

Procesos de Fabricación

Lectura 4 Maquinado

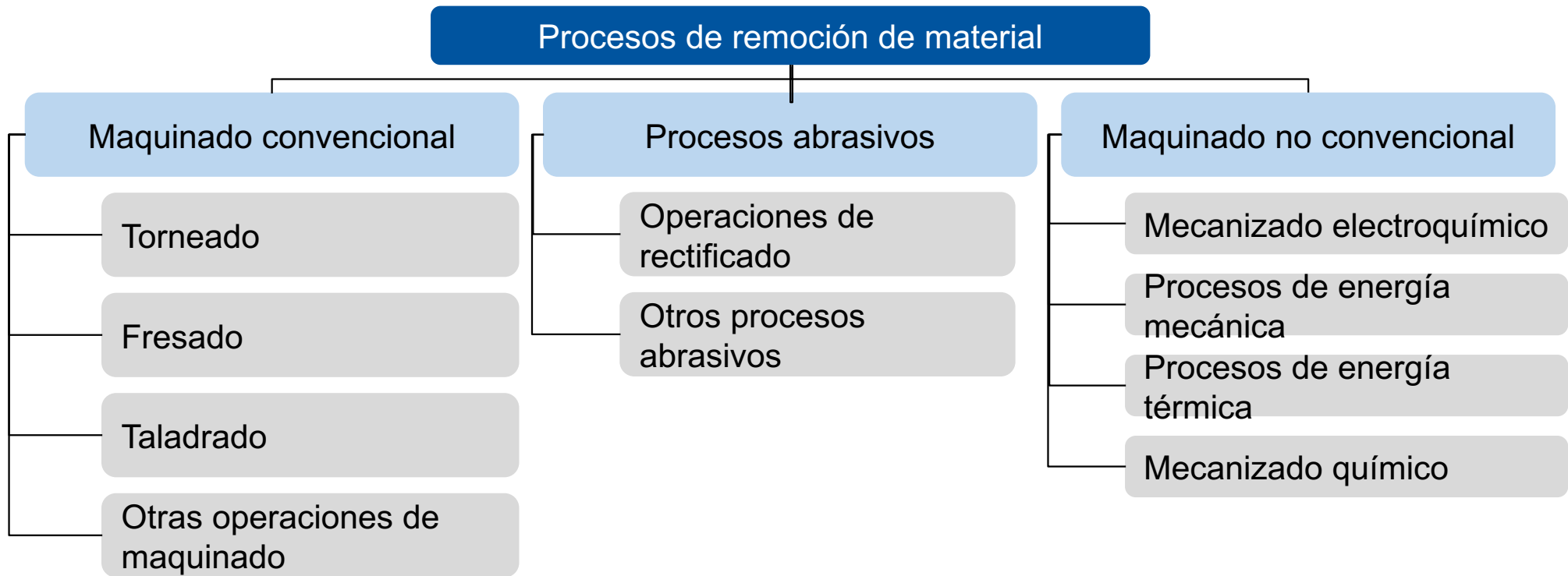
Profesor:

Ricardo Caballero, M.Sc.

✉ ricardo.caballero@utp.ac.pa

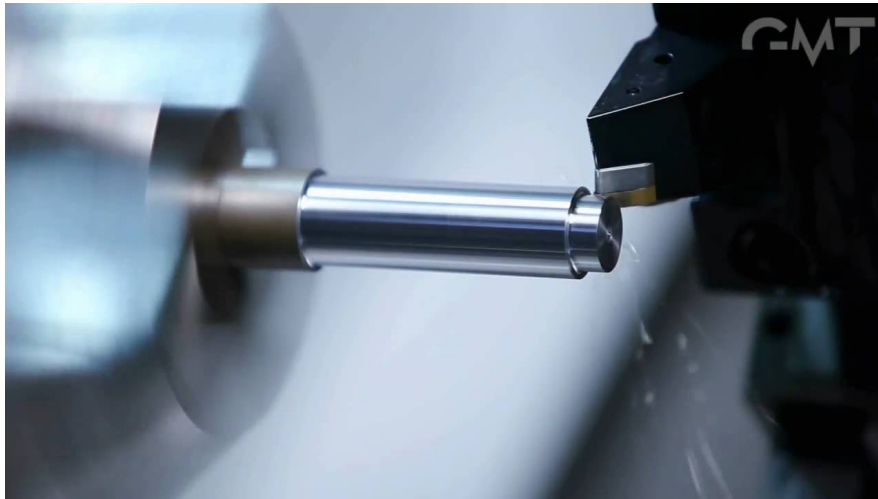


Procesos de remoción de material

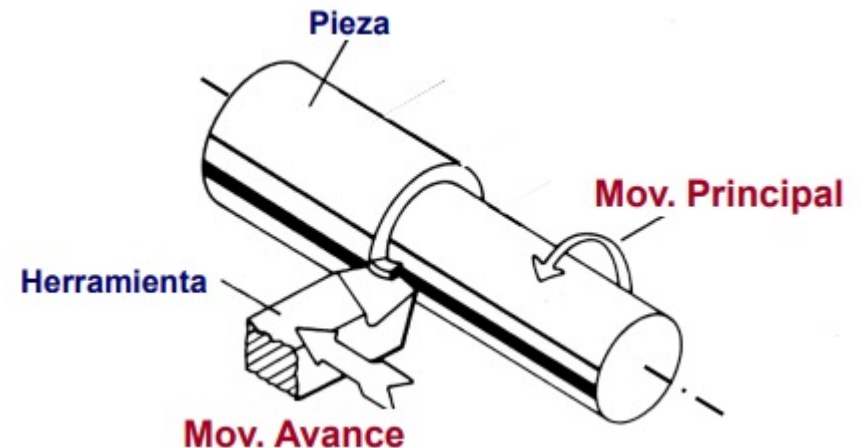


Maquinado

- Proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante la eliminación de material
- Se realiza a partir de productos semielaborados



- En el proceso de maquinado intervienen dos movimientos:
 - Movimiento principal o de corte
 - Movimiento de avance



Importancia del maquinado

Ventajas

- Amplia gama de materiales de trabajo
- Variedad de formas y características geométricas
- Precisión dimensional
- Acabados superficiales de calidad

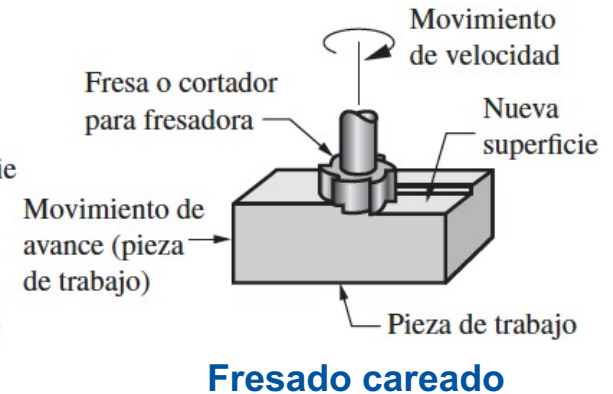
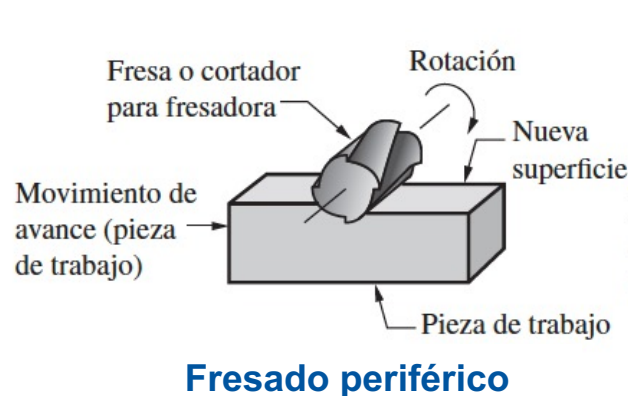
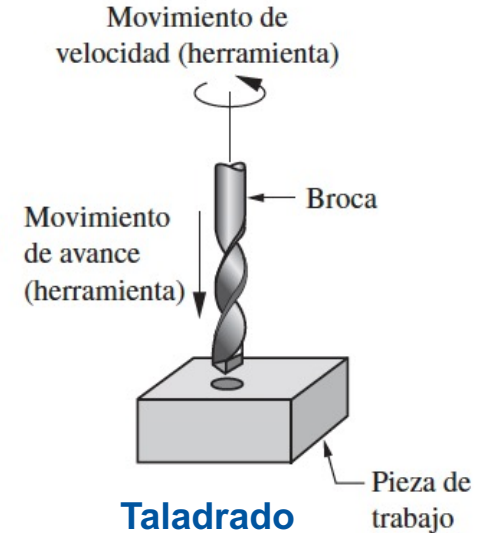
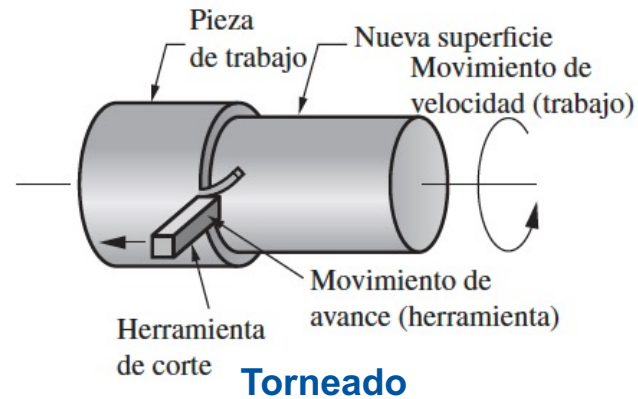
Desventajas

- Desperdicio de material
- Consumo de tiempo

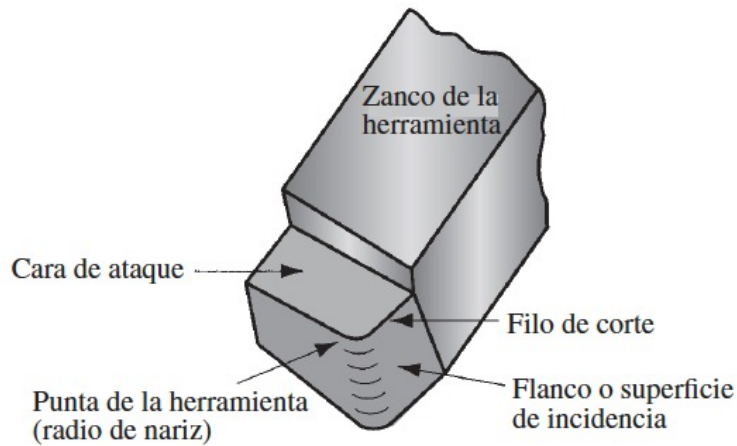
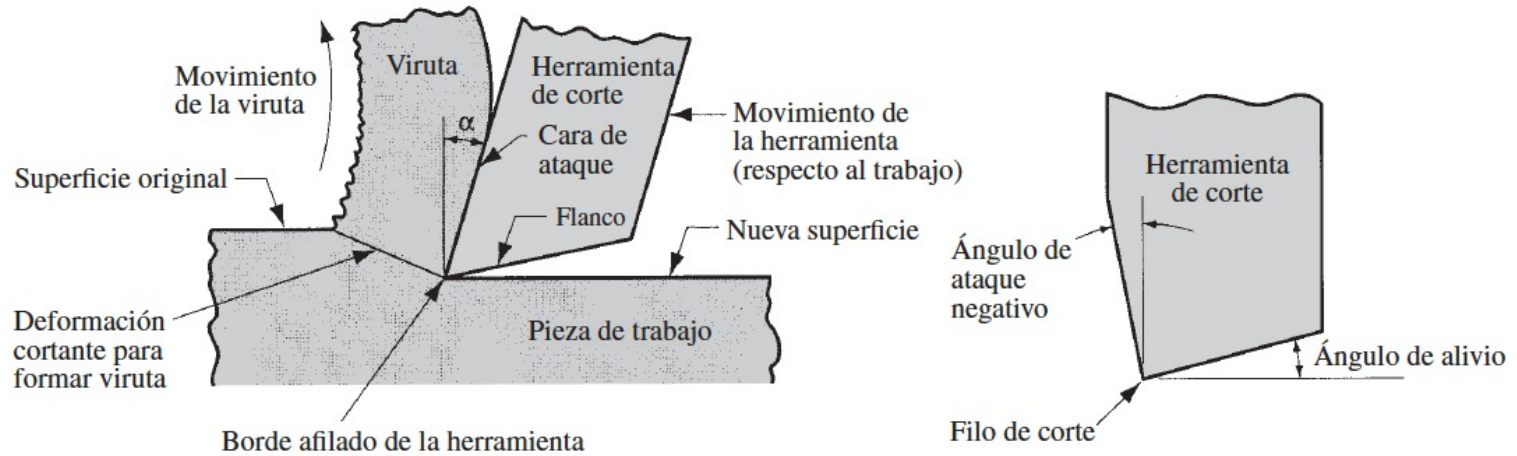


Clasificación de procesos con movimiento principal de rotación

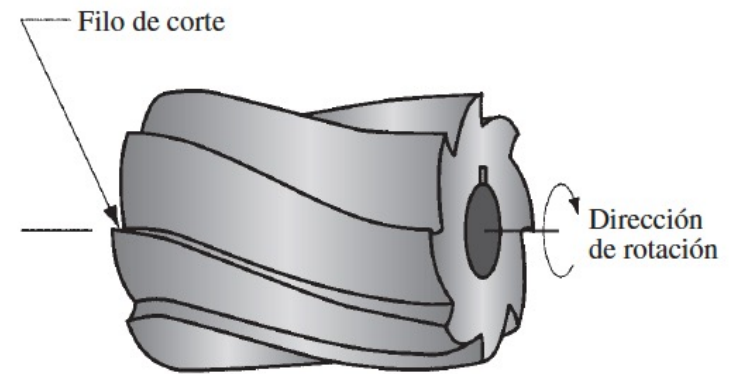
Hay muchas clases de operaciones de maquinado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta configuración geométrica y textura superficial.



Herramienta de corte



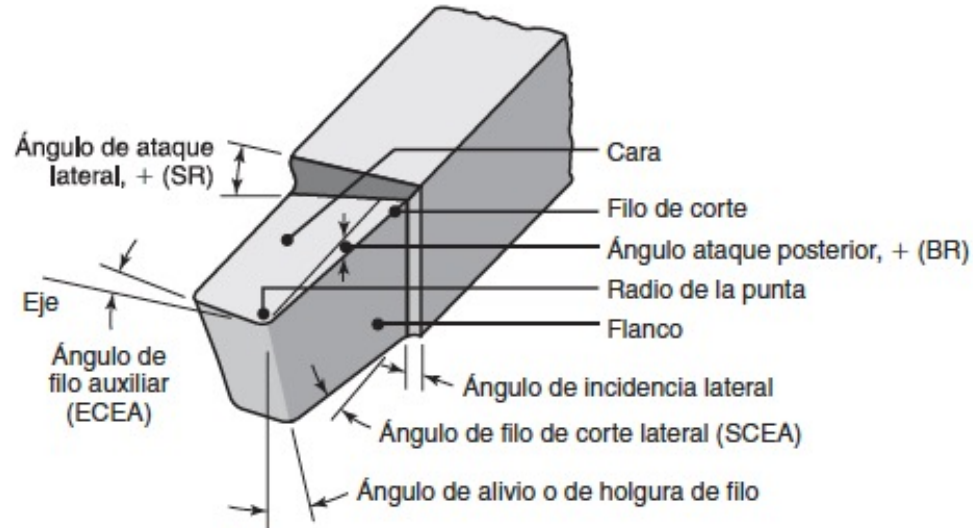
Herramienta de un solo punto



Herramienta de múltiples filos cortantes

Herramienta de corte

Herramienta de corte monofilo



Herramienta de corte con insertos

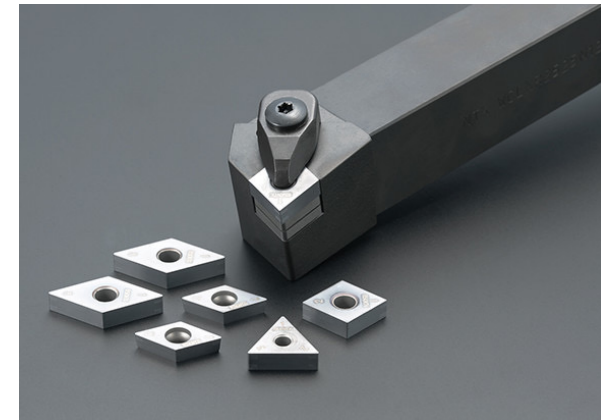
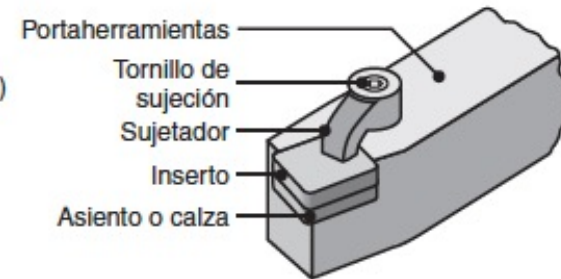
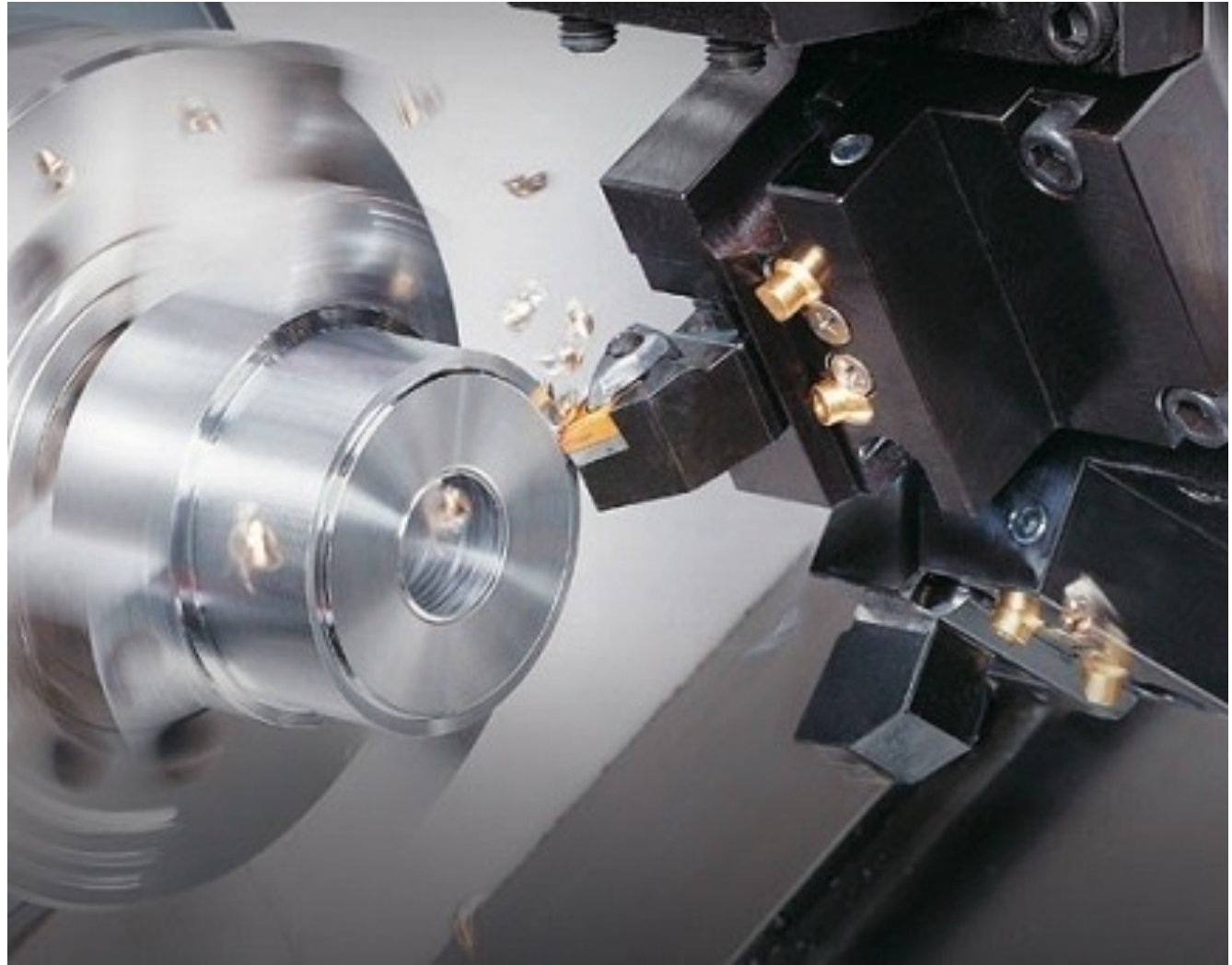


Ilustración esquemática del proceso de corte

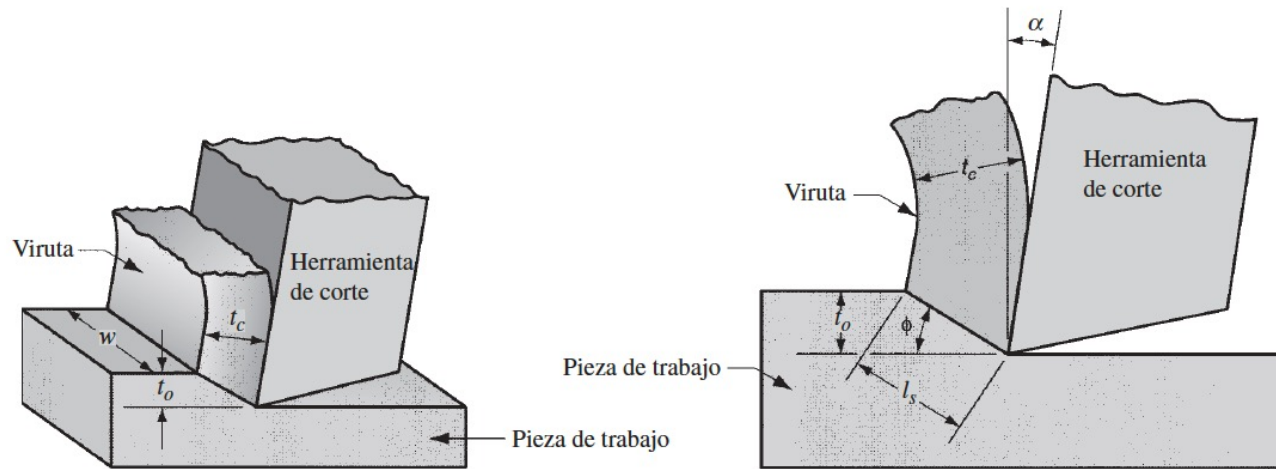


Factores que influyen en las operaciones de maquinado

Parámetro	Influencia e interrelación
<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de corte • Profundidad de corte • Avance • Fluidos de corte 	Fuerza, potencia, aumento de temperatura, vida de la herramienta, tipo de viruta, acabado e integridad de la superficie.
<ul style="list-style-type: none"> • Ángulos de la herramienta 	Todos los anteriores e influencia en la dirección de flujo de la viruta; resistencia del desgaste de la herramienta y a la producción de viruta
<ul style="list-style-type: none"> • Viruta continua 	Buen acabado superficial; fuerzas de corte estables; no es deseable, sobre todo en máquinas herramientas modernas
<ul style="list-style-type: none"> • Formación de borde acumulado 	Mal acabado de la superficie y de su integridad; so es delgado y estable, el borde acumulado puede proteger las superficies de la herramienta
<ul style="list-style-type: none"> • Viruta discontinua 	Deseable por la facilidad de eliminarla; fuerzas de corte fluctuantes; puede afectar el acabado de la superficie; puede ocasionar daño térmico a la superficie de trabajo y generar vibración y movimiento
<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de temperatura 	Influye en la vida de la herramienta, en particular en el desgaste y precisión dimensional de la pieza de trabajo; puede causar daño termino a la superficie de la pieza de trabajo
<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste de la herramienta 	Influye en el acabado y la integridad de la superficie, la precisión dimensional, el aumento de temperatura, y en fuerzas y potencia
<ul style="list-style-type: none"> • Maquinabilidad 	Relacionada con la vida de la herramienta, el acabado superficial, fuerzas y potencia, además del tipo de viruta producida

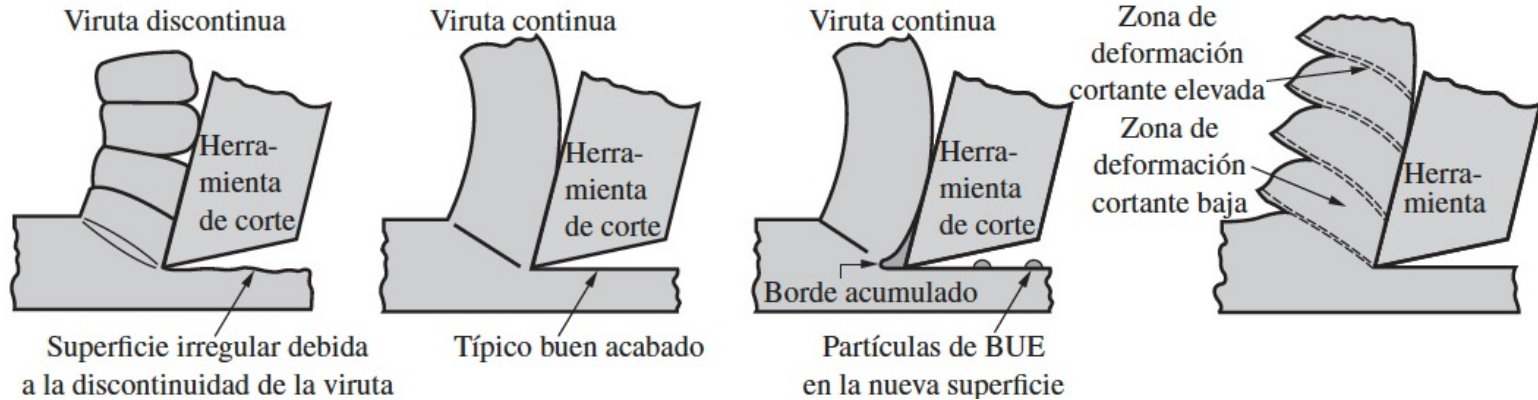
Proceso de formado de virutas

- La geometría viene definida por el ángulo de ataque, el ángulo de alivio y el ángulo cortante o de cizallamiento
- La cuña penetra el material y ocasiona deformaciones plásticas y elásticas y separación de material
- La viruta fluye a través de la superficie de ataque o cara de incidencia



Corte ortogonal

Tipos de virutas



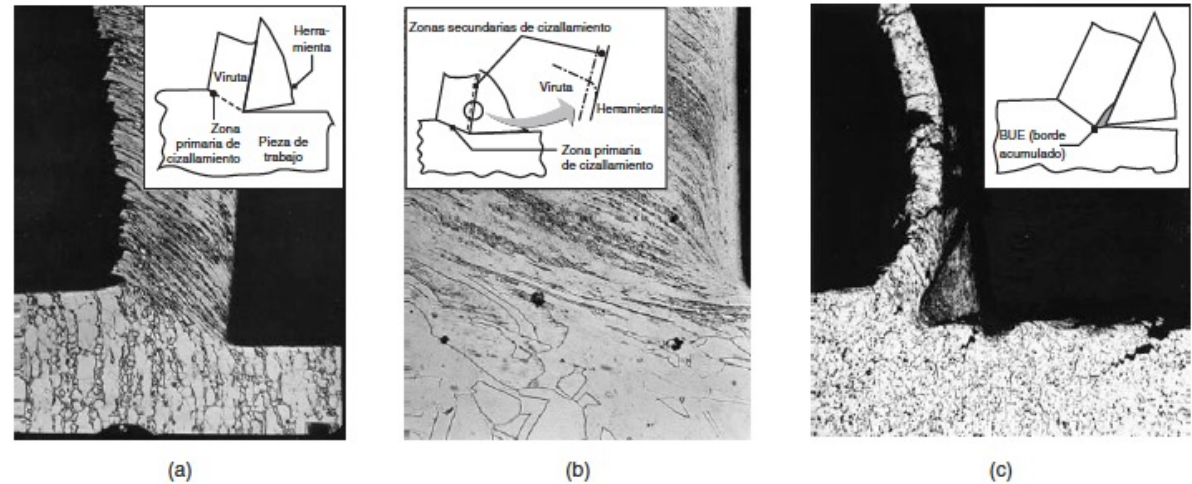
Viruta discontinua. se forma frecuentemente en segmentos. Esto tiende a impartir una textura irregular a la superficie maquinada. Una alta fricción herramienta-viruta y los avances y profundidades grandes de corte promueven la formación de este tipo de viruta.

Viruta continua. cuando se forma este tipo de viruta se obtiene un buen acabado superficial. Un borde cortante bien afilado en la herramienta y una baja fricción herramienta-viruta propician la formación de virutas continuas. pueden generar problemas respecto al desecho de viruta o enredarse alrededor de la herramienta.

Viruta continua con borde acumulado. cuando se maquinan materiales dúctiles a velocidades bajas o medias de corte, la fricción entre la herramienta y la viruta tiende a causar la adhesión de porciones del material de trabajo en la cara de ataque de la herramienta cerca del filo cortante. Esta formación se llama borde acumulado (BUE, Built-Up Edge).

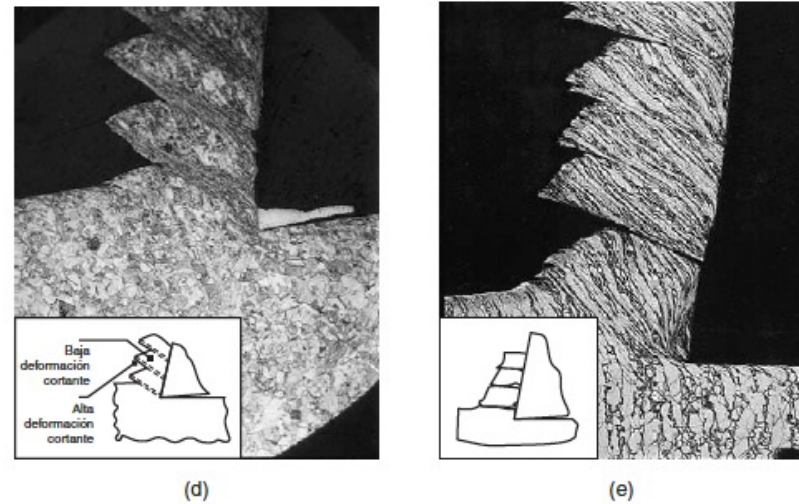
Viruta dentada (escalonada) son semicontinuas en el sentido que poseen una apariencia de diente de sierra. Este tipo está asociado más cercanamente con ciertos metales difíciles de maquinar como aleaciones de titanio

Tipos de virutas

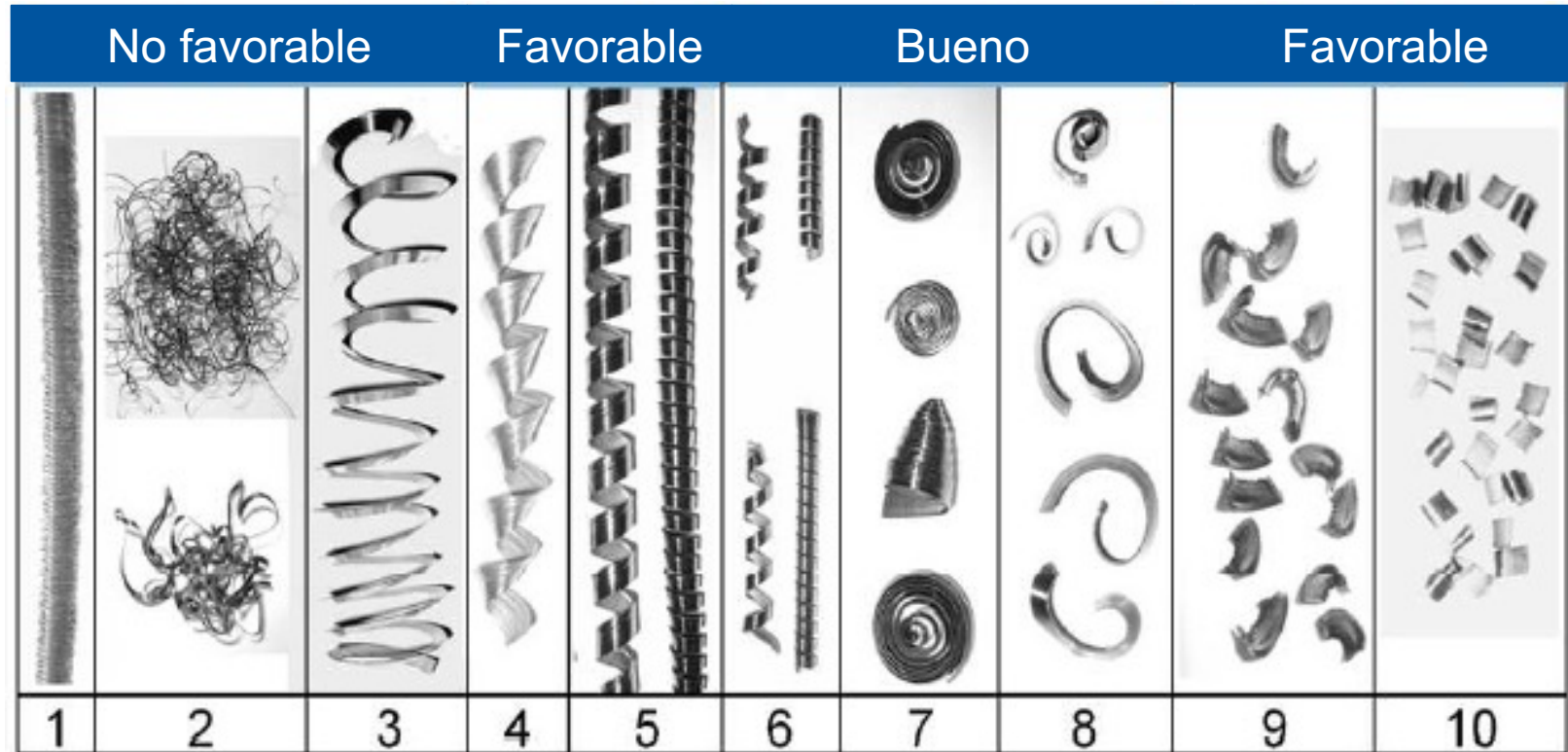


En la imagen se observa

- a. Viruta continua con zona de corte angosta, recta y primaria
- b. Viruta continua con zona de corte en la interfase viruta-herramienta
- c. Viruta de borde acumulado
- d. Viruta segmentada
- e. Viruta discontinua



Tipos de virutas



¿Qué experimenta la herramienta y el material durante el cortado?

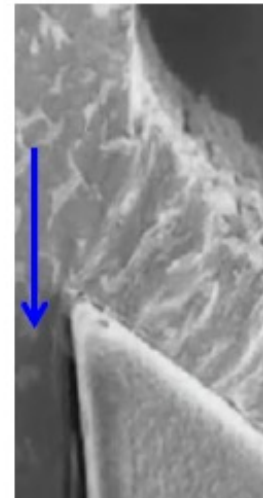
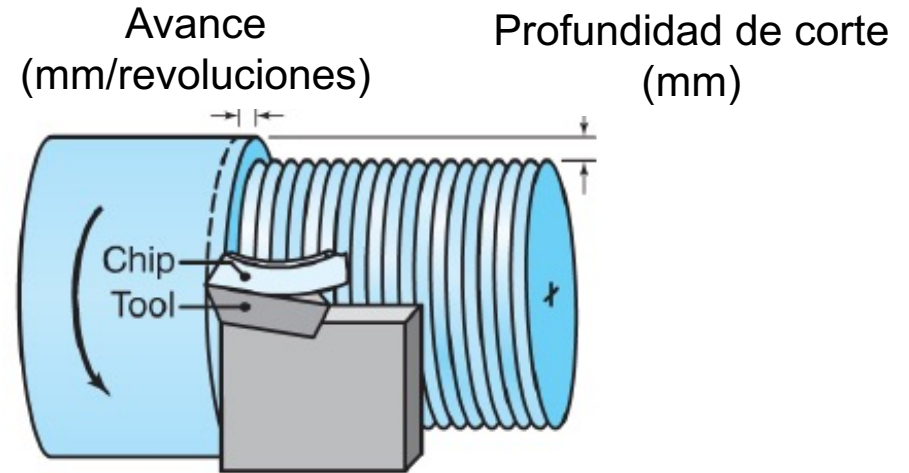
Fuerza

Movimiento (deslizamiento y vibración)

Calor



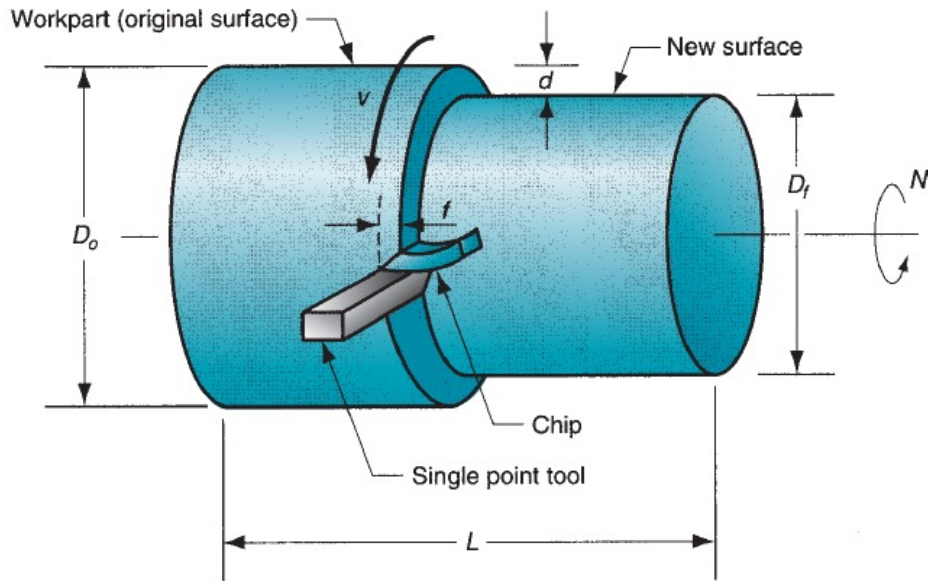
- Esto conduce a la deformación de la pieza de trabajo y el desgaste de la herramienta.
- Todos estos factores influyen en la calidad de la pieza



Ejemplos de piezas mecanizadas



Parámetros de corte en torneado



- Tasa de remoción de material (MRR)

$$MRR = \pi D_{prom} d f N$$

$$MRR = d f v$$

- Velocidad de rotación

$$N = \frac{v}{\pi D_o}$$

- Profundidad de corte

$$d = \frac{D_o - D_f}{2}$$

- Velocidad de avance

$$f_r = f N$$

- Tiempo de corte o maquinado

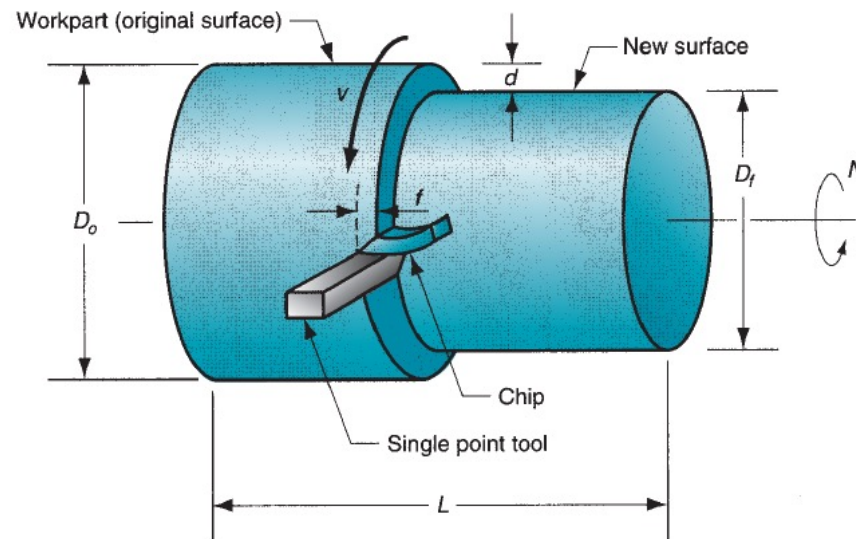
$$T = \frac{l}{f_r} \quad \triangleright \quad T = \frac{\pi D_o l}{f v}$$

Problema 1

Una pieza de trabajo cilíndrica de 200 mm de diámetro y 700 mm de largo va a ser cilindrada en un torno cuya velocidad de corte es de 2.3 m/s, su avance es de 0.32 mm/rev y su profundidad de corte de 1.8 mm

Determinar

- Tiempo de corte
- Tasa de remoción de material



Problema 1: Solución

Determinar

a. Tiempo de corte

$$T = \frac{\pi D_o l}{fv}$$

$$T = \frac{\pi(200 \text{ mm})(700 \text{ mm})}{(0.32 \text{ mm})(138,000 \text{ mm/min})}$$

$$T = 9,96 \text{ minutos}$$

Problema 1: Solución

Determinar

b. Tasa de remoción de material

$$MRR = dfv$$

$$MRR = (1.8 \text{ mm})(0.32 \text{ mm})(138,000 \text{ mm/min})$$

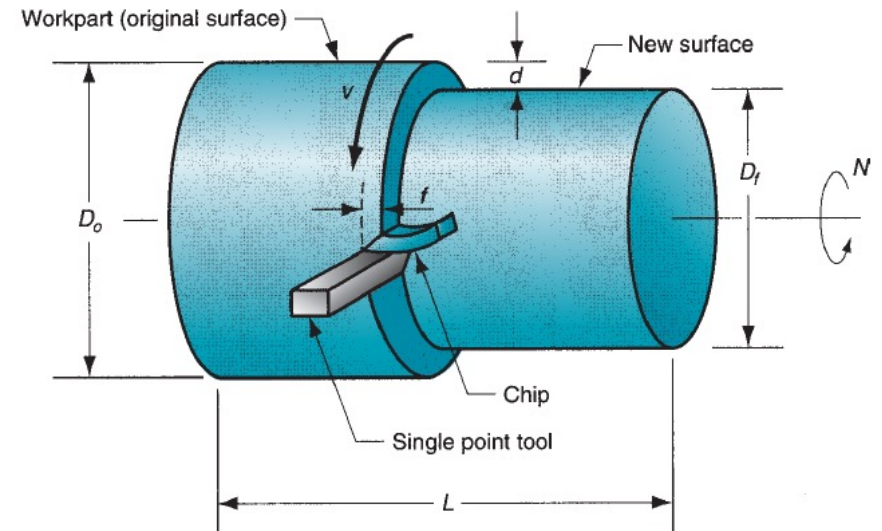
$$MRR = 79488 \text{ mm}^3/\text{min}$$

Problema 2

Se reduce a 0.480 pulgadas de diámetro una barra de acero por medio de un proceso de torneado. La barra tiene una longitud de 6 pulgadas de largo y 0.5 pulgadas de diámetro. El husillo rota a 400 rpm y la herramienta se desplaza con una velocidad de avance de 8 pulgadas/min

Determinar

- Velocidad de corte con el diámetro inicial de la pieza
- Tasa de remoción de material
- Tiempo de corte



Problema 2: Solución

Determinar

- Velocidad de corte con el diámetro inicial de la pieza

$$N = \frac{v}{\pi D_o}$$

$$v = N\pi D_o$$

$$v = (400 \text{ rpm}) (0.5 \text{ pulg})\pi$$

$$v = 628 \text{ pulg/min}$$

Problema 2: Solución

Determinar

b. Tasa de remoción de material

$$d = \frac{D_o - D_f}{2} = \frac{0.5 - 0.48}{2} = 0.01 \text{ pulg}$$

$$f_r = fN$$

$$f = \frac{f_r}{N} = \frac{8 \text{ pulg/min}}{400 \text{ rpm}} = 0.02 \text{ pulg/min}$$

$$MRR = dfv$$

$$MRR = (0.01 \text{ pulg})(0.02 \text{ pulg})(628 \text{ pulg/min})$$

$$MRR = 0.12 \text{ pulg}^3/\text{min}$$

Problema 2: Solución

Determinar

c. Tiempo de corte

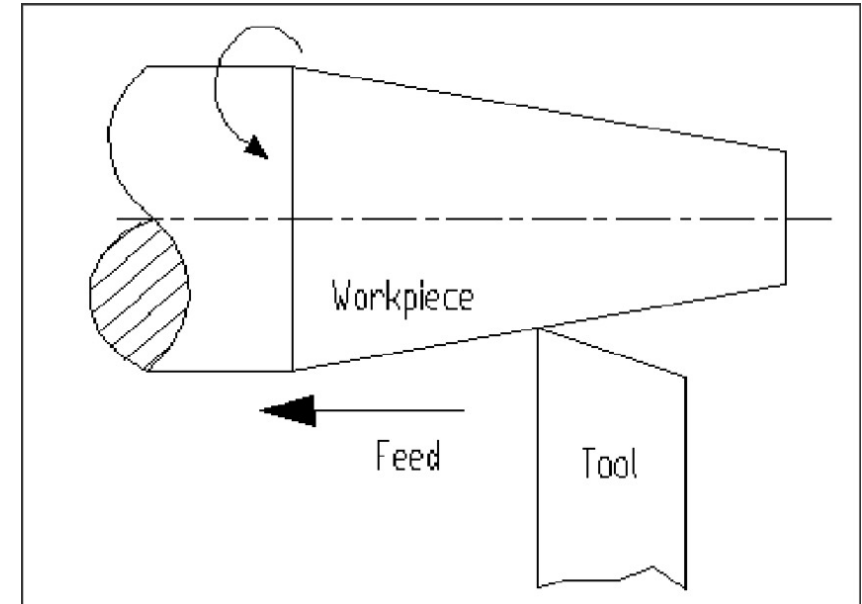
$$T = \frac{l}{f_r}$$

$$T = \frac{6 \text{ pulg}}{8 \text{ pulg/min}}$$

$$T = 0.75 \text{ minutos}$$

Problema 3

Una superficie cónica debe tornearse en un torno automático. La pieza de trabajo tiene 750 mm de largo con diámetros mínimo y máximo de 100 mm y 200 mm en extremos opuestos. Los controles automáticos del torno permiten mantener la velocidad de la superficie a un valor constante de 200 m / min ajustando la velocidad de rotación en función del diámetro de la pieza. Avance = 0,25 mm / rev y profundidad de corte = 3,0 mm. Ya se ha formado la geometría rugosa de la pieza, y esta operación será el corte final.



Determine

- el tiempo requerido para tornearse el cono y
- las velocidades de rotación al principio y al final del corte

Problema 3: Solución

Tiempo requerido para torneear el cono

$$MRR = dfv$$

$$MRR = \left(200 \frac{m}{min}\right) \left(10^3 \frac{mm}{m}\right) (0.25 mm)(3 mm) = 150,000 \frac{mm^3}{min}$$

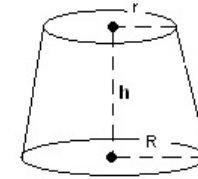
$$\text{Área de la pieza} = \pi(R_1 + R_2)\sqrt{h^2 + (R_1 - R_2)^2}$$

$$\text{Área de la pieza} = \pi(100 + 50)\sqrt{750^2 + (100 - 50)^2}$$

$$\text{Área de la pieza} = 354,214 mm^2$$

$$\text{Volumen de corte} = Ad = 354,214 mm^2 (3 mm) = 1,062,641 mm^3$$

$$T = \frac{V}{MRR} = \frac{1,062,641 mm^3}{150,000 mm^3/min} = 7.084 min$$



$$\text{Area} = \pi(R_1 + R_2)\sqrt{(R_1 - R_2)^2 + h^2}$$

$$\text{Volume} = \frac{\pi}{3}h(R_1^2 + R_2^2 + R_1 * R_2)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= 100 mm, \\ R_2 &= 50 mm \\ h &= 750 mm \end{aligned}$$

Problema 3: Solución

Las velocidades de rotación al principio y al final del corte

Al inicio del corte $D = 100\text{mm}$

$$N = \frac{v}{\pi D_o}$$

$$N = \frac{200,000}{\pi 100}$$

$$N = 636.6 \text{ rev/min}$$

Al final del corte $D = 200\text{mm}$

$$N = \frac{v}{\pi D_o}$$

$$N = \frac{200,000}{\pi 200}$$

$$N = 318.3 \text{ rev/min}$$

Máquina herramienta

- Proceso de mecanizado con un borde de corte definido geoméricamente, un movimiento de corte giratorio y un movimiento de avance traslacional transversal arbitrario.

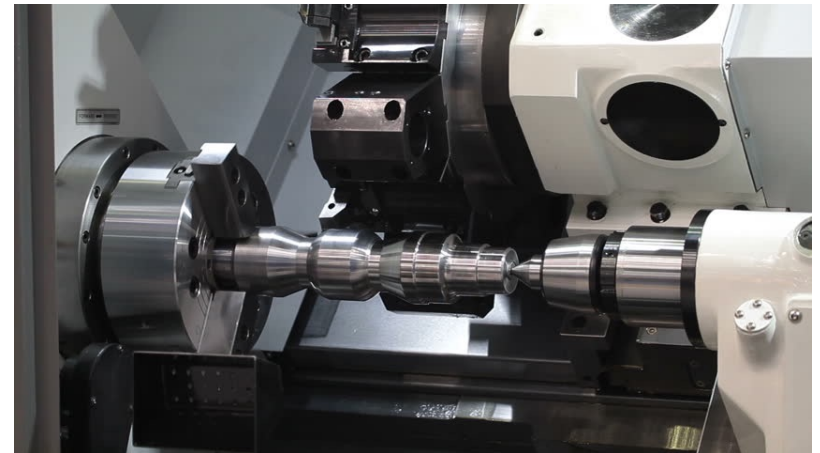


Ilustración esquemática de los componentes de un torno

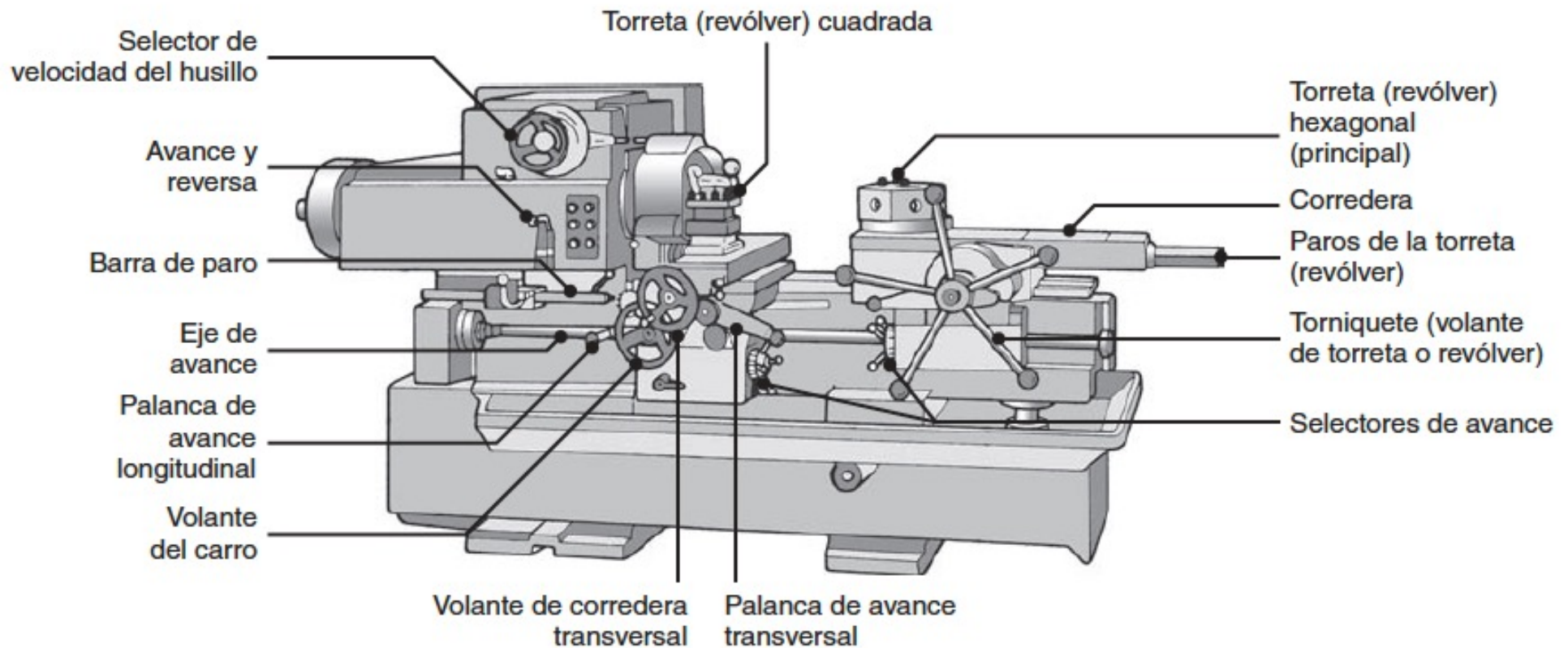
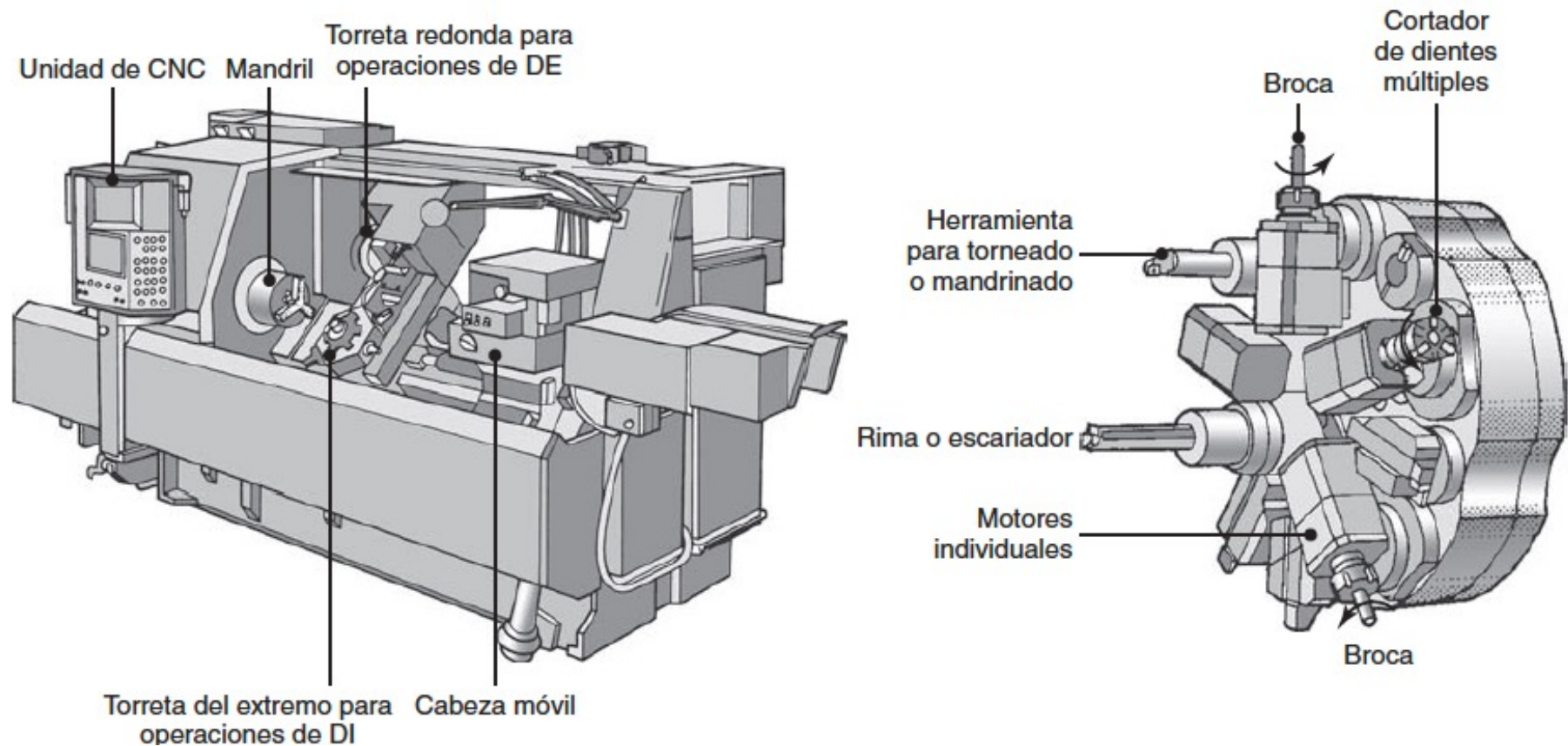


Ilustración esquemática de los componentes de un torno



Fuerzas en el corte de metales

La fuerza normal a la fricción N es perpendicular a la fuerza de fricción. Estos dos componentes se pueden utilizar para definir el coeficiente de fricción

$$\mu = \frac{F}{N}$$

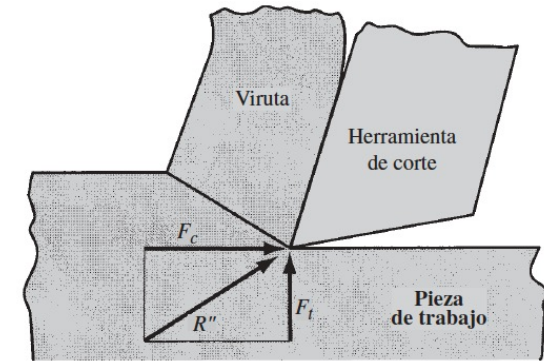
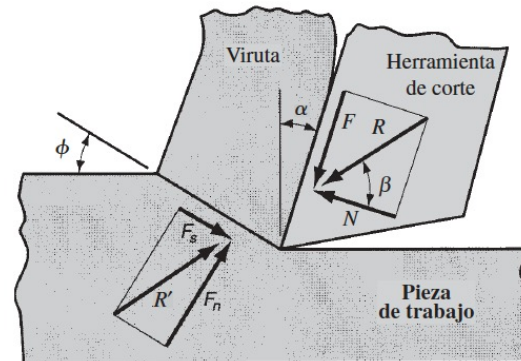
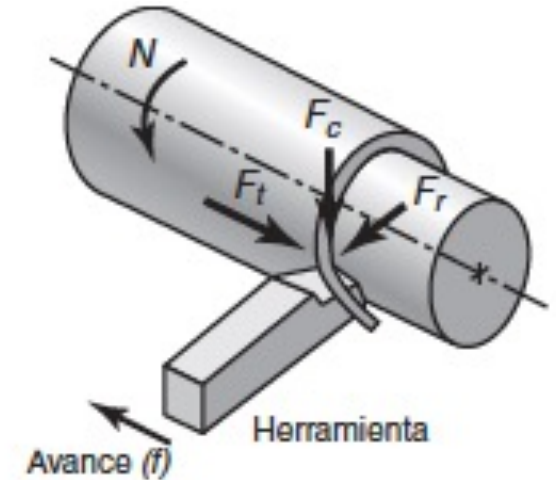
La fuerza de fricción y su fuerza normal se pueden sumar vectorialmente para formar una fuerza resultante R , la cual se orienta en un ángulo β , llamado ángulo de fricción. El ángulo de fricción se relaciona con el coeficiente de fricción de la manera siguiente:

$$\mu = \tan \beta$$

La **fuerza cortante F_s** es la fuerza que causa la deformación de corte que ocurre en el plano de corte y la **fuerza normal a la cortante F_n** es normal a la fuerza cortante.

Esfuerzo cortante que actúa a lo largo del plano de corte entre la pieza y la viruta

$$\tau = \frac{F_s}{A_s}$$



Fuerzas en el corte de metales

El área del plano de corte A_s se puede calcular como

$$A_s = \frac{t_o w}{\sin \phi}$$

La **fuerza de corte F_c** va en dirección del corte, la misma dirección de la velocidad de corte v , y la **fuerza de empuje F_t** es perpendicular a la fuerza de corte y esta asociada con el espesor de la viruta t_o .

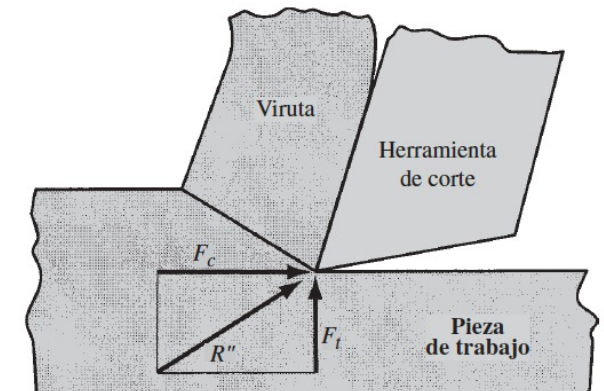
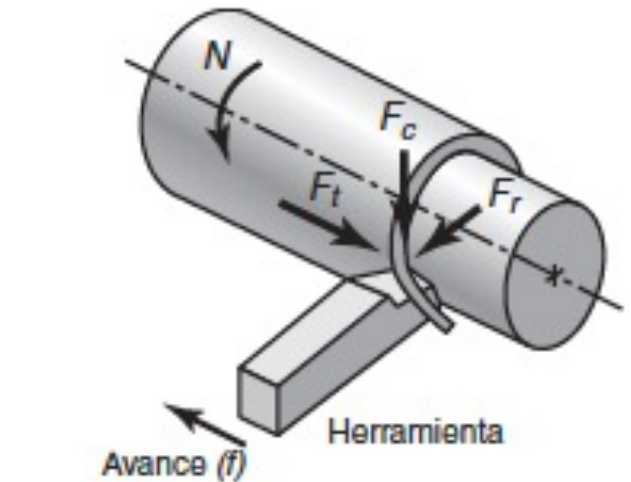
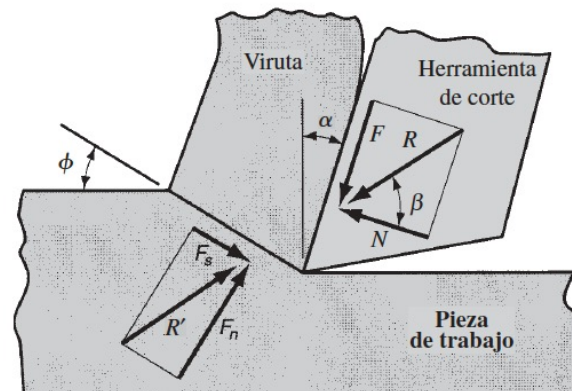
Se pueden deducir ecuaciones para relacionar las cuatro fuerzas componentes

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi$$

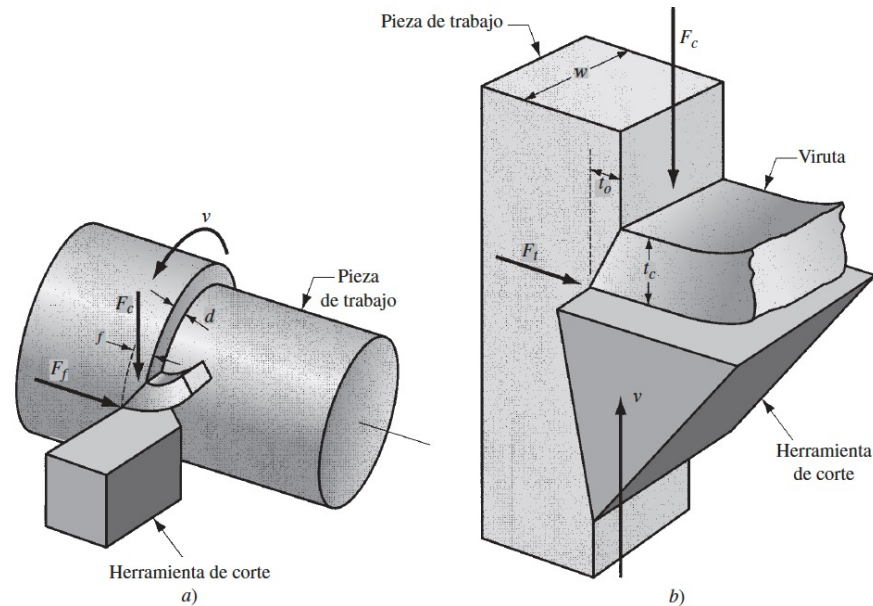


Fuerzas en el corte de metales

Eugene Merchant dedujo una importante relación en el corte de metal.

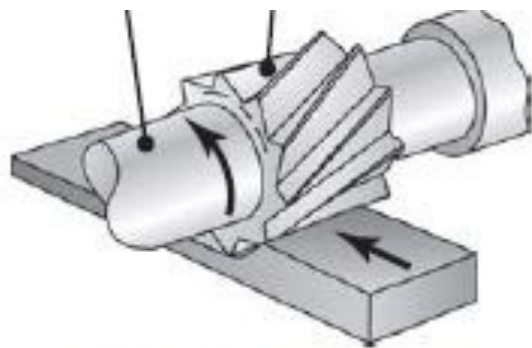
La deducción está basada en la suposición de corte ortogonal, pero en su validez general se extiende a operaciones de maquinado en tres dimensiones. Merchant empezó con la definición de esfuerzo cortante, expresado mediante la siguiente relación deducida de la combinación de las ecuaciones

Una de las suposiciones en que se basa la ecuación de Merchant es que la resistencia al corte del material de trabajo es una constante a la que no le afecta la velocidad de deformación, la temperatura y otros factores.

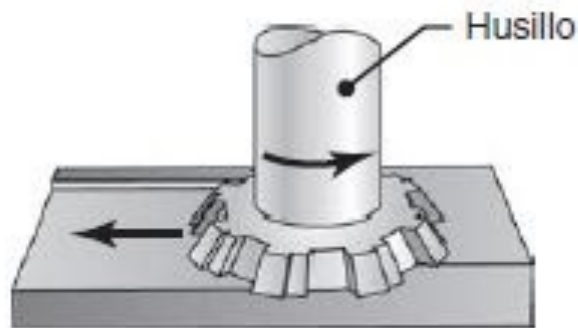


Fresado

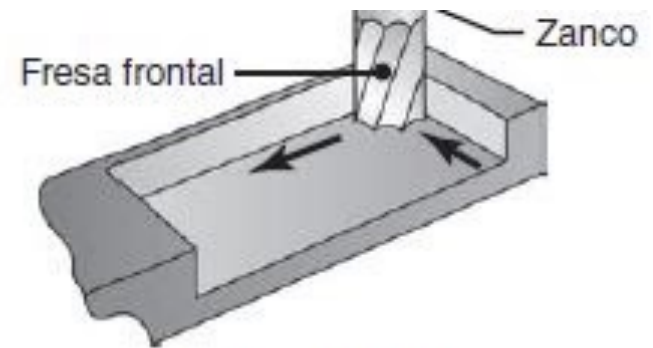
- Método de producción de mecanizado con movimiento de corte circular de una herramienta generalmente de dientes múltiples para producir superficies de piezas de trabajo arbitrarias.



(a) Fresado periférico

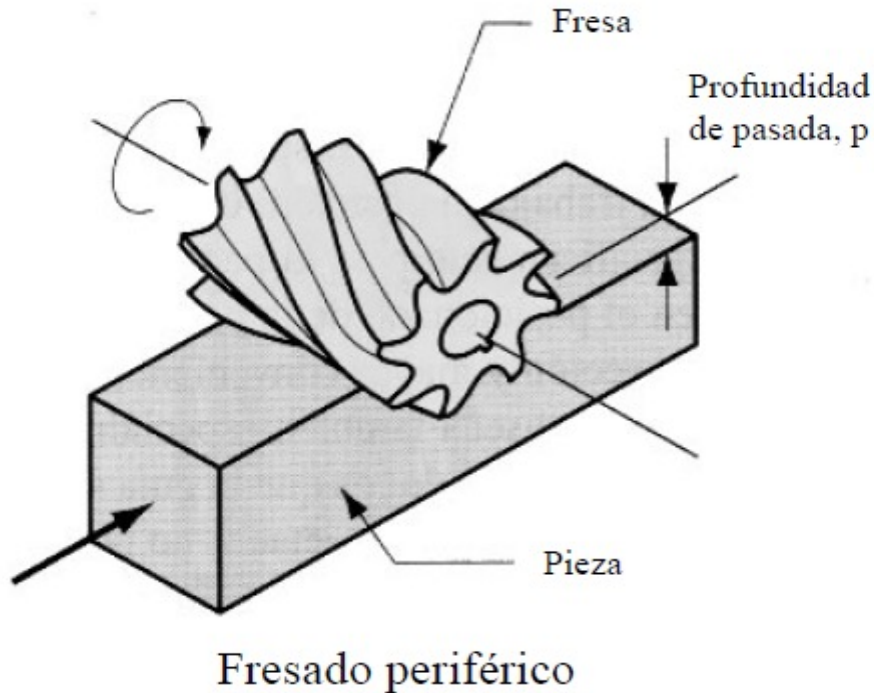


(b) Fresado de careado

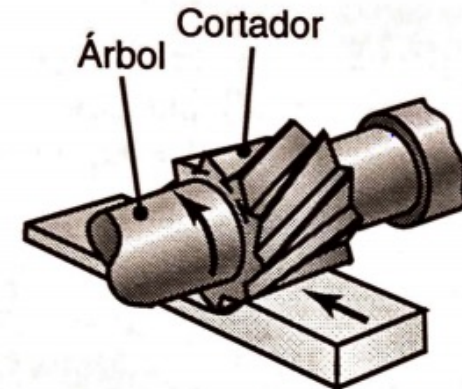


(c) Fresado frontal

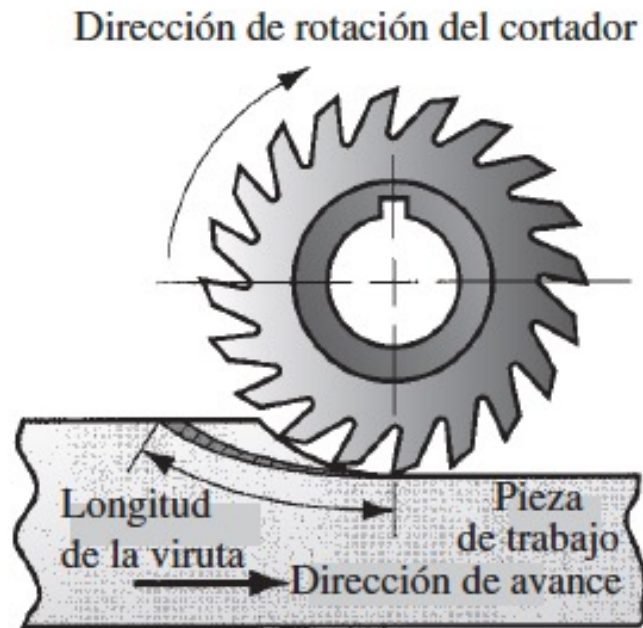
Fresado periférico



- El eje de la rotación del cortador es paralelo a la superficie de la pieza de trabajo.
- El cuerpo del cortador tiene múltiples dientes a lo largo de su circunferencia
- Los cortadores para el fresado periférico pueden tener ya sea dientes rectos o helicoidales

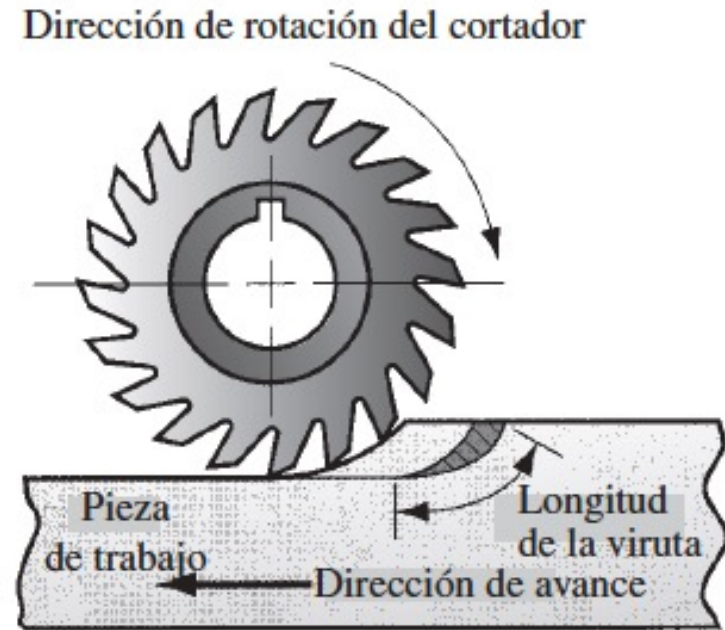


Fresado periférico: Fresado convencional y fresado concurrente



Fresado convencional

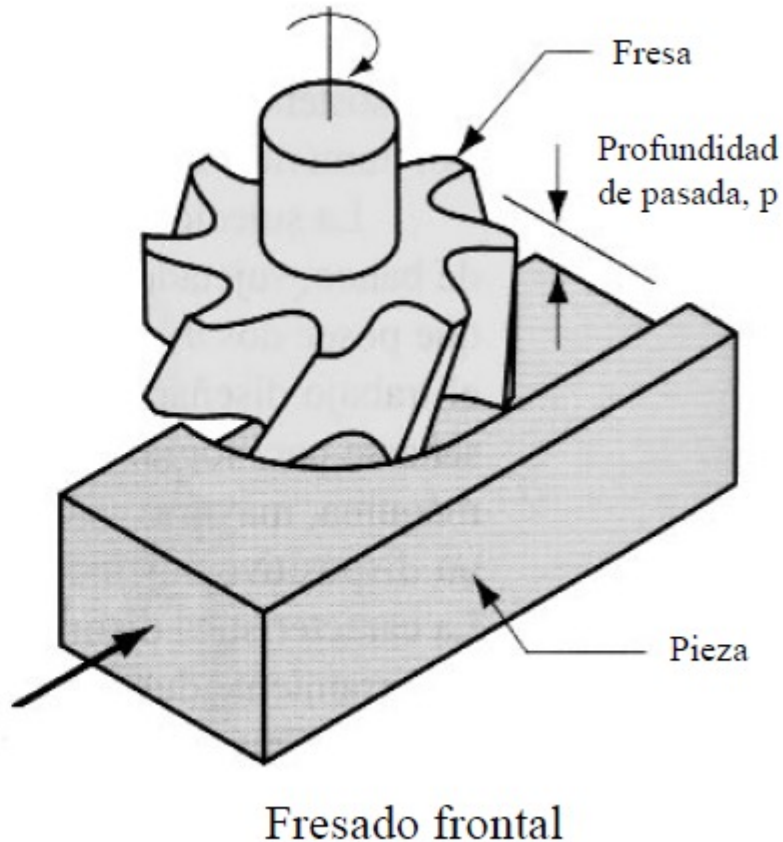
- También llamado fresado hacia arriba
- El máximo espesor de la viruta está al final del corte, a medida que el diente deja la superficie de la pieza de trabajo.
- Este es el método más común



Fresado concurrente,

- Conocido también como fresado hacia abajo,
- El corte comienza en la superficie de la pieza de trabajo donde la viruta es más gruesa.

Fresado refrentado o careado (frontal)

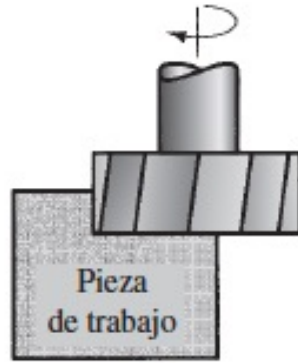


- El cortado se monta en un husillo que tiene un eje de rotación perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo y remueve material.
- Debido al movimiento relativo entre los dientes del cortador y la pieza de trabajo, el fresado dentado deja marcas de avance en la superficie maquinada, de manera parecida a las que dejan las operaciones de torneado
- Es una operación importante y común de maquinado debido a su versatilidad y capacidad para producir varios perfiles y superficies curvas.
- El cortador, llamado fresa frontal, tiene ya sea un eje recto (para tamaños pequeños de cortador) o un eje con estrechamiento (para tamaños grandes) y está montado en el husillo de la fresadora

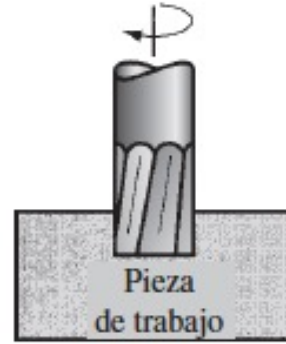
Fresado frontal



Fresado refrentado convencional



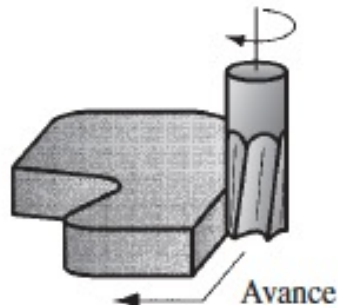
Fresado refrentado parcial



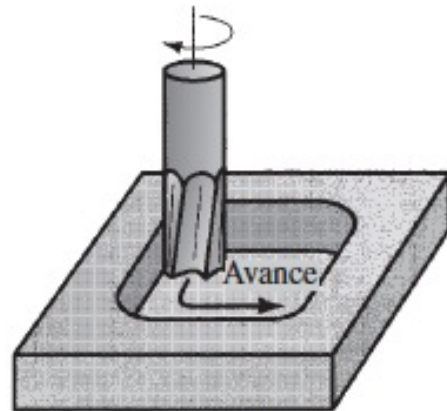
Fresado frontal



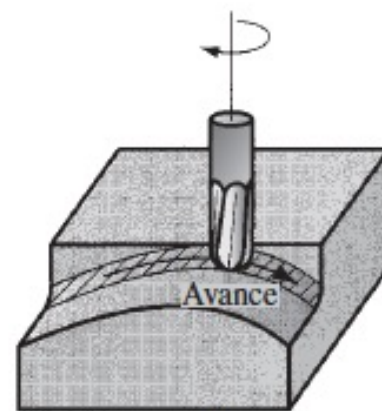
Fresas frontales



Fresado de perfiles

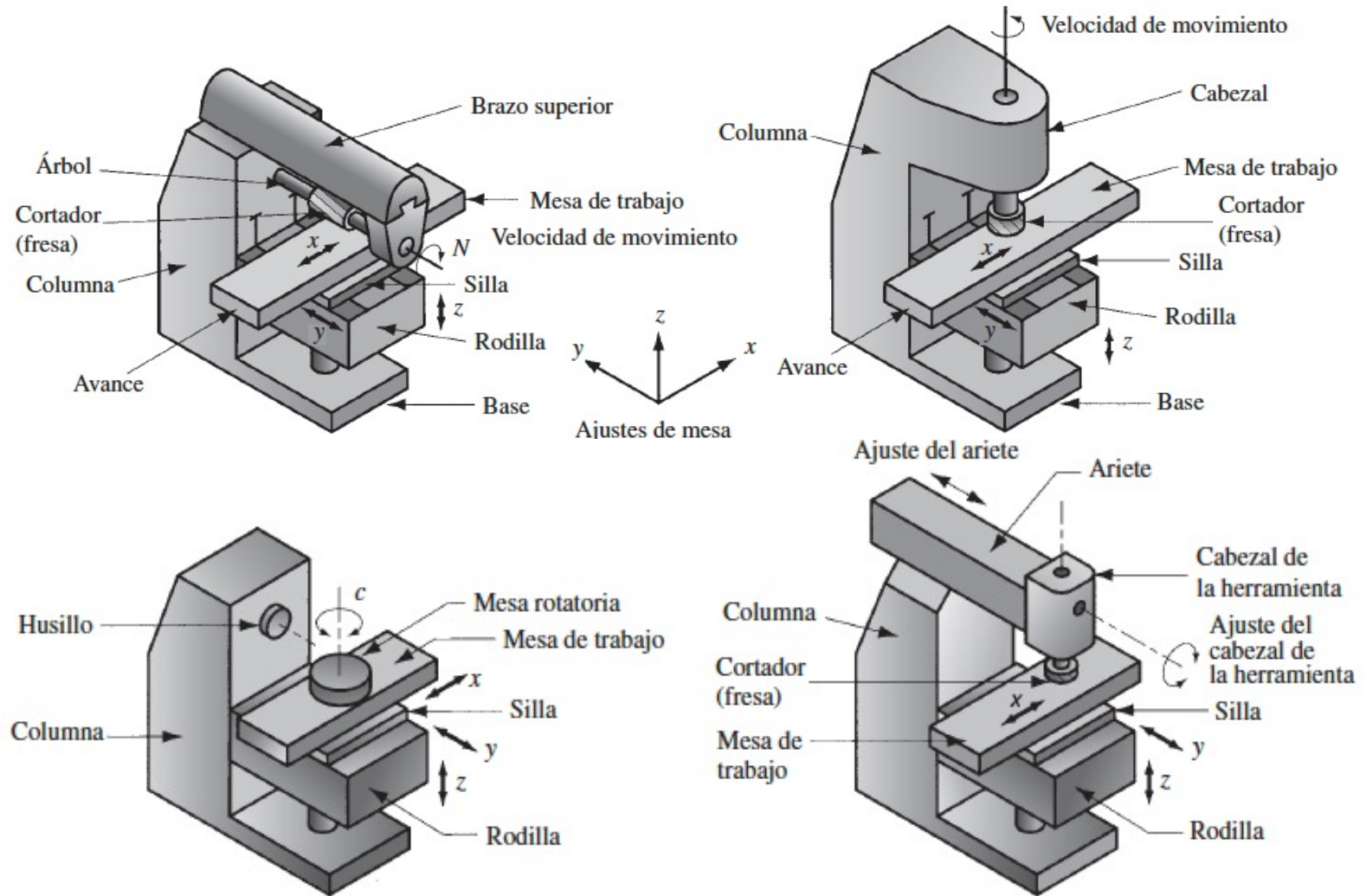


Fresado de cajas o cavidades



Fresado de contorno superficial

Máquinas fresadoras



Condiciones de corte en el fresado

La velocidad de corte se determina con el diámetro exterior de la fresa. Ésta se puede convertir a la **velocidad de rotación del husillo** usando una fórmula que para este tiempo debe ser familiar al lector

$$N = \frac{v}{\pi D_o}$$

El avance f en fresado se determina por lo general como el avance por diente cortante, llamado carga de viruta, y representa el tamaño de la viruta formada por cada filo de corte. Esto se puede convertir a **velocidad de avance** tomando en cuenta la velocidad del husillo y el número de dientes en la fresa

$$f_r = N n_t f$$

donde f_r = velocidad de avance en mm/min (pulg/min); N = velocidad del husillo en rev/min; n_t = número de dientes en la fresa, y f = carga de viruta en mm/diente (pulg/diente).

La **tasa de remoción de material** en el fresado se determina usando el producto del área de la sección transversal del corte por la velocidad de avance. Por consiguiente, si una operación de fresado de bloque corta una pieza de trabajo con ancho w a una profundidad d , la velocidad de remoción de material es

$$MRR = w d f_r$$

se puede aplicar al fresado frontal, fresado lateral, fresado refrentado y otras operaciones de fresado, haciendo los ajustes apropiados en el cálculo del área de la sección recta del corte.

Condiciones de corte en el fresado

El tiempo requerido para fresar una pieza de trabajo de longitud L debe tomar en cuenta la distancia de aproximación requerida para insertar completamente la fresa. Para determinar el tiempo de ejecución de una operación de fresado de bloque, la distancia de aproximación A para alcanzar la velocidad de corte completo se determina

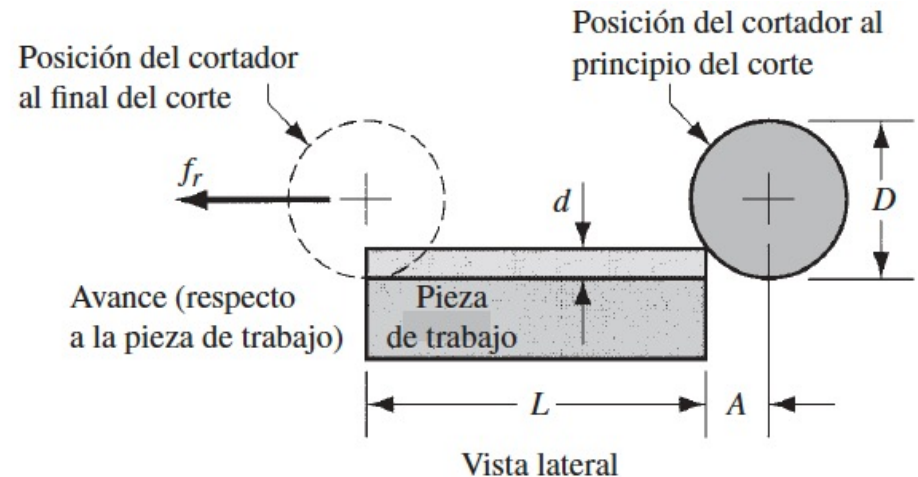
$$A = \sqrt{d(D - d)}$$

donde d = profundidad de corte, mm (pulg),
y D = diámetro de la fresa, mm (pulg).

Por tanto, el **tiempo T_m en el que el cortador se encuentra fresando la pieza** es

$$T = \frac{L + A}{f_r}$$

Fresado de bloque (periférico)



Condiciones de corte en el fresado

En el fresado refrentado, cuando la fresa se centra sobre una pieza de trabajo rectangular, para que la fresa alcance el ancho completo de la pieza de trabajo debe viajar una distancia de aproximación dada por

$$A = 0.5(D - \sqrt{(D^2 - w^2)})$$

donde D = diámetro de la fresa, mm (pulg) y w = ancho de la pieza de trabajo, mm (pulg).

Si $D = w$, entonces la ecuación se reduce a $A = 0.5D$.

Y si $D < w$, entonces se corta una ranura en la pieza de trabajo y $A = 0.5D$.

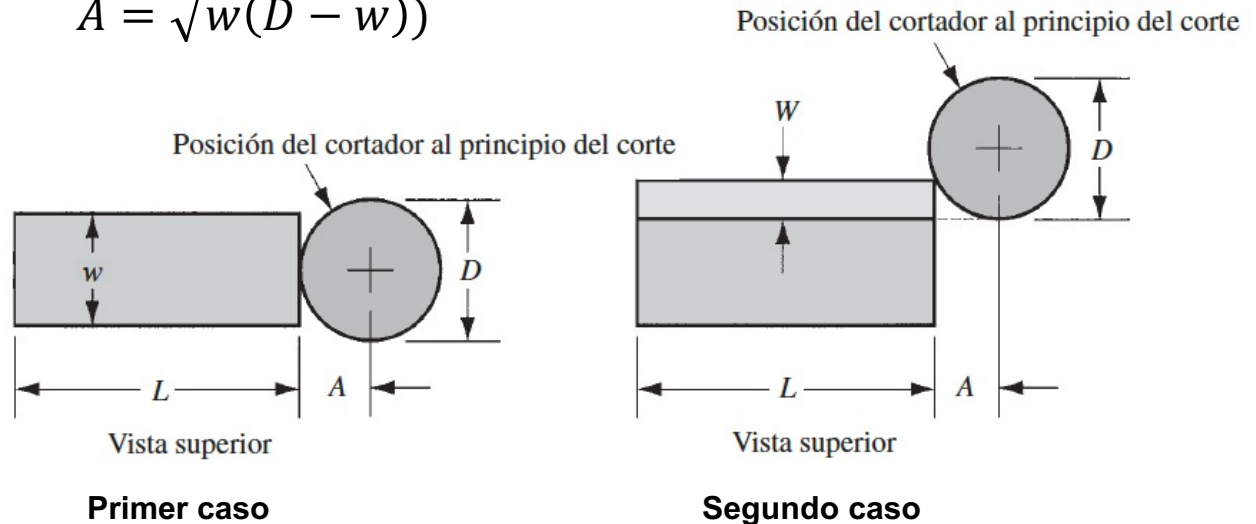
El segundo caso es cuando la fresa sobresale a uno de los lados de la pieza de trabajo. En este caso, las distancias de aproximación y la distancia adicional están dadas por

$$A = \sqrt{w(D - w)}$$

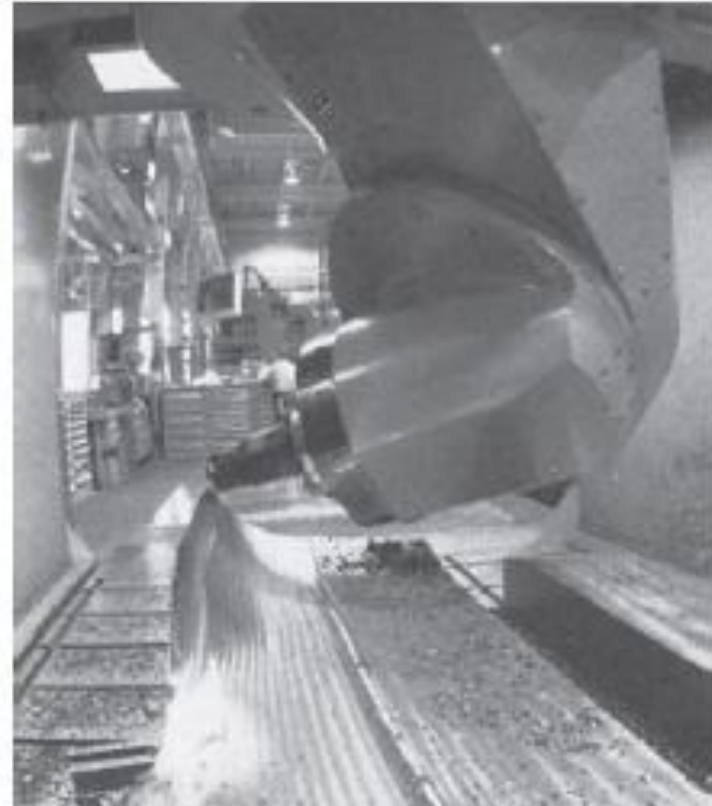
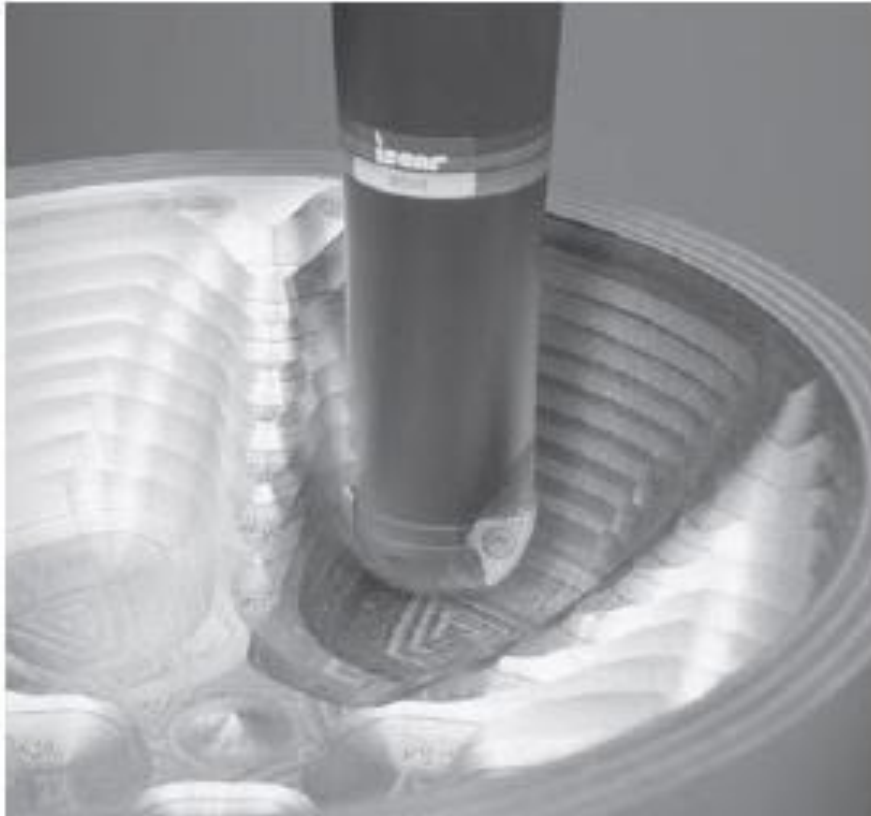
donde w = ancho del corte, mm (pulg).

El tiempo de maquinado en cada caso está dado por

$$T = \frac{L + A}{f_r}$$

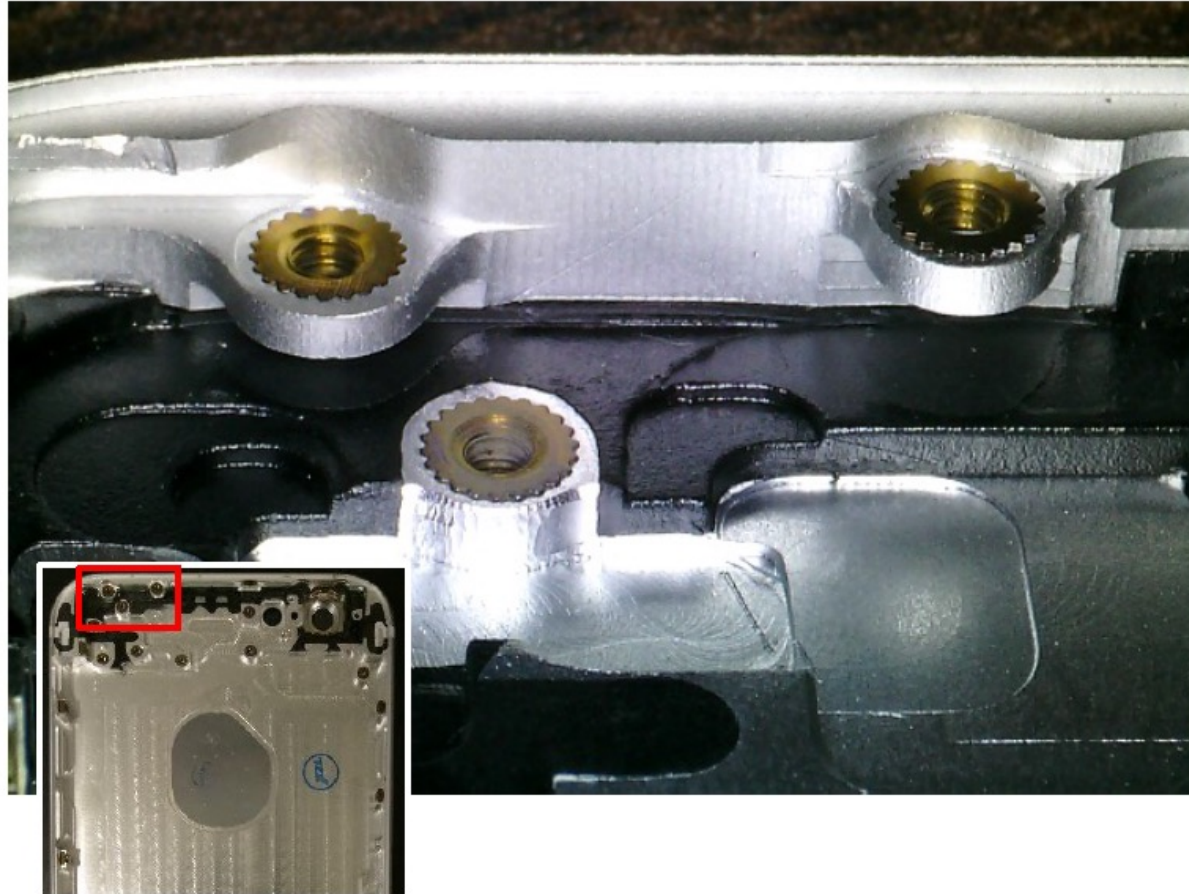


Proceso de fresado



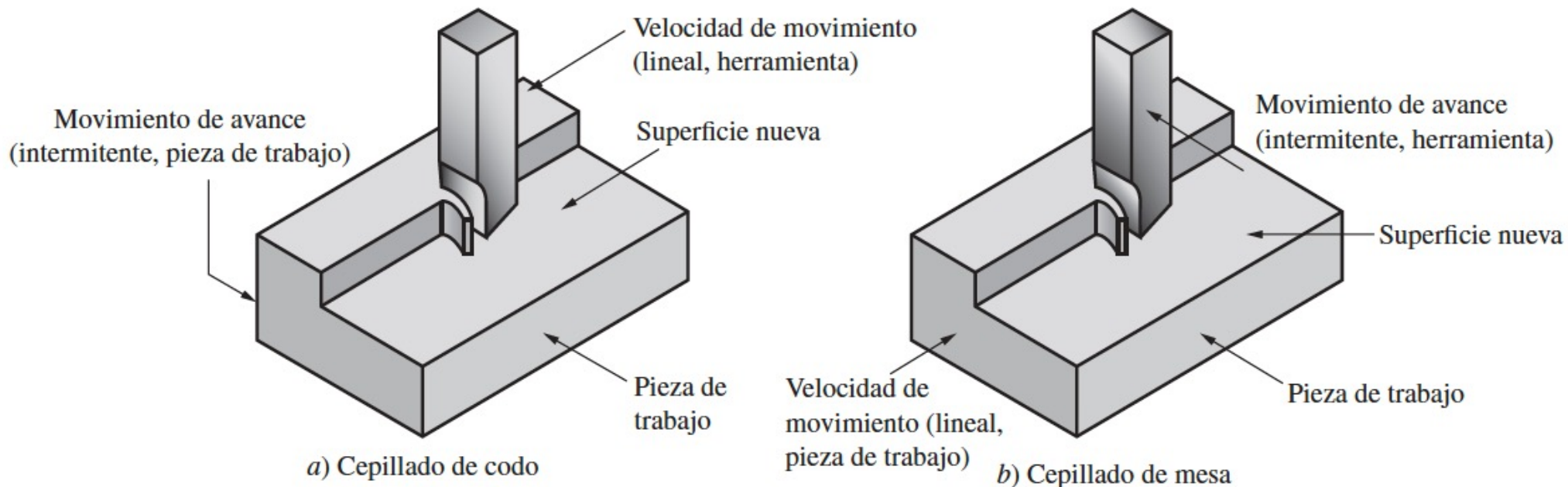
Productos maquinados por fresado

Carcasa de iPhone 6



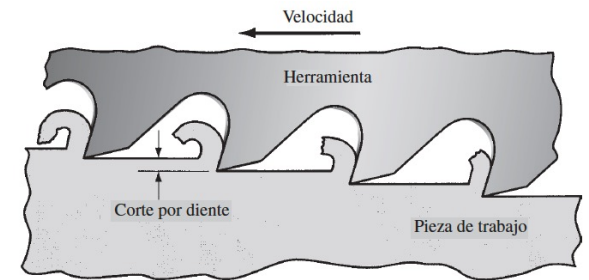
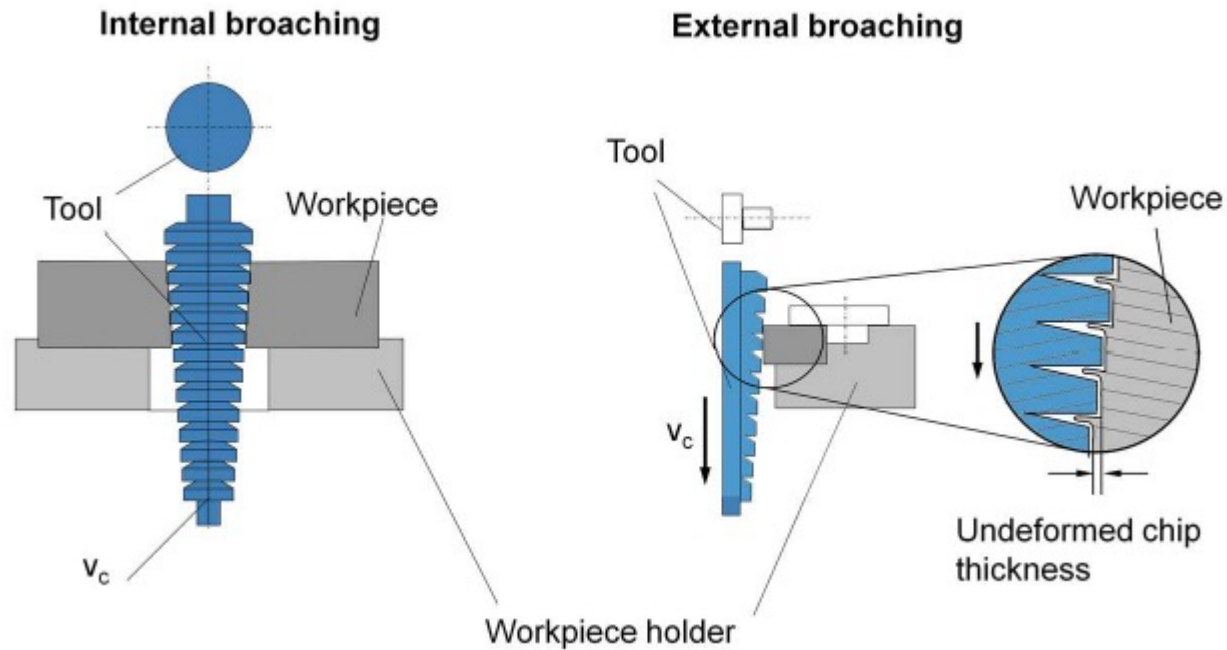
Cepillado

El cepillado es una operación de maquinado relativamente sencilla por medio de la cual se producen superficies, así como secciones transversales con ranuras y escalones, a lo largo de la pieza de trabajo. El formado se hace por lo general en piezas de trabajo grande.



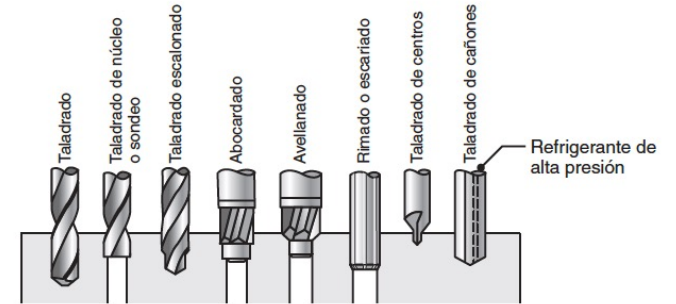
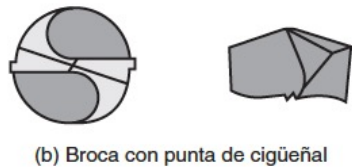
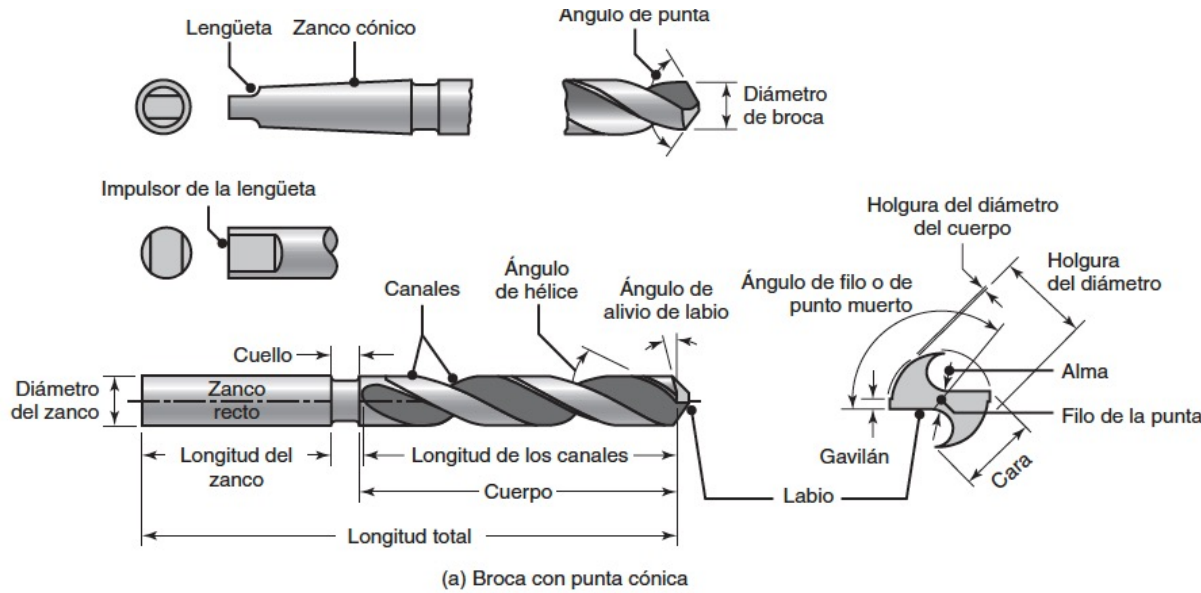
Brochado

El brochado es similar al cepillado con un cortador largo de dientes múltiples y se utiliza para maquinarse superficies internas y externas, como orificios de sección circular, cuadrada o irregular; cuñeros; dientes de engranes internos; estriados internos y superficies planas



Taladrado

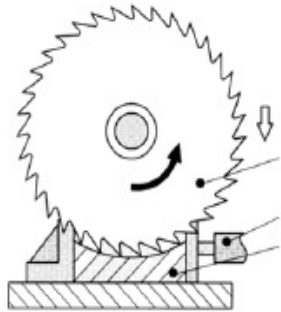
Método de mecanizado con un movimiento principal giratorio en el que a la herramienta se le permite un solo movimiento de avance en la dirección del eje giratorio de la herramienta.



Brocas

Aserrado

- Proceso donde la herramienta de corte es una hoja (segueta) que tiene una serie de pequeños dientes, cada uno de los cuales remueve una pequeña cantidad de material en cada paso o movimiento de la sierra.



Sierra circular

Hoja de sierra

Equipo de sujeción

Pieza de trabajo

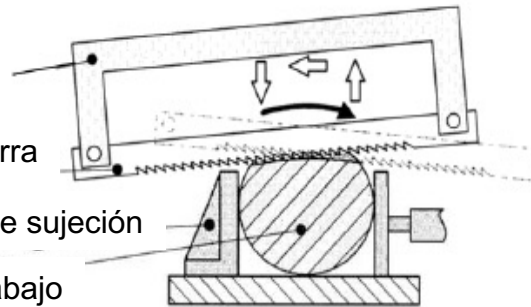
Sierra de arco

Arco

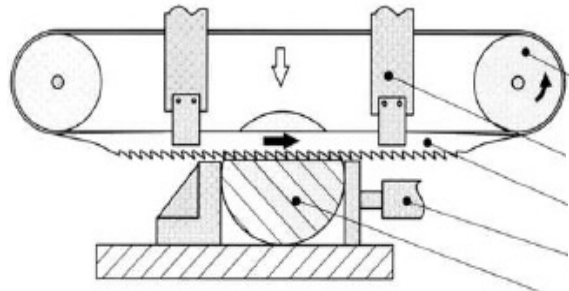
Hoja de sierra

Equipo de sujeción

Pieza de trabajo



Sierra de cinta



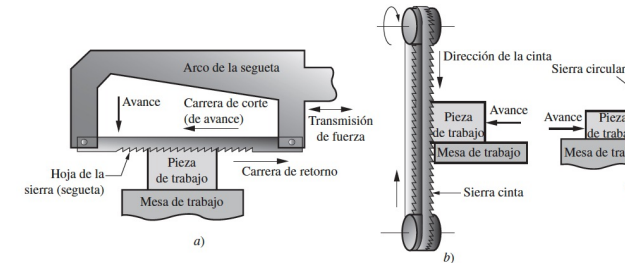
Rodillo impulsor

Riel de control

Sierra de cinta

Equipo de sujeción

Pieza de trabajo



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

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