



SEM-0534
Processos de Fabricação Mecânica

Retificação

Definição



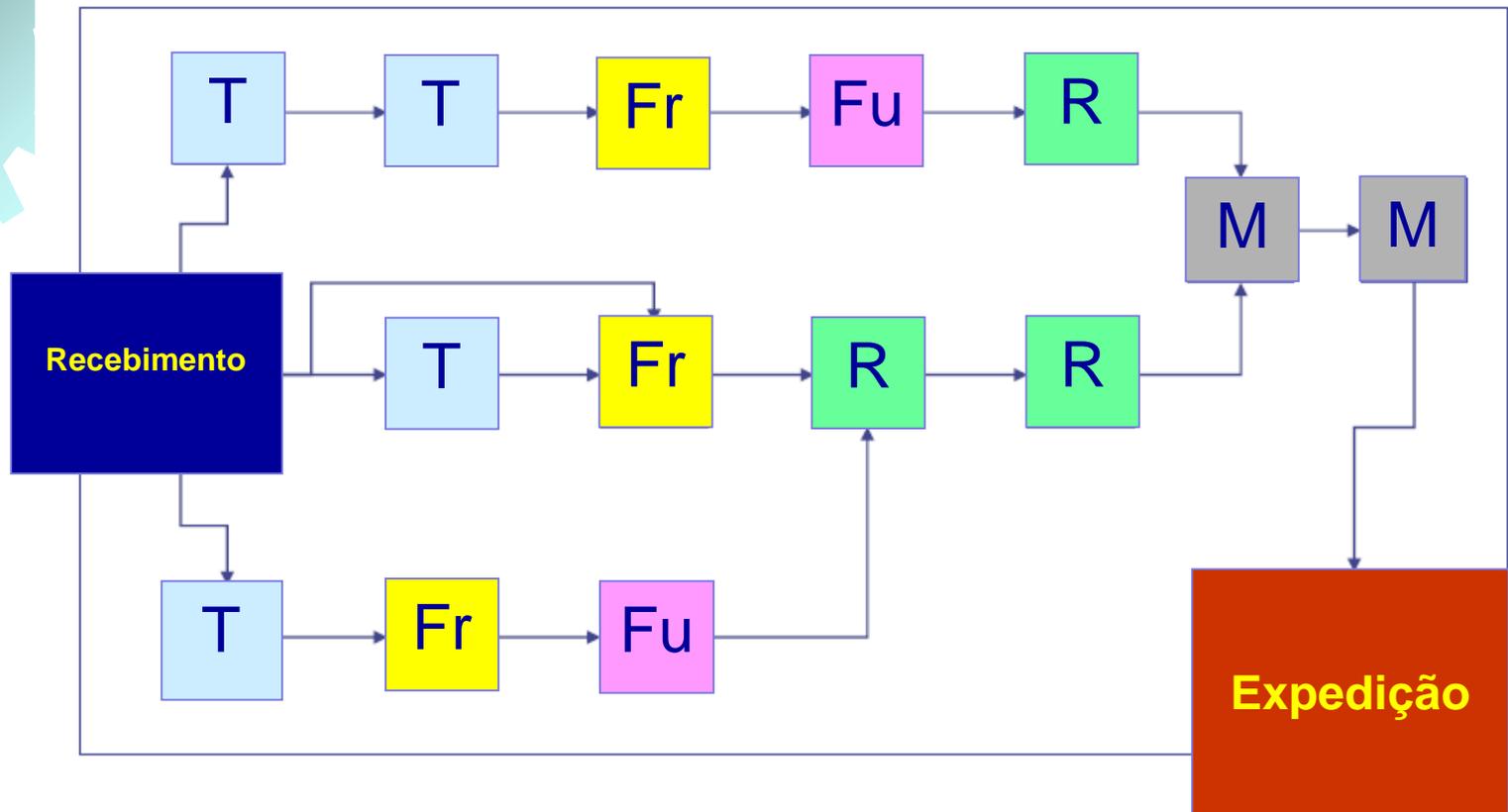
Retificação é o processo aplicado à peça após a execução de todos os outros processos de usinagem.

Outros processos abrasivos:

- a) Brunimento
- b) Lapidação
- c) Polimento
- d) Superacabamento

Exemplo - Rota de Fabricação

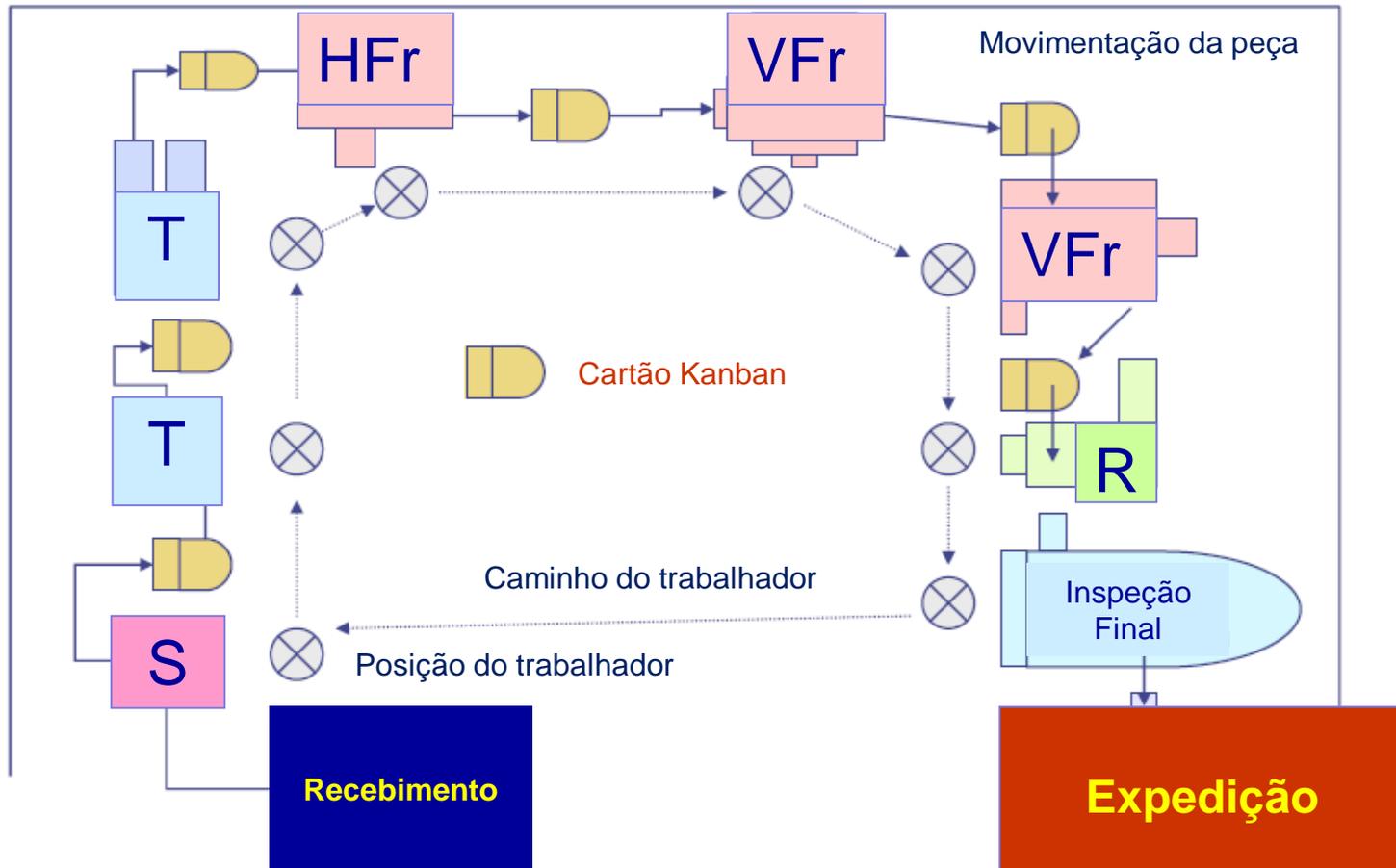
Operação Final: Retificação



T: Torno, Fr: Fresadora, Fu: Furadeira, R: Retificadora, M: Montagem

Exemplo - Rota de Fabricação

Operação Final: Retificação



S: Serra, T: Torno, HFV: Fresadora Horizontal, VFr: Fresadora Vertical, R: Retificadora

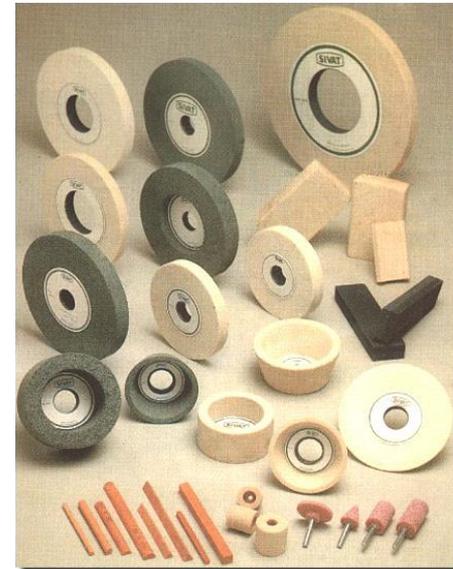
Processos Abrasivos

Retificação: processo de remoção de material no qual partículas abrasivas imersas em um meio ligante (rebolo) operam a altas velocidades superficiais.

- Rebolo geralmente tem formato de disco e é precisamente balanceado para elevadas velocidades.
- Pode ser usado para todo tipo de material.



Retificação Cilíndrica Externa



Rebolos

Processos Abrasivos

Process	Roughness Average R,— Micrometers, μm (microinches $\mu\text{in.}$)												
	50 (2000)	25 (1000)	12.5 (500)	6.3 (250)	3.2 (125)	1.6 (63)	0.80 (32)	0.40 (16)	0.20 (8)	0.10 (4)	0.05 (2)	0.025 (1)	0.012 (0.5)
Flame cutting													
Snagging													
Sawing													
Planing, shaping													
Drilling													
Chemical milling													
Elect. discharge mach.													
Milling													
Broaching													
Reaming													
Electron beam													
Laser													
Electrochemical													
Boring, turning													
Barrel finishing													
Electrolytic grinding													
Roller burnishing													
Grinding													
Honing													
Electropolish													
Polishing													
Lapping													
Superfinishing													
Sand casting													
Hot rolling													
Forging													
Perm mold casting													
Investment casting													
Extruding													
Cold rolling, drawing													
Die casting													

- Alguns processos podem alcançar a classe de rugosidade N1 (0,025 μm ou 1 $\mu\text{-in}$) e qualidades de trabalho IT5 a IT9.
- Velocidades de corte maiores que as do torneamento (30 m/s, podendo chegar a 120 m/s).

		Qualidade de Trabalho																	
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16
Eixos		mecânica extra-precisa					mecânica corrente					mecânica grosseira							
Furos		mecânica extra-precisa					mecânica corrente					mecânica grosseira							

The ranges shown above are typical of the process listed.

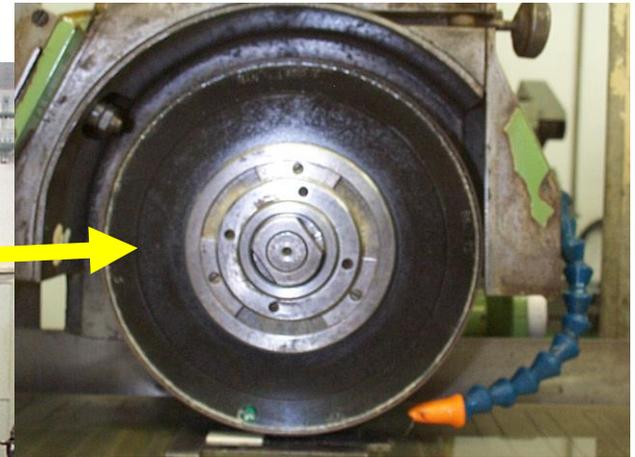
KEY  Average Application

Higher or lower values may be obtained under special conditions.

 Less Frequent Application

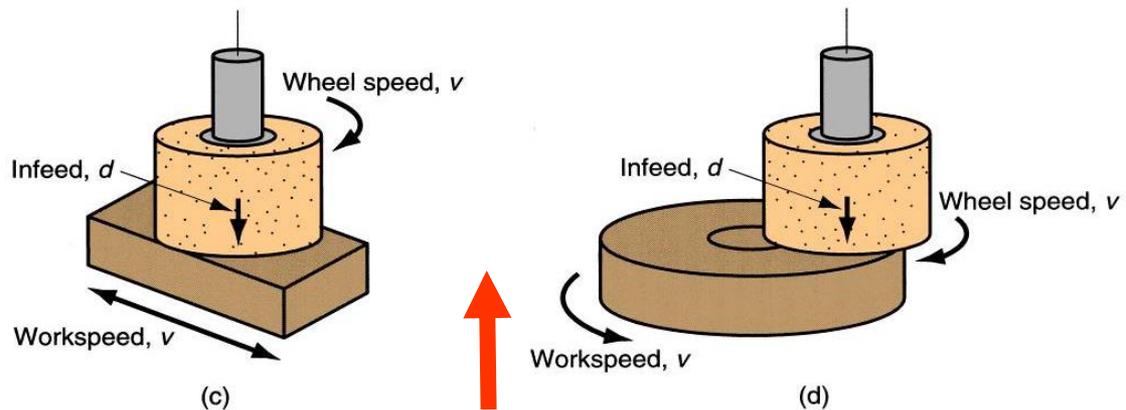
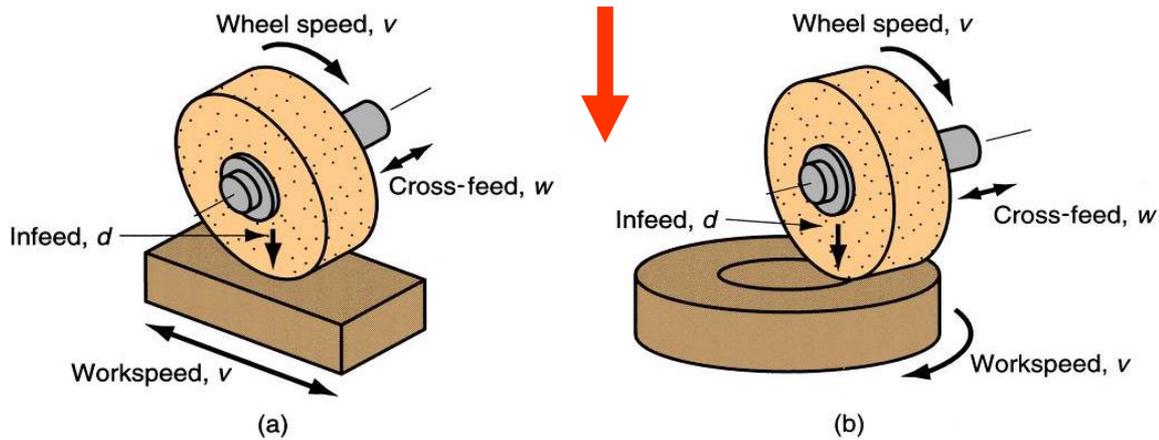
Máquinas-Ferramenta

Retifica Plana



Processos Abrasivos

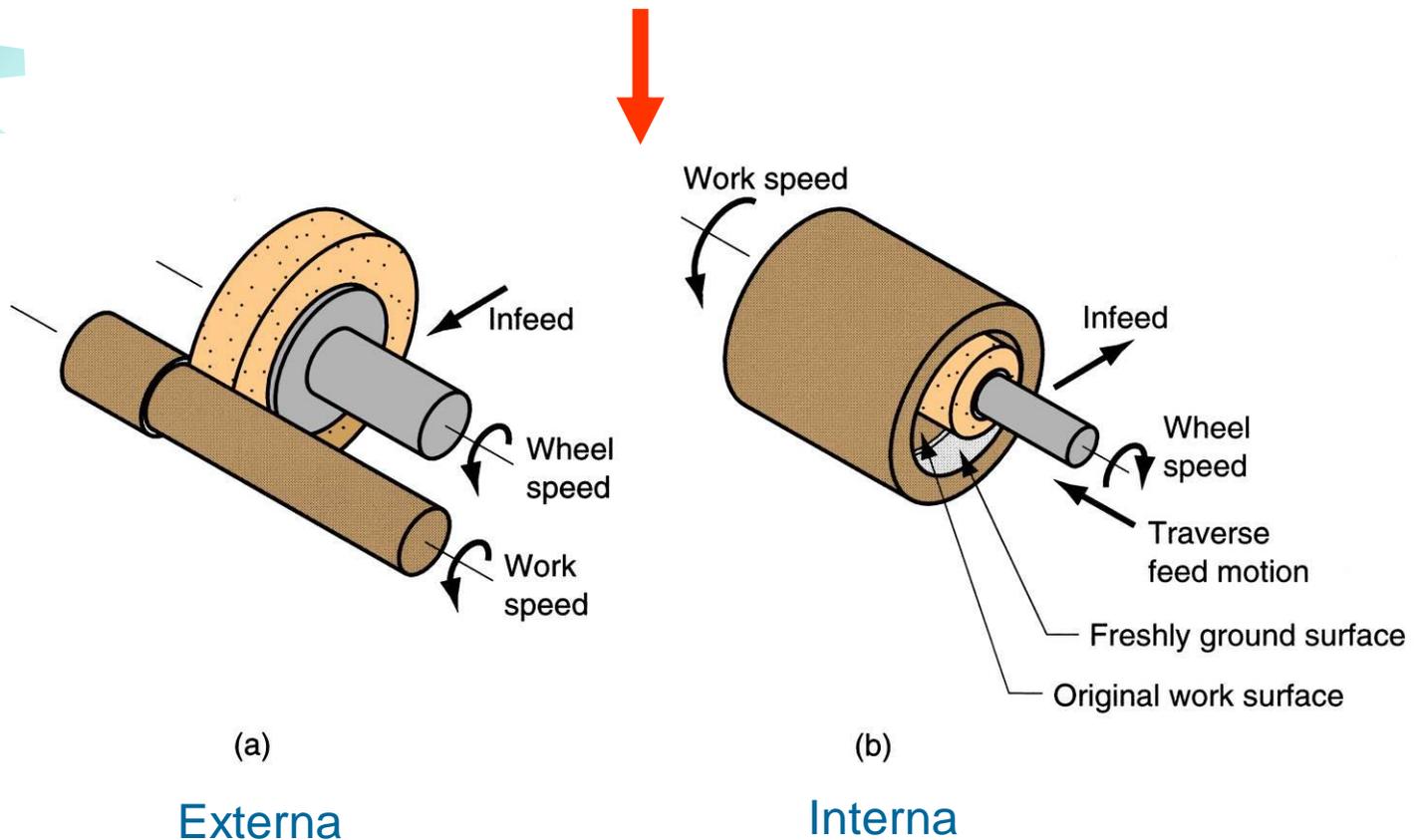
Retificação Horizontal



Retificação Vertical

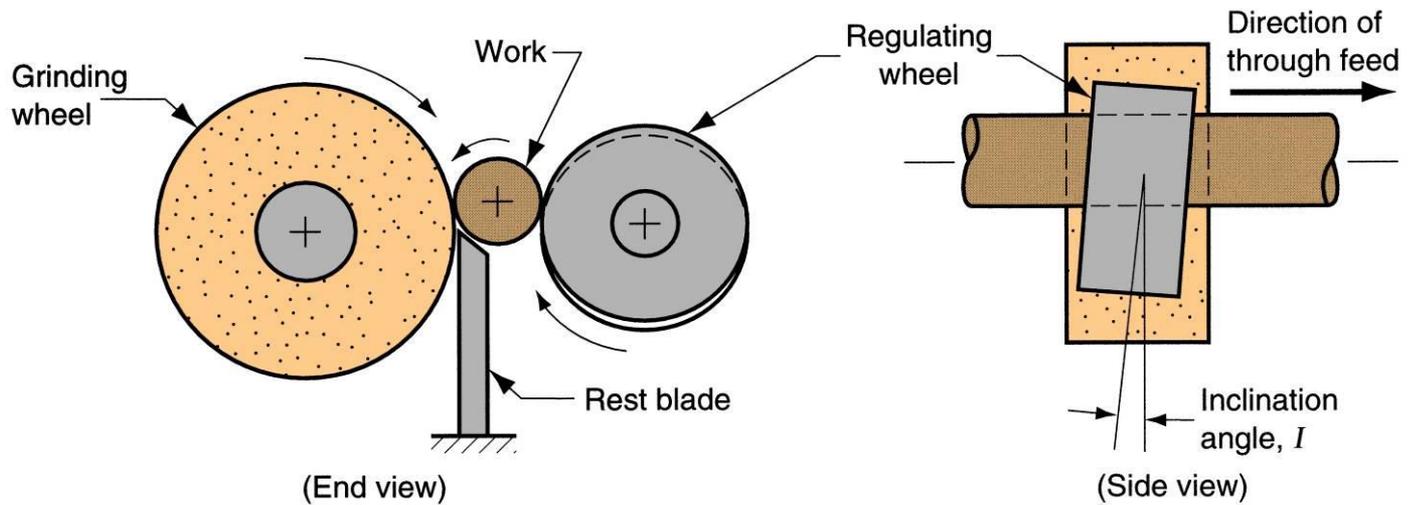
Processos Abrasivos

Retificação Cilíndrica



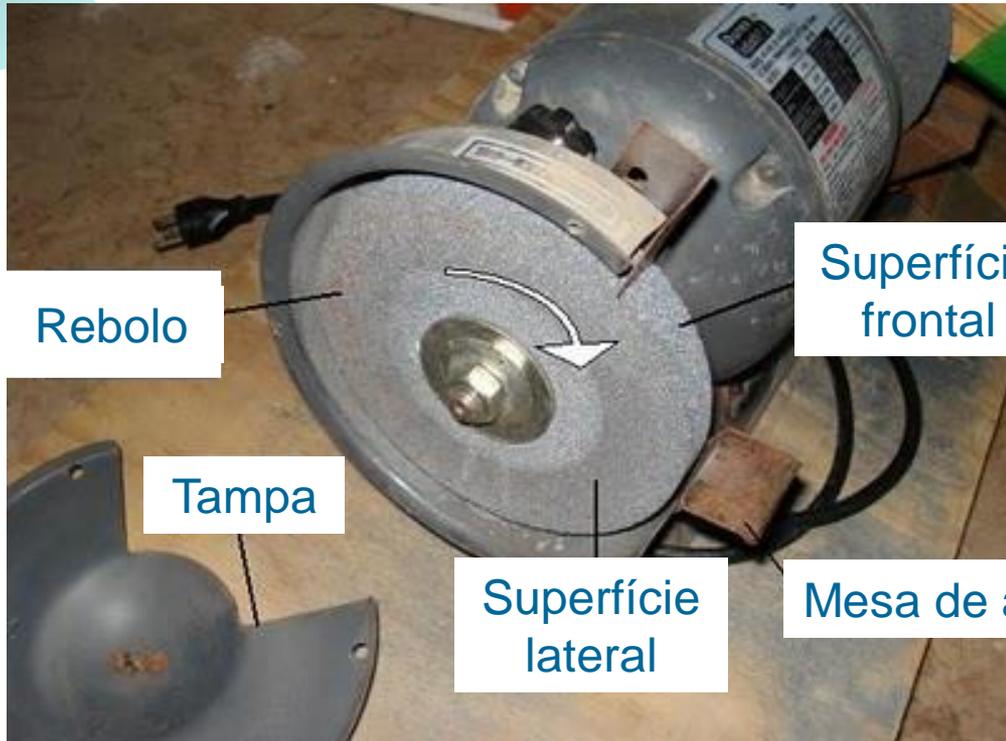
Processos Abrasivos

Retificação "Centerless"



Processos Abrasivos

Esmeril



Processos Abrasivos

Afiação de Ferramenta



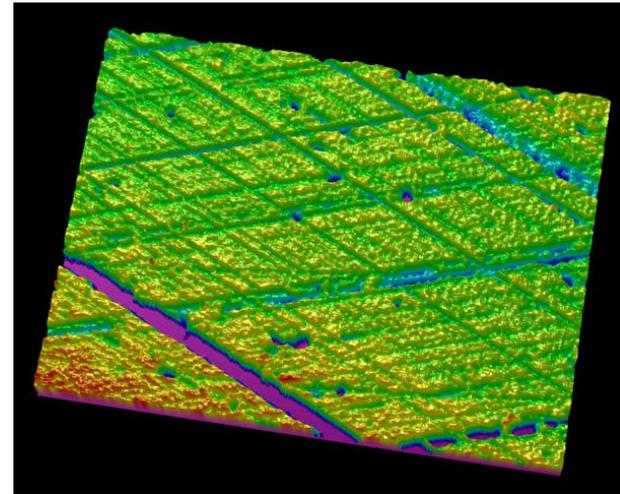
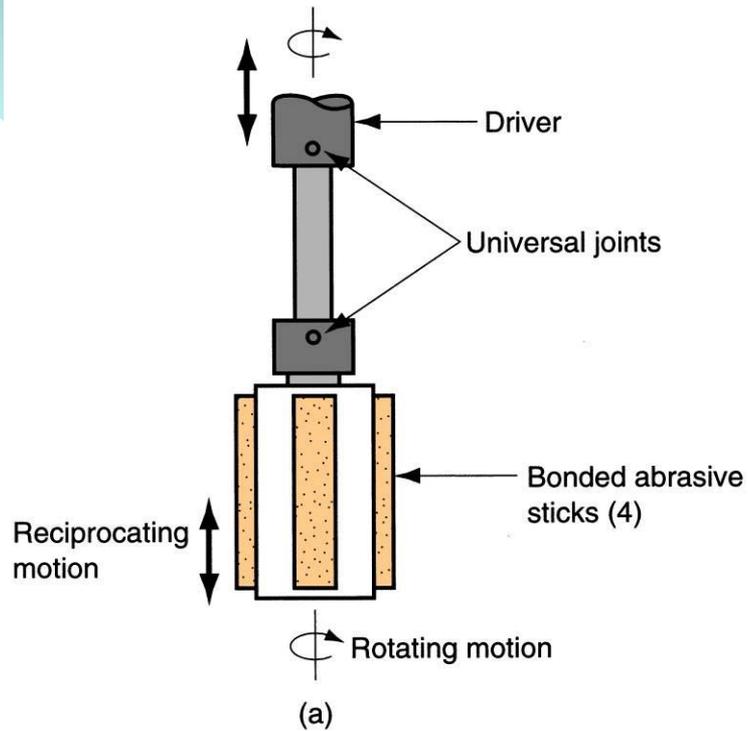
Processos Abrasivos

Acabamento de Superfície

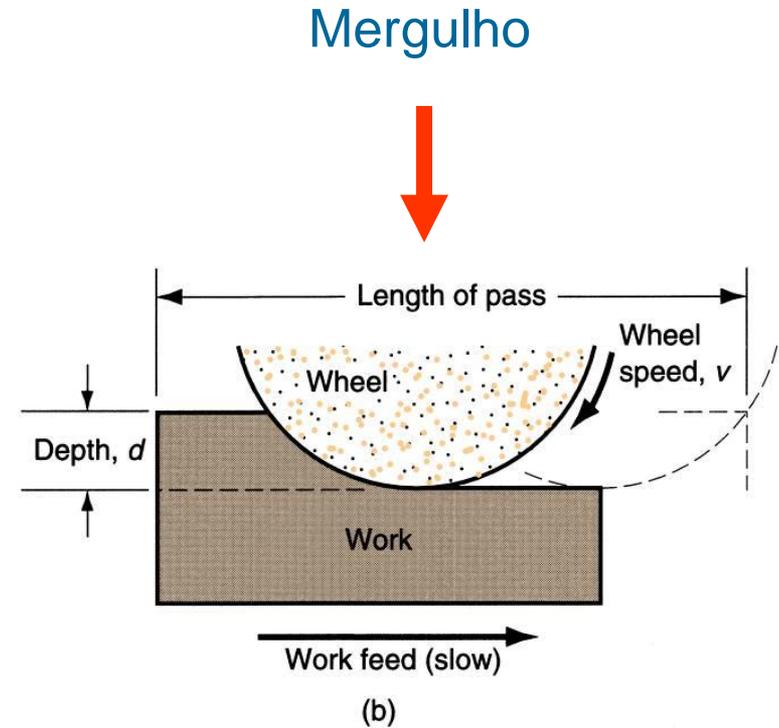
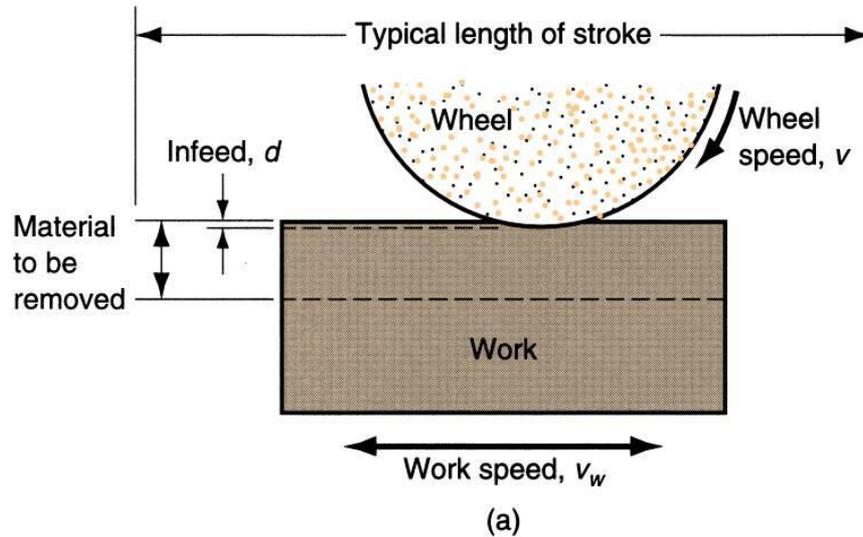


Processos Abrasivos

Brunimento "Honing"



Retificação de Megulho “Creep Feeding”



Comparação entre (a) retificação convencional e (b) retificação de mergulho

Ferramentas para Retificação - Rebolos





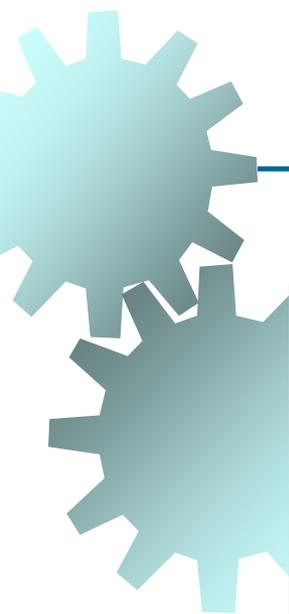
Parâmetros do Rebolo

- Material abrasivo
- Tamanho de grão
- Grau do rebolo
- Estrutura do rebolo
- Material ligante



Material Abrasivo: Propriedades

- Alta dureza
- Resistência ao desgaste
- Tenacidade
- Friabilidade (capacidade de fraturar quando perde a afiação, de forma que novas arestas sejam expostas)



Materiais Abrasivos

- **Oxido de Alumínio (Al_2O_3)**

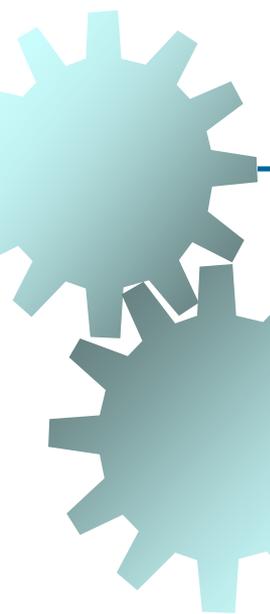
Abrasivo mais comum

Usado para retificar aço e ligas ferrosas de alta resistências

- **Carboneto de Silício (SiC)**

Mais duro que Al_2O_3 , porém menos tenaz

Usado na usinagem de alumínio, latão, aço inox, alguns ferros fundidos e determinadas cerâmicas



Novos Materiais Abrasivos

- **Nitreto de Boro Cúbico(cBN)**

Muito duro e caro

Apropriado para aços

Usado para materiais duros, tais como aço ferramenta e ligas aeroespaciais

- **Diamante**

Mais duro e mais caro

Natural ou sintético

Não aplicado para aço

Usado em materiais duros, abrasivos, tais como cerâmicas, metal duro e vidro



Novos Materiais Abrasivos

Propriedades Materiais

<u>Material abrasivo</u>	<u>Dureza Knoop</u>
Óxido de Al	2100
Carboneto de Si	2500
cBN	5000
Diamante (sintético)	7000

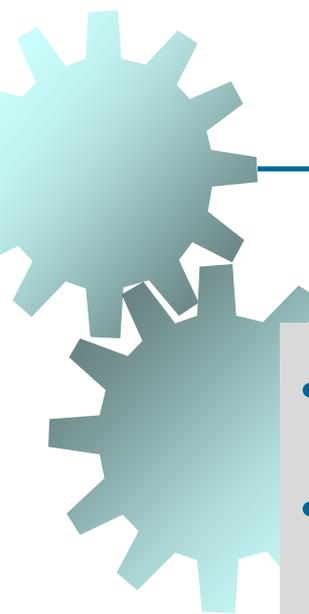
* **Material abrasivo**

Corundum subdivide-se em:

Normal: 95% Al_2O_3

Semiprecioso: 98% Al_2O_3

Precioso: 99,9% Al_2O_3



Tamanho de Grãos Abrasivos

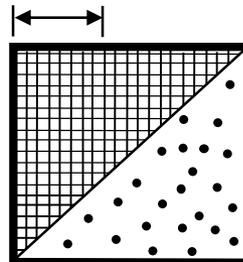
- Grãos pequenos produzem melhores acabamentos
- Grãos grandes permitem maior remoção de material (TRM maior)
- Materiais mais duros exigem tamanhos de grão menores para corte mais eficaz
- Materiais mais dúcteis exigem granulometrias maiores

Tamanho de Grãos Abrasivos

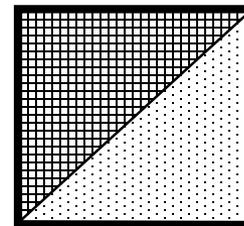
Tamanho de grão é medido usando o procedimento de peneira *screen mesh*

- Tamanhos pequenos refere-se a peneiras com números elevados para o *screen mesh* e vice-versa
- Tamanhos de grãos em rebolos geralmente entre 8 (muito grosso) e 250 (muito fino)

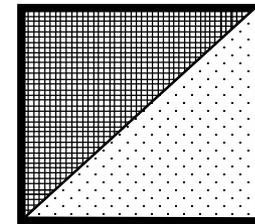
Tamanho de peneiras para seleção de tamanho de grãos. Quanto maior o número da peneira (no. de aberturas por polegada quadrada), menor será o tamanho de grão



Peneira 8
tamanho de grão 8



Peneira 24
tamanho de grão 24



Peneira 60
tamanho de grão 60

Tamanho de Grãos Abrasivos (mm)



Muito grosso		Grosso		Médio	
No.	Tam. grão	No.	Tam. grão	No.	Tam. grão
8	2,830-2,380	14	1,680-1,410	30	0,710-0,590
10	2,380-2,000	16	1,410-1,190	36	0,590-0,500
12	2,000-1,680	20	1,190-1,000	46	0,420-0,350
		24	0,840-0,710	50	0,350-0,297
				60	0,297-0,250

Fino		Muito fino		Muitíssimo fino	
No.	Tam. grão	No.	Tam. grão	No.	Tam. grão
70	0,250-0,210	150	0,105-0,188	280	0,040-0,030
80	0,210-0,77	180	0,088-0,074	320	0,030-0,020
90	0,177-0,149	200	0,074-0,062	400	0,020-0,016
100	0,149-0,125	220	0,062-0,053	500	0,016-0,013
120	0,125-0,105	240	0,053-0,040	600	0,013-0,010
				800	0,007-0,003

Dimensões em milímetro



Grau do Rebolo

Indica a resistência do ligante para reter os grãos durante o corte

- Depende da quantidade de ligante na estrutura do rebolo (P_b)
- Medida de escala entre macio e duro
 - “Macios” perdem grãos prontamente (usados para baixas TRM e materiais duros)
 - “Duros” retêm grãos (usados para altas TRM e materiais dúcteis)
 - Graduação de dureza de rebolos segundo a Norma DIN 69100

Muito macio	Macio	Médio	Duro	Muito duro	Extrema/e duro
EFG	HIJK	LMNO	PQRS	TUVW	XYZ



Ligante

- Deve suportar elevadas temperaturas e altas forças centrífugas
- Deve resistir à trepidação durante o choque do contato do rebolo/peça
- Deve segurar os grãos abrasivos rigidamente no lugar para o corte e também permitir que grãos desgastados “soltem-se” para que grãos novos e afiados trabalhem

Estrutura do Rebolo



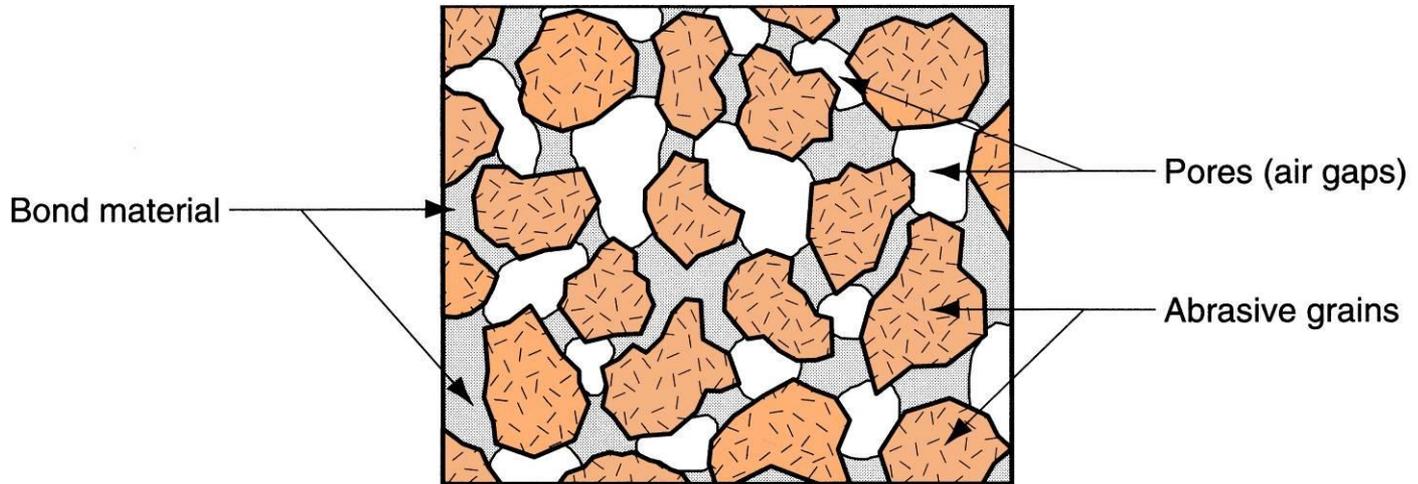
Refere-se ao espaçamento relativo dos grãos abrasivos no rebolo

- Além do grão abrasivo e do material ligante, os rebolos também possuem vazios ou poros
- Proporções volumétricas de grãos (g), ligante (b do inglês “bond”) e poros (p) podem ser expressas como:

$$P_g + P_b + P_p = 1$$

Estrutura do Rebolo

$$P_g + P_b + P_p = 1$$



Muito densa	Densa	Médio	Poros aberto	Poros muito aberto
1, 2	3, 4	5, 6, 7, 8	9, 10, 11	12, 13, 14



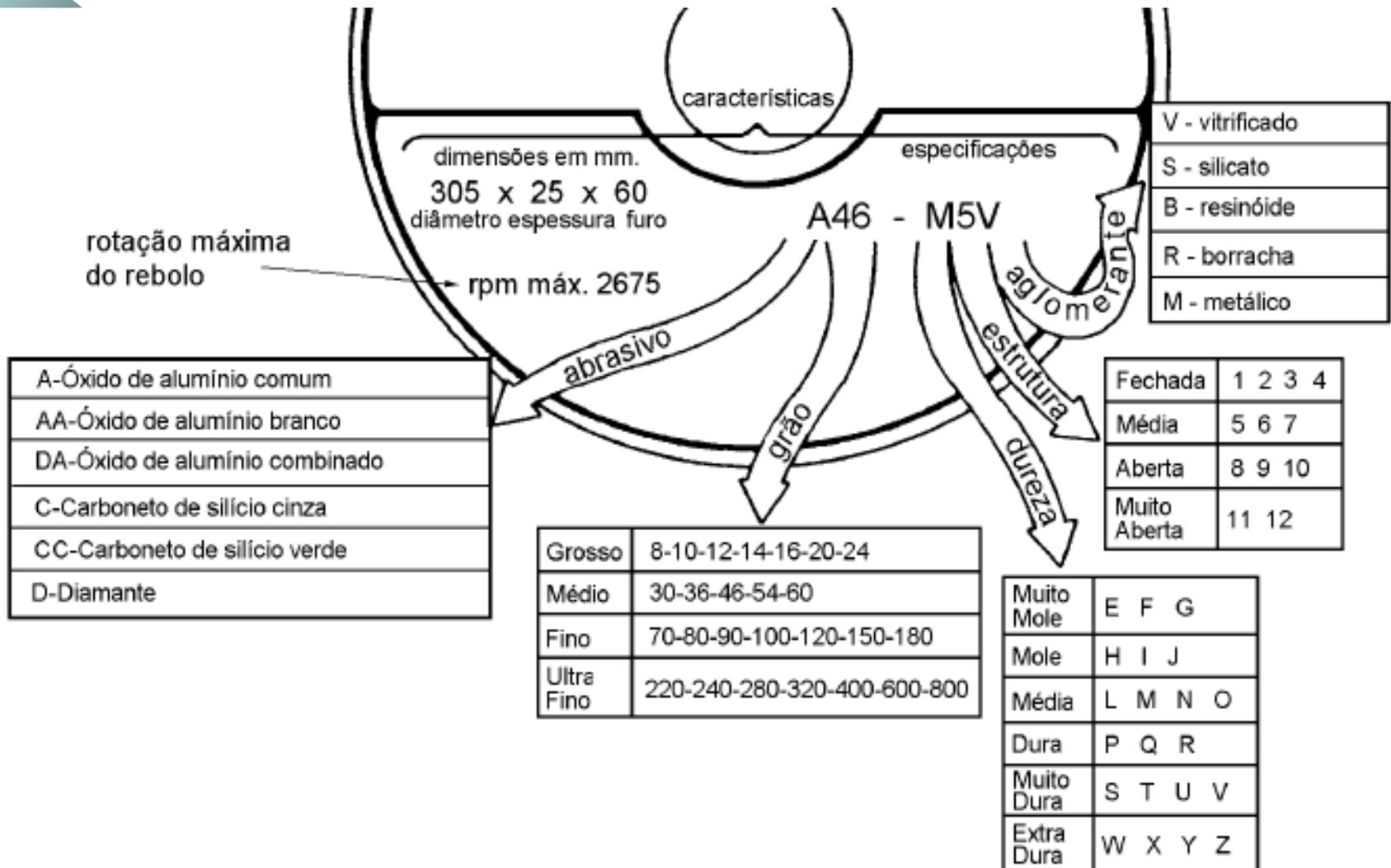
Estrutura do Rebolo: Quantificação

$$P_g + P_b + P_p = 1$$

Medida em uma escala que varia entre “aberta” e “densa.”

- Estrutura aberta significa P_p é relativamente grande e P_g é relativamente pequeno (recomendado como “bolsões” para cavaco de materiais dúcteis).
- Estrutura densa significa P_p é relativamente pequeno e P_g é grande (recomendado para obtenção de melhores acabamentos e controle dimensional).

Sistema de Codificação do Rebolo





Aplicação do Rebolo

- **Para metais dúcteis:**
 - Tamanhos de grão grande e rebolo de grau duro
- **Para metais mais duros:**
 - Tamanhos de grão pequenos e rebolo de grau macio

Configurações do Rebolo

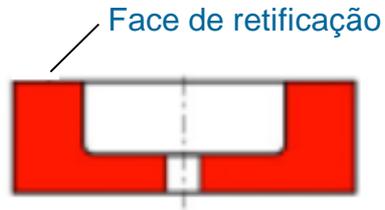


Plano



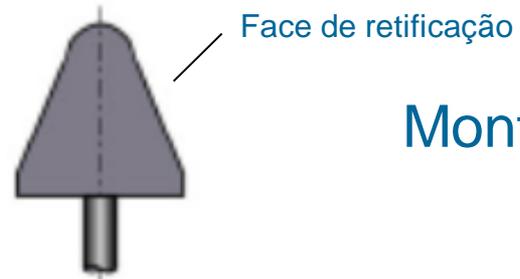
Cilindro

Copo Plano

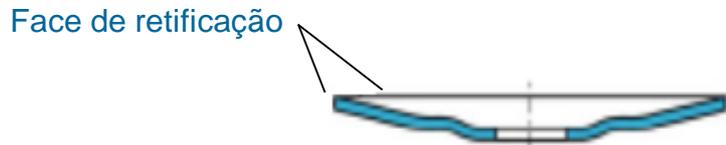


Copo

Prato

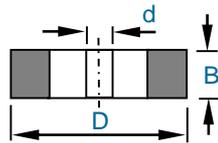


Montado

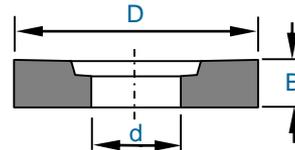


Configurações do Rebolo

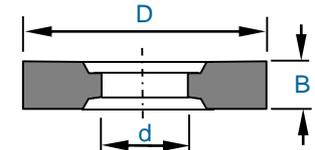
Formas de rebolos de acordo com Norma DIN



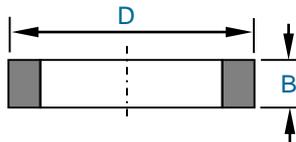
Rebolo reto (DIN 69120)



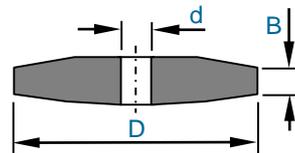
Rebolo reto com lado rebaixado (DIN 69123)



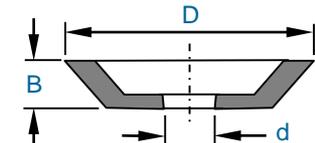
Rebolo reto com dois lados rebaixados



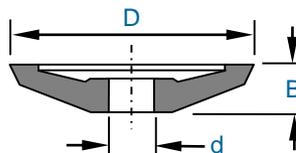
Rebolo cilíndrico (DIN 69138)



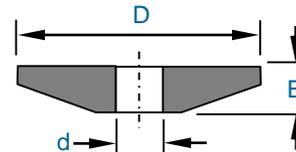
Rebolo cônico (DIN 69123)



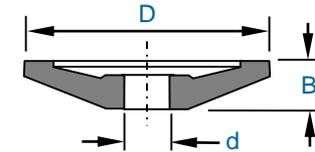
Rebolo cônico copo



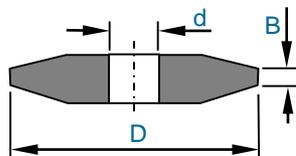
Rebolo Disco (DIN 69149)



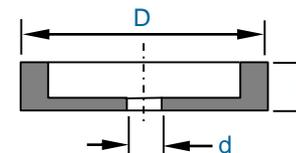
Rebolo disco Forma A (DIN 69149)



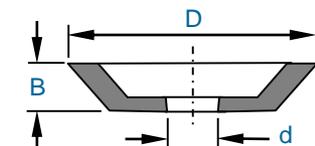
Rebolo Disco forma B (DIN 69149)



Rebolo com dois lados cônicos Forma C (DIN 69149)



Rebolo copo forma D (DIN 69149)



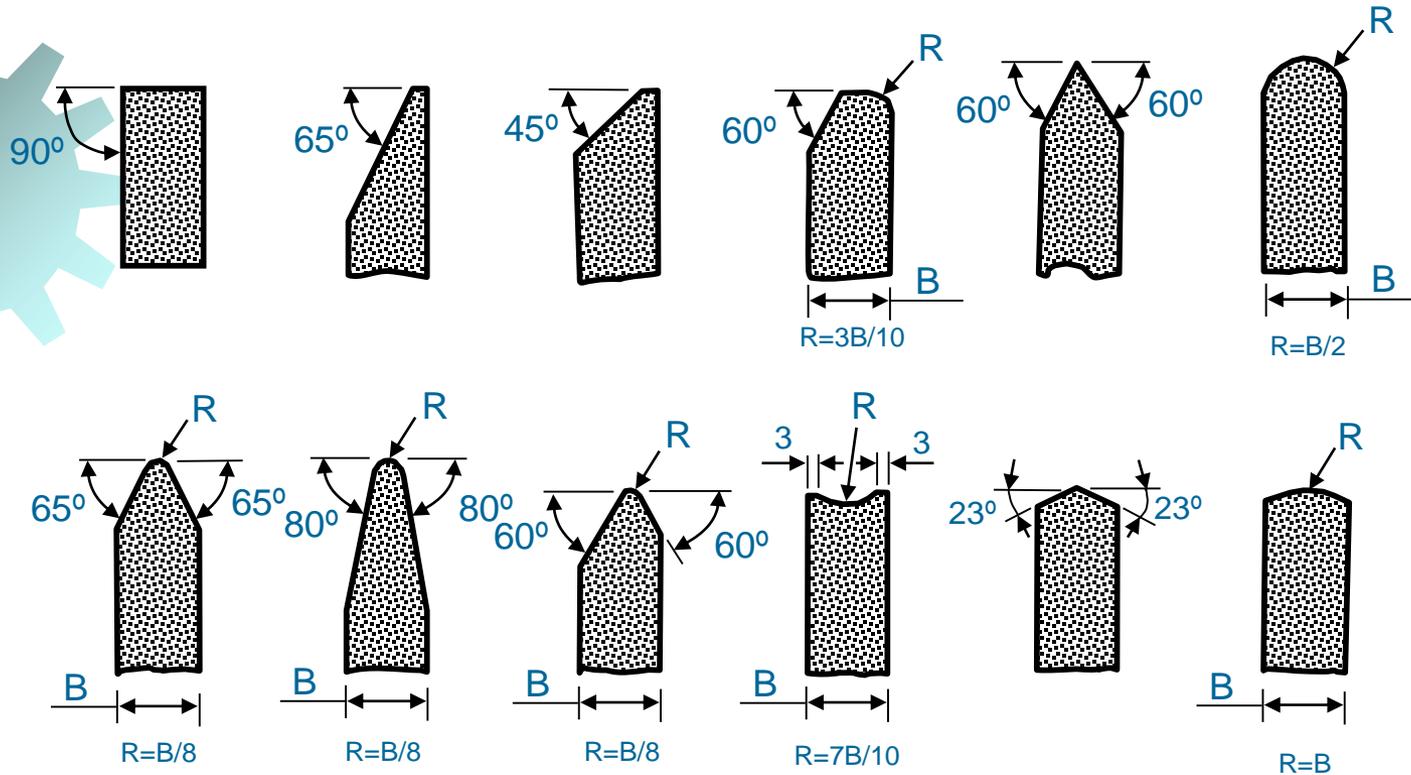
Rebolo cônico copo Forma E (DIN 69149)

Configurações do Rebolo

Dimensões de rebolos de acordo com norma DIN 69100

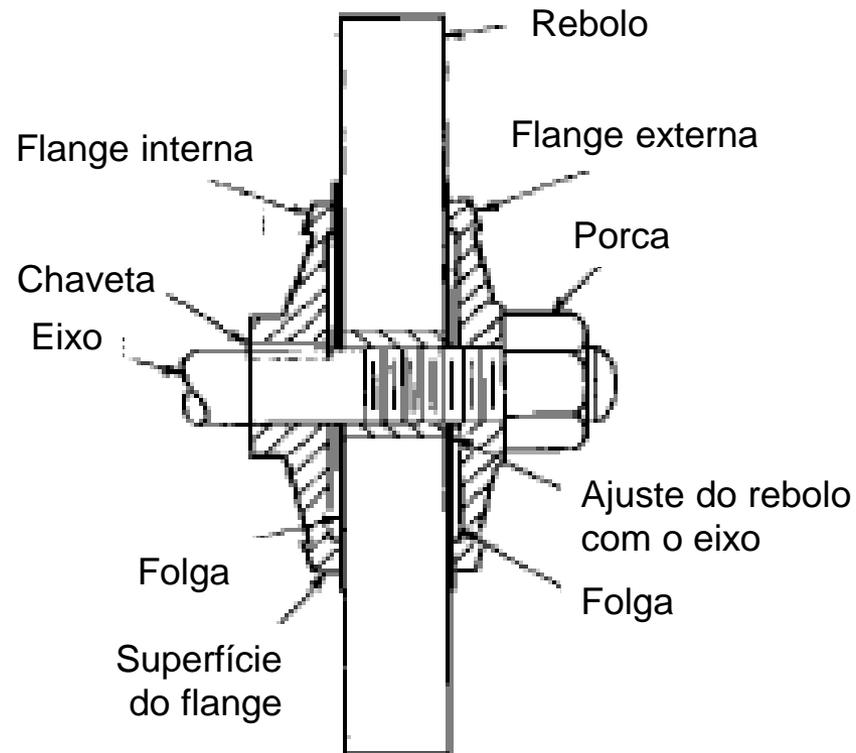
Tipo de Rebolo	Principais dimensões do rebolo (mm)		
	D	B	d
Disco Forma A e B	80-250	8-21	20-32
Cônico Forma C	80-250	8-19	20-32
Copo Forma D	50-150	32-80	13-20
Copo Cônico Forma E	50-150	25-50	13-20
Copo cônico	50-150	25-50	13-20

Configurações do Rebolo

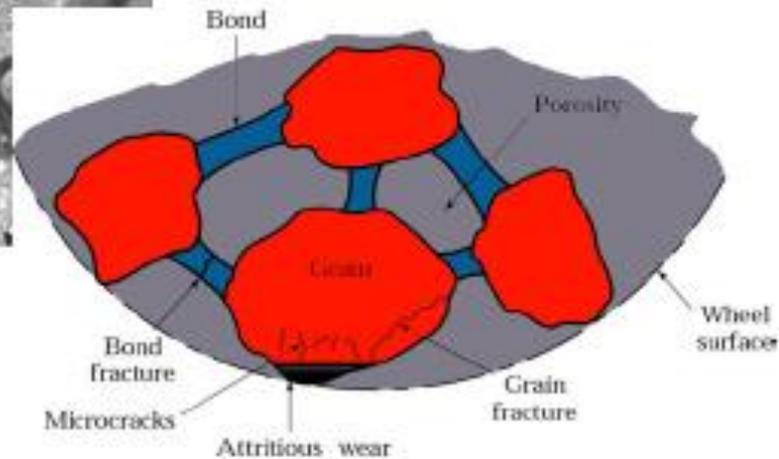
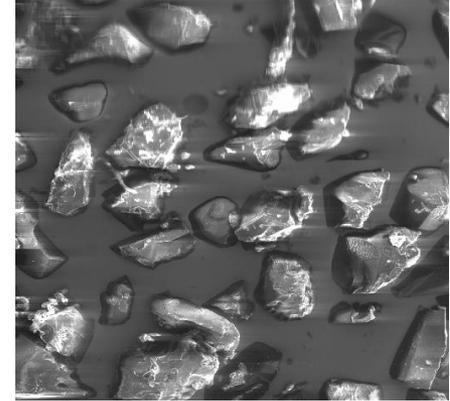
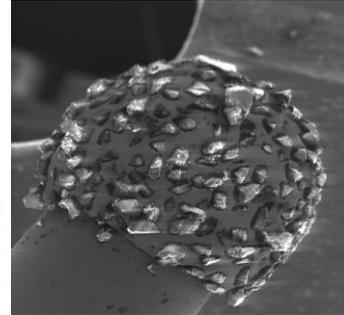
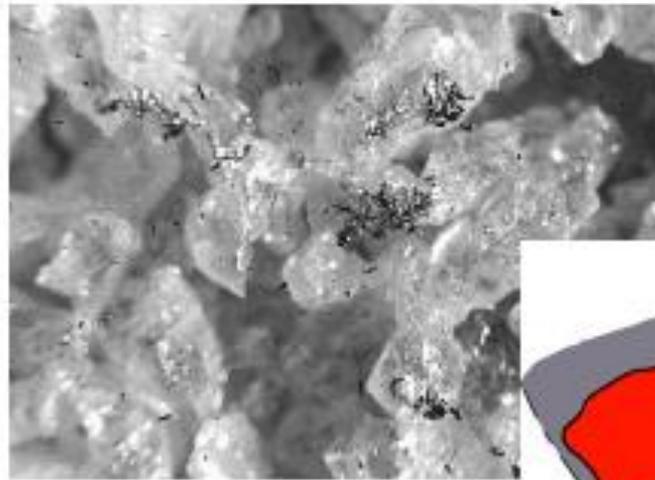


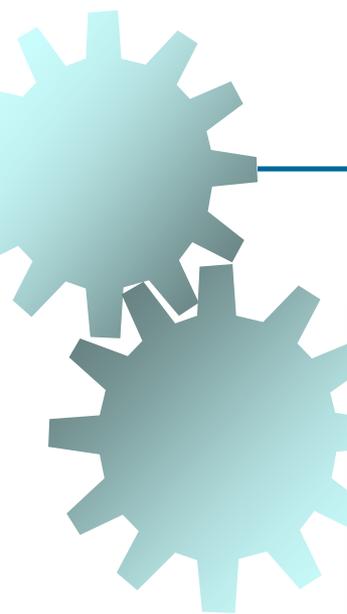
Perfis dos Rebolos

Montagem do Rebolo



Rebolo - Superfície e Microestrutura

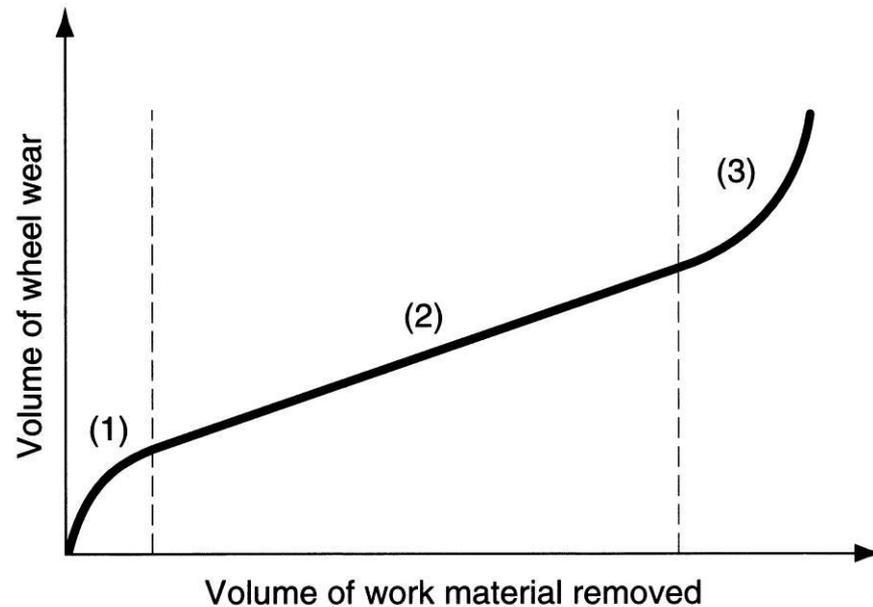




Mecanismos de Desgaste de Rebolo

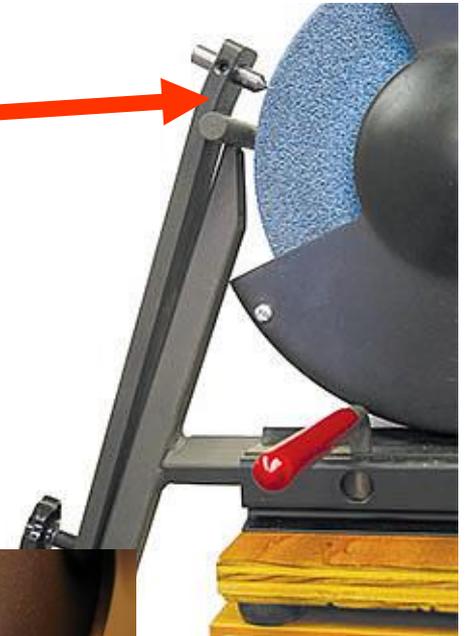
- Fratura de grão
- *Attrition* – Causado por mecanismos similares entre si: atrito, difusão e reações químicas.
- Fratura do ligante – depende do grau do rebolo – grãos se desgastam por *attrition* e a força aumenta muito.

Quantificação do Desgaste de Rebolo

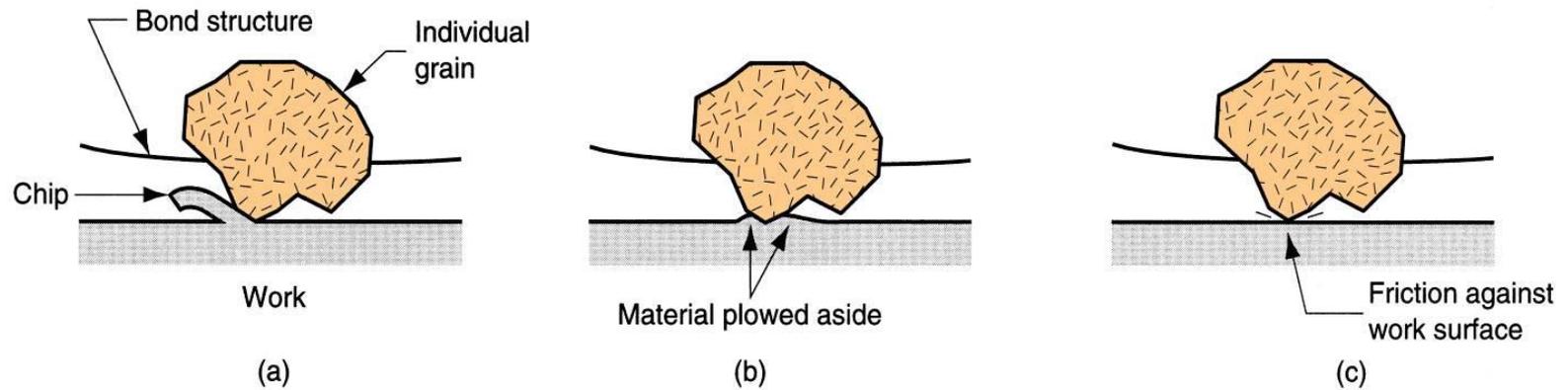


Curva típica do desgaste do rebolo. O desgaste é lançado no gráfico como função do volume de material removido, ao invés de ser em função do tempo.

Rebolo - Reafiação

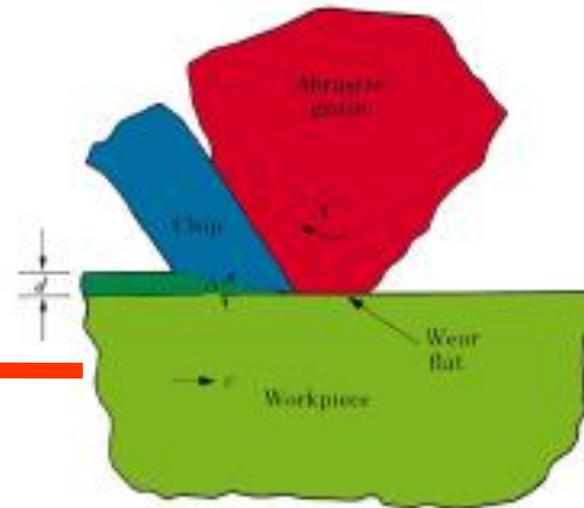
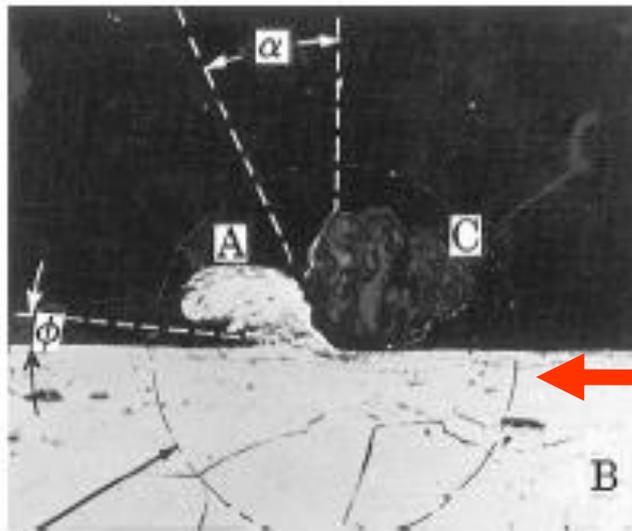


Mecanismo de Remoção de Material



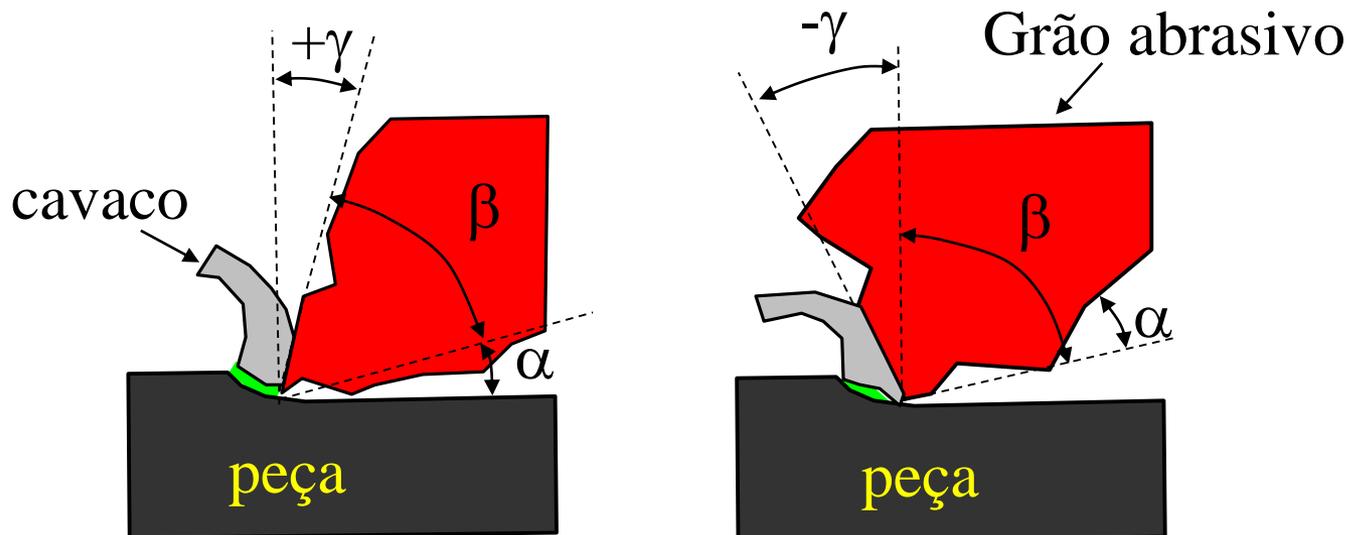
Três tipos de ação dos grãos na retificação:
(a) corte, (b) sulcamento, e (c) atrito.

Formação do Cavaco

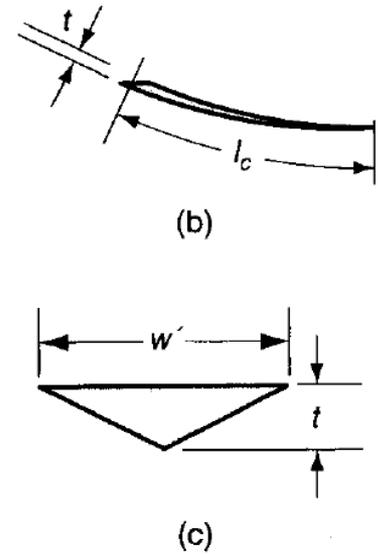
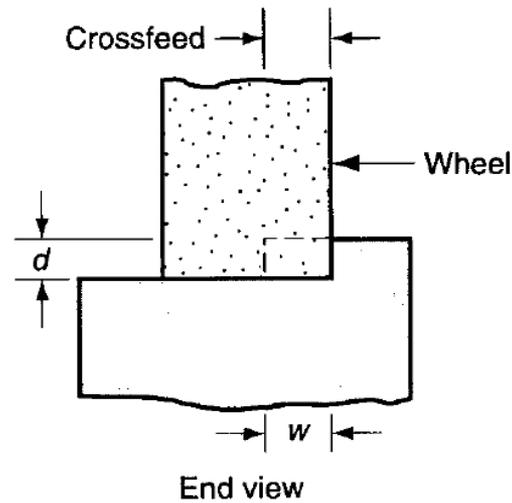
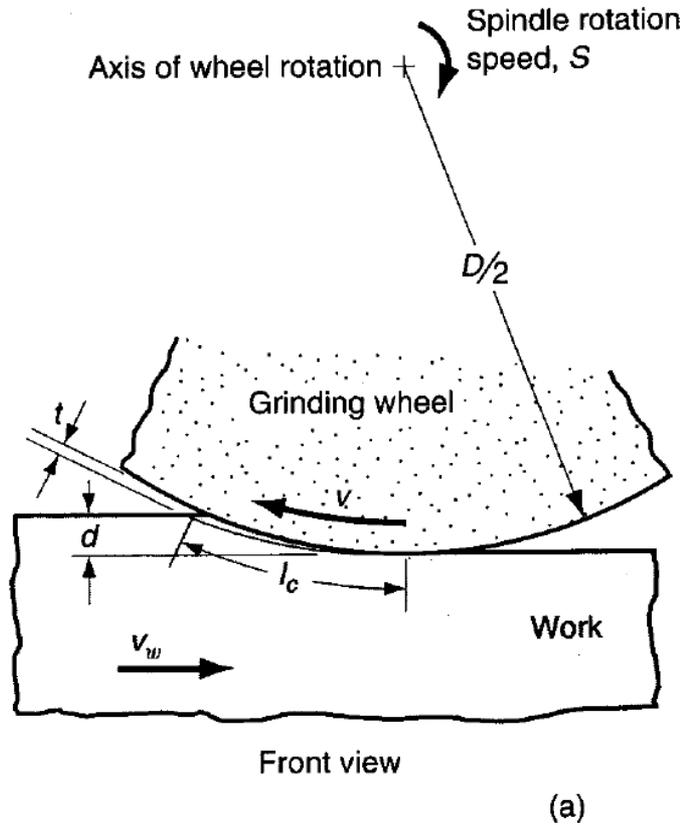


Formação do Cavaco

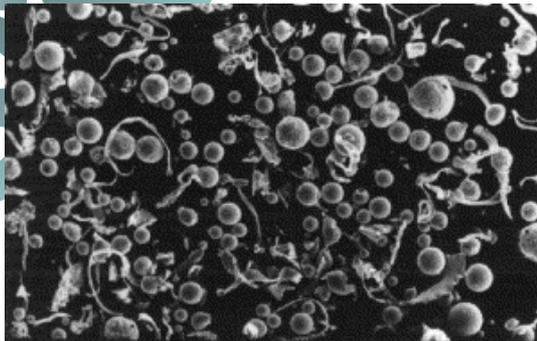
Mecanismo de Formação do cavaco e geometria da ferramenta



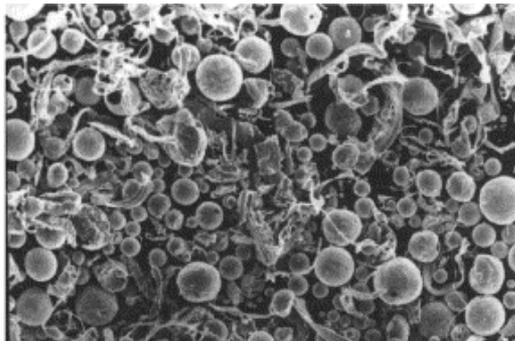
Geometria da Formação do Cavaco



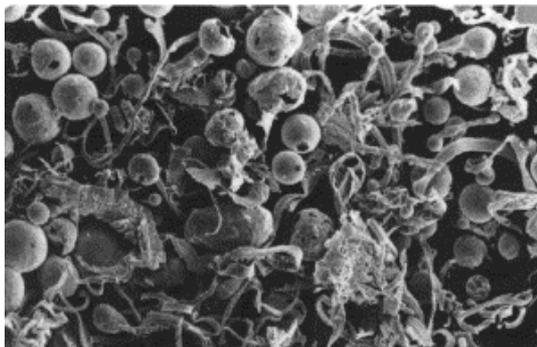
Geometria da Formação do Cavaco



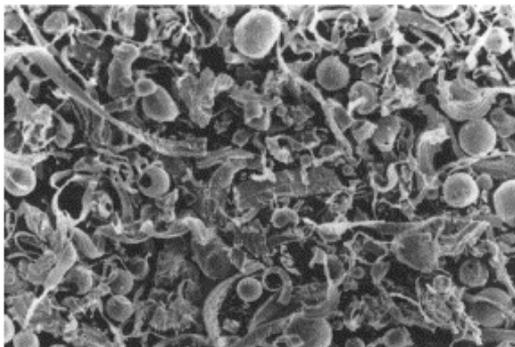
(a) $V_s=3000\text{rpm}$ $V_w=5\text{m/min}$ $a=10\mu\text{m}$



(b) $V_s=2700\text{rpm}$ $V_w=5\text{m/min}$ $a=10\mu\text{m}$



(c) $V_s=2400\text{rpm}$ $V_w=5\text{m/min}$ $a=10\mu\text{m}$

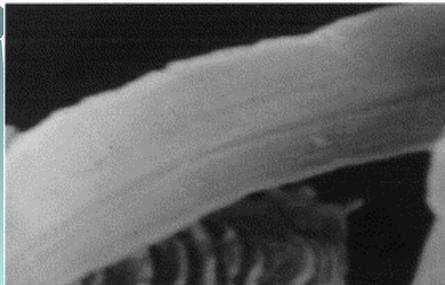


(d) $V_s=1800\text{rpm}$ $V_w=5\text{m/min}$ $a=10\mu\text{m}$

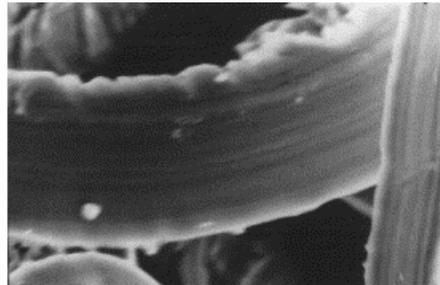
20KV X200 ----- 100 μm

Fotos de microscopia eletrônica de varredura de cavacos com diferentes velocidades de corte (v)

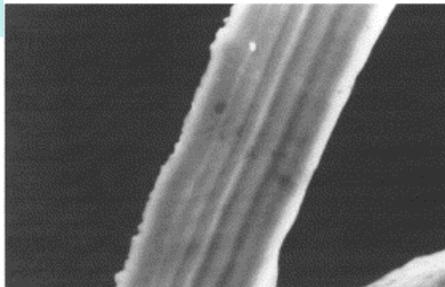
Geometria da Formação do Cavaco



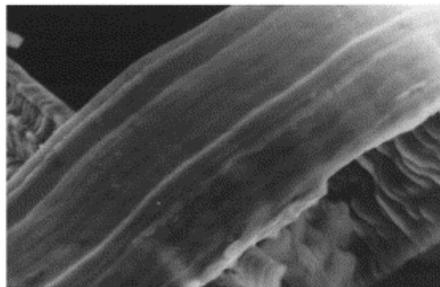
(c) $V_{eq}=0.0264$



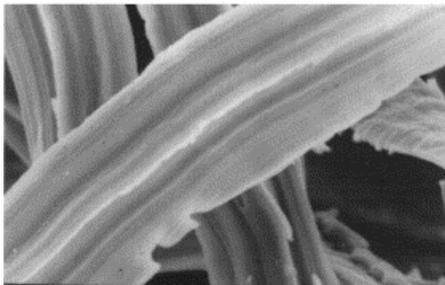
(d) $V_{eq}=0.0296$



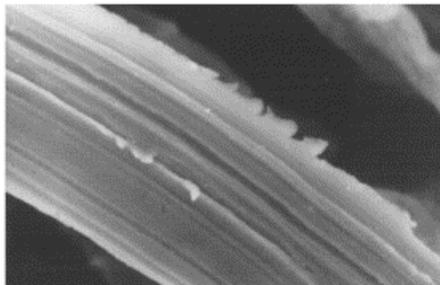
(e) $V_{eq}=0.0318$



(f) $V_{eq}=0.0338$



(g) $V_{eq}=0.0393$



(h) $V_{eq}=0.0485$

Fotos de microscopia eletrônica de varredura de cavacos com diferentes velocidades equivalentes ($v_{eq} = v_w/v$)

Geometria do Cavaco

- Com o comprimento de contato rolante, o comprimento do cavaco, l_c :

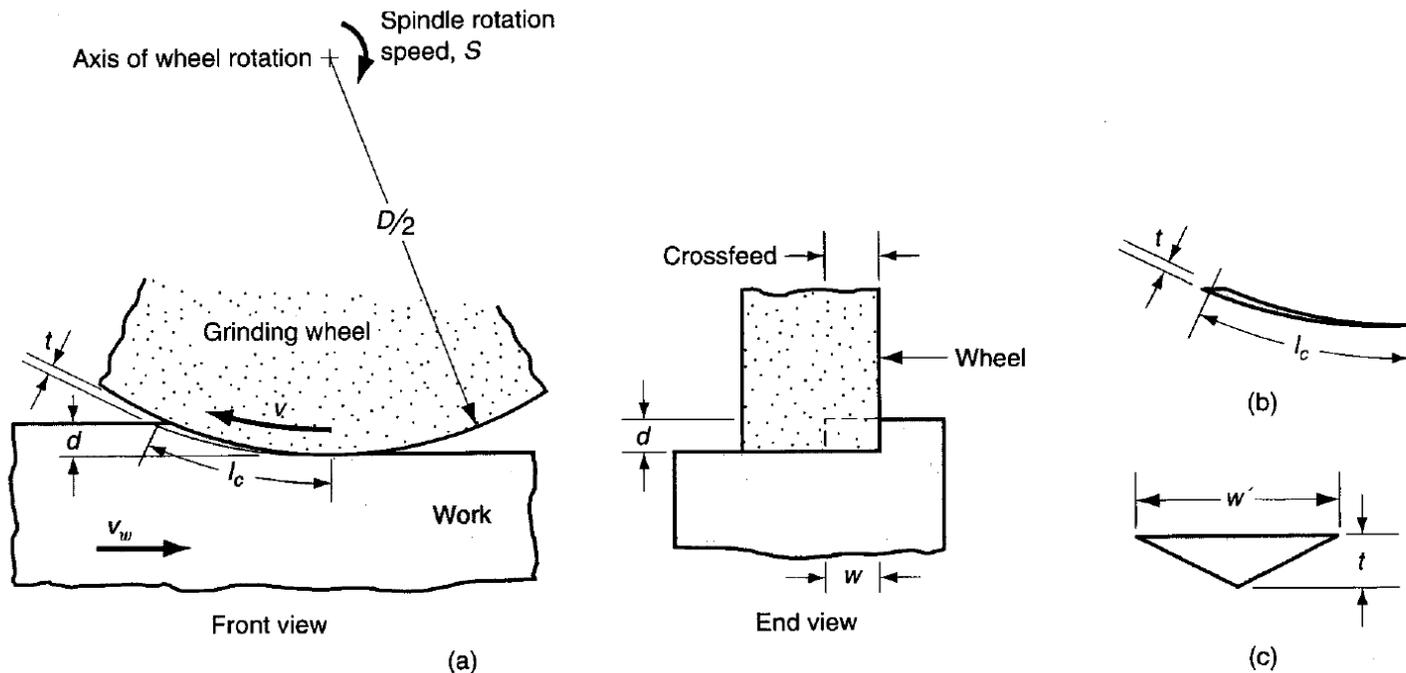
$$l_c = (D \cdot d)^{1/2}$$

onde D = diâmetro do rebolo, d = profundidade de penetração

- Taxa de remoção de material, TRM

$$TRM = v_w \cdot w \cdot d$$

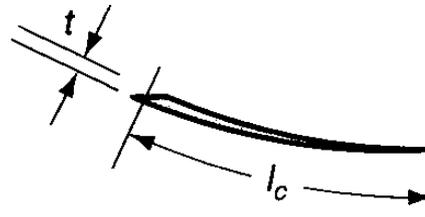
onde v_w = velocidade da peça, d = profundidade de penetração, w = largura de corte (equivale ao avanço transversal ou passo lateral)



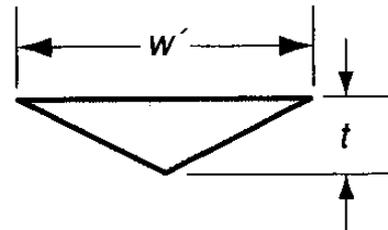
Volume Médio de Cavaco

- Os cavacos possuem uma seção transversal triangular e razão de aspecto do grão abrasivo (r_g) dada pela espessura do cavaco (t) em relação à largura do cavaco (w')

$$r_g = w'/t \approx 10 \text{ a } 20 \Rightarrow w' = (10 \text{ a } 20).t$$



(b)



(c)



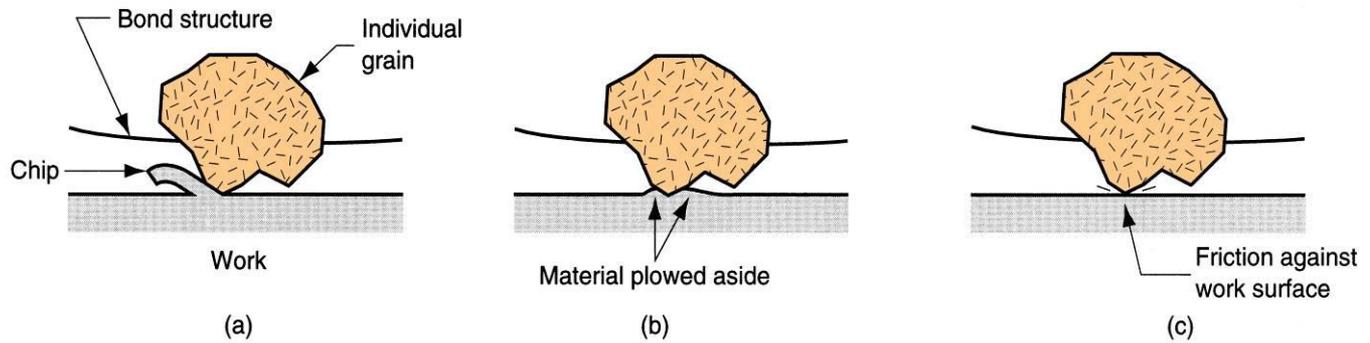
Número de Cavaco Removido por Tempo (n_c)

- O número de cavacos removidos por unidade de tempo (n_c) é:

$$n_c = v \cdot w \cdot C$$

onde C = número de arestas de corte (grãos) por unidade de área da superfície do rebolo (típico 0,1 a 10 grãos/mm²), w é o avanço lateral, e v = velocidade de corte do rebolo.

Energia Específica do Corte



Energia específica da retificação (U)

- Consiste da energia da formação do cavaco (cisalhamento), do “*plowing*” (deformação lateral do material da peça na passagem do grão) e do deslizamento (atrito do grão com a peça)

$$U = \frac{F_c \cdot v}{v_w \cdot w \cdot d}$$



Força sobre um Grão

Utilizando a equação de U e assumindo que a força de corte agindo em um único grão no rebolo é proporcional a $r_g \cdot t$, tem-se:

$$F'_c = K_1 \left(\frac{r_g \cdot v_w}{v \cdot C} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{0,25}$$

onde K_1 é uma constante de proporcionalidade



Temperatura na Retificação

Sabendo-se que a temperatura de retificação é dependente de U , que por sua vez, é inversamente proporcional a t , tem-se:

$$T_s = K_2 \cdot d^{0,75} \cdot \left(\frac{r_g \cdot C \cdot v}{V_w} \right)^{0,5} \cdot D^{0,25}$$

onde K_2 é uma constante de proporcionalidade.