



SEM-0534

Processos de Fabricação Mecânica

Retificação

Professor:

Renato Goulart Jazinevicius



Processos Abrasivos

Os processos abrasivos são aqueles que usam ferramentas com geometria não definida, geralmente, a apresentação são pós com diferentes granulometrias.

Nos processos abrasivos, os pós podem ser usados soltos imersos em algum meio líquido ou impregnando um tecido apropriado ou presos através de um ligante.

O ligante pode ser metálico, vítreo ou resinóide, dependendo da aplicação e do material.

Processos Abrasivos

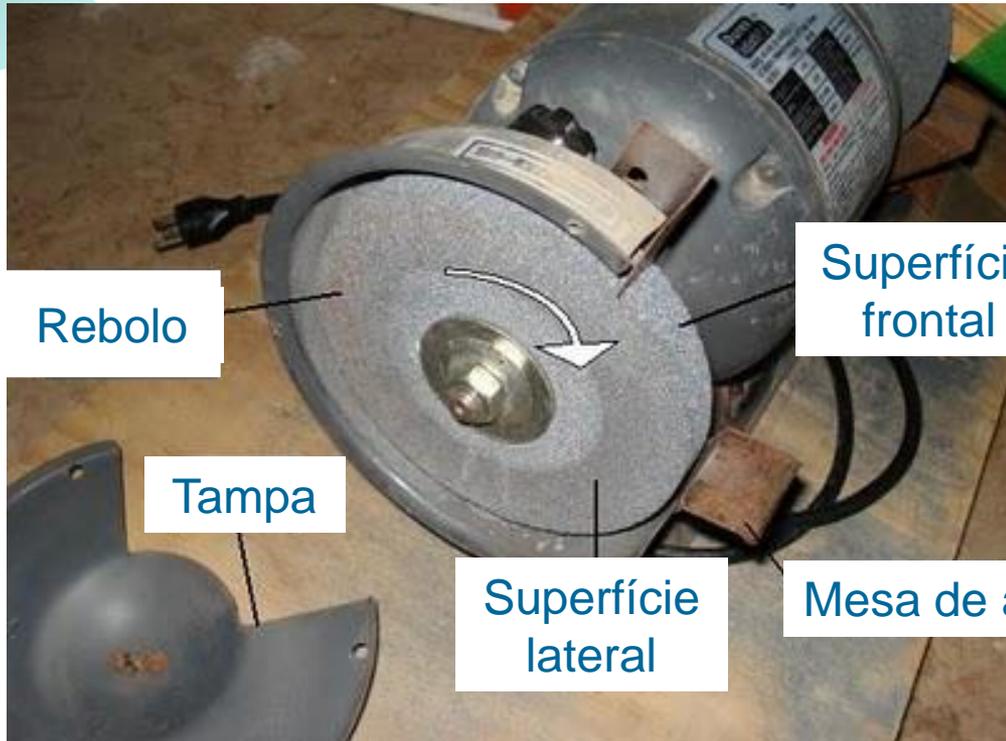
O uso de abrasivos como meio para remover material de superfície não é um processo novo.

Exemplo: lapidação e polimento de metais e gemas



Processos Abrasivos

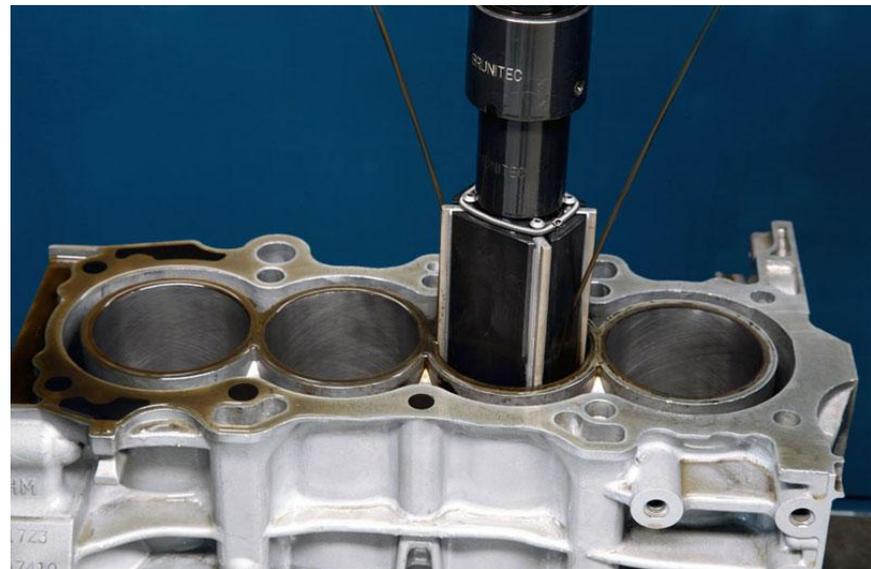
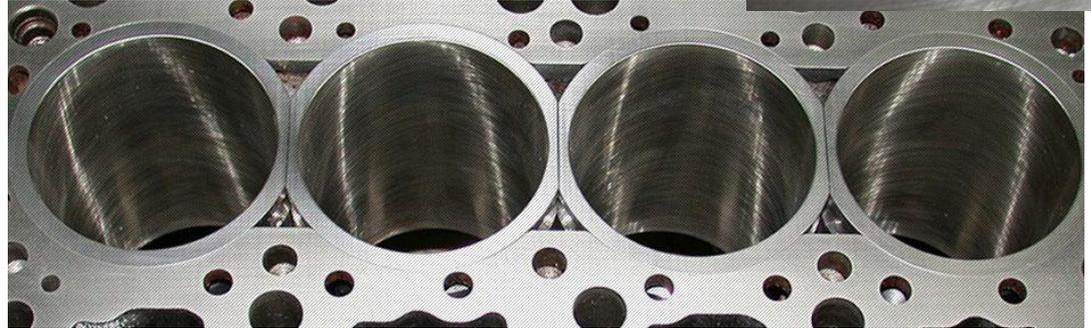
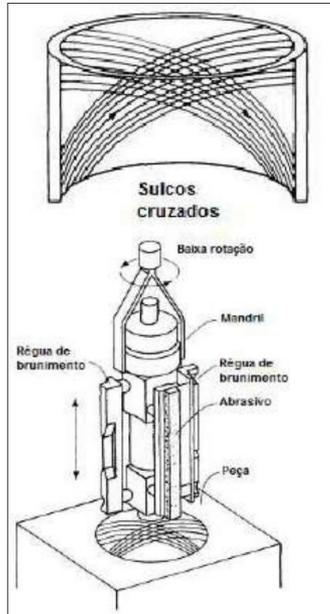
Esmerilhamento



Processos Abrasivos

Outros processos abrasivos:

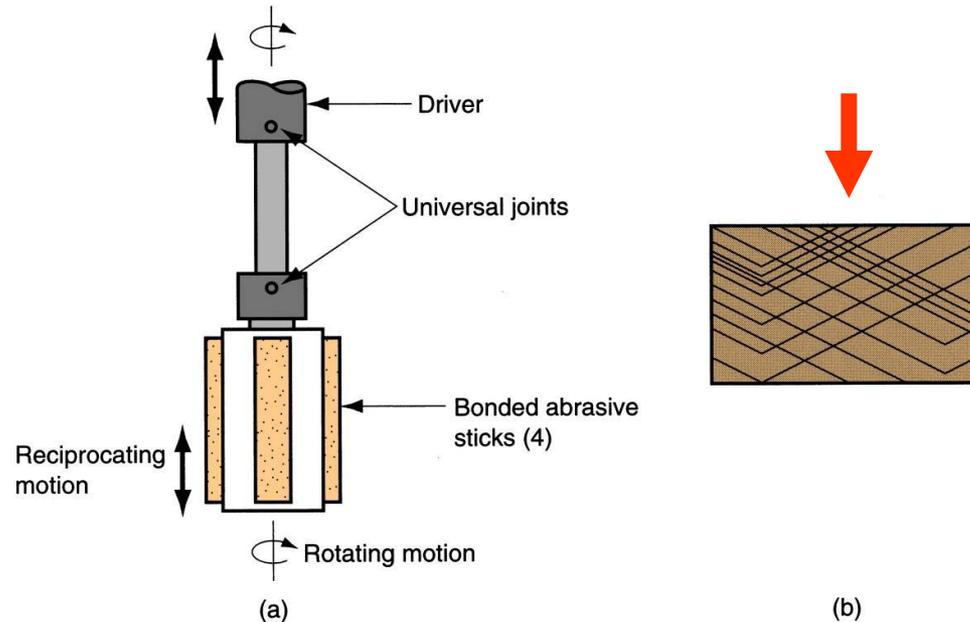
a) Brunimento



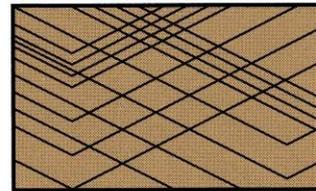
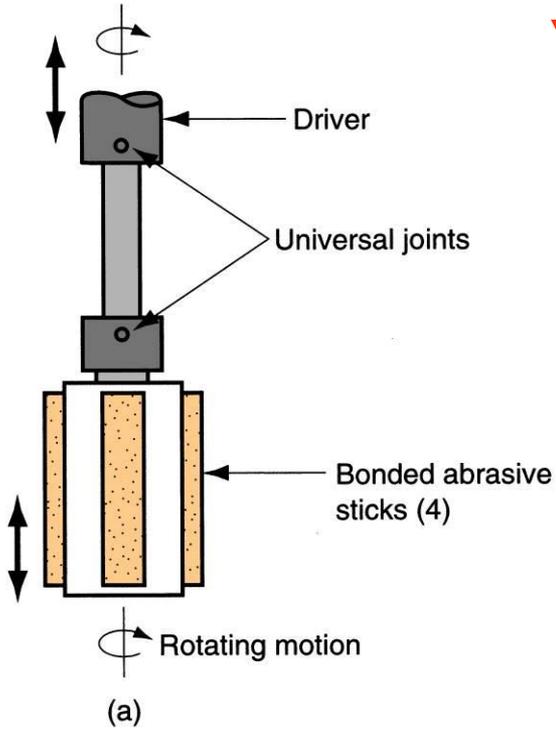
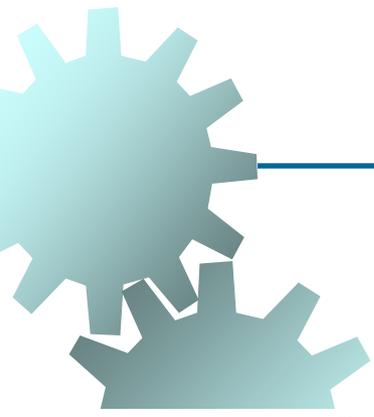
Processos Abrasivos

Brunimento é um processo abrasivo realizado por um conjunto de seguimentos abrasivos ligados.

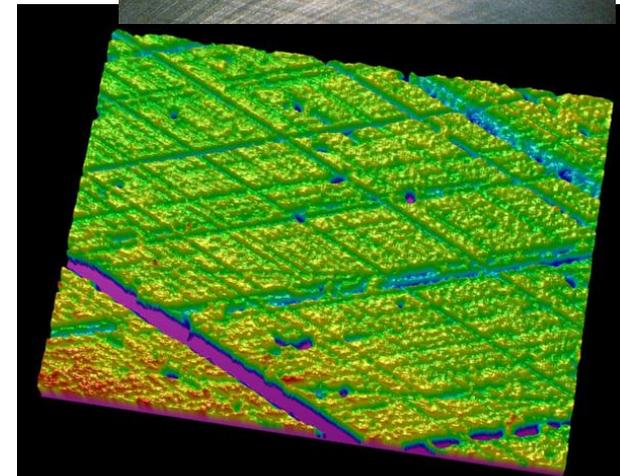
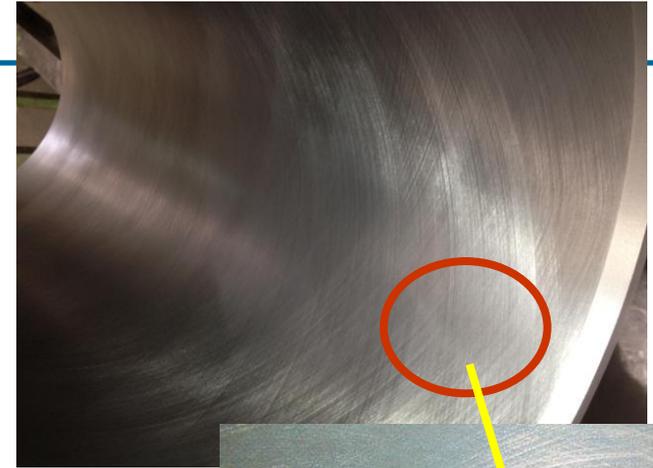
Produz superfícies com riscos cruzados, que tendem a manter lubrificação durante funcionamento do componente, contribuindo para função e durabilidade.



Brunimento "Honing"



(b)



Lapidação



O processo de **Lapidação** é um processo de usinagem com partículas abrasivas soltas suspensas em uma lama a base de água ou

O processo de Lapidação é capaz de remover de forma econômica até 1,27 mm (Sobremetal) em peças de materiais dúcteis.

Geralmente, remoção ocorre na faixa de 0,05 a 0,250 mm.

Processo envolve pouca geração de calor e de rebarbas

Processos Abrasivos

Outros processos abrasivos:

b) Lapidação (Gemas e Pedras Preciosas)



Processos Abrasivos

Outros processos abrasivos:

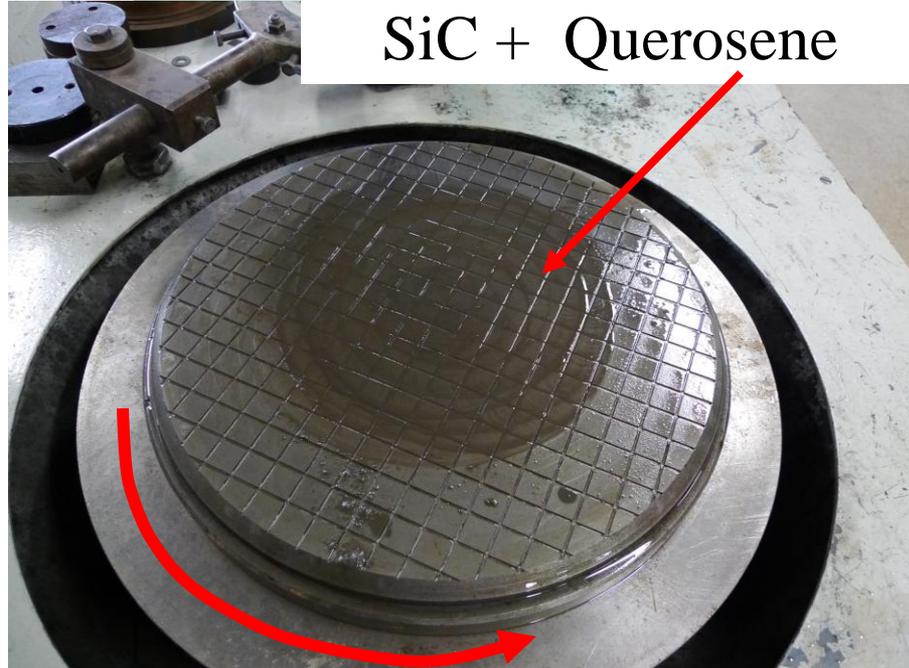
b) Lapidação – Peças Mecânicas Planas



Lapidação



SiC + Querosene

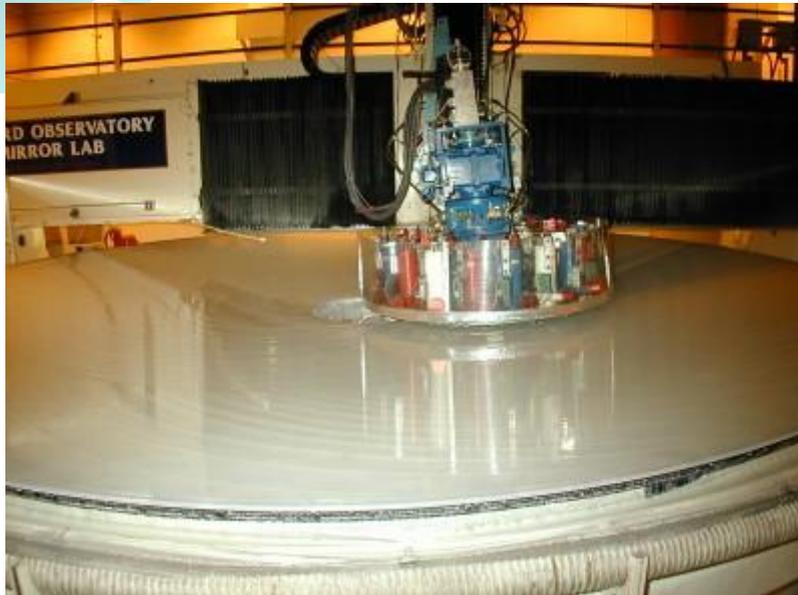


n

Processos Abrasivos

Outros processos abrasivos:

b) Lapidação – com abrasivo solto





Polimento

O processo de polimento é utilizado para remover riscos e rebarbas e suavizar superfícies irregulares por meios de grãos abrasivos aderidos a um disco de polir que giram em altas velocidades (até 2300 m/min).

As superfícies desses discos podem ser revestidas com feltro ou papel onde os grãos abrasivos são alimentados juntamente com algum tipo de líquido.

Granulometrias de 20 a 80 – polimento grosseiro

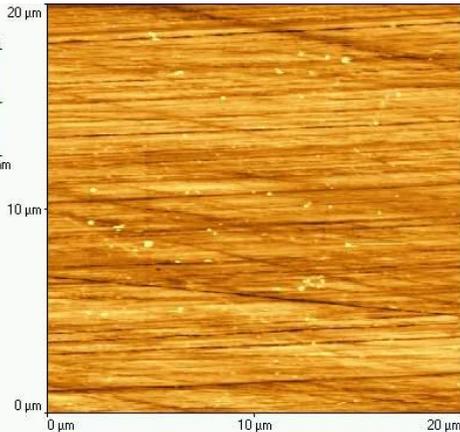
Granulometria acima de 120 – polimento fino

Operação de polimento muitas vezes são realizadas manualmente

Polimento



Area Ra: 5.8256 nm
Area RMS: 7.4883 nm
Avg. Height: 39.4937 nm
Max. Range: 129.1882 nm



Processos Abrasivos

Outros processos abrasivos:

c) Polimento



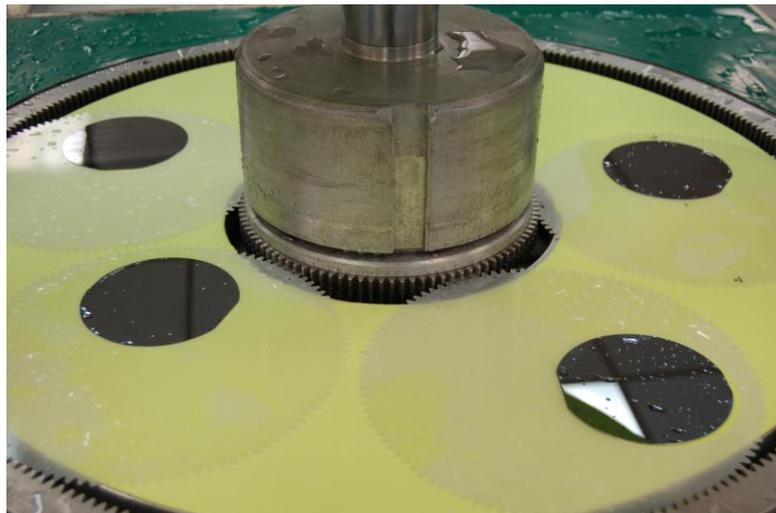
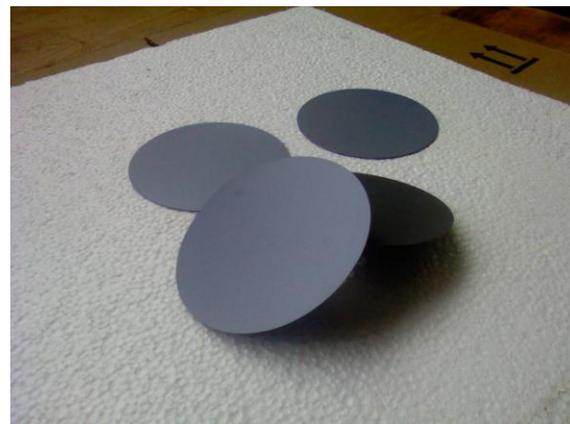
Processos Abrasivos

Outros processos abrasivos:

c) Polimento



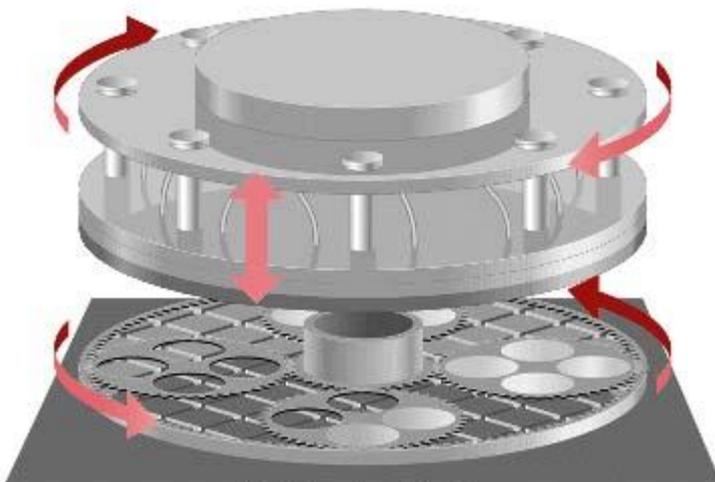
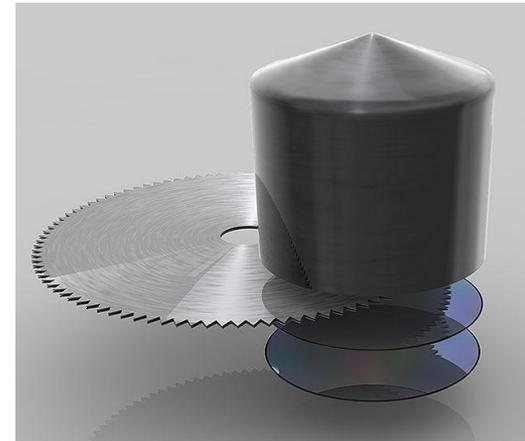
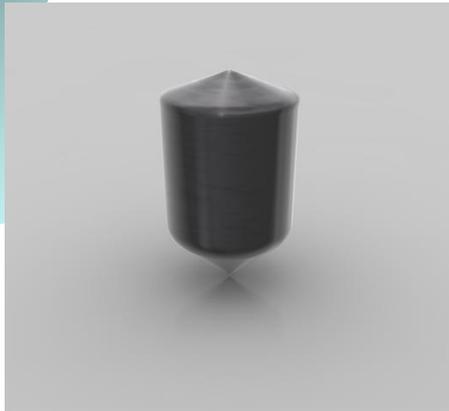
Polimento



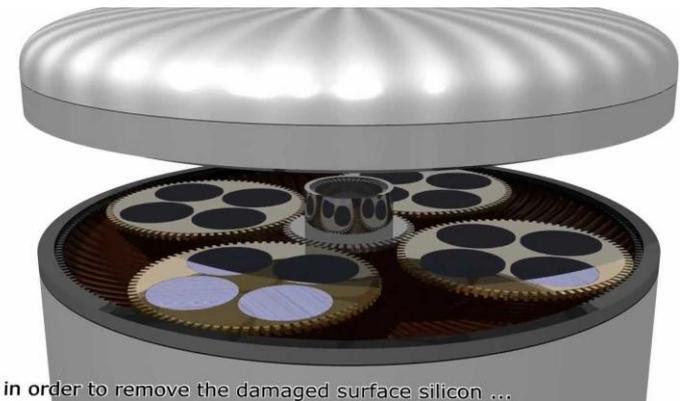
Processos Abrasivos

Outros processos abrasivos:

c) Polimento de wafer de Silício



Water Lapping Machine
(Mitsubishi Materials Silicon)

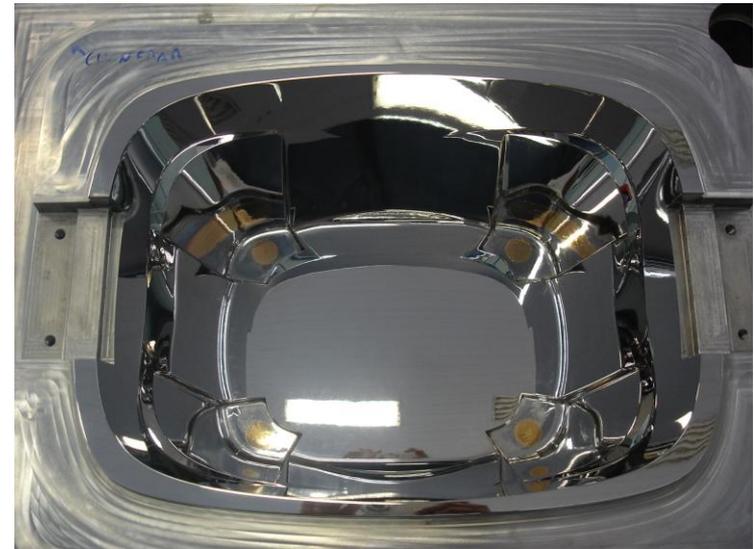


in order to remove the damaged surface silicon ...

Processos Abrasivos

Outros processos abrasivos:

c) Polimento de Moldes e Matrizes





Processos Abrasivos

Outros processos abrasivos:

d) Superacabamento

Superacabamento é uma operação de extrema precisão, onde se considera quantidade extremamente pequena de remoção superficial de material. Em alguns casos a remoção sequer existe teoricamente, o que ocorre de fato é a formação da superfície de assentamento com a redução dos picos



Processos Abrasivos

Superacabamento é uma operação conhecida na atualidade com outras denominações, tais como:

Micro-acabamento; .

Super-brunimento;

Brunimento de ciclo curto e até mesmo;

Polimento.

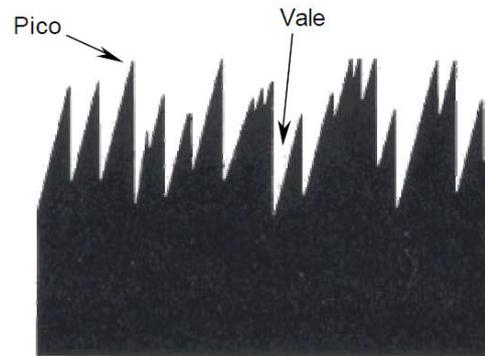
Entretanto o superacabamento não pode ser confundido com essas operações

O superacabamento ocorre geralmente após a operação de retificação. São consideradas remoções de 0,25 a 2.5 microns, para se obter a superfície com a qualidade e acabamento de que se trata na técnica de superacabamento.

Processos Abrasivos

Por que necessitamos do super-acabamento?

A resposta está na própria natureza da operação de retificação. A retificação é uma operação classificada como de "alta temperatura". Além disso, ela produz uma superfície formada de "picos" e "vales".

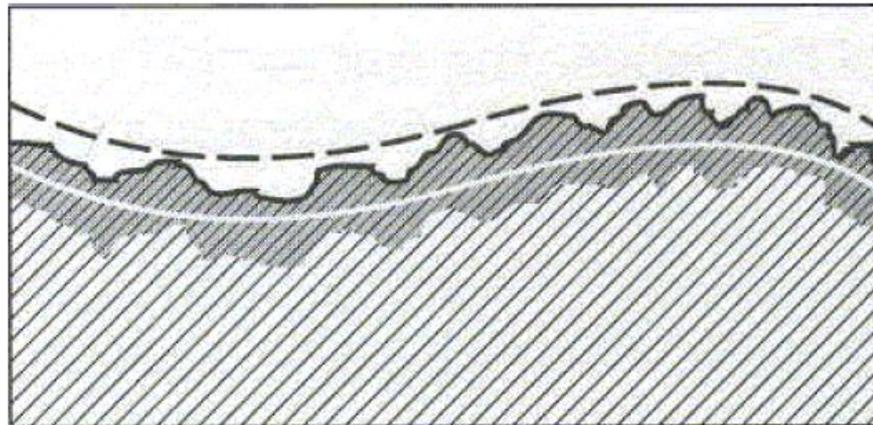


Típico perfil de superfície retificada formada de picos e vales

Processos Abrasivos

Por que necessitamos do super-acabamento?

Sendo uma operação de "alta temperatura" ela atinge níveis de até 1000°C . O resfriamento subsequente causa alteração na estrutura metalúrgica do metal. É um revenimento, que afeta a superfície, alterando a micro estrutura do metal, que resta sobre ele, sob a forma de uma "pele" ou casca, denominada de "camada amorfa".

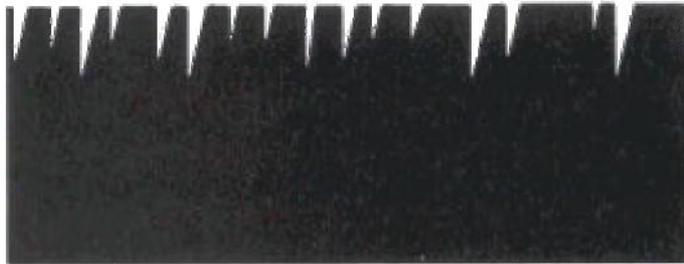


Camada amorfa formada após a retificação

Processos Abrasivos

O que faz o super-acabamento?

O super-acabamento remove os "picos" da superfície acabada, e a "pele" ou camada da amorfa gerada durante a retificação. Ela é uma operação de "baixa velocidade" e "baixa temperatura". O resultado é um bom condicionamento de assentamento e a preservação da micro-estrutura metalúrgica do material, quanto a manutenção das suas características de dureza, composição, estrutura, etc. As ondulações e outras milésimas imperfeições , geométricas são também reduzidas a limites mínimos, ou eliminadas.



Superfície submetida a operação de super-acabamento, com picos, ondulações e camada amorfa, eliminados



Por que usar processos abrasivos

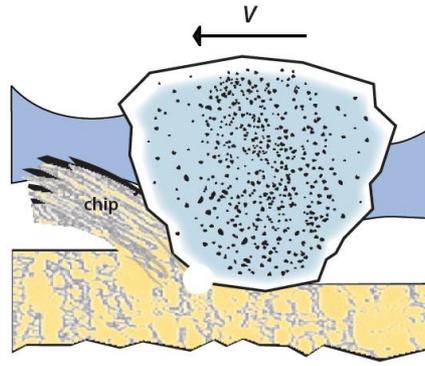
- Redução de Atrito: calor - mancais
- Redução de desgaste: Buchas/mancais
- Aparência
- Afiação de Ferramentas



Abrasivos

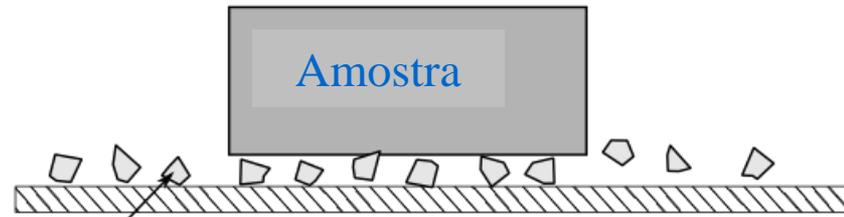
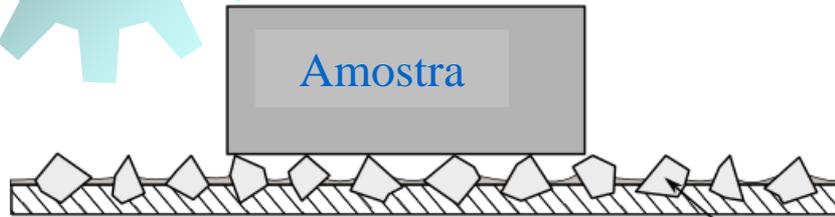
- Pequenas partículas não metálicas duras com arestas afiadas e formas irregulares;
- Remove quantidades pequenas de material, produzindo cavacos muito pequenos (sobre metal de décimos a centésimos de mm);
- Processos abrasivos produzem superfícies bem acabadas e tolerâncias dimensionais mais exatas.

Processos Abrasivos



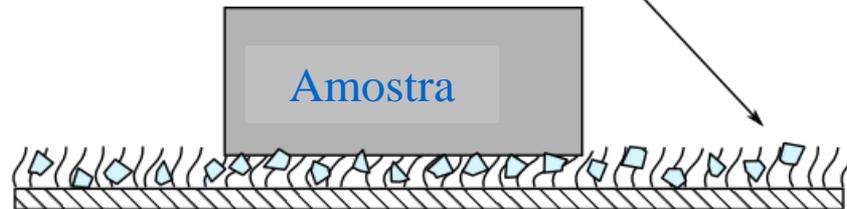
Retificação: Abrasivos presos

Lapidação: Abrasivos soltos



Abrasivos 5

Polimento |



Acabamento e Tolerâncias

Roughness Average R,—Micrometers, μm (microinches $\mu\text{in.}$)													
Processo	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)
Corte maçarico	[Barra cinza]												
Esmerilhamento rebarba	[Barra cinza]												
Serra	[Barra cinza]												
Plaina	[Barra cinza]												
Furação	[Barra cinza]												
Fresamento químico	[Barra cinza]												
Eletro erosão	[Barra cinza]												
Fresamento	[Barra cinza]												
Brochamento	[Barra cinza]												
Alargamento	[Barra cinza]												
Feixe de elétrons	[Barra cinza]												
Laser	[Barra cinza]												
Ataque eletroquímico	[Barra cinza]												
Mandrilamento, torno	[Barra cinza]												
Acabamento em tambor	[Barra cinza]												
Kentica eletrônica	[Barra cinza]												
Brunimento cilíndrico	[Barra cinza]												
Retificação	[Barra cinza]												
Honing (brunimento)	[Barra cinza]												
Polimento eletrolítico	[Barra cinza]												
Polimento	[Barra cinza]												
Lapidação	[Barra cinza]												
Superacabamento	[Barra cinza]												
Fundição em areia	[Barra cinza]												
Laminação a quente	[Barra cinza]												
Forjamento	[Barra cinza]												
Fund. em molde fechado	[Barra cinza]												
Fund. por cera perdida	[Barra cinza]												
Extrusão	[Barra cinza]												
Lamina. a frio, trefilação	[Barra cinza]												
Fund. Sob pressão	[Barra cinza]												

- 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							

As faixas apresentadas acima são típicas dos processos listados

Valores menores ou maiores podem ser obtidos sob condições especiais

■ Aplicação Média

■ Aplicação menos frequentes

CARTA DE PROCESSOS VERSUS ACABAMENTOS

Acabamento



Lapidação plana
Alargamento

Retificação

	N7	N6	N5	N4	N3	N2
	△△	△△△			△△△△	
						
						
$\mu\text{m Ra}$	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05
$\mu'' \text{ AA}$	63	32	16	8	4	2

Geometrias de peças típicas para brunimento, lapidação, polimento e superacabamento



Processo	Geometria de Peças	Acabamento (μm)
Retificação, tamanho de grão médio	Superfícies planas, cilindros externos, furos redondos	0,4-16
Retificação, tamanho de grão Fino	Superfícies planas, cilindros externos, furos redondos	0,2-0,4
Brunimento	Furos redondos (por ex.: furo do cilindro do motor)	0,1-0,8
Lapidação	Superfícies planas ou levemente esféricas (p.e., lentes)	0,025-0,4
Superacabamento	Superfícies planas, cilindros externos	0,013-0,2
Polimento	Miscelânea de formas	0,025-0,8
Polimento fino	Miscelânea de formas	0,013-0,4

Ferramentas Abrasivas - Pastas



TIPO	GRANA (Microns)	INDICAÇÃO DE USO
PB-2	0-2	Polimento metalográfico fino de aços e metais análogos
PB-4	1-4	Polimento metalográfico de carboneto de tungstênio metais brandos e aços
PB-6	2-6	Polimento fino de carboneto de tungstênio e semi-preciosos em geral
PB-12	6-12	Acabamento de pedras sintéticas e polimentos em geral
PB-20	8-20	Polimento de desbaste de aços, metais e carboneto de tungstênio
PB-40	20-40	Desbaste rápido e prepolimento de aços e carboneto de tungstênio
PB-60	40-60	Preparação de superfícies (desbastes)

Tabela de pastas diamantadas		
Mícron	Aplicação	Cor
0 - ½	Polimento Final	CINZA
1 - 2	Super Polimento	LARANJA
0 - 2	Polimento Espelhado	VERMELHO
2 - 4	Acabamento de Peças	OCRE
3 - 6	Acabamento de Peças	AMARELO
4 - 8	Lapidação Fina	AZUL CLARO
6 - 12	Lapidação	VERDE
10 - 20	Semi Acabamento de pedras	LILÁS
20 - 40	Pequenos Desbaste - Aços Cartelos	AZUL
40 - 60	Desbaste Rápido Pré-Polimento	MARROM
36 - 54	Preparação Dimensional Primeiros Desbastes	PRETO

Ferramentas Abrasivas - Pedras



<p>Cod. 300.384</p> <p>Pedra: 100x50x25 AA80H8V13 Branca 200x50x25 AA80H8V13 Branca Para uso: Uso para desbaste para punções e matriz</p>	<p>Cod. 305.483</p> <p>Pedra: 100x50x25 AAZ120 KVS Azul Para uso: Acabamento para punção externa</p>
<p>Cod. 300.386</p> <p>Pedra: 200x50x25 Ref. 108 Dupla Face Para uso: Acabamento para punção</p>	<p>Cod. 303.303</p> <p>Pedra: 100x20x10 AA320P6V Branca Para uso: Acabamento para punção externo</p>
<p>Cod. 305.905</p> <p>Pedra: 150x50x25 C100 J6V Preta Para uso: Material temperado</p>	<p>Cod. 306.297</p> <p>Pedra: 150x50x25 C 120 J6V Preta Para uso: Material temperado</p>
<p>Cod. 303.333</p> <p>Pedra: 150x50x50 A120 J6V Casca côco Para uso: Acabamento de pisador e matriz para material mole</p>	<p>Cod. 306.318</p> <p>Pedra: 150x20x16 C120 J6V Preta Para uso: Material temperado para cantos</p>
<p>Cod. 306.298</p> <p>Pedra: 150x20x16 C100 J6V Preta Para uso: Material temperado para cantos</p>	<p>Cod. 300.383</p> <p>Pedra: 150x50x40 A120 J6V Marrrom Para uso: Acabamento de pisador e material mole</p>
<p>Cod. 300.385</p> <p>Pedra: 100x20x10 AA80 H8V13 Branca Para uso: Geral para canto de matriz, pisador e punções</p>	<p>Cod. 300.078</p> <p>Pedra: 200x50x25 C20 Q6V Bastão Para uso: Desbastar ponta montada e rebolo</p>
<p>Cod. 300.000</p> <p>Pedra: 200x20x20 AA320 P6V 100x15x20 AA320 P6V Para uso: Examinar se a superfície está plana</p>	<p>Cod. 305.485</p> <p>Pedra: 100x20x10 CS 46 N6V Verde Para uso: Redução raio negativo material mole</p>
<p>Cod. 300.068</p>	<p>Cod. 300.071</p>
<p>Cod. 300.090</p> <p>Pedra: 70x30x15 AA46 KVS Pedra: 100x32x15 AA60 KVS Pedra: 70x30x15 AA60 KVS Para uso: Em turbinas pra desbastar material duro</p>	

Ferramentas Abrasivas - Rebolos



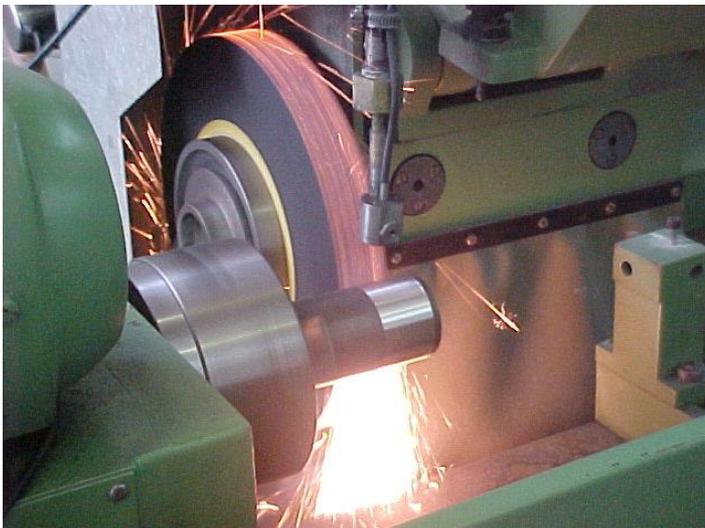
Pontas



Processos Retificação

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



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



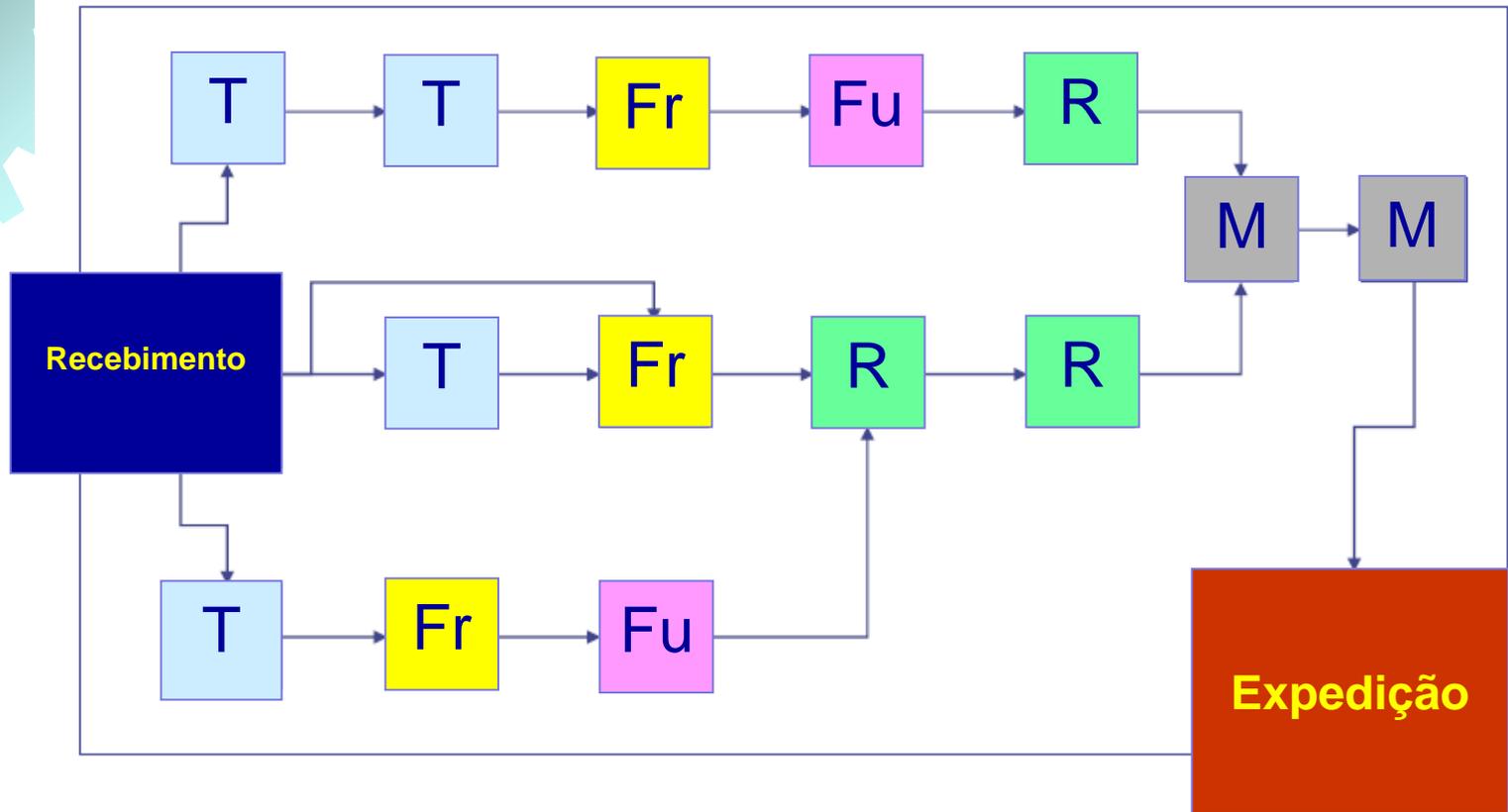
Cilíndrica



Plana

Exemplo - Rota de Fabricação

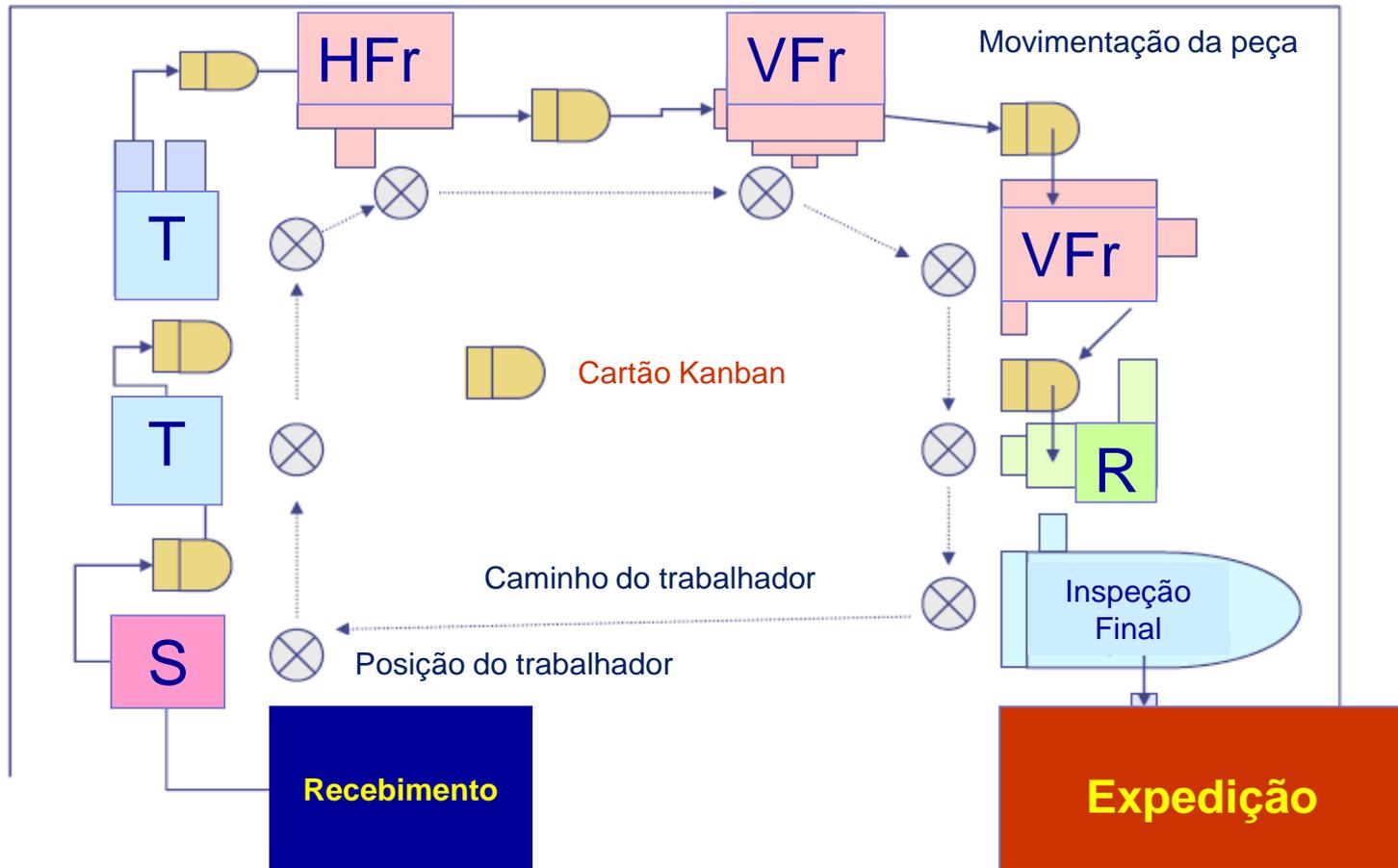
Operação Final: Retificação



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

Exemplo - Rota de Fabricação

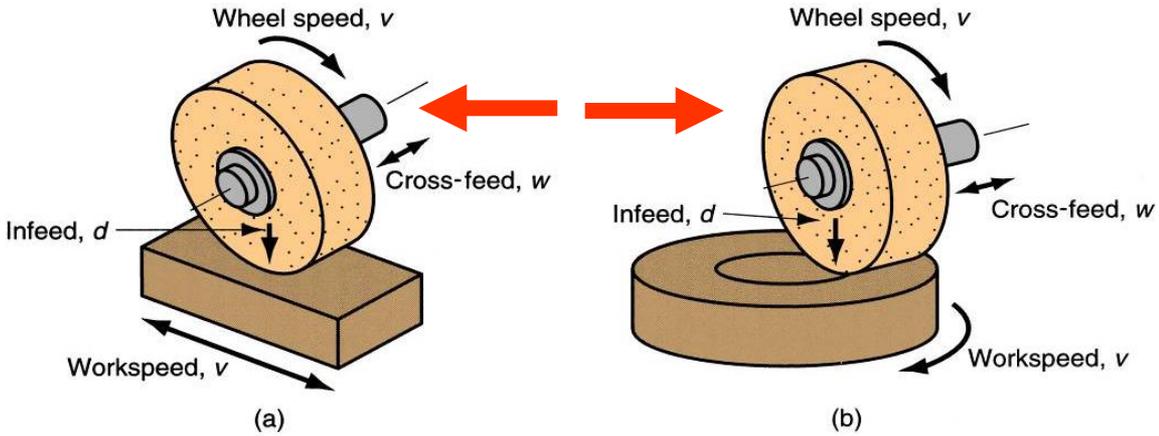
Operação Final: Retificação



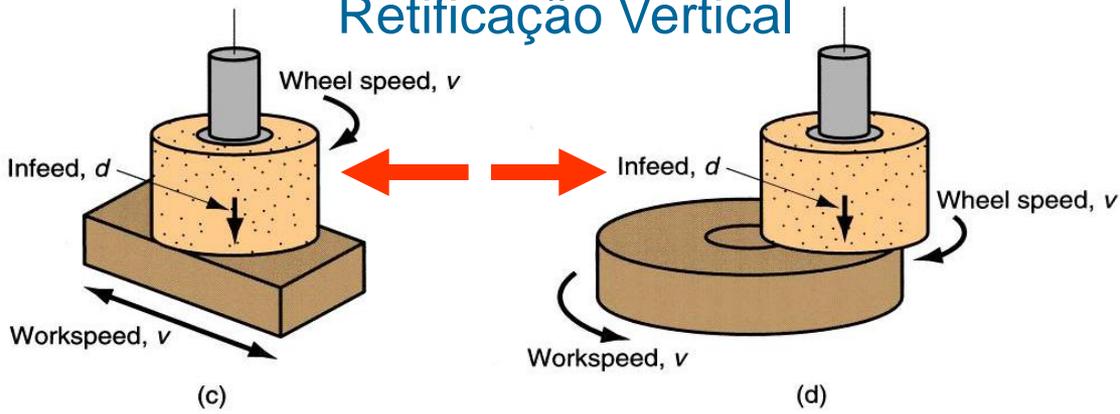
S: Serra, T: Torno, HFr: Fresadora Horizontal, VFr: Fresadora Vertical, R: Retificadora

Retificação - Tipos

Retificação Horizontal

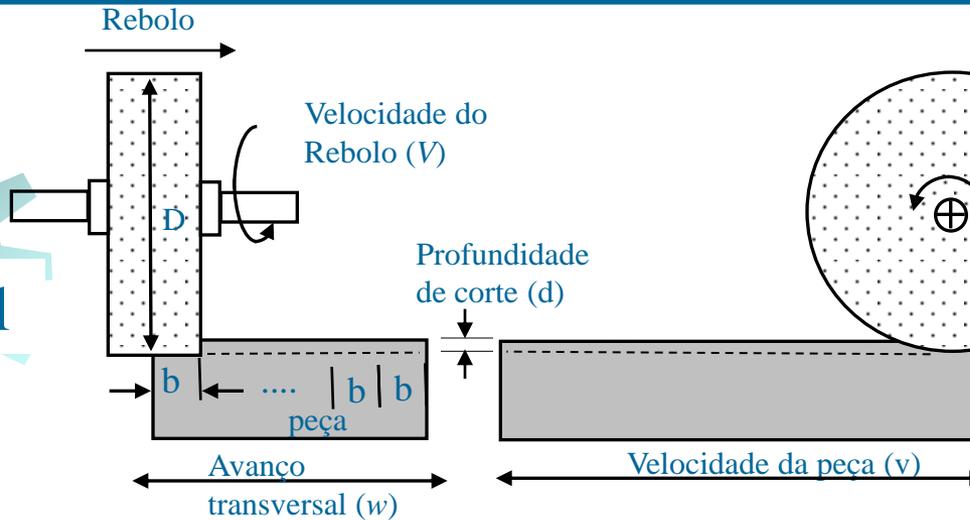


Retificação Vertical



Comparação: retificação convencional X retificação por mergulho.

Tangencial

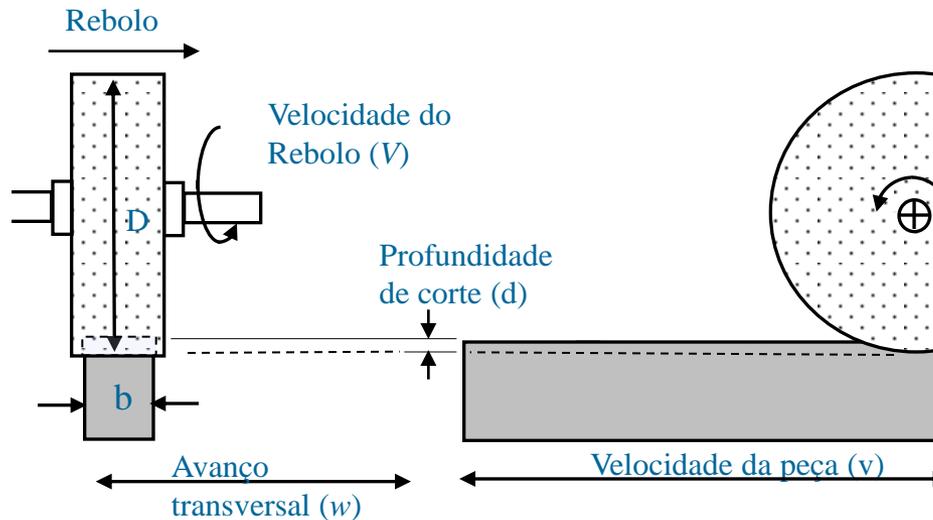


a) Vista Frontal

b) Vista Lateral

- D – diâmetro do Rebolo
- d – profundidade de corte
- b – Largura de corte
- w – avanço transversal
- V – Velocidade do rebolo
- v – Velocidade da peça

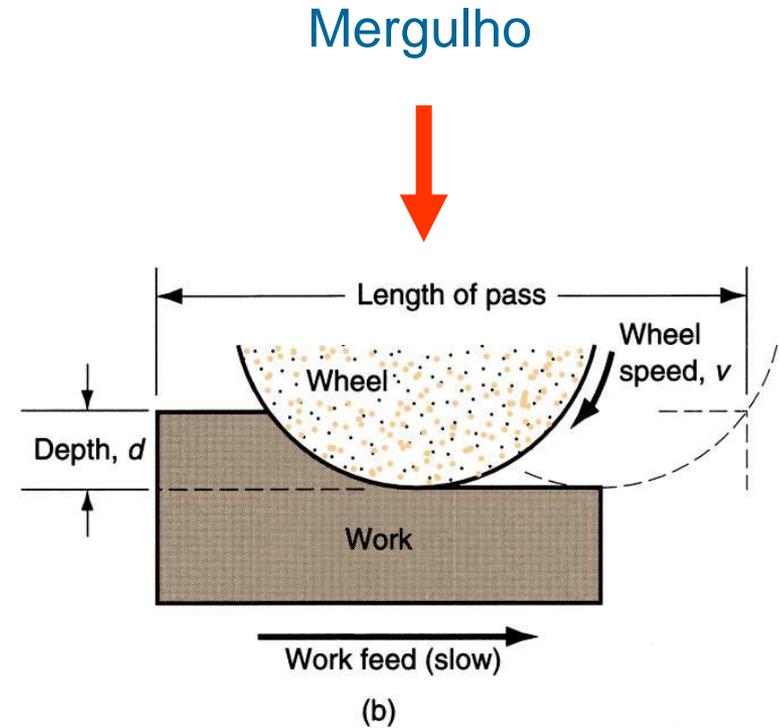
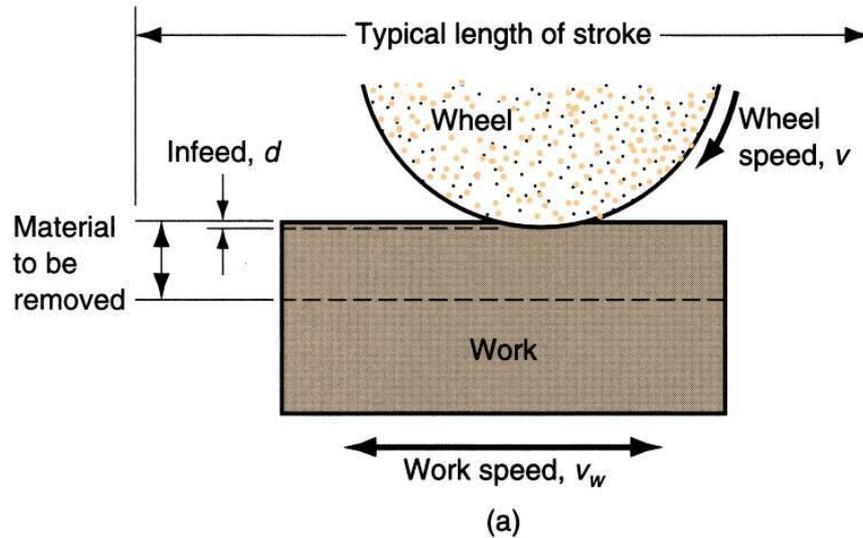
Mergulho



a) Vista Frontal

b) Vista Lateral

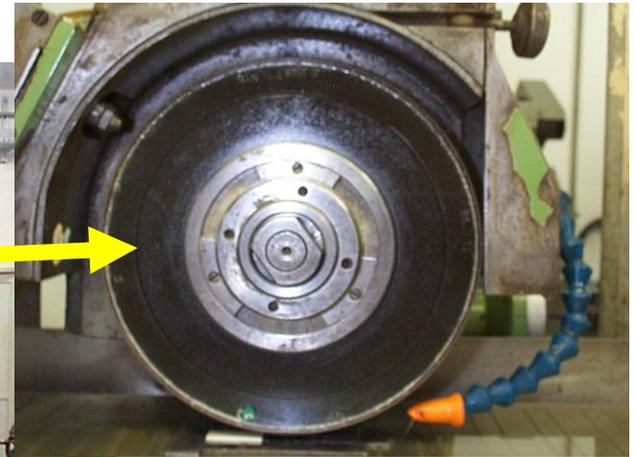
Retificação de Megulho “Creep Feeding”



Comparação entre (a) retificação convencional e (b) retificação de mergulho “creep feeding”

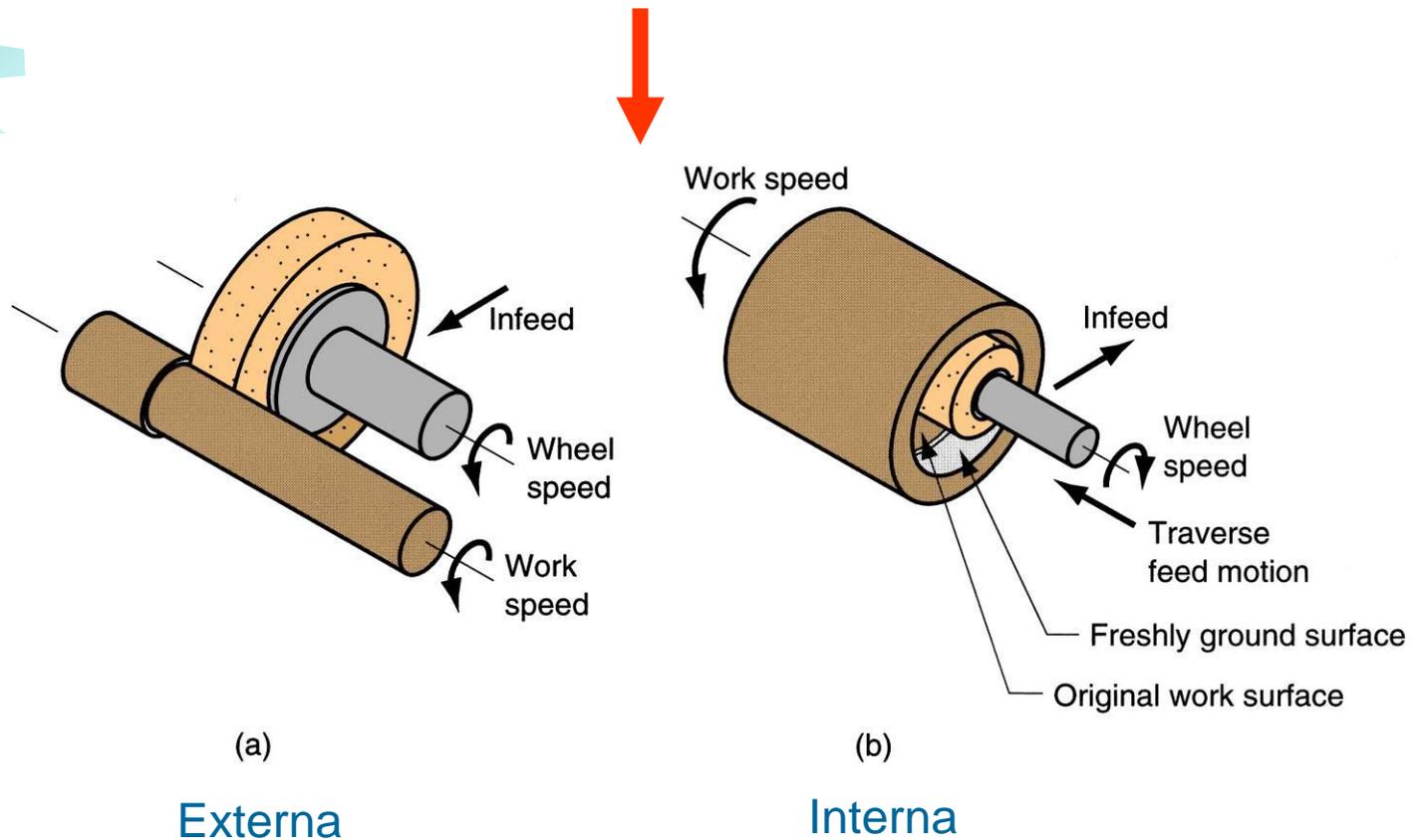
Máquina-Ferramenta

Retifica Plana



Retificação - Tipos

Retificação Cilíndrica

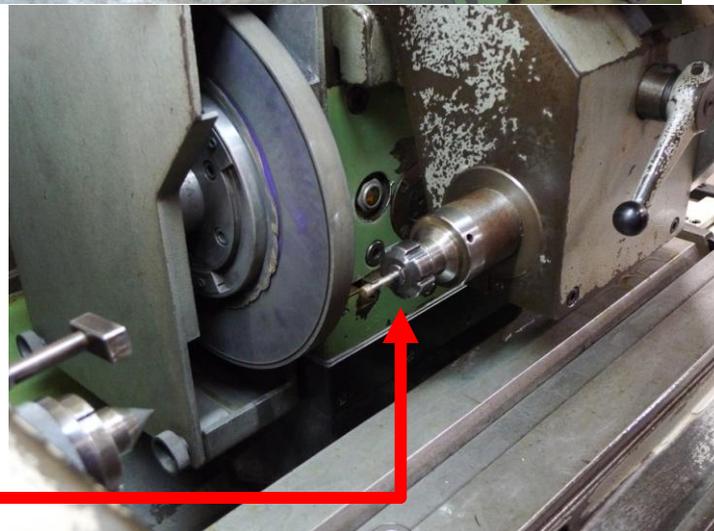


Máquina-Ferramenta

Retifica Cilíndrica



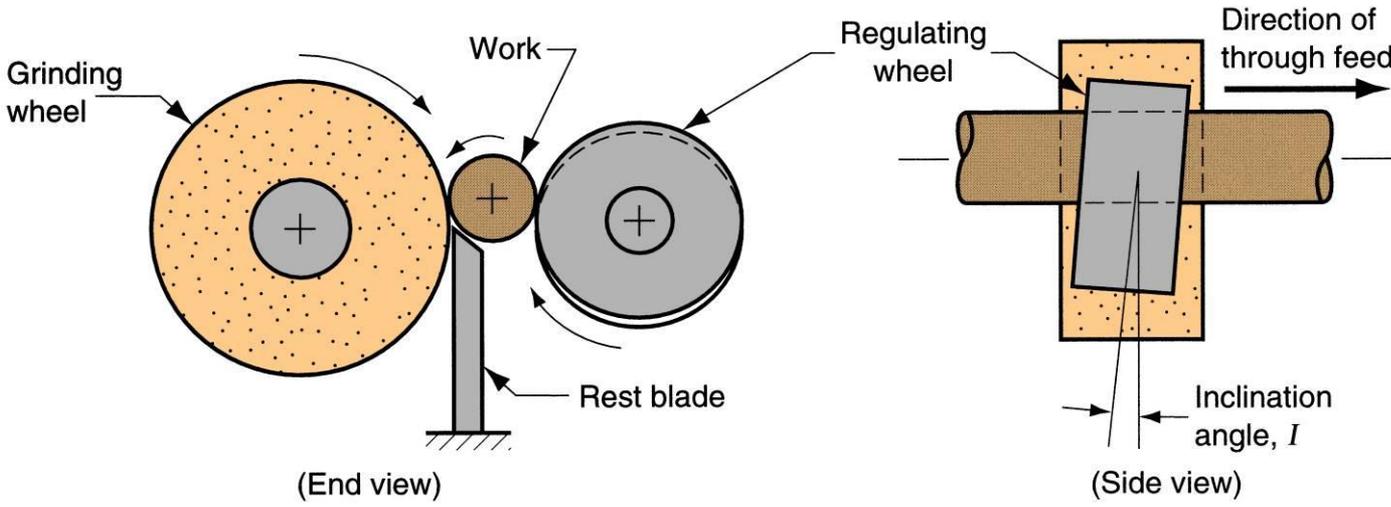
Retificação externa



Retificação interna

Retificação - Tipos

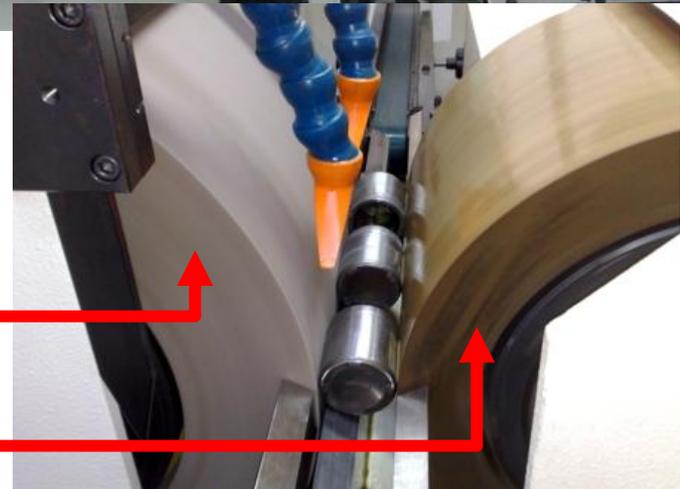
Retificação "Centerless"



Máquina-Ferramenta

Retificação externa

Retifica Centerless

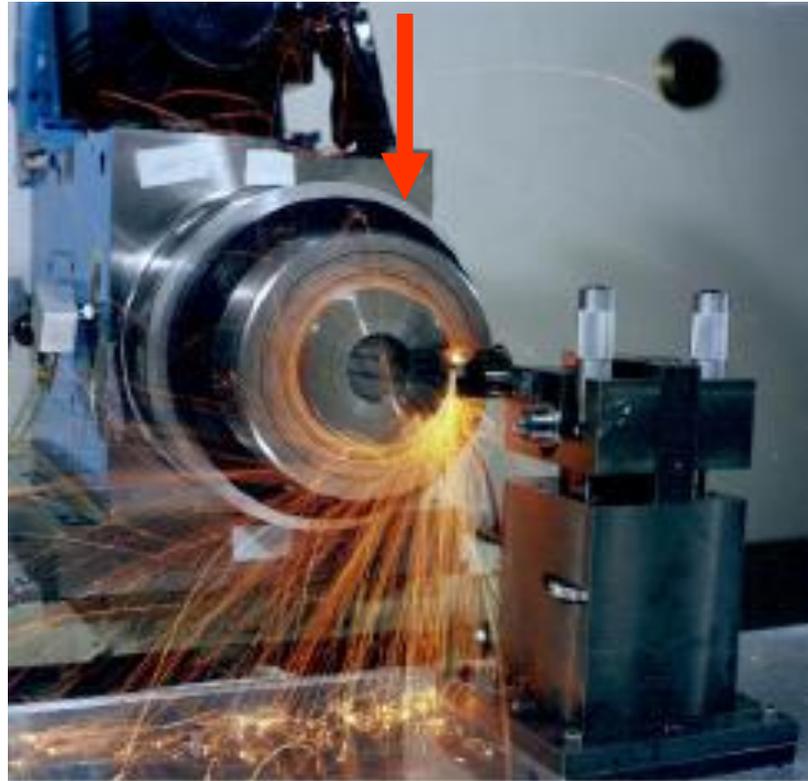


Rebolo de corte

Rebolo de arraste

Aplicações dos Processos Abrasivos

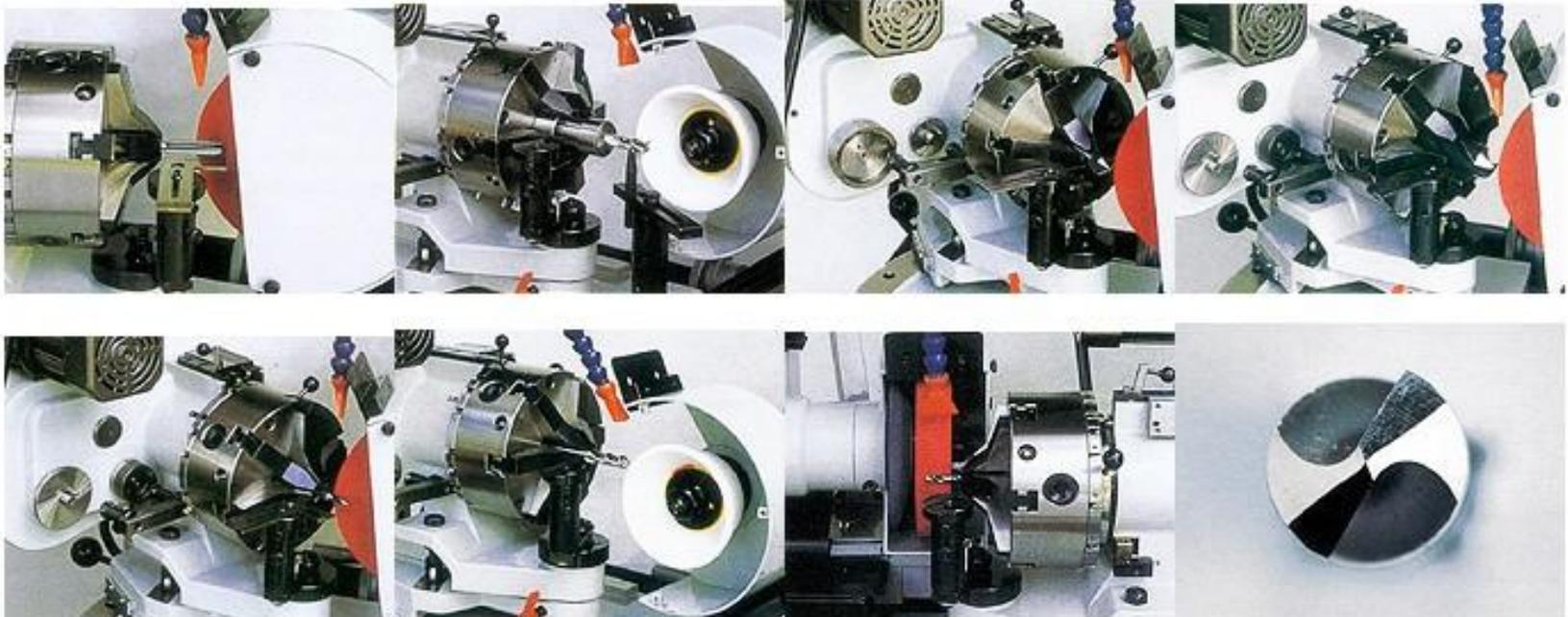
Afição de
Ferramenta



Aplicações dos Processos Abrasivos



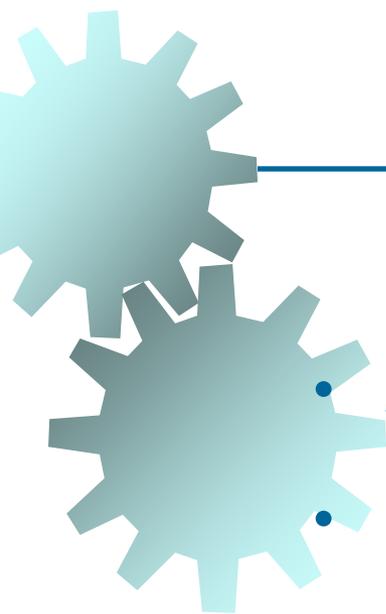
Afição de Brocas





Parâmetros do Rebolo

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

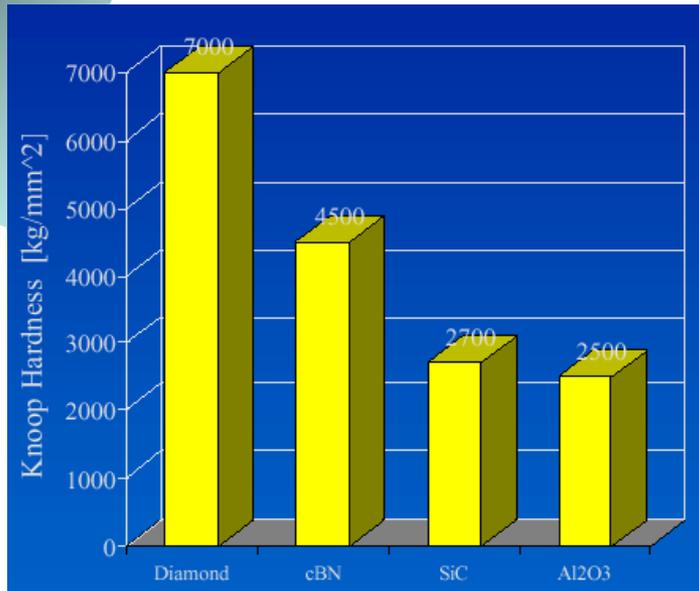


Material Abrasivo: Propriedades

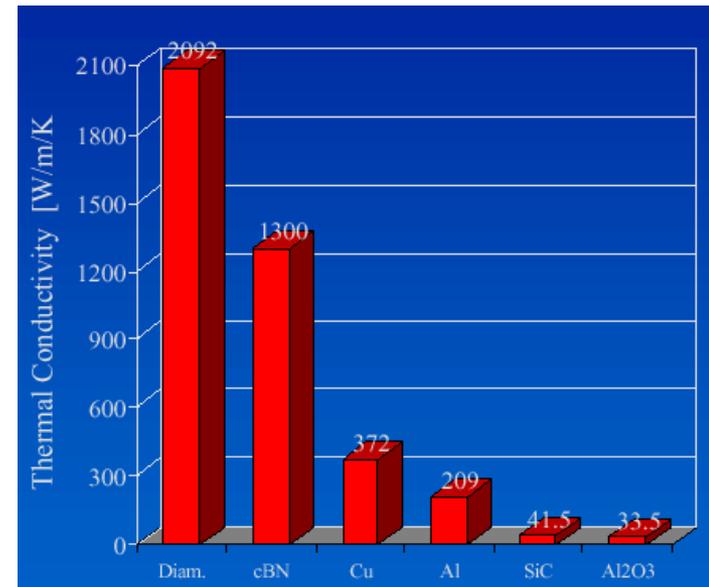
- Alta dureza
- Resistência ao desgaste
- Tenacidade
- Friabilidade (capacidade de fraturar quando perde a afiação, de forma que novas arestas sejam expostas)

Propriedades Materiais Abrasivos

Dureza



Condutividade térmica



* Material abrasivo

Corundum subdivide-se em:

Normal: 95% Al₂O₃

Semiprecioso: 98% Al₂O₃

Precioso: 99,9% Al₂O₃



Materiais Abrasivos

- **Oxido de Alumínio (Al_2O_3)**

Abrasivo mais comum: cores Branca e Cinza

Cinza – Muito tenaz e é usado para materiais metálicos com alta resistência a tração;

Branco – mais quebradiço e é usado para aços com alta dureza e sensíveis ao calor; bom acabamento em menor tempo

Também aplicado em FoFo nodular e maleável

Materiais Abrasivos





Materiais Abrasivos

- **Carbeto de Silício (SiC)**

Mais duro que Al_2O_3 , porém menos tenaz

Cores **Verde** ou **Preto**:

Verde é usado para afiação de metal duro e por serem mais quebradiços não alteram a estrutura do MD.

Preto é usado para metais não ferrosos alumínio, latão, FoFo cinzento, aço inox e determinadas cerâmicas

Materiais Abrasivos





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**

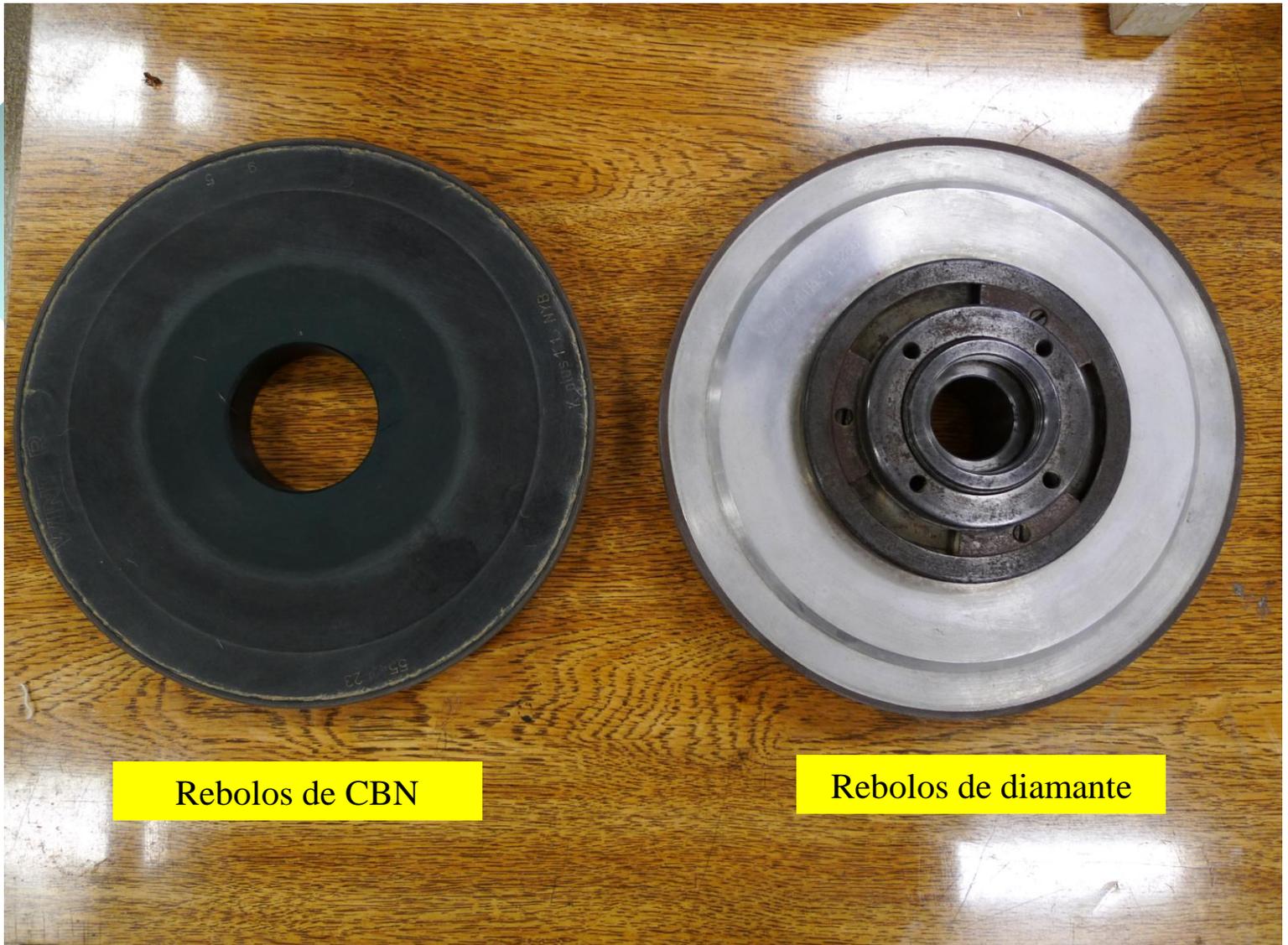
Mais duro e mais caro

Natural ou sintético

Não aplicado para aço

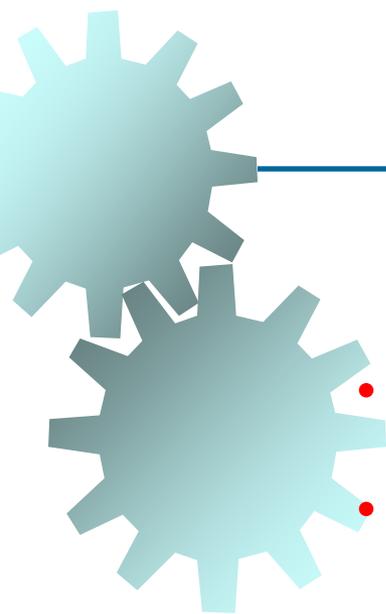
Usado em materiais duros, abrasivos, tais como cerâmicas, metal duro e vidro

Novos Materiais Abrasivos



Rebolos de CBN

Rebolos de diamante



Tamanho de Grãos Abrasivos

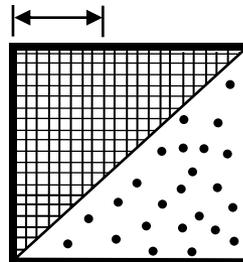
- **Grãos pequenos** produzem melhores acabamentos
- **Grãos grandes** permitem maior remoção de material (TRM maior)
- **Materiais mais duros** exigem tamanhos de grão menores para corte mais eficaz
- **Materiais mais dúcteis** exigem granulometrias maiores

Tamanho de Grãos Abrasivos

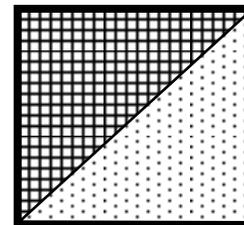
Tamanho de grão é medido usando o procedimento de peneira *screen mesh*

- **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)

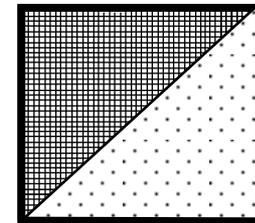
Tamanho de peneiras para seleção de tamanho de grãos. Quanto maior o número da peneira (no. de aberturas por polegada quadrada), menor será o tamanho de grão



Peneira 8
tamanho de grão 8



Peneira 24
tamanho de grão 24



Peneira 60
tamanho de grão 60

Tamanho de Grãos Abrasivos (mm)



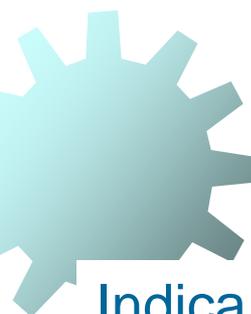
Muito grosso		Grosso		Médio	
No.	Tam. grão	No.	Tam. grão	No.	Tam. grão
8	2,830-2,380	14	1,680-1,410	30	0,710-0,590
10	2,380-2,000	16	1,410-1,190	36	0,590-0,500
12	2,000-1,680	20	1,190-1,000	46	0,420-0,350
		24	0,840-0,710	50	0,350-0,297
				60	0,297-0,250

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



Tamanho	Tipo	Aplicações
10,12,14,16,20,24	Grosseiro	Remoção rápida de material
30,36,46,54,60	Médio	Remoção de material e acabamento
80,100,120,150,180	Fino	Menos remoção e melhor acabamento
220,240,280,320,400,500,600	Muito fino	Acabamento muito fino e retificação de materiais duros e superduros



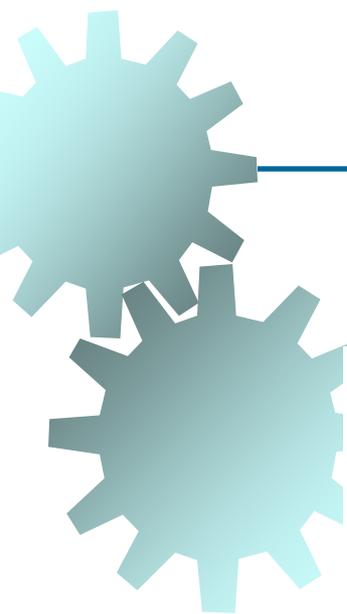
Grau do Rebolo

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”** retém 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

- 
- Vítreo:
 - maior precisão de forma
 - Não sofre ataque de água, óleo ou ácido
 - Velocidade de trabalho 33 m/s (pode chegar a 60 m/s em situações especiais)



Ligante

- Resinóide:
 - Resina sintética por isso não possui poros
 - Serviços pesados como corte e desbaste de materiais
 - Velocidade de trabalho 80m/s
- Borracha corte de metais e transporte como no caso das retíficas centerless



Ligante

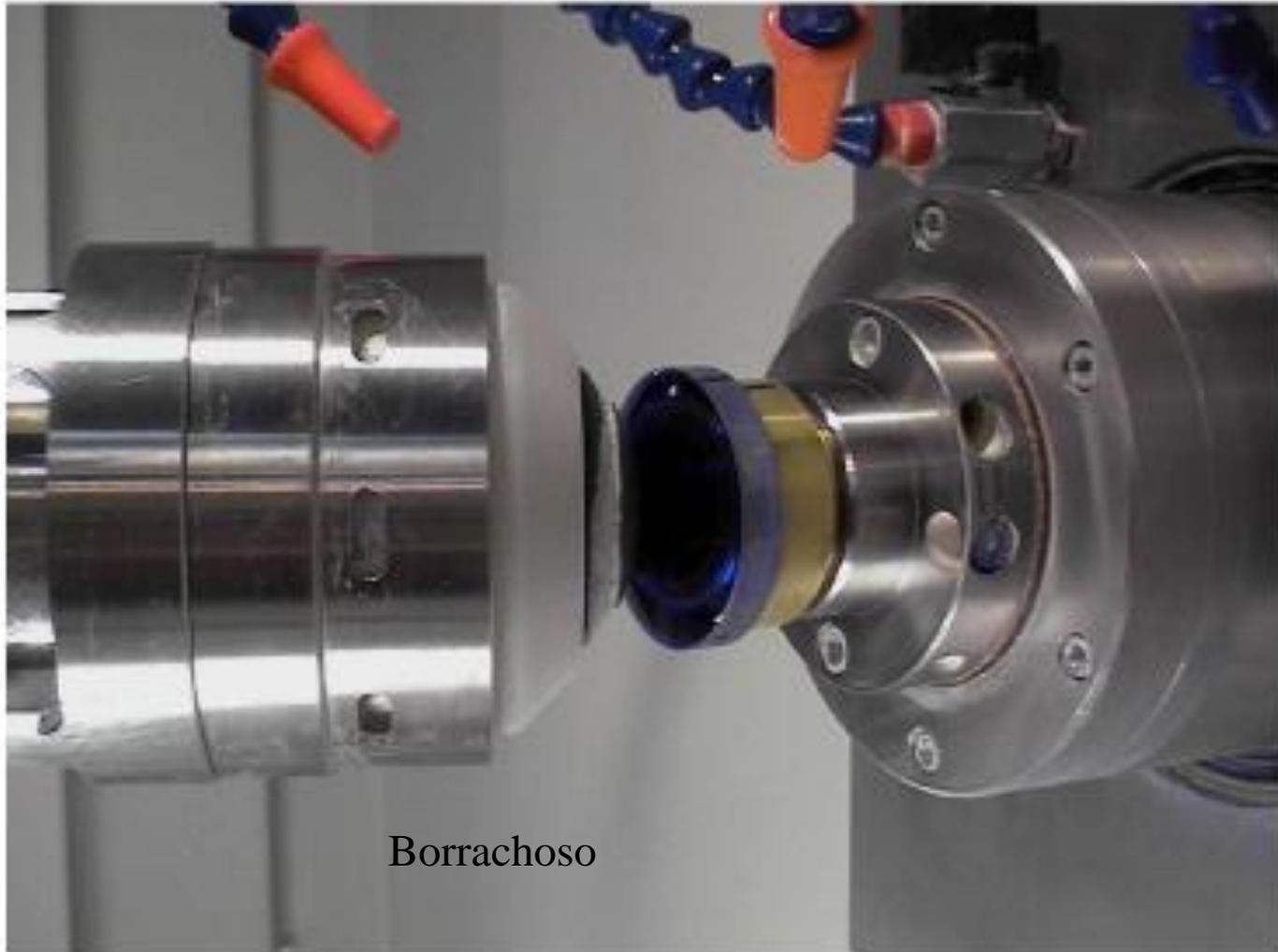
- Deve suportar elevadas temperaturas e altas forças centrífugas
- Deve resistir à trepidação durante o choque do contato do rebolo/peça
- Deve segurar os grãos abrasivos rigidamente no lugar para o corte e também permitir que grãos desgastados “soltem-se” para que grãos novos e afiados trabalhem



Ligante

Nome do ligante	Característica	Designação
Vitreo	Boa resistência e alta porosidade	V
silicato	A prova d'água, usado para rebolos de grandes diâmetros. Retificação de arestas de ferramentas	S
Shellac	Rebolos fino, alta elasticidade, não é adequado para aplicações pesadas	E
Resinoide	Retificação de desbaste, alta velocidade	B
Borrachoso	Discos finos, acabamento fino e polimento, ex.: trilhas de mancais de esferas	R
Oxicloreto	Menos frágil, retificadores de discos	O

Ligante



Borrachoso



Estrutura do Rebolo

Refere-se ao espaçamento relativo dos grãos abrasivos no rebolo

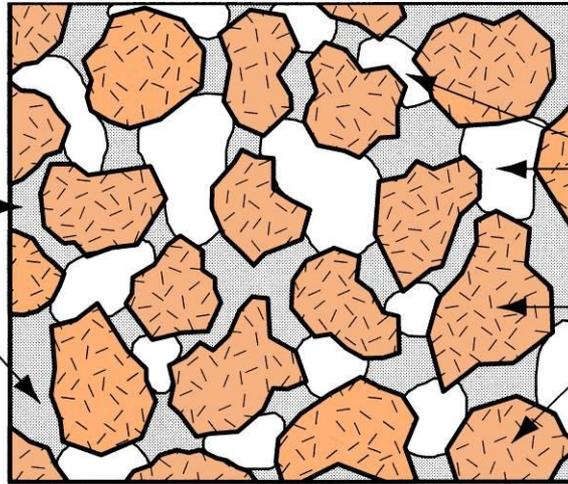
- Além do grão abrasivo e do material ligante, os rebolos também possuem vazios ou poros
- Proporções volumétricas de grãos (*g*), ligante (*b* do inglês “bond”) e poros (*p*) podem ser expressas como:

$$P_g + P_b + P_p = 1$$

Estrutura do Rebolo

$$P_g + P_b + P_p = 1$$

P_b : Ligante



P_b : Poros (espaços abertos)

P_g : Grãos Abrasivos



Estrutura do Rebolo: Quantificação

$$P_g + P_b + P_p = 1$$

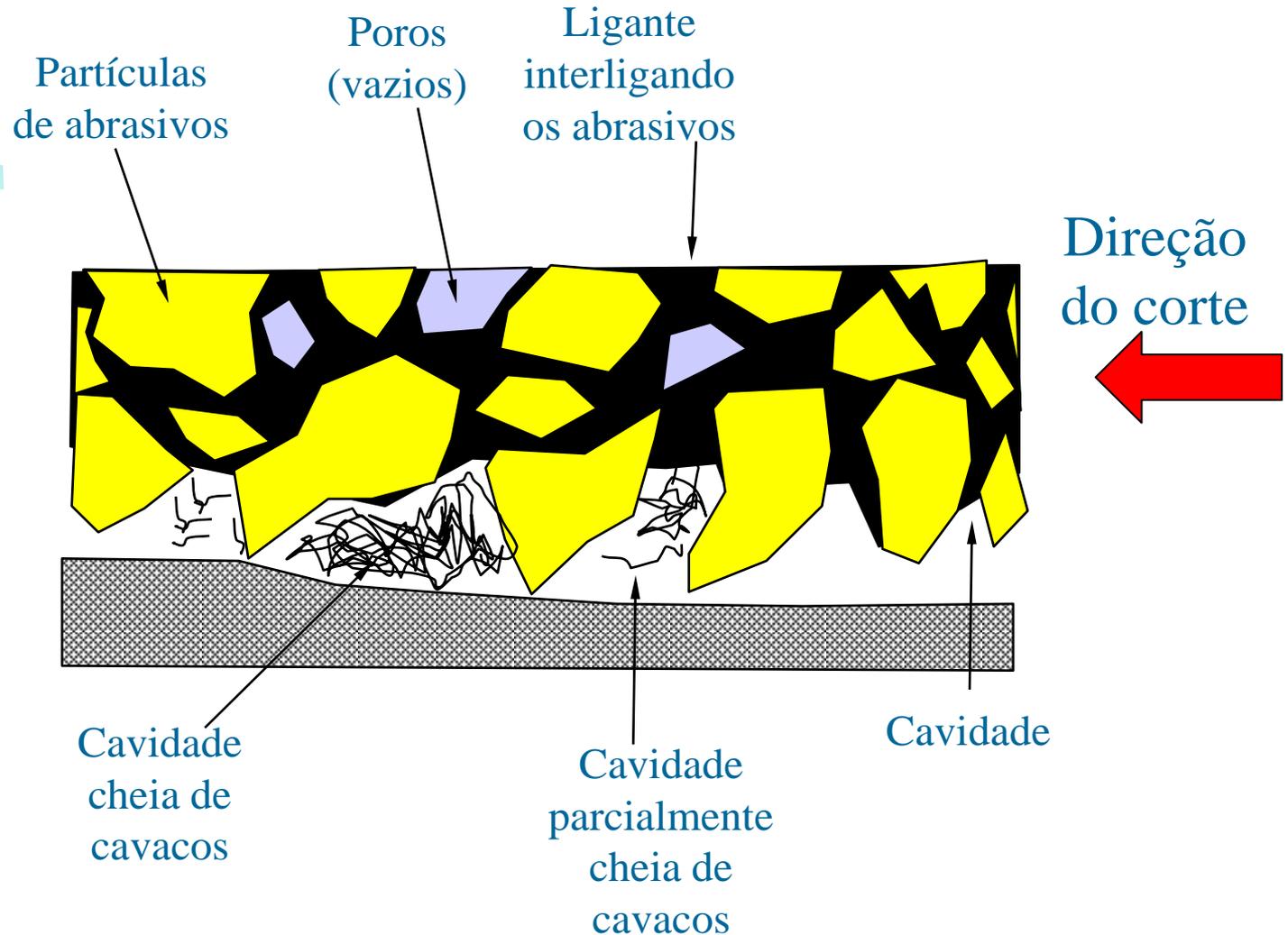
Medida em uma escala que varia entre “aberta” e “densa”.

- **Estrutura aberta** significa P_p é relativamente grande e P_g é relativamente pequeno (recomendado como “bolsões” para cavaco de materiais dúcteis).

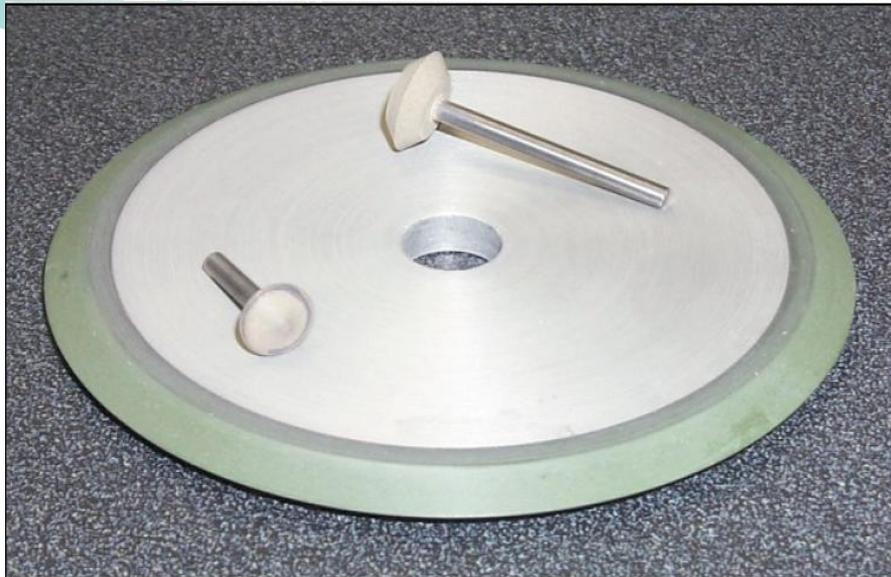
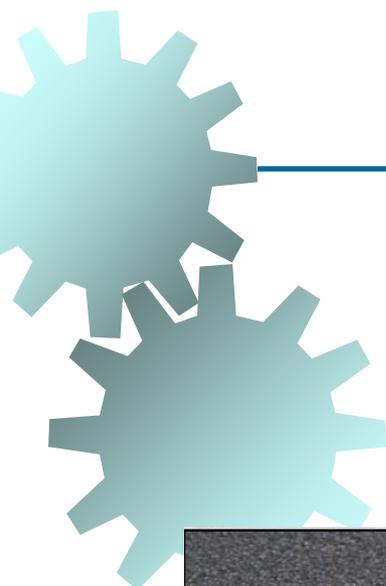
Estrutura densa significa P_p é relativamente pequeno e P_g é grande (recomendado para obtenção de melhores acabamentos e controle dimensional).

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



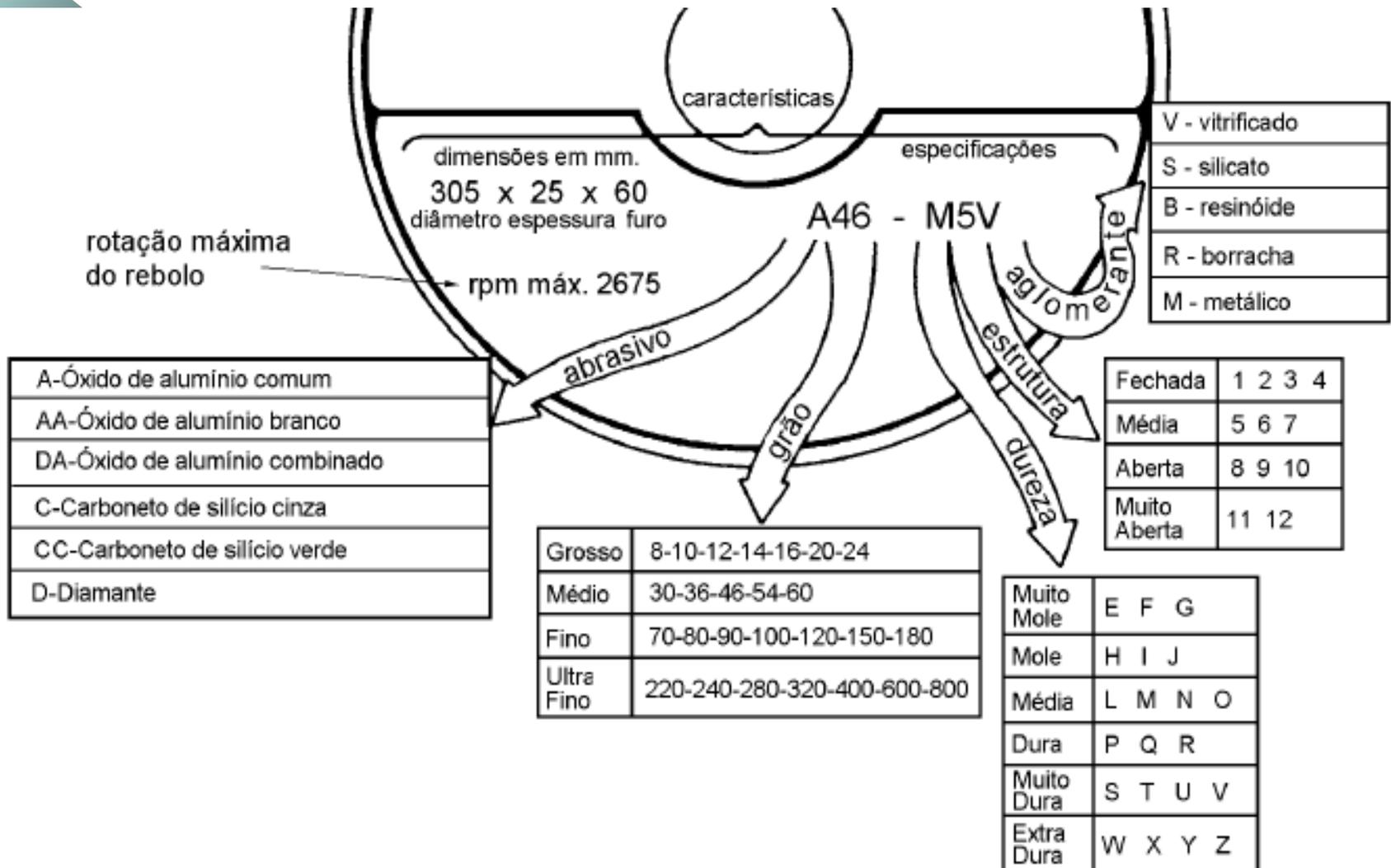
Estrutura do Rebolo: Quantificação



SoloStocks



Sistema de Codificação do Rebolo



Sistema de Codificação do Rebolo



Código: **A60 N5V1**

A: Óxido de Alumínio comum

60: Tamanho de grão : Médio

N: Dureza: Média

5: Estrutura : Média

V: Aglomerante: Vitrificado



Velocidade
máxima do rebolo

Dimensões do rebolo:

Diâmetro externo x largura x diâmetro do furo

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

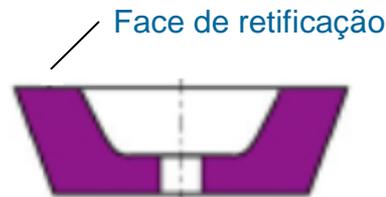
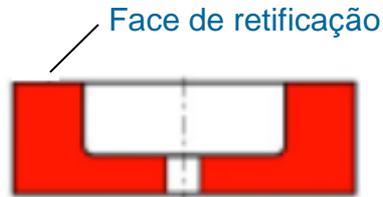


Plano



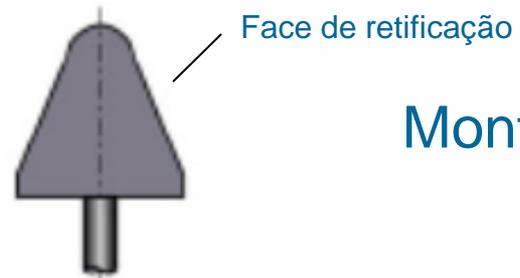
Cilindro

Copo Plano

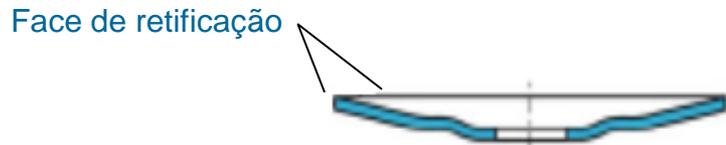


Copo

Prato



Montado



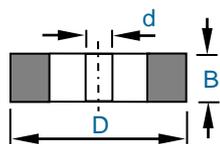
Configurações do Rebolo

Dimensões de rebolos de acordo com norma DIN 69100

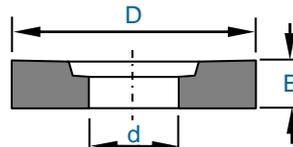
Tipo de Rebolo	Principais dimensões do rebolo (mm)		
	D	B	d
Disco Forma A e B	80-250	8-21	20-32
Cônico Forma C	80-250	8-19	20-32
Copo Forma D	50-150	32-80	13-20
Copo Cônico Forma E	50-150	25-50	13-20
Copo cônico	50-150	25-50	13-20

Configurações do Rebolo

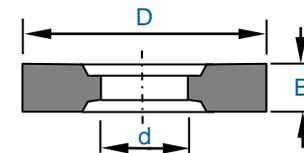
Formas de rebolos de acordo com Norma DIN



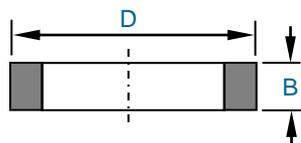
Rebolo reto (DIN 69120)



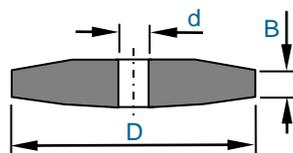
Rebolo reto com lado rebaixado (DIN 69123)



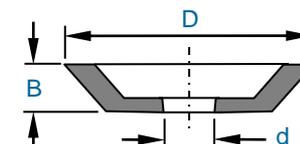
Rebolo reto com dois lados rebaixados



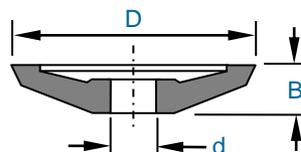
Rebolo cilíndrico (DIN 69138)



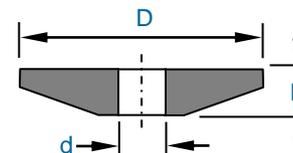
Rebolo cônico (DIN 69123)



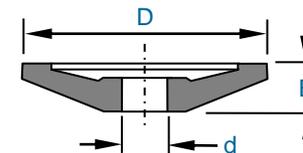
Rebolo cônico copo



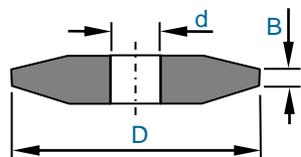
Rebolo Disco (DIN 69149)



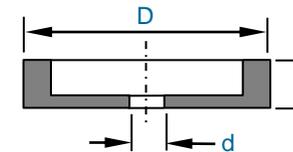
Rebolo disco Forma A (DIN 69149)



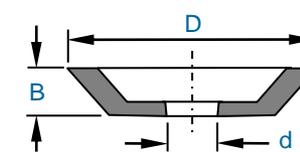
Rebolo Disco forma B (DIN 69149)



Rebolo com dois lados cônicos Forma C (DIN 69149)

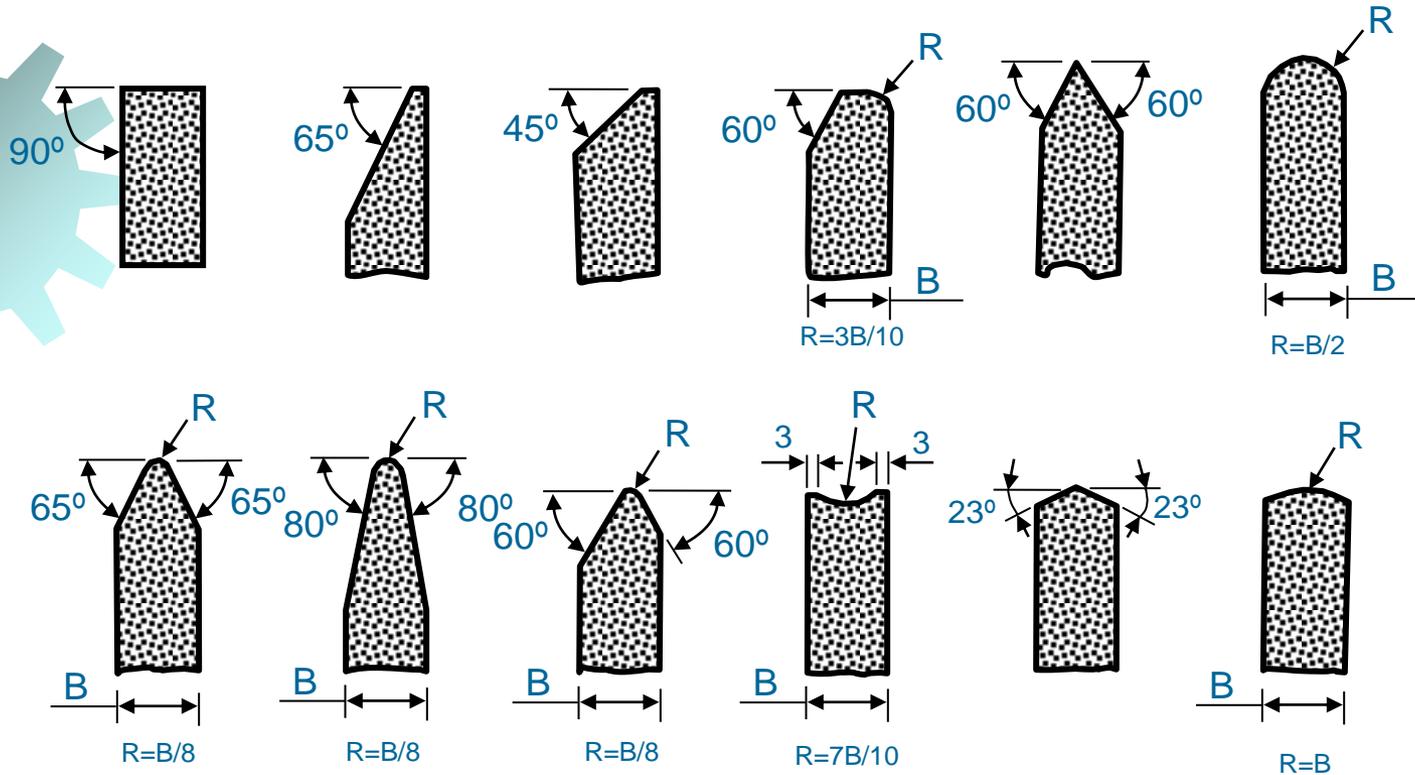


Rebolo copo forma D (DIN 69149)



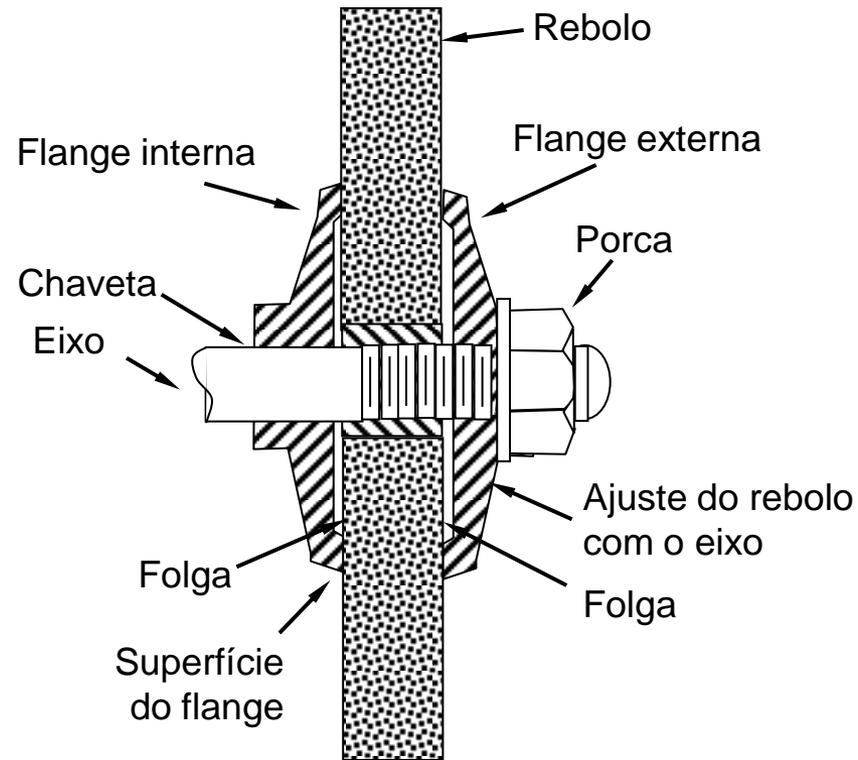
Rebolo cônico copo Forma E (DIN 69149)

Configurações do Rebolo

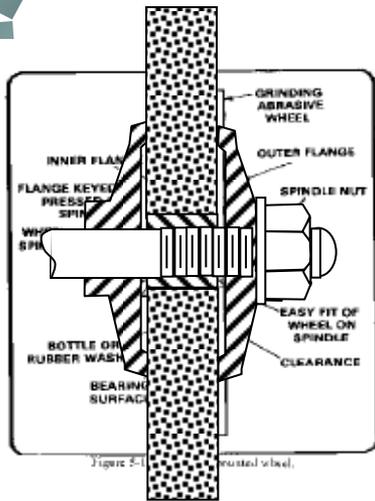


Perfis dos Rebolos

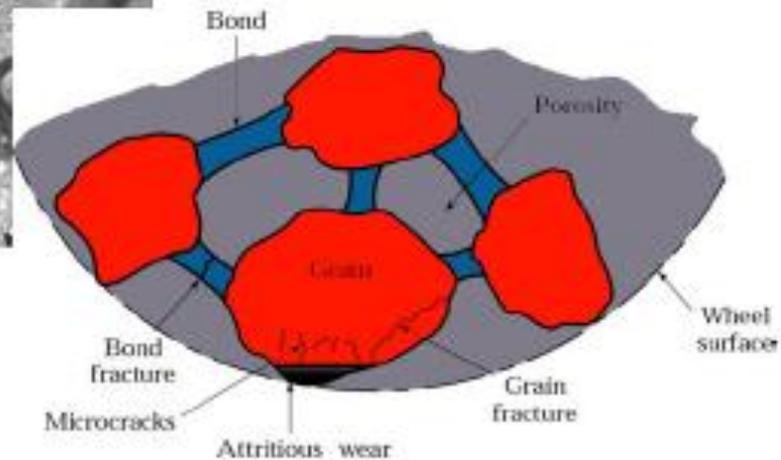
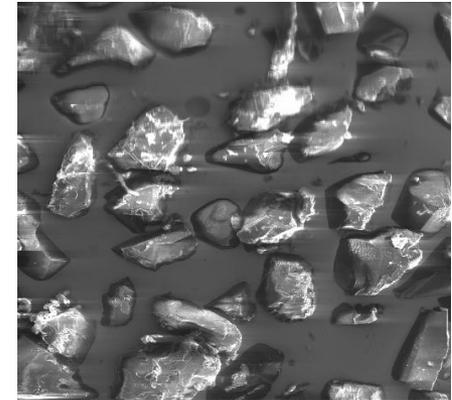
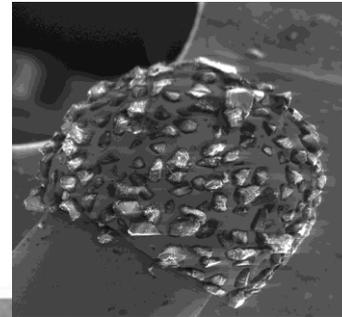
Montagem do Rebolo



Montagem do Rebolo - Configuração



Rebolo - Superfície e Microestrutura

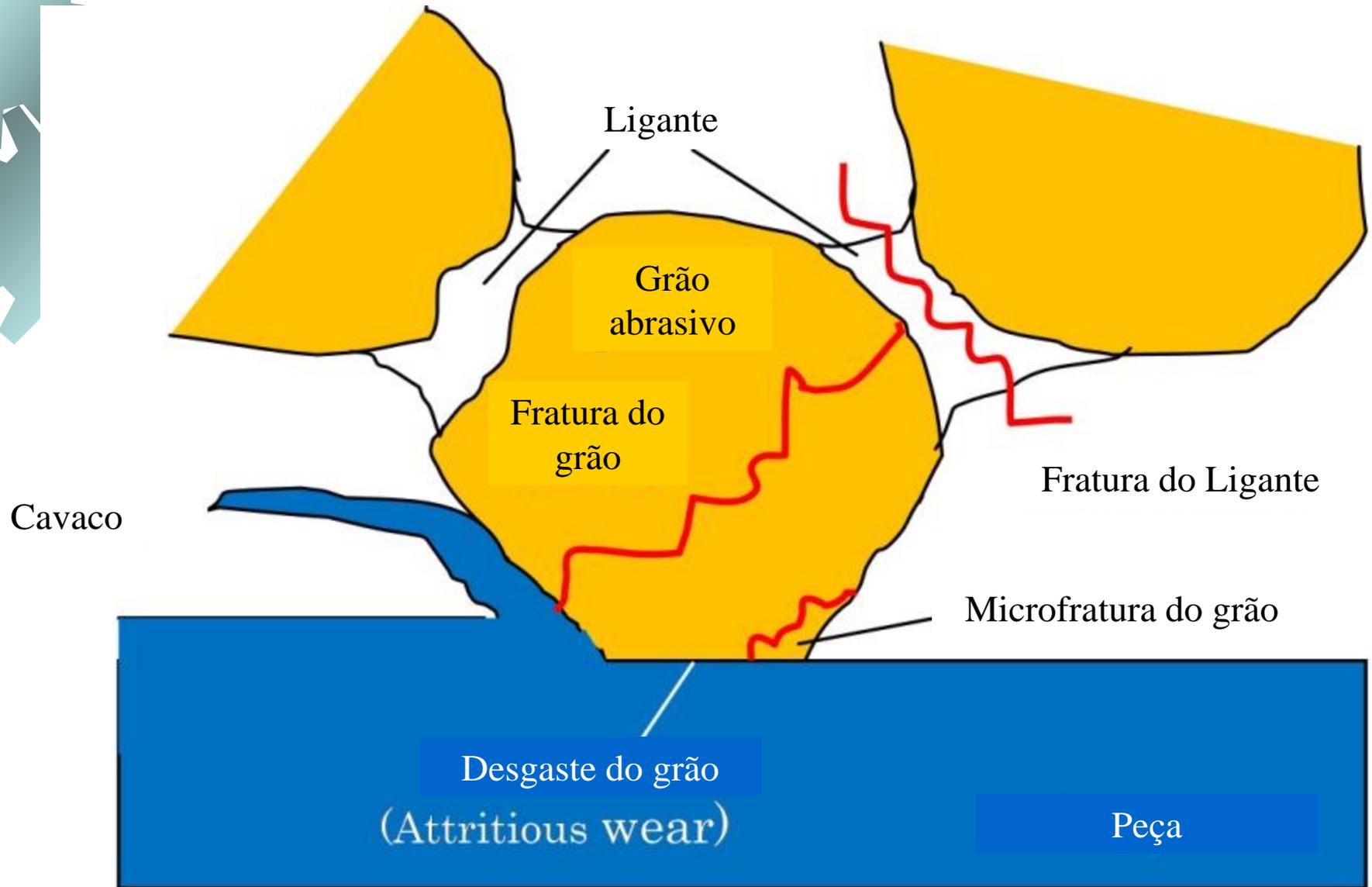




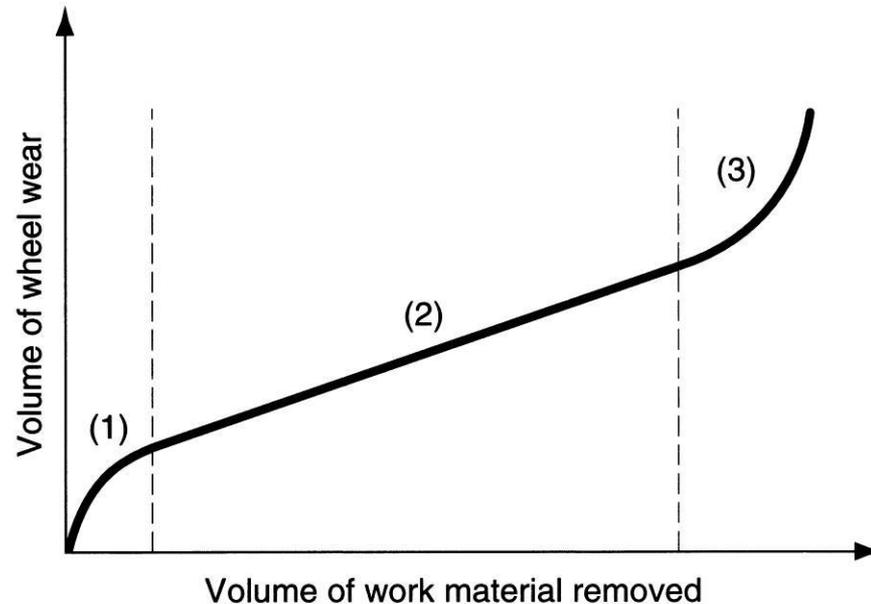
Mecanismos de Desgaste de Rebolo

- 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.

Mecanismos de Desgaste de Rebolo



Quantificação do Desgaste de Rebolo

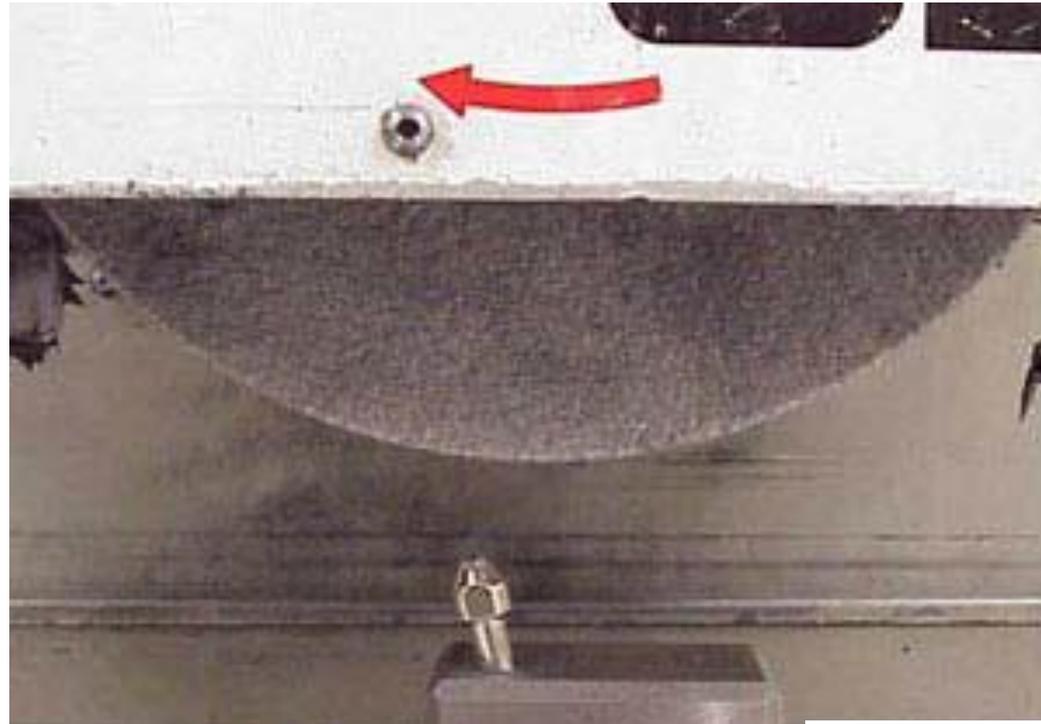


Curva típica do desgaste do rebolo. O desgaste é lançado no gráfico como função do volume de material removido, ao invés de ser em função do tempo.

Rebolo - Reafiação



Rebolo - Reafiação



Rebolo - Reafiação

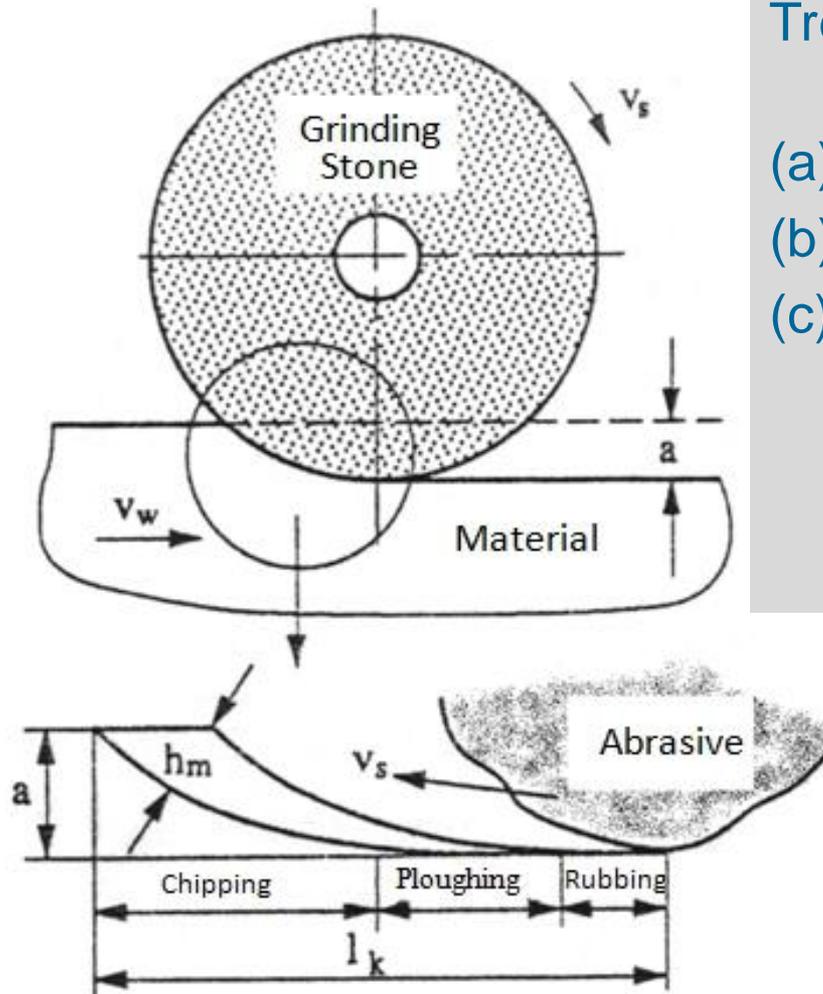


Dressador com ponta

Dressador rotativo



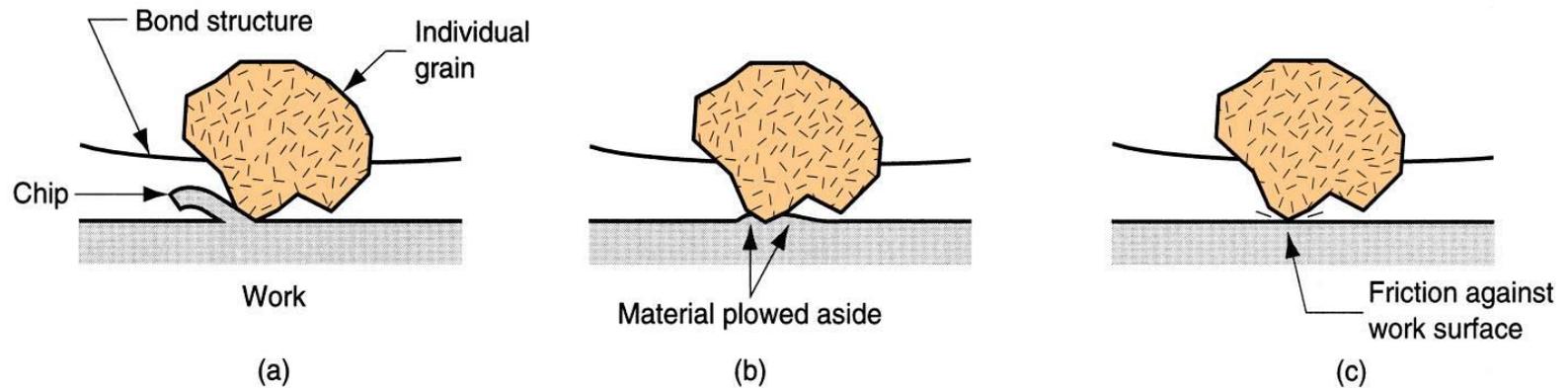
Mecanismo de Remoção de Material



Três tipos de ação dos grãos na retificação:

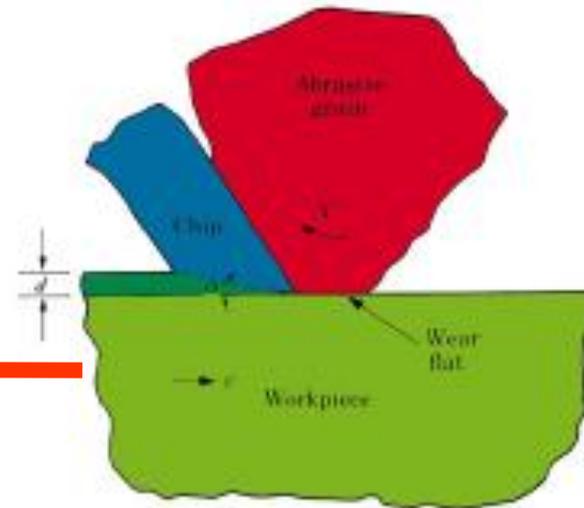
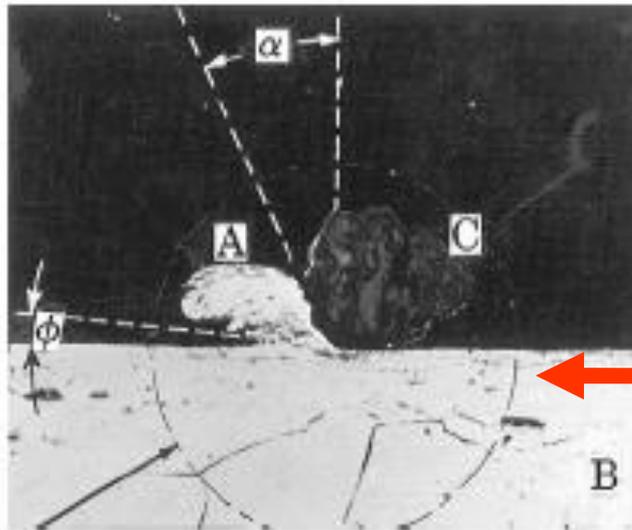
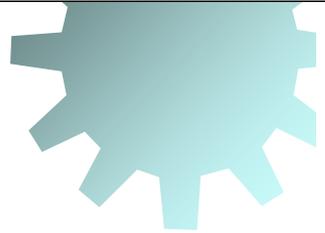
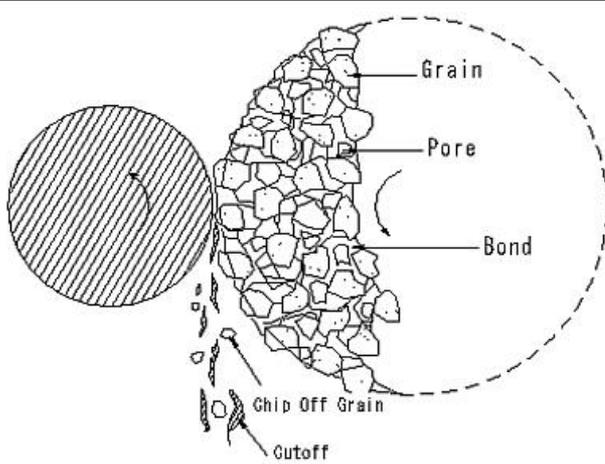
- (a) Corte (*Chipping*),
- (b) Sulcamento (*Ploughing*), e
- (c) Atrito (*Rubbing*).

Mecanismo de Remoção de Material



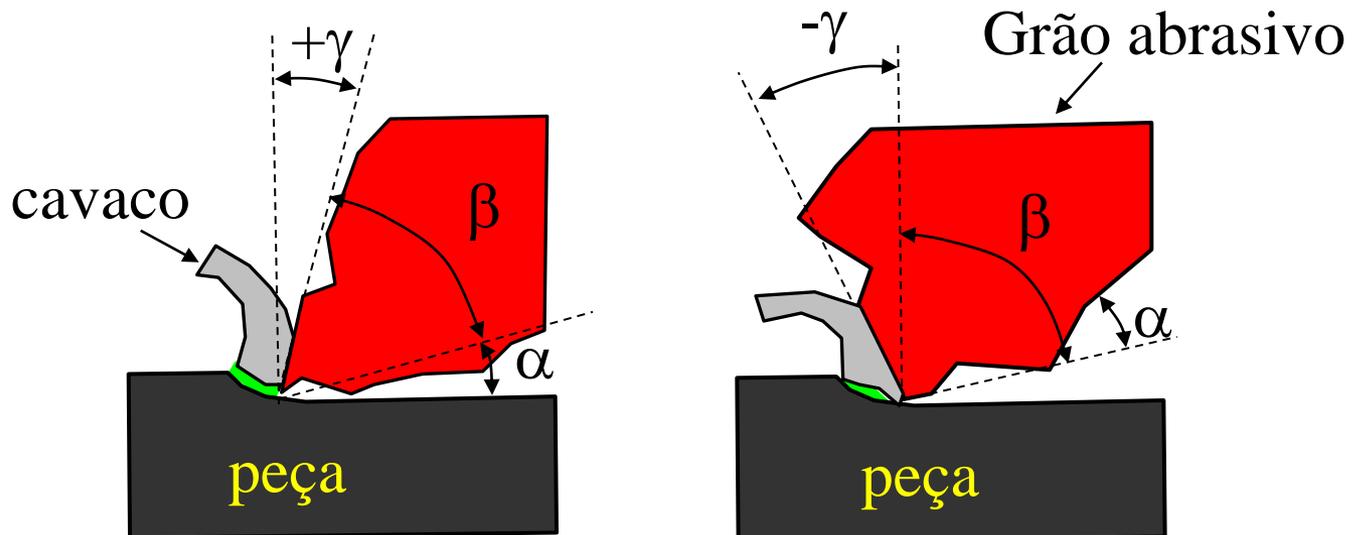
Três tipos de ação dos grãos na retificação:
(a) corte, (b) sulcamento, e (c) atrito.

Formação do Cavaco

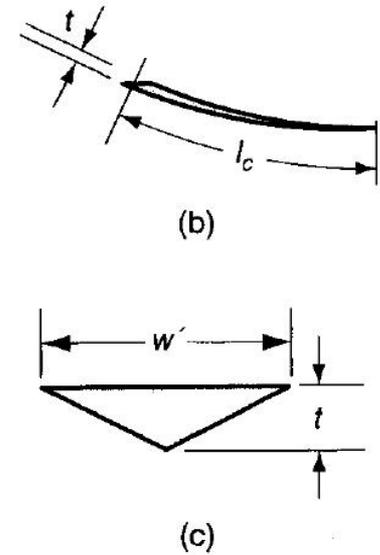
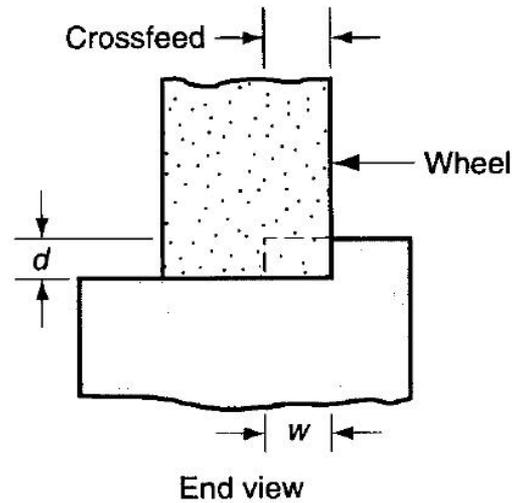
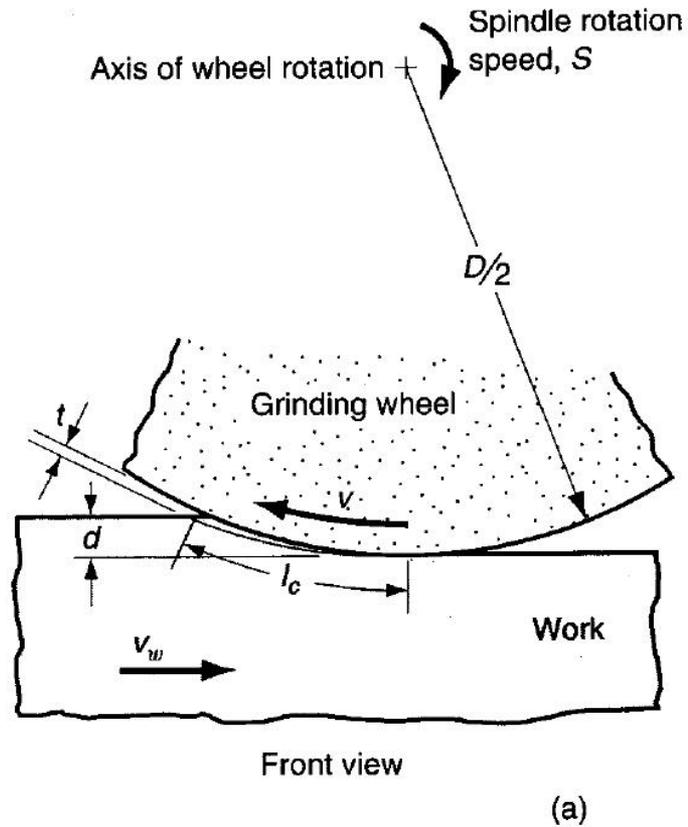


Formação do Cavaco

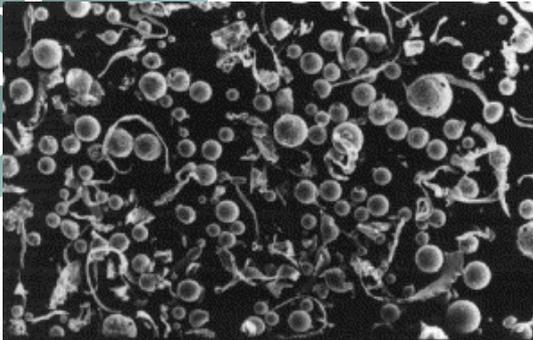
Mecanismo de Formação do cavaco e geometria da ferramenta



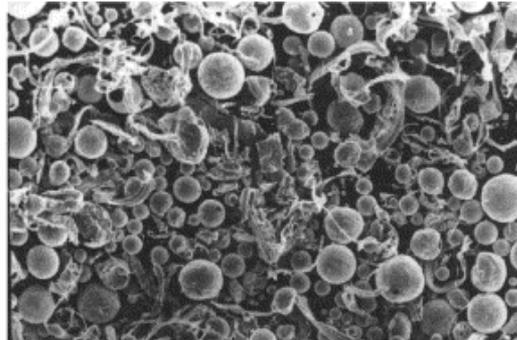
Geometria da Formação do Cavaco



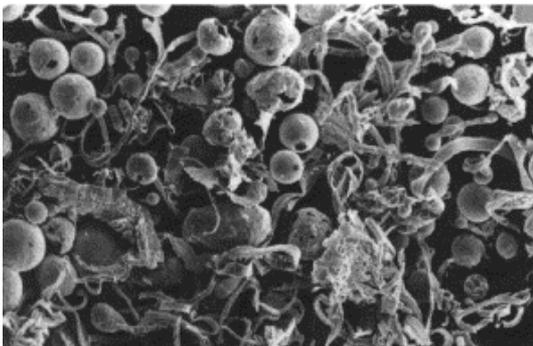
Geometria da Formação do Cavaco



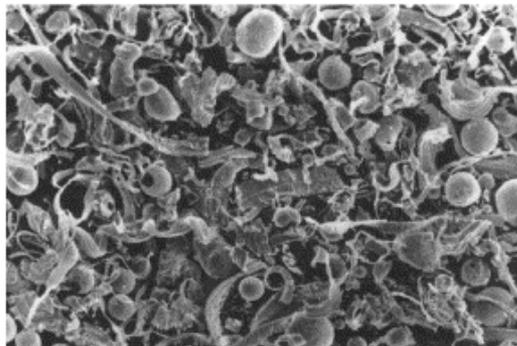
(a) $V_s=3000\text{rpm}$ $V_w=5\text{m/min}$ $a=10\mu\text{m}$



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



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

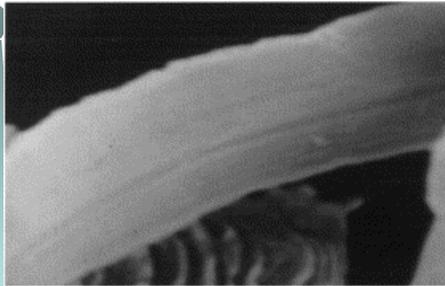


(d) $V_s=1800\text{rpm}$ $V_w=5\text{m/min}$ $a=10\mu\text{m}$

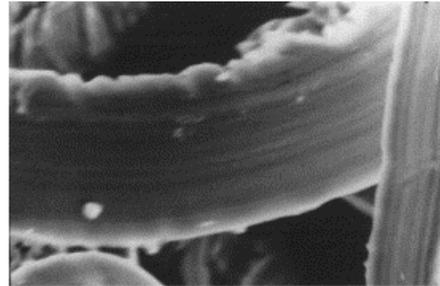
20KV X200 ----- 100 μm

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

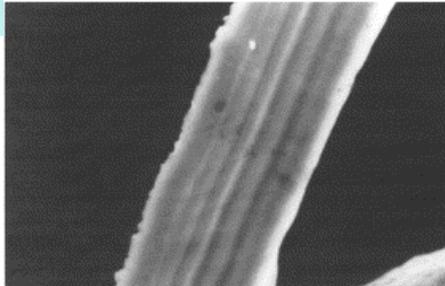
Geometria da Formação do Cavaco



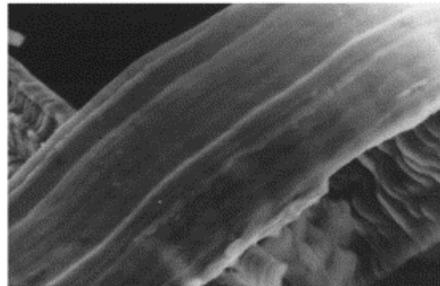
(c) $V_{eq}=0.0264$



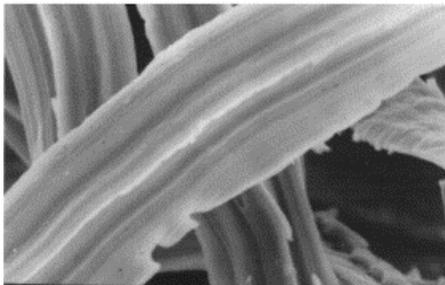
(d) $V_{eq}=0.0296$



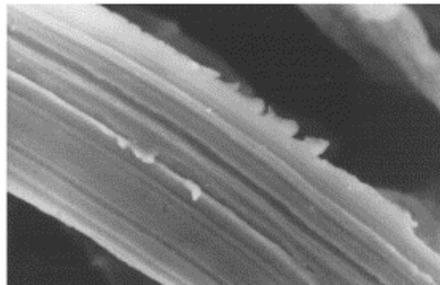
(e) $V_{eq}=0.0318$



(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

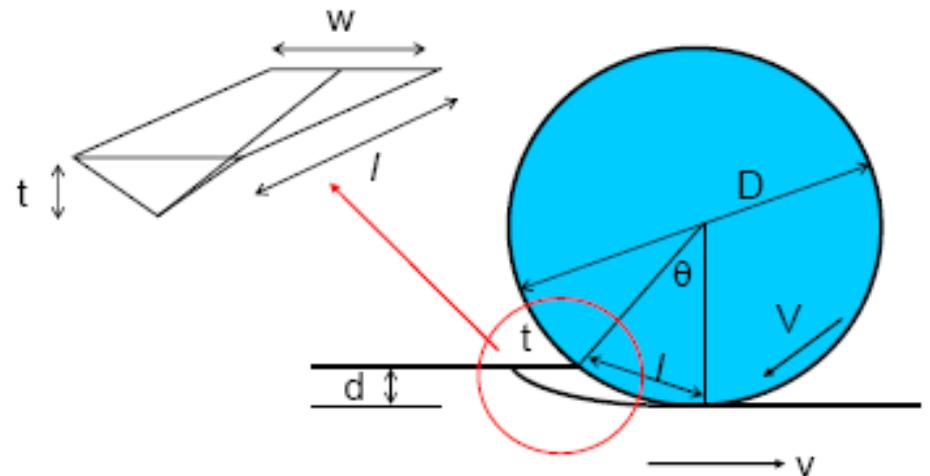
- Com o comprimento de contato longitudinal, o comprimento do cavaco, l :
 $D =$ diâmetro do Rebolo, $d =$ profundidade de penetração

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

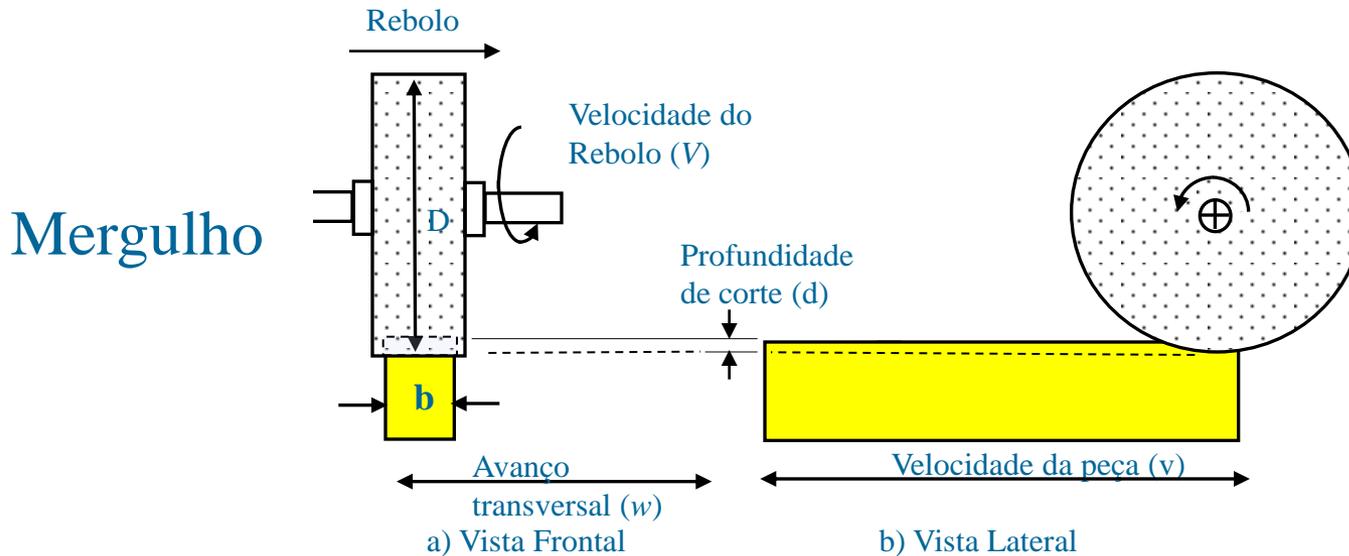
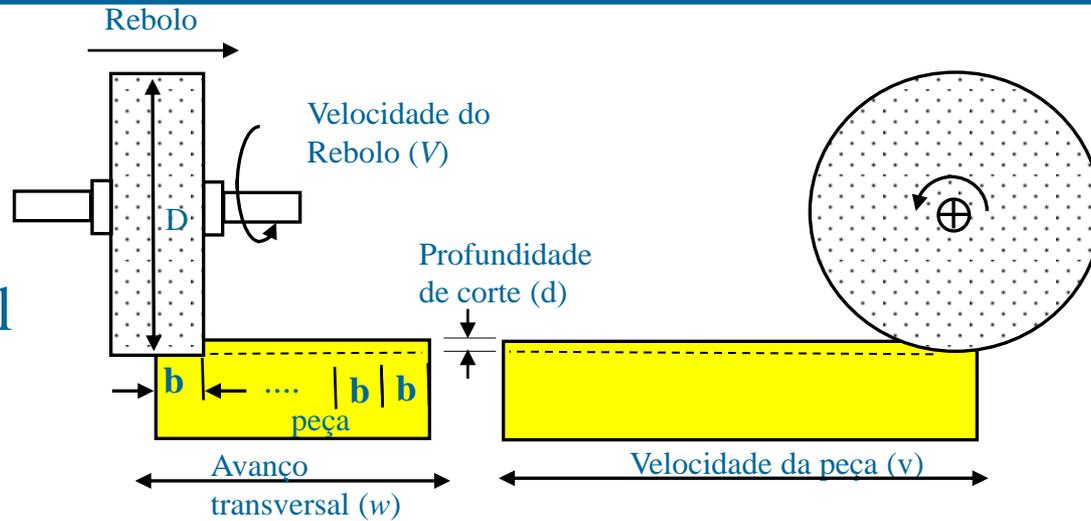
- Taxa de remoção de material, TRM

$$TRM = v \cdot d \cdot b \quad (2)$$

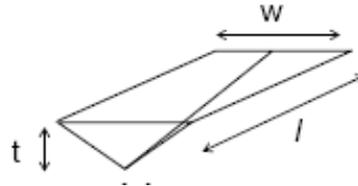
- $v =$ velocidade da peça, $d =$ profundidade de penetração, $b =$ largura de corte (equivale ao avanço transversal)



Comparação: retificação convencional X retificação por mergulho.



Volume médio de cavaco

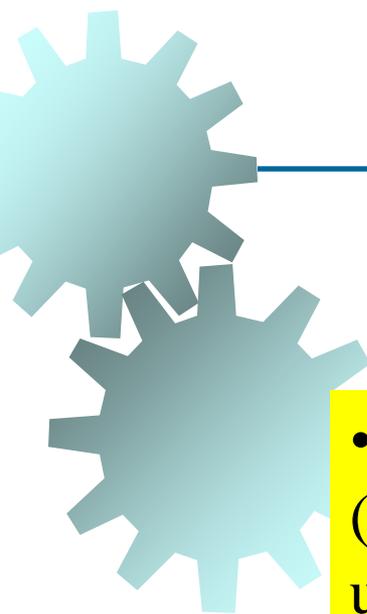


- Os cavacos possuem uma seção transversal triangular, e razão (r) da espessura do cavaco (t)
Em relação a largura do cavaco (w)

$$r = w/t \approx 10 \text{ a } 20 \quad (3)$$

- Assim, o volume médio de cavaco será

$$Vol_{cav} = (0,5).w . (0,5). t . l = 0,25.w.t.l \quad (4)$$



Número de cavaco removido por tempo (n)

- O número de cavacos removidos por unidade de tempo (n), onde c = número de arestas de corte (grãos) por unidade de área (típico 0.1 a 10 por mm^2), b é a largura do corte, e V = velocidade periférica do rebolo:

$$n = V \cdot b \cdot c \quad (5)$$

Espessura do cavaco

Combinando (1), (2) (3), (4) e (5)

$$TRM = v \cdot d \cdot b = n \cdot Vol_{cav}$$

$$v \cdot d \cdot b = V \cdot b \cdot c \cdot 0,25 wtl$$

$$w = r \cdot t \quad e \quad l = (D \cdot d)^{1/2}$$

$$v \cdot d \cdot b = V \cdot c \cdot b \cdot (0,25) r \cdot t \cdot t \cdot (D \cdot d)^{1/2}$$

Espessura do cavaco

Rearranjando:

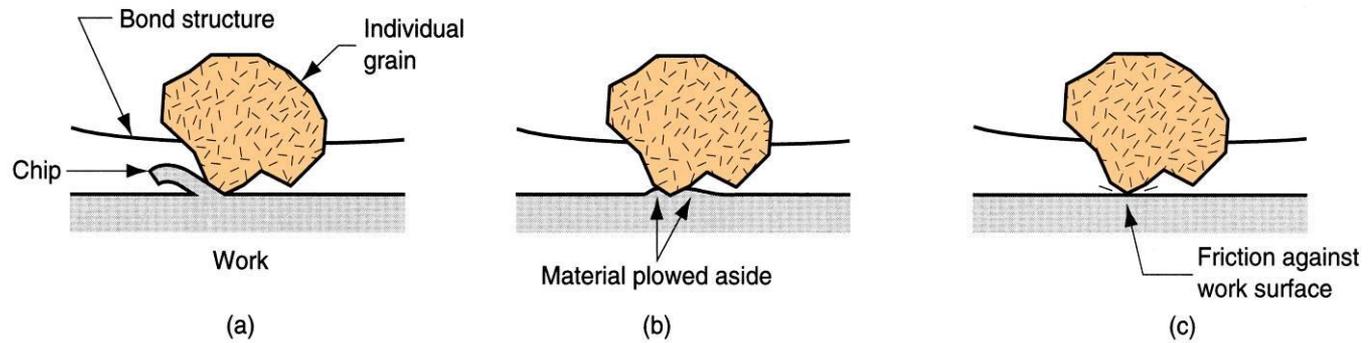
$$t^2 = \frac{4 \cdot v \cdot d}{V \cdot c \cdot r \cdot (D \cdot d)^{1/2}} \quad (6)$$

Espessura do cavaco

Rearranjando:

$$t = \sqrt{\frac{4 \cdot v}{V \cdot c \cdot r}} \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Energia específica do corte



Energia específica da retificação, u

- Consiste da energia da formação do cavaco, do “*plowing*”, e do deslizamento (atrito)

$$u = u_c + u_p + u_d \quad (7)$$



Força Total de Retificação

Força Total de Retificação

- Força obtida a partir da potência

$$\text{Potência} = u \cdot \text{TRM} \quad (8)$$

$$\text{Potência} = F_{retif} \cdot V = u \cdot v \cdot d \cdot b \quad (9)$$

$$F_{retif} = u \cdot \left(\frac{v \cdot d \cdot b}{V} \right) \quad (10)$$

Força Total de Retificação

Força total de retificação

- A partir de resultados empíricos, quando t diminui, a componente de atrito de u aumenta

$$u \propto \frac{1}{t}$$

ou

$$u = K_1 \cdot \frac{1}{t}$$

$$F_{retif} = K_1 \cdot \frac{1}{t} \left(\frac{v \cdot d \cdot b}{V} \right)$$

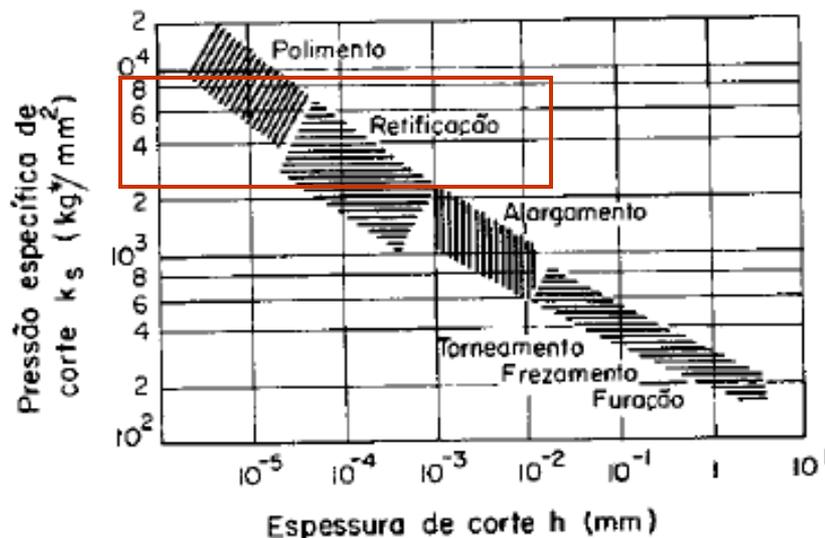


FIG. 5.31 — Variação da pressão específica de corte k_s com a espessura de corte h para diferentes operações de usinagem [3].



Força Total de Retificação

Força total de retificação

- substituindo

$$F_{retif} = K_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{4 \cdot v}{Vcr} (d/D)^{1/2}}} \cdot \frac{v \cdot d \cdot b}{V} \quad (11)$$

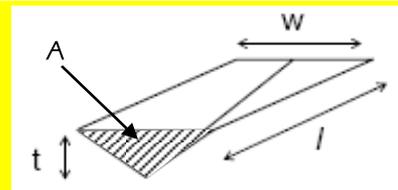
rearranjando

$$F_{retif} = K_1 \cdot b \sqrt{\frac{d \cdot c \cdot r \cdot v \cdot (d/D)^{1/2}}{4 \cdot V}} \quad (12)$$

Força Total de Retificação

Força sobre um único grão

- A força por grão pode ser calculada



$$F_{grão} = u \cdot \text{Área} \quad (\text{A} = \text{área da seção transversal do cavaco})$$

$$F_{grão} = u \cdot \frac{1}{2} \cdot w \cdot t$$

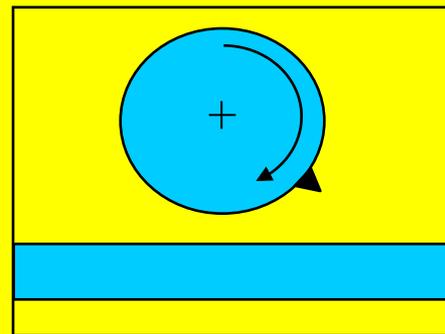
Como

$$w = r \cdot t$$

e

$$u = K_1 \cdot \frac{1}{t}$$

$$F_{grão} = \frac{K_1}{2 \cdot t} \cdot r \cdot t \cdot t$$



Força de corte no grão

Força sobre um único grão

- Substituindo por t , e rearranjando

$$F_{gr\tilde{a}o} = \frac{K_1}{2} \cdot r \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot v}{V \cdot c \cdot r}} \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}$$

$$F_{gr\tilde{a}o} = K_1 \cdot \sqrt{\frac{r \cdot v}{V \cdot c}} \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (13)$$



Temperatura na Retificação

Temperatura na retificação

- O aumento de Temperatura ocorre com a liberação de energia por unidade de área

$$\Delta T = K_2 \cdot \frac{\text{Unid.energia}}{\text{Área}}$$

$$\Delta T = K_2 \frac{u \cdot b \cdot l \cdot d}{b \cdot l} = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{1}{t} \cdot d$$

$$\Delta T = K_1 \cdot K_2 \cdot d \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{4 \cdot v}{V \cdot c}} \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}} \quad (14)$$



Temperatura na Retificação

Temperatura de retificação

- Rearranjando

$$\Delta T = K_1 \cdot K_2 \cdot \sqrt{\frac{V \cdot c \cdot d \cdot r}{4 \cdot v} \cdot \sqrt{d \cdot D}} \quad (15)$$

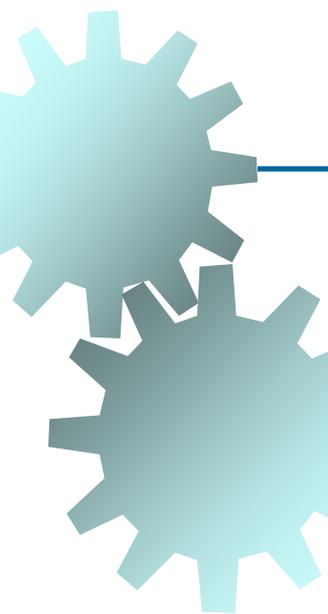
- A Temperatura pode chegar até 1600°C, porém por um período curto de tempo.



Exemplo 1

Em uma operação de retificação realizada em aço carbono plano, o rebolo, de diâmetro de 200 mm e largura de 25 mm, gira a 2400 rpm, com profundidade de usinagem de 0,05 mm e avanço transversal de 3,5 mm. A velocidade da peça é 6 m/min e a operação é realizada a seco. Determine:

- (a) O comprimento de contato entre o rebolo e a peça;
- (b) A taxa de remoção de material;
- (c) O número de cavacos formados por unidade de tempo, considerando que há 64 grãos/cm² na superfície ativa do rebolo;
- (d) O volume médio por cavaco;
- (e) A energia específica de corte, sabendo-se que a força de corte é 30 N.



Exemplo 2

Numa operação de retificação plana, o diâmetro do rebolo é 150 mm e a profundidade de penetração vale 0,07 mm. A velocidade de corte do rebolo é 1450 m/min, a velocidade da peça é 0,25 m/s, o avanço lateral é 5 mm e o número de grãos abrasivos ativos por unidade de área da superfície do rebolo é 0,75 grão/mm². Determine:

- (a) o comprimento médio do cavaco;
- (b) a taxa de remoção de material e
- (c) número de cavacos formados por unidade de tempo para a porção do rebolo em contato com a peça.

Exemplo 3

Você está retificando um aço, o qual possui uma energia específica de retificação (u) de 35 W-s/mm^3 .

- O rebolo gira a 3600 rpm , diâmetro (D) de 150 mm , espessura (b) de 25 mm , e (c) 5 grãos por mm^2 (c). O motor tem potência de 2 kW .

- A peça move-se (v) a $1,5 \text{ m/min}$. A razão de espessura do cavaco (r) é 10 .

Calcule:

a) Determine a força de retificação (F_{retif}) e a força por grão ($F_{\text{grão}}$).

b) Determine a temperatura (K_2 é 0.2°K.m/N). Temperatura ambiente é 20°C .



Exemplo 3: Solução

Primeiro precisamos calcular a prof. de corte. Isso pode ser obtido a partir do cálculo de potência.

$$Potência = u \cdot TRM = u \cdot v \cdot d \cdot b$$

$$2000W = 35 \frac{W \cdot s}{mm^3} \cdot 1,5 \frac{m}{min} \cdot d \cdot 25mm \cdot 10^6 \frac{mm^2}{m^2} \cdot \frac{min}{60sec}$$

$$d = 91,4 \cdot 10^6 m$$

Exemplo 3: Solução

Agora iremos calcular a força de corte total.

$$F_{retif} = u \cdot \frac{v \cdot d \cdot b}{V}$$

$$F_{retif} = 35 \frac{W \cdot s}{mm^3} \cdot \frac{1500 \frac{mm}{min} \cdot 91,4 \cdot 10^{-3} mm \cdot 25 mm}{3600 \frac{rev}{min} \cdot 150 \cdot \pi \frac{mm}{rev} \cdot \frac{m}{1000 mm}}$$

$$F_{retif} = 70,7 N$$

Exemplo 3: Solução

Próximo passo é calcular a força por grão.

$$F_{gr\tilde{a}o} = u \cdot \frac{1}{2} \cdot w \cdot t$$

$$w = r \cdot t$$

$$F_{gr\tilde{a}o} = u \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot t \cdot t$$

$$t = ?$$

$$t = \sqrt{\frac{4 \cdot v}{V \cdot c \cdot r}} \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1500 \cdot \frac{mm}{min}}{3600 \cdot 150 \cdot \pi \frac{mm}{min} \cdot 5 \frac{gr\tilde{a}os}{mm^2} \cdot 10}} \cdot \sqrt{\frac{91,4 \cdot 10^{-3} mm}{150 mm}}$$

$$t = 1,32 \cdot 10^{-3} mm$$

Exemplo 3: Solução

Agora substituindo t em $F_{\text{grão}}$.

$$F_{\text{grão}} = u \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot t \cdot t = 35 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot (1,32 \cdot 10^{-3})^2$$

$$F_{\text{grão}} = 3,05 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$



Exemplo 3: Solução

Para o cálculo da temperatura é necessário K_1 e K_2 . K_2 é dado, então é necessário calcular K_1 .

$$F_{gr\tilde{a}o} = u \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot t \cdot t = K_1 \cdot \frac{1}{t} \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot t \cdot t = K_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot t$$

$$3,05 \cdot 10^{-4} N = K_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 1,32 \cdot 10^{-6} m$$

$$K_1 = 46,2 \frac{N}{m}$$



Exemplo 3: Solução

Substituindo K_1 e K_2 teremos

$$\Delta T = K_2 \cdot K_1 \cdot \frac{1}{t} \cdot d$$

$$\Delta T = 0,2 \frac{K \cdot m}{N} \cdot 46,2 \cdot \frac{N}{m} \cdot \frac{1}{1,32 \cdot 10^{-6} m} \cdot 91,4 \cdot 10^{-6} m = 640^\circ K$$

$$20^\circ C = 293^\circ K$$

$$T_{final} = T_{inicial} + \Delta T = 293 + 640 = 933^\circ K$$

Por tanto

$$T_{final} = 660^\circ C$$