

# Procesos de Fabricación

## Lectura 1

# Maquinado con procesos abrasivos

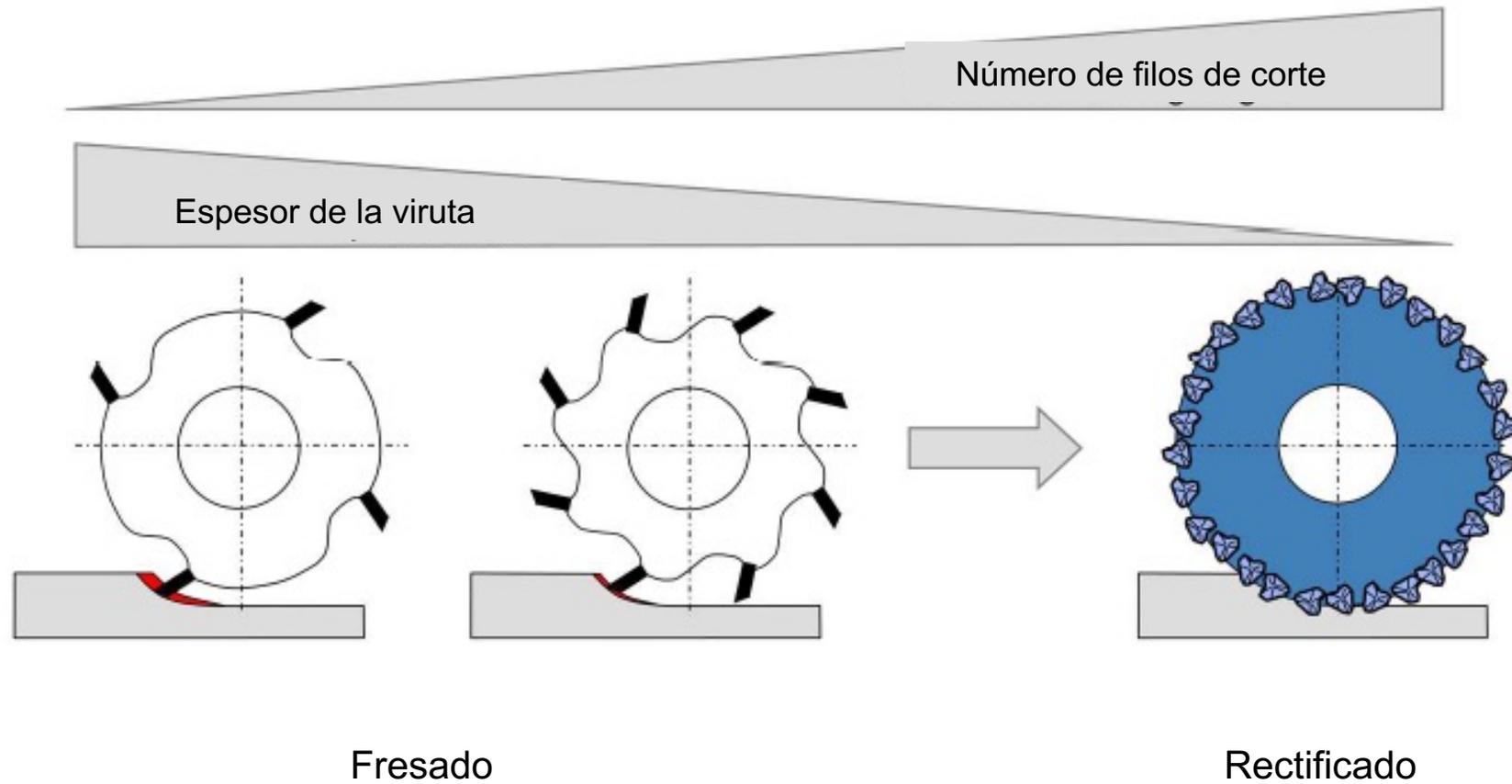
### Profesor:

Ricardo Caballero, M.Sc.

✉ [ricardo.caballero@utp.ac.pa](mailto:ricardo.caballero@utp.ac.pa)



# Del fresado al rectificado



# Maquinado abrasivo

---

- Eliminación de material por la acción de partículas abrasivas que generalmente tienen la forma de rueda
- Proceso abrasivo más importante → rectificado

## Abrasivo

- Partícula pequeña, dura, con aristas afiladas y forma irregular
- Capaz de remover pequeñas cantidades de material de una superficie por un proceso de corte que produce residuos diminutos



# Tipo de abrasivo

---

## Abrasivos convencionales

### Óxido de aluminio

- Material abrasivo más común
- Utilizado para rectificar acero y otras aleaciones ferrosas de alta resistencia
- Corindón

### Carburo de silicio

- Más duro que óxido de aluminio, pero no tan resistente.
- Utilizado para rectificar metales dúctiles como aluminio, latón y acero inoxidable, titanio, hierro fundido y cerámicos

## Superabrasivos

### Nitruro de boro cúbico

- Utilizado para materiales duros como aceros endurecidos para herramientas y aleaciones aeroespaciales.

### Diamante

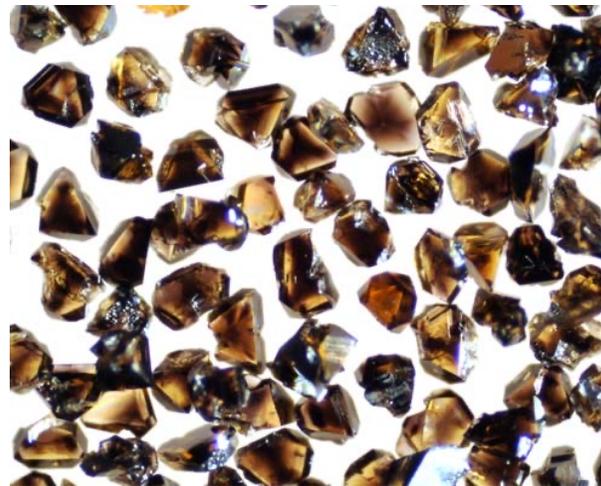
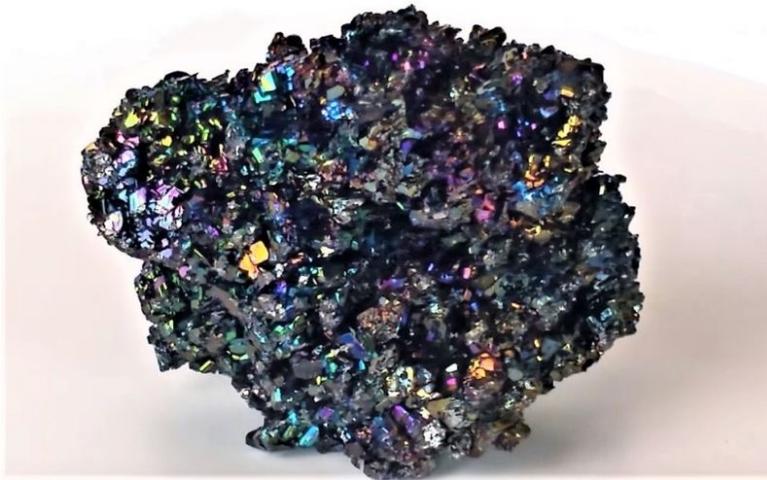
- Utilizado generalmente en materiales duros como cerámica, carburos cementados y vidrio.

# Tipo de abrasivo



## Friabilidad:

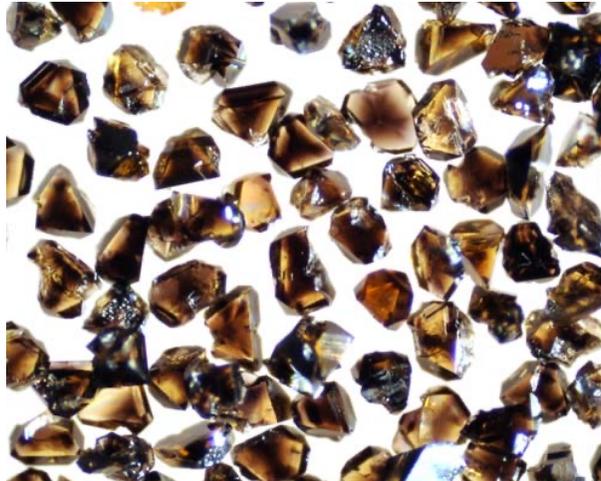
- Capacidad de los granos abrasivos para fracturarse en partes más pequeñas.
- Una friabilidad alta indica baja resistencia a la fractura



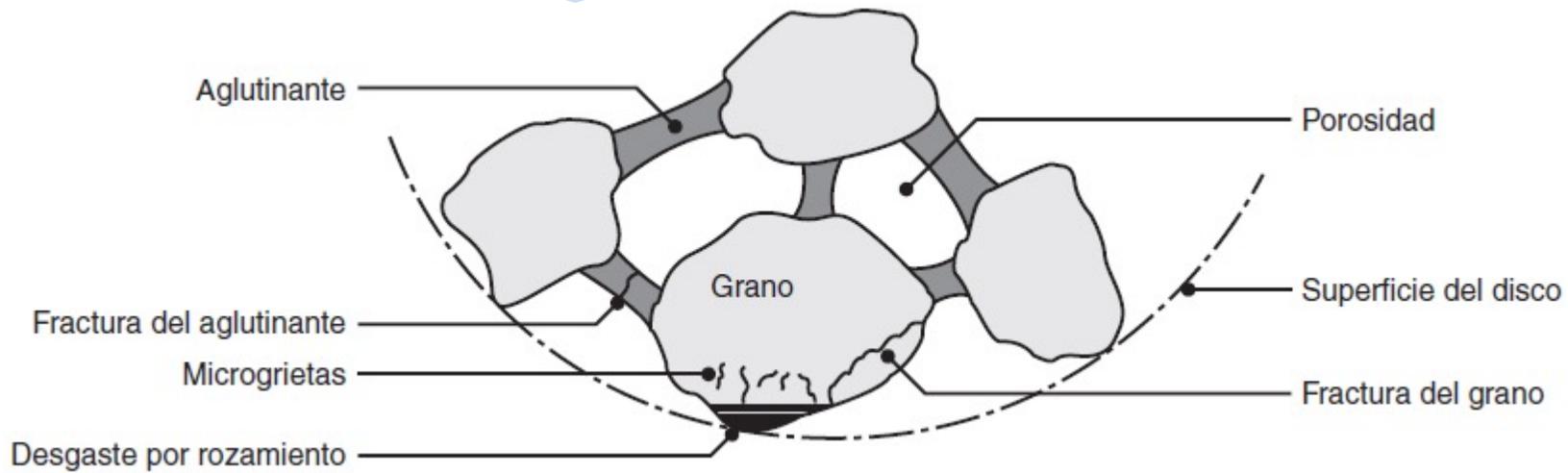
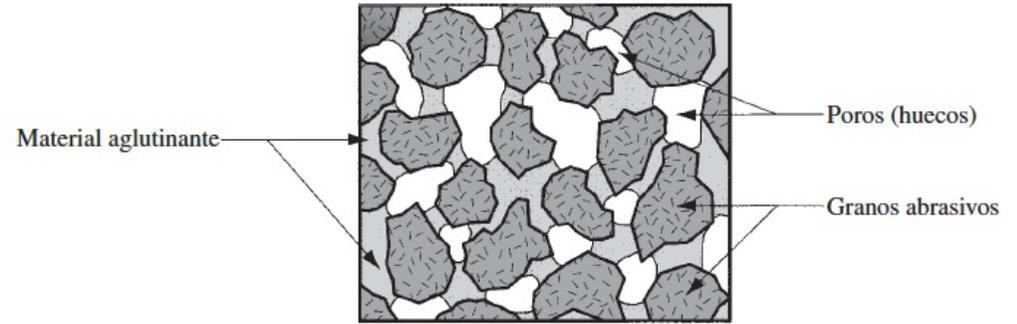
# Tamaño del grano

---

- Parámetro utilizado para determinar el acabado superficial y de la velocidad de remoción del material
- Grano pequeño → mejores acabados
- Grados grandes → permiten velocidades de remoción de material alta
- La selección del tamaño del grano depende también del tipo de material de trabajo



# Discos abrasivos

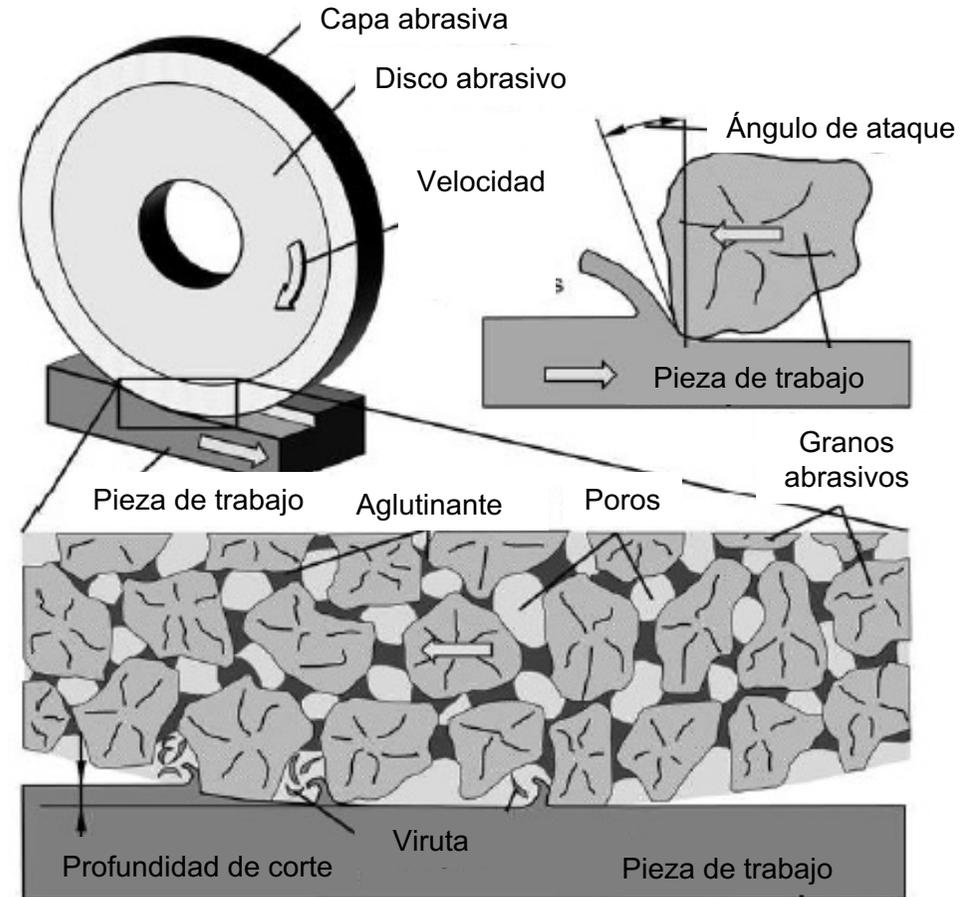


# Materiales aglutinantes utilizados en discos abrasivos

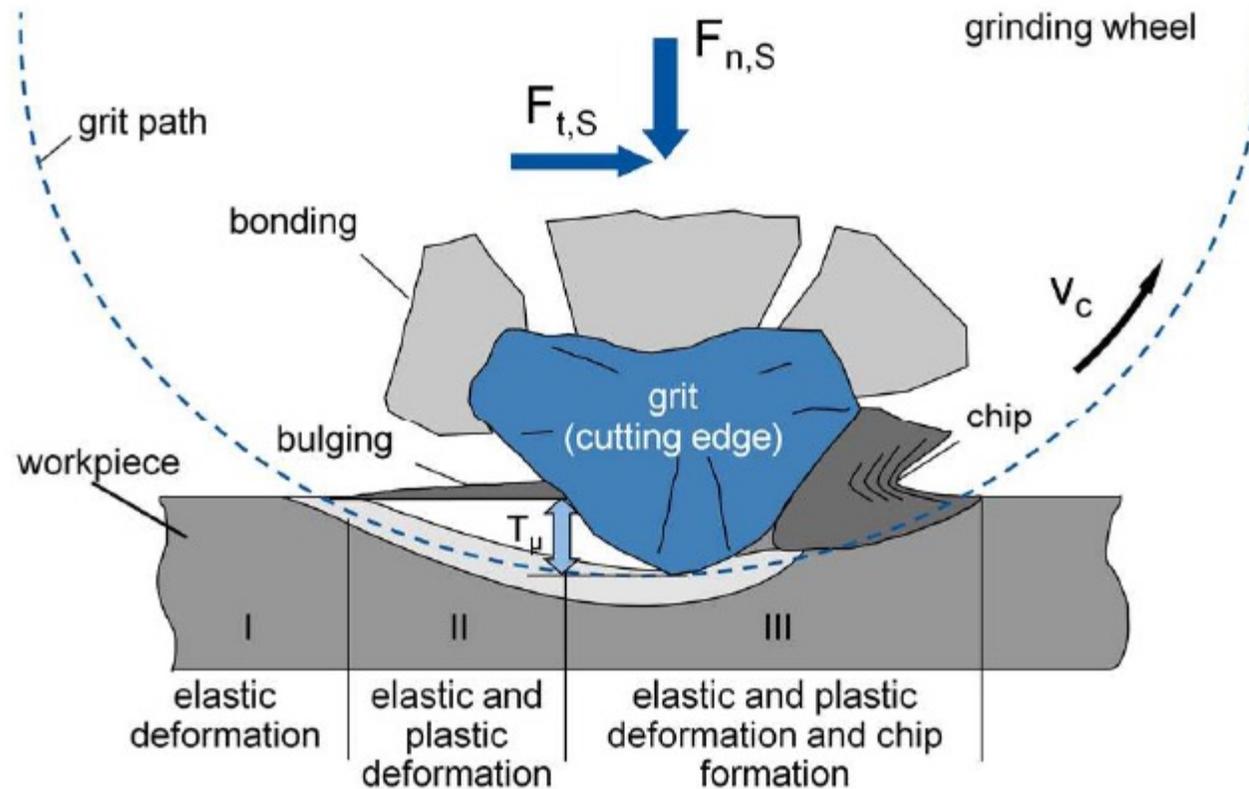
Tipo de material	Características
Vitrificado	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Son fuertes y rígidos, resistentes a temperaturas elevadas y relativamente no se ven afectados por el agua y el aceite que podrían usarse en la molienda de fluidos</li></ul>
Resinoides	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Tiene una resistencia muy alta y se utiliza para operaciones de rectificado y corte en bruto.</li></ul>
Metal	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Se utiliza para unir la matriz metálica y los granos abrasivos a la periferia exterior de la rueda, conservando así los costosos materiales abrasivos.</li></ul>
Hule	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ El material de unión más flexible y utilizado como material de unión en ruedas de corte</li></ul>

# Rectificado

- Proceso de remoción de virutas que utiliza un grano abrasivo como herramienta de corte.
- Los bordes de corte poseen diferentes geometrías
- Distancia variable de los bordes de corte y, por lo tanto, diferentes grosores de viruta
- Distancia entre el filo corte y los ejes de rotación es variable
- La herramienta consta de tres componentes (grano, aglutinante, porosidad)



# Fases de formación de viruta



# Sistema de identificación para piedras abrasivas convencionales según ANSI

30	A	46	H	6	V	XX
						<p><i>Marca privada del fabricante</i> de la piedra (opcional).</p> <p><i>Tipo de aglutinante:</i> B = resinoso, BF = resinoso reforzado E = goma laca, R = hule, RF = hule reforzado, S = silicato, V = vitrificado, M = metálico.</p> <p><i>Estructura:</i> La escala va del 1 al 15: 1 = estructura muy densa, 15 = estructura muy abierta.</p> <p><i>Adhesión:</i> La escala va de la A a la Z: A = suave, M = mediano, Z = duro.</p> <p><i>Tamaño del grano:</i> Grueso = tamaños de grano 8 a 24, Mediano = tamaños de grano 30 a 60, Fino = tamaños de grano 70 a 180, Muy fino = tamaños de grano 220 a 600.</p> <p><i>Tipo de abrasivo:</i> A = óxido de aluminio, C = carburo de silicio.</p> <p><i>Prefijo:</i> Símbolo del fabricante para el abrasivo (opcional).</p>

Sistema de marcado estándar para abrasivos aglutinados de óxido de aluminio y carburo de silicio.

# Sistema identificación para piedras abrasivas de diamante y nitruro de boro cúbico según ANSI

XX	D	150	P	YY	M	ZZ	3

*Profundidad del abrasivo* = Profundidad del abrasivo en el perímetro de la piedra de la sección abrasiva en mm (como se muestra aquí) o en pulgadas (como en la figura 18.2c).

*Modificación del aglutinante* = nota del fabricante sobre la modificación o tipo de aglutinante especial.

*Tipo de aglutinante*: B = Resina, M = Metal, V = Vitrificado.

*Concentración*: Designación del fabricante, puede ser un número o símbolo.

*Adhesión*: La escala va de la A a la Z: A = suave, M = mediano, Z = duro.

*Tamaño de grano*: Grueso = tamaños de grano 8 a 24, Mediano = tamaños de grano 30 a 60, Fino = tamaños de grano 70 a 180, Muy fino = tamaños de grano 220 a 600.

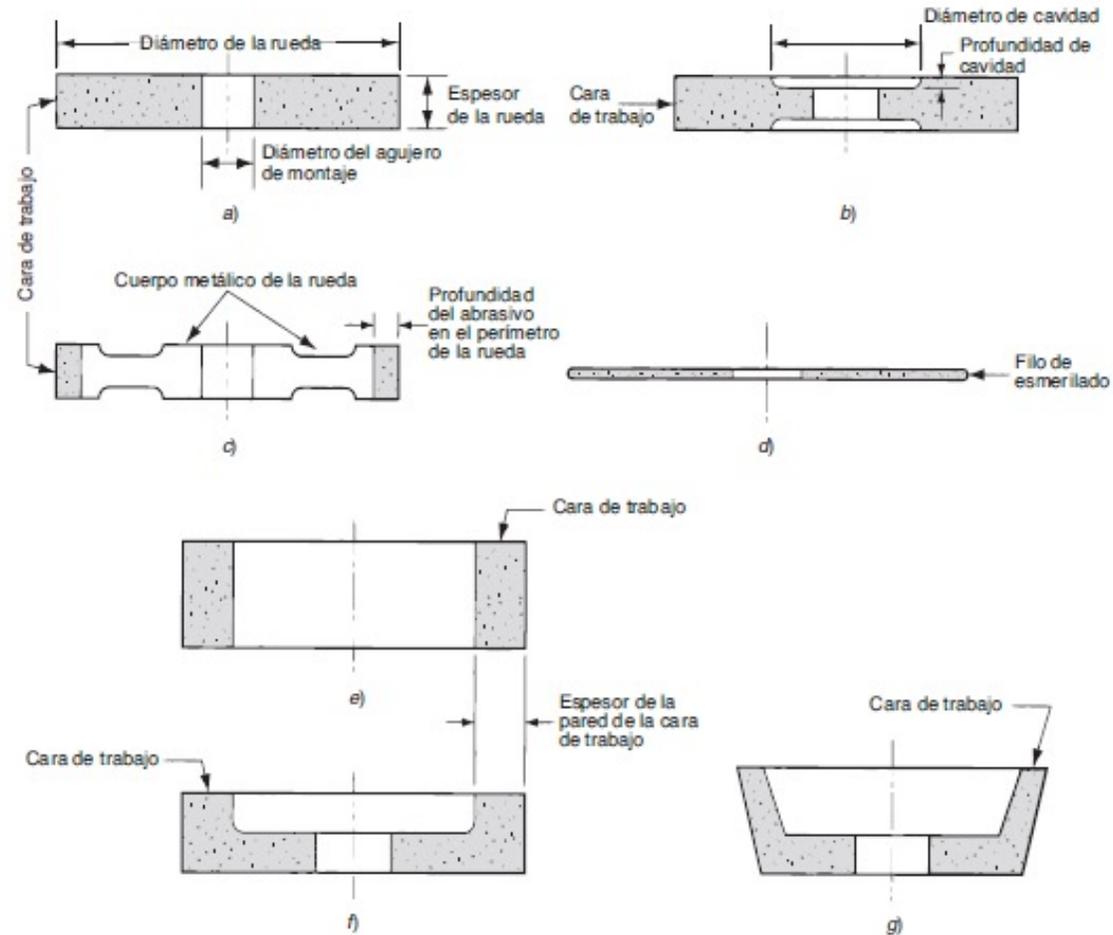
*Tipo de abrasivo*: D = Diamante, B = Nitruro de boro cúbico.

*Prefijo*: Símbolo del fabricante para el abrasivo (opcional).

Sistema de marcado estándar para abrasivos aglutinados de nitruro de boro cúbico y diamante.

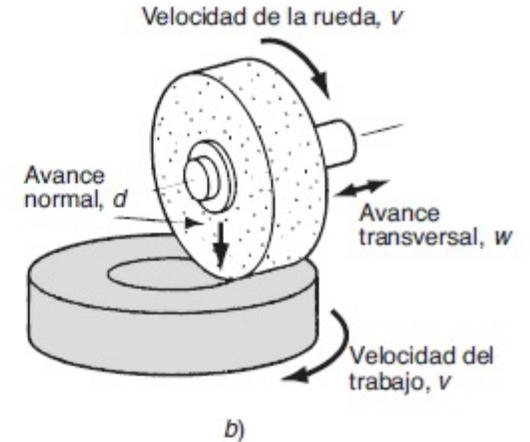
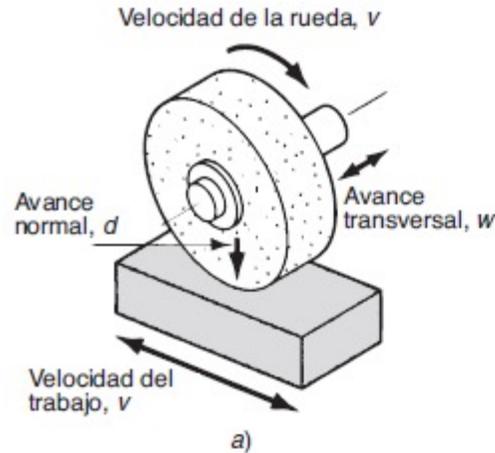


# Formas estándar de ruedas abrasivas

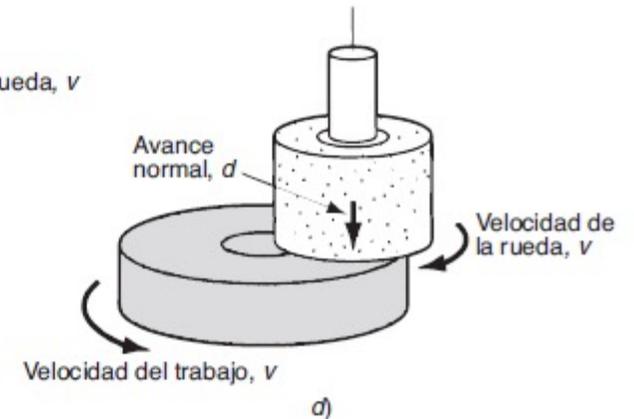
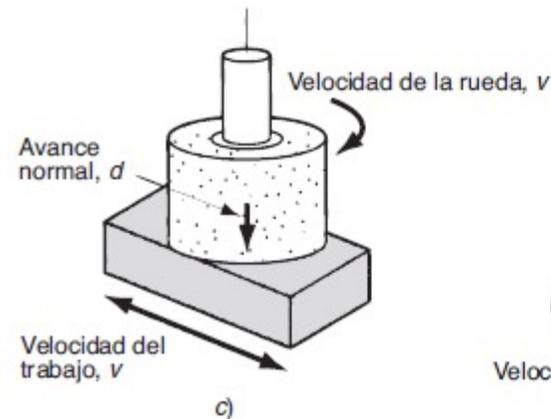


# Rectificado en superficies planas

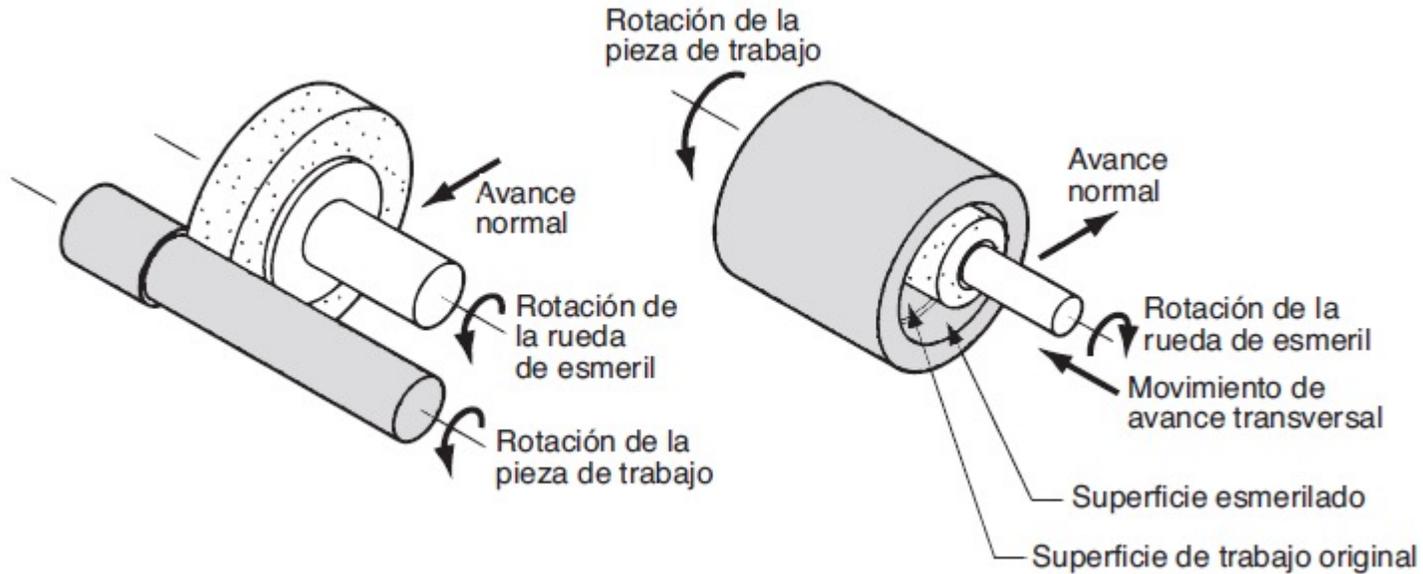
Se han diseñado máquinas para rectificar superficies planas, cilindros exteriores o interiores y formas de contorno, como roscas.



- a) husillo horizontal con mesa de trabajo oscilante,
- b) husillo horizontal con mesa de trabajo giratoria,
- c) husillo vertical con mesa de trabajo oscilante y
- d) husillo vertical con mesa de trabajo giratoria.



# Rectificado cilíndrico



Rectificado cilíndrico externo

Rectificado cilíndrico interno

# Análisis de las operaciones de rectificado

## Velocidad de la rueda

$$V = \pi DN$$

Donde:

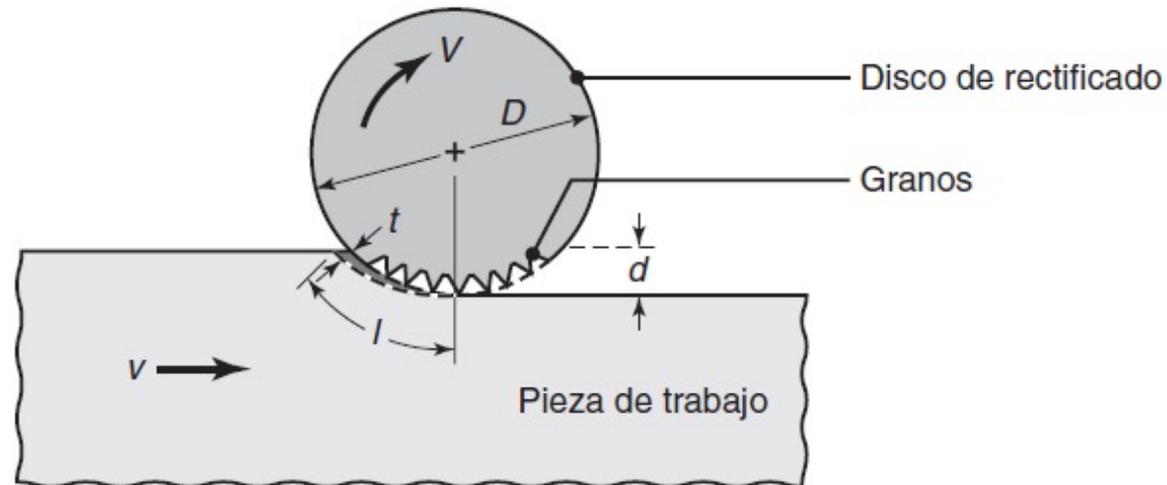
- V = velocidad lineal de la rueda
- D = diámetro de la rueda
- N = velocidad de rotación del husillo

## Tasa de remoción de material

$$MRR = vwd$$

Donde:

- v = velocidad de avance
- w = ancho de corte
- d = profundidad de corte



# Análisis de las operaciones de rectificado

## Longitud promedio de la viruta

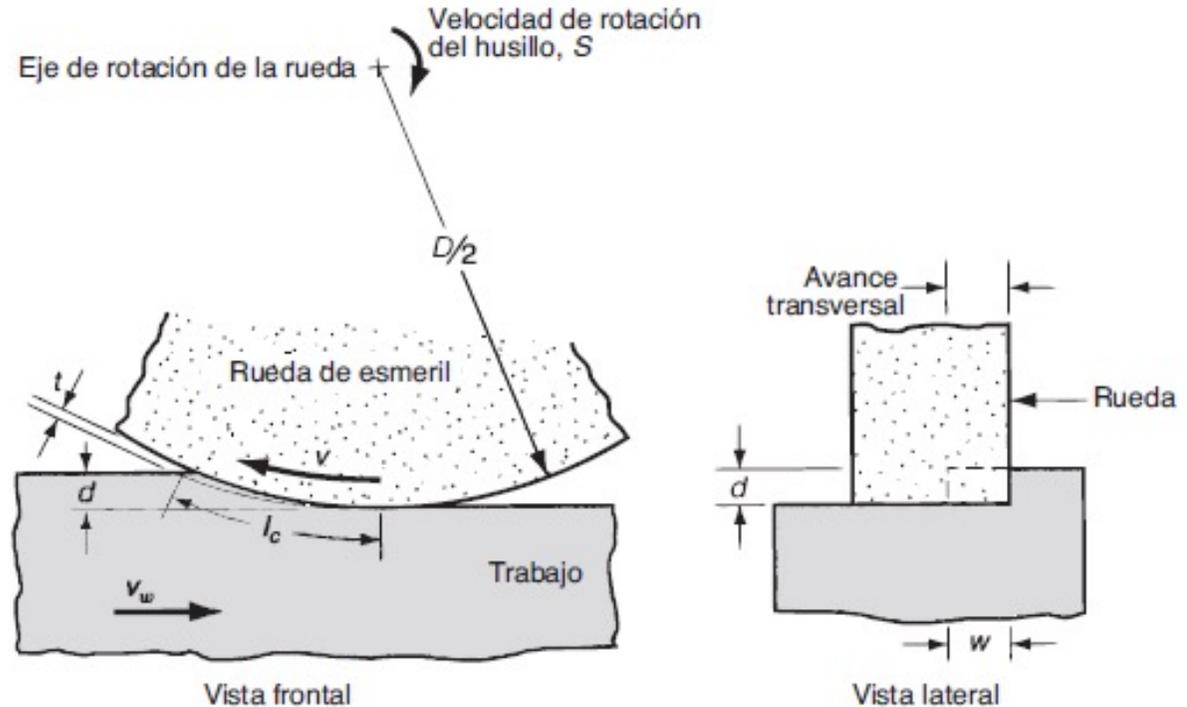
$$l_c = \sqrt{Dd}$$

## Espesor de la viruta

$$t = \sqrt{\frac{4v}{VCr}} \sqrt{\frac{d}{D}}$$

## Número de virutas

$$n_c = VwC$$



Donde:

- C = cantidad de puntos de corte por unidad de área de la periferia del disco
- r = relación de la anchura de la viruta al espesor promedio de la viruta sin deformación
- D = diámetro de la rueda
- d = profundidad de corte
- V = velocidad de la rueda
- w = ancho de corte / avance transversal

# Análisis de las operaciones de rectificado

---

## Energía específica

$$U = \frac{F_c V}{vwd}$$

Donde:

U = energía específica J/mm<sup>3</sup>

F<sub>c</sub> = fuerza de corte

V = velocidad de la rueda

v = *velocidad de avance*

d = *profundidad de corte*

## Relación de rectificado

$$G = \frac{\text{Volumen del material retirado}}{\text{Volumen de desgaste del disco}}$$

La relación de rectificado es un término usado para indicar la pendiente de la curva de desgaste de la piedra.

## Ejemplo 1

---

Suponga que se tiene un diámetro de la rueda de 200 mm, una profundidad de corte de 0.05 mm. Se configura una velocidad de la rueda a 1800 m/min y una velocidad de avance de 30 m/min.

Utilizando las formulas anteriores, calcule la longitud  $l$  y el espesor  $t$  de la viruta suponiendo que tienen 2 granos por mm<sup>2</sup> y que un valor de  $r = 15$

## Ejemplo 1: Solución

---

a. Calcular la longitud de la viruta

$$l_c = \sqrt{Dd}$$

$$l_c = \sqrt{200 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}}$$

$$l_c = 3.2 \text{ mm}$$

b. Calcular el espesor de la viruta

$$t = \sqrt{\frac{4v}{VCr} \sqrt{\frac{d}{D}}}$$

$$t = \sqrt{\frac{4 (30 \times 1000)}{(1800 \times 1000)(2)(15)} \sqrt{\frac{0.05}{200}}}$$

$$t = 0.006 \text{ mm}$$

## Ejemplo 2

---

En cierta operación de rectificado de superficies el diámetro de la rueda 150 mm y el avance normal 0.07 mm. La velocidad de la rueda 1 450 m/min, la velocidad del trabajo 0.25 m/s y el avance transversal 5 mm. El número de granos activos por área de la superficie de la rueda 0.75 granos/mm<sup>2</sup>.

Determine

- a. la longitud promedio por viruta,
- b. la velocidad de remoción de metal
- c. el número de virutas formadas por unidad de tiempo para la porción de la operación cuando la rueda está trabajando

## Ejemplo 2: Solución

---

Determine

- a. la longitud promedio por viruta,

$$l_c = \sqrt{Dd}$$

$$l_c = \sqrt{150 \text{ mm} \times 0.07 \text{ mm}}$$

$$l_c = 3.24 \text{ mm}$$

## Ejemplo 2: Solución

---

b. la velocidad de remoción de metal

$$MRR = vwd$$

$$MRR = \left(0.25 \frac{m}{s} \times \frac{1000 \text{ mm}}{m}\right) \times 5 \text{ mm} \times 0.07 \text{ mm}$$

$$MRR = 87.5 \frac{\text{mm}^3}{s} \rightarrow 5250 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$$

## Ejemplo 2: Solución

---

c. el número de virutas formadas por unidad de tiempo para la porción de la operación cuando la rueda está trabajando

$$n_c = VwC$$

$$n_c = \left( 1450 \frac{m}{min} \times \frac{1000 \text{ mm}}{m} \right) \times 5 \text{ mm} \times 0.75 \text{ granos/mm}^2$$

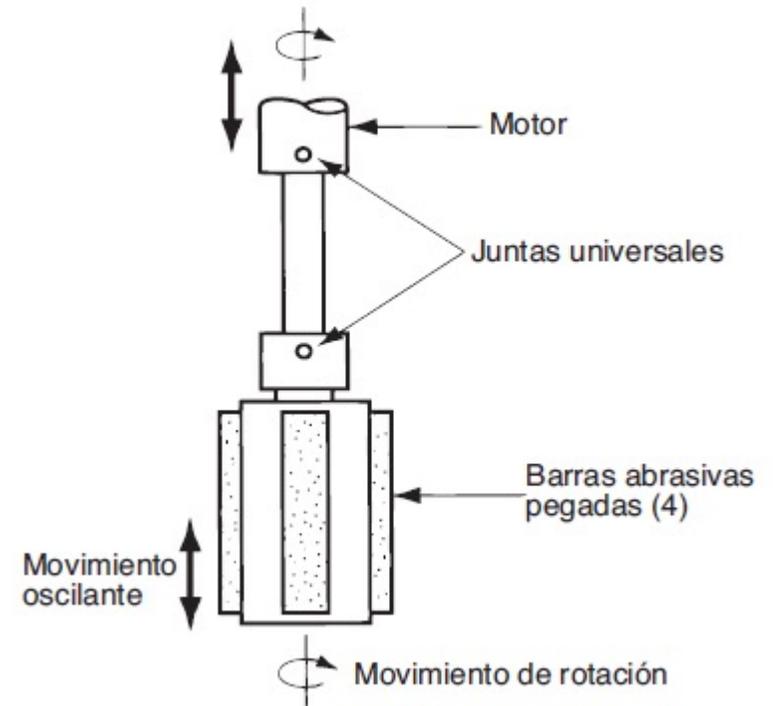
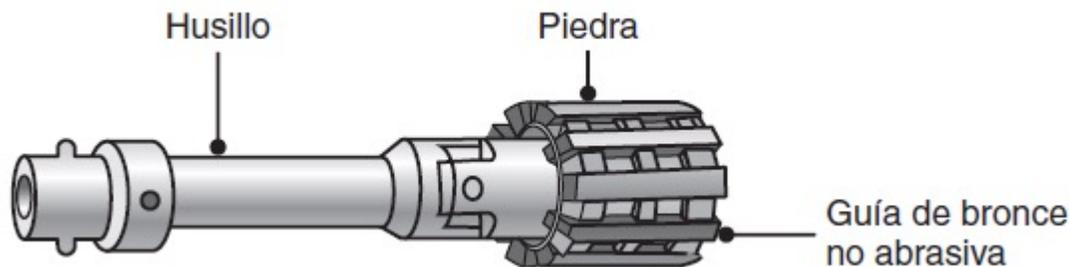
$$n_c = 5,437,500 \text{ virutas/min}$$

# Lineamientos de aplicación para le rectificando

Problema u objetivo de aplicación	Recomendación o lineamiento
Esmerilar acero y la mayoría de las aleaciones de hierro	Seleccione el óxido de aluminio como abrasivo.
Esmerilar la mayoría de los metales no ferrosos	Seleccione el carburo de silicio como abrasivo.
Esmerilar aceros de herramienta endurecidos y ciertas aleaciones aeroespaciales	Seleccione el nitruro de boro cúbico (Borazón) como abrasivo.
Esmerilar materiales abrasivos duros, como cerámicos, carburos cementados y vidrio	Seleccione el diamante como abrasivo
Esmerilar metales suaves	Seleccione un tamaño grande de grano y el grado de rueda más duro
Esmerilar metales duros	Seleccione un tamaño de grano pequeño y una dureza de rueda menor
Optimizar el acabado superficial	Seleccione una estructura de rueda densa con granos de tamaño pequeño. Use velocidades más altas ( $v$ ) y velocidades de trabajo bajas ( $v_w$ )
Maximizar la velocidad de remoción de material	Seleccione un tamaño grande de grano, estructura de rueda más abierta y aglutinante vitrificado
Minimizar el daño por calor, el agrietado y el torcido de la superficie de trabajo	Mantenga el filo de la rueda. Aderece la rueda frecuentemente. Use profundidades de corte menores ( $d$ ), velocidades de rueda más bajas ( $v$ ), velocidades de trabajo más rápidas ( $v_w$ )
Si la rueda de esmeril se abrillanta y se quema	Seleccione una rueda de dureza menor y una estructura más abierta
Si la rueda de esmeril se rompe demasiado rápido	Seleccione una rueda de mayor dureza y una estructura más densa.

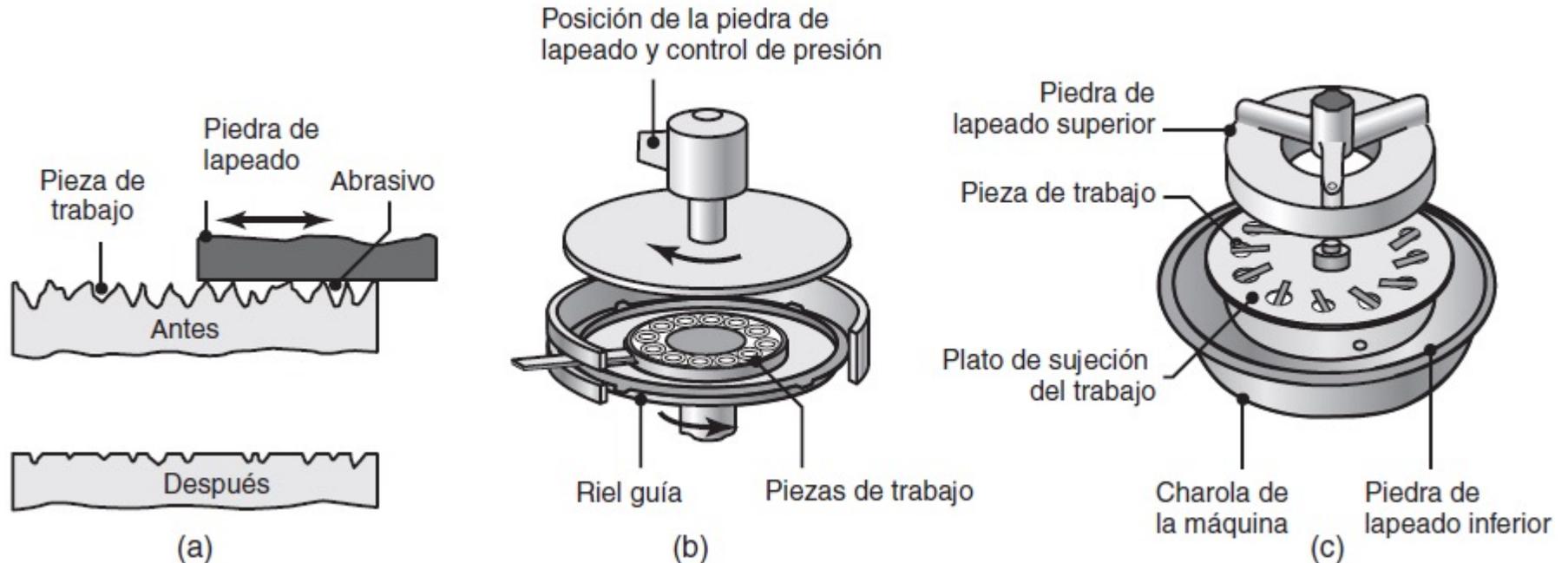
# Honeado

- Proceso por el que pasan los tubos para tener una superficie lisa que permite el fácil flujo del aceite por el tubo y permite un eficiente sellado y alta durabilidad de los sellos o empaques.
- Los tubos honeados son tubos que por sus características especiales se utilizan para la reparación y fabricación de cilindros.



# Lapeado

- Operación de maquinado en la que se frota dos superficies con un abrasivo de grano muy fino entre ambas, para mejorar el acabado y disminuir la rugosidad superficial.
- Esta operación sirve para dar acabado a las superficies planas, cilíndricas o curvadas.



# Pulido o pulimentado

---

- Proceso que produce un acabado superficial liso y lustroso.
- Se usa para remover arañazos y rebabas y para alisar las superficies gruesas



## Libros de referencia

---

- Kalpakjian, S. & Schmid, S. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson
- Groover, M. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. McGraw-Hill.
- Black, B. (2015) *Workshop Processes, Practices and Materials*. Taylor & Francis Group
- Youssef, H. & El-Hoy, H. (2008). *Machining Technology – Machine Tools and Operations*. Taylor and Francis Group
- Noriega, S. et al. (2017). *Ingeniería de Manufactura en el Siglo XXI*. Academia de Ingeniería de México



Ricardo Caballero, M.Sc.

Docente Tiempo Completo  
Facultad de Ingeniería Industrial  
Centro Regional de Chiriquí  
Universidad Tecnológica de Panamá

E-mail: [ricardo.caballero@utp.ac.pa](mailto:ricardo.caballero@utp.ac.pa)

<https://www.academia.utp.ac.pa/ricardo-caballero>