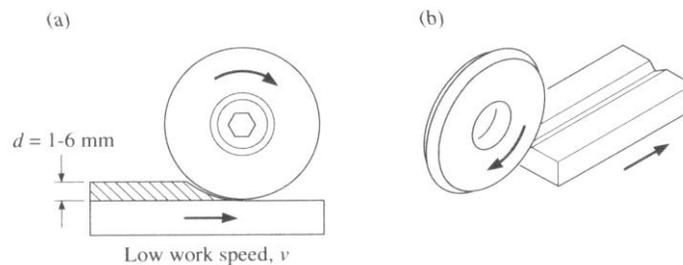


Figura 11.14: Esquema da retificação *creep feed*.

Tabela 11.3: Parâmetros usados na retificação convencional e *creep feed*.

| Parâmetro | Convencional | <i>Creep feed</i> |
|---------------|--------------|-------------------|
| v_s (m/s) | 25 – 50 | 25 - 50 |
| v_w (m/min) | 10 – 60 | 0,1 - 1 |
| a_e (mm) | 0,01 – 0,05 | 1 - 6 |

Devido à elevada penetração de trabalho e extenso comprimento de contato rebolo-peça, elevadas forças e temperatura de retificação são observadas na operação *creep feed*. Em geral, o rebolo utilizado na operação *creep feed* é superabrasivo e possui ligante resinóide com estrutura aberta a fim de manter a temperatura de usinagem baixa e garantir o acabamento da peça. Salmon (1992) recomenda que esta operação seja feita com rebolos com a seguinte estrutura aproximada: $V_g=30-40\%$, $V_b=5-10\%$ e $V_p=50-60\%$. Equipamentos modernos operam com a dressagem contínua do rebolo.

Requisitos para retificadoras *creep feed*:

- Alta potência do motor principal;
- Alta rigidez;
- Alta capacidade de absorção de choques;
- Controle de velocidade da peça preciso (sistema de avanço mecânico e não hidráulico);
- Sistema de bombeamento de fluido de corte de alta pressão e vazão (em torno de 10 bar e de 300 a 600 l/min, respectivamente).

11.5.1 Retificação sem-centros (*centerless*)

A retificação sem-centros (também conhecida por *centerless*) é uma operação de retificação cilíndrica externa que emprega dois rebolos (de corte e de arraste). A remoção de material é feita pelo rebolo de corte e a peça não é suportada entre centros, mas repousa sobre uma régua de apoio. A Figura 11.15 ilustra as duas configurações possíveis para a retificação sem-centros (Nussbaum, 1988):

- Retificação de passagem (longitudinal): neste caso as peças avançam continuamente entre os dois rebolos, entrando por um lado e deslocando-se longitudinalmente. O ângulo de inclinação entre os eixos dos dois rebolos é de aproximadamente 3° (podendo variar de 2 a 5°). Devido ao fato dos rebolos não serem dotados de movimento de avanço radial, pequenos ajustes são necessários após cada dressagem para compensar a redução de diâmetro do rebole. A velocidade do rebole de corte varia de 30 a 40 m/s e a do rebole de arraste varia de $0,3$ a $0,5$ m/s. Apenas peças cilíndricas são produzidas;
- Retificação radial (de mergulho): a peça é posicionada sobre a régua de apoio enquanto o rebole de arraste se encontra afastado do rebole principal. Com o início da operação a peça e o rebole de arraste avançam radialmente contra o rebole de corte a uma velocidade de avanço de $0,3$ mm/min (acabamento) a 3 mm/min (desbaste) até a peça atingir o diâmetro desejado. Concluída a operação, o rebole de arraste se afasta, a peça é retirada (manual ou automaticamente) e o ciclo recomeça. Aqui é possível produzir peças cônicas ou de diâmetro variável.

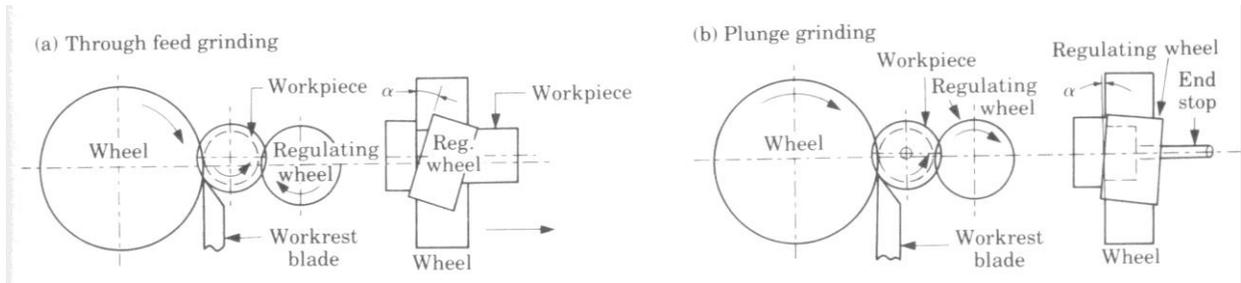


Figura 11.15 Retificação sem-centros: (a) de passagem e (b) radial.

Esta operação exige pouca habilidade do operador sendo normalmente empregada para a produção em massa. Apesar da peça não estar fixa, esta operação é bastante precisa e consistente. Peças comumente produzidas por esta operação são: rolos para mancais de rolamento, válvulas de motores, eixos de cames e pinos para pistão.

11.6 Referências bibliográficas

- Diniz, A.E. Processos de Retificação. UNICAMP, s.a.
- Field, M., Kahles, J.F. and Koster, W.P. Surface Finish and Surface Integrity. Metals Handbook, Vol. 16: Machining, Ninth Edition. ASM International, Metals Park, 1995. ISBN 0 87170 007 7.
- Kalpakjian, S. Manufacturing Engineering and Technology, Third Edition. Addison-Wesley Publishing Co., 1995. ISBN 0-201-84552-0.
- Lindsay, R.P. Principles of Grinding. Metals Handbook, Vol. 16: Machining, Ninth Edition. ASM International, Metals Park, 1995. ISBN 0 87170 007 7.
- Malkin, S. Grinding Technology – theory and application of machining with abrasives. Ellis Horwood Ltd., Chichester, 1989. ISBN 0-85312-756-5.
- Nussbaum, G.C. Rebolos & Abrasivos – tecnologia básica. Ícone Editora Ltda., São Paulo, 1988.
- Oliveira, J.F.G. Tópicos Avançados sobre o Processo de Retificação. Publicação 048/89. Laboratório de Máquinas-Ferramentas, EESC – USP, 1989.
- Salmon, S.C. Modern Grinding Process Technology. McGraw-Hill, 1992. ISBN 0-07-054500-6.

