67.15 – Tecnología Mecánica I
F.I.U.B.A.

Apunte: ***Tiempos de producción y potencia***

- Cálculos en máquinas-herramientas de conformado por arranque de viruta.

I) Tiempos
II) Potencia
III) Desgaste de la herramienta
IV) Vibraciones

I) TIEMPOS

El mecanizado por arranque de viruta es un proceso gradual de eliminación de material tal cual si fuera la eliminación gradual de capas de material en forma de viruta, a partir de un macizo cómo materia prima y conformando la forma final de la pieza en función de la acción de la herramienta y los movimientos relativos pieza – máquina.

Todo movimiento de un cuerpo involucra un desplazamiento relativo en el espacio e insume una cantidad de tiempo, lo cual podemos sintetizar en la velocidad de dicho cuerpo:

$$Vel. = \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad \text{[m/seg.]}$$

De aquí podemos calcular nuestro primer parámetro de interés que será el tiempo empleado en el mecanizado:

$$\Delta t = \frac{\Delta X}{Vel.} \quad \text{[seg.]}$$

En el proceso general de mecanizado se definen dos velocidades:

- **Velocidad de corte: (V_c)** definida por el *movimiento principal* en el mecanizado es el responsable de la eliminación del material y consume la mayor parte de la potencia empleada en el proceso. Movimiento relativo del filo (o de cada filo en herramientas multicortantes) respecto a la pieza.

- **Velocidad de avance: (V_a)** definida por la trayectoria que realiza la herramienta relativa a la pieza de trabajo; es responsable en máquinas de corte continuo del arranque continuo de material. Movimiento relativo de la herramienta respecto a la pieza.

Estas dos velocidades características del proceso sumadas a la profundidad de corte (P) nos definen la rapidez de eliminación del material (MRR – *metal removal rate*) que mide el caudal, o volumen de material eliminado por minuto.

Estas tres variables operativas (Vc, Va y P) definen las condiciones de operación, siendo la selección de la velocidad de corte (V_c) adecuada el factor más crítico. La modificación de cualquiera de estos parámetros debe lidiar entre la máxima vida útil de la herramienta y la máxima velocidad de eliminación de material o productividad.

Para estudiar el tiempo empleado en el mecanizado utilizaremos principalmente la velocidad de avance (Va) que determina al fin y al cabo el tiempo insumido en las diversas pasadas de mecanizado que son las trayectorias que recorre la herramienta para eliminar material de la pieza:

$$\text{Tiempo principal} = \frac{\text{trayecto de trabajo}}{\text{Avance / min}}$$

$$\Delta t = \frac{L}{Va}$$

aquí definimos [V_a]= mm / min. Entonces [L]=mm y [Δt]=min. Para el caso particular de tener el avance referido a la velocidad de rotación de la pieza (sea el caso de un mecanizado en el torno) o la velocidad de rotación de la herramienta (sea el caso de un mecanizado en la fresadora, alesadora o taladro) podemos redefinir el avance tal como: [Va]= mm / rev. y en estos casos queda:

$$\Delta t = \frac{L}{a \times n}$$

con n: revoluciones por minuto y a: avance en mm.

A este tiempo principal de mecanizado, o tiempo activo que es el tiempo insumido en recorrer la trayectoria de trabajo a la velocidad de avance, se le deben sumar los tiempos de preparación, aproximación, control y puesta e punto de las máquinas, herramientas y piezas; estos son los tiempos muertos. Para cada operación la máquina y la herramienta deben adecuarse, controlarse y todo proceso lleva intrínseco tiempos muertos que no son activos propiamente pero si absolutamente necesarios. De no poder mejorarse las velocidades de corte o avance en general se intenta optimizar los demás tiempos por ejemplo mediante automatización o mejorando la secuencia del proceso.

Para cada proceso en particular deberán definirse los parámetros involucrados y sus magnitudes para así calcular el tiempo principal de mecanizado o tiempo activo. Luego sumarle los tiempos muertos o pasivos sin arranque de material que corresponden a la aproximación y retroceso de la herramienta o pieza, la sujeción o liberación de la misma, el afilado de la herramienta o la preparación de la máquina.

$$\text{Tiempo}_{\text{(total)}} = T_{\text{activo}} + T_{\text{muerto}}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{(total)}} = \Delta t_{\text{activo}} + T_{\text{(preparación + afilado + aproximación + control)}}$$

Para relacionarlo con la producción podemos definir la *hora productiva:* que dependiendo de la eficiencia de cada taller, máquina y operarios es un porcentaje de la hora reloj. PR (production rate o piezas por hora):

$$PR = \frac{60[\text{min}]xE}{tp} \qquad (1)$$

E: eficiencia de 80 al 85%
tp: tiempo unitario por pieza.

De aquí surge:

$$tp = tc + ts + td \qquad (1.1)$$

tp: tiempo por pieza
tc: tiempo del ciclo de operación
ts: tiempo de preparación de la máquina
td: tiempo de afilado

de donde surge:

$$tc = tm + ti + th \qquad (1.1.1)$$

tc: tiempo del ciclo
tm: tiempo de mecanizado activo
ti: tiempo perdido del ciclo automático
th: tiempo de manipuleo

Para el tiempo de mecanizado activo (tm; *machining time*) debemos considerar que a la velocidad de avance seleccionada para el mecanizado la herramienta debe aproximar a la pieza; por lo cual tenemos una carrera neta, más una sobrecarrera necesaria para absorber las posibles variaciones de sobrematerial en las piezas a mecanizar.
Con frecuencia esta sobrecarrera se toma de unos 3 a 4 mm tomando valores aun mayores si la pieza es forjada o fundida.

$$tm = \frac{L + A + O}{V_a} \qquad (1.1.1.1)$$

L: longitud de corte
A: aproximación de la herramienta a la V_a
O: sobrecarrera

Es más intuitivo entender la sobrecarrera como la necesidad de pasarse con la herramienta para desprender la última viruta al finalizar el corte; si solo llegásemos hasta el límite de la pieza o la longitud de corte sin sobrepasarnos la última viruta no se desprendería y produciría rebabas indeseables.

El tiempo de ciclo automático (ti; *idle time*) se relaciona en las máquinas automáticas a aquel movimiento que se realiza a velocidad de desplazamiento rápido (sea un G00 para una máquina CNC). Este desplazamiento es necesario considerarlo por ser la aproximación rápida a la posición de trabajo. En el mecanizado manual sigue considerándose como dicha aproximación.

$$ti = t1 + t2 \qquad (1.1.1.2)$$

t1: tiempo de aproximación rápido
t2: tiempo de retroceso rápido

Nos queda analizar el tiempo de manipuleo (th; *handeling time*) que consiste en el tiempo utilizado por el operador para manipular la pieza (carga y descarga). En general comprende:

t3: colocar la pieza en el dispositivo
t4: fijar la pieza
t5: giro del dispositivo (si cabe)
t6: arranque del ciclo
t7: extracción de la pieza
t8: colocación junto a piezas terminadas
t:9: limpieza de virutas del dispositivo
t10: control de piezas
t00: operaciones particulares

y obtenemos:

$$th = t3 + t4 + t5 + t6 + t7 + t8 + t9 + t10 + t00 \qquad (1.1.1.3)$$

Cabe la aclaración que los tiempos aquí insumidos son arbitrarios y dependen pura y exclusivamente de cada proceso de maquinado; quedando abierta la ecuación a condiciones y operaciones particulares.

Analicemos ahora el tiempo de preparación de la máquina (ts; *set up time*) insumido en montar las herramientas, dispositivos, controlar los parámetros de operación, alinear, controlar la precisión y puesta a punto.

$$ts = \frac{Ts}{N} \qquad (1.1.2)$$

Ts: tiempo total de preparación
N: número de piezas luego de cada preparación

Finalmente el tiempo insumido en el cambio o afilado de la herramienta (td; *down-time*). Depende fundamentalmente de la duración del filo cortante de la herramienta y este a su vez de las condiciones de corte.

$$td = \frac{Td}{Ns} \qquad (1.1.3)$$

Td: Tiempo para cambio de la herramienta
Ns: número de piezas entre afilados

Obsérvese que los dos últimos tiempos estimados van al inverso de la cantidad de piezas producidas luego de dicha operación. Comprendemos entonces que si luego de preparar adecuadamente una máquina producimos cientos de miles de piezas el valor se torna insignificante, mientras que si por cada ajuste de la máquina producimos una baja cantidad de piezas, este valor se torna cada vez más significativo.

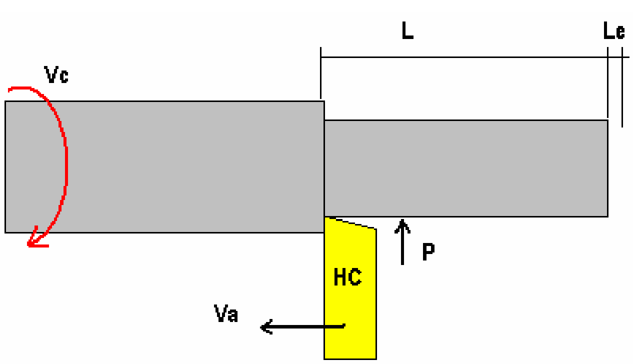
Retornamos a la ecuación (1.1) que expresa el tiempo por pieza como la suma de los tiempos anteriores:

$$Tp = tc + \frac{Ts}{N} + \frac{Td}{Ns} \qquad (1.2)$$

Reemplazando en (1) obtenemos la cantidad de piezas por hora efectiva de producción.

Ejemplo:

TORNO:



$$t_m = \frac{L_m}{V_a} = \frac{L + (L_e + L_s)}{a \times n}$$

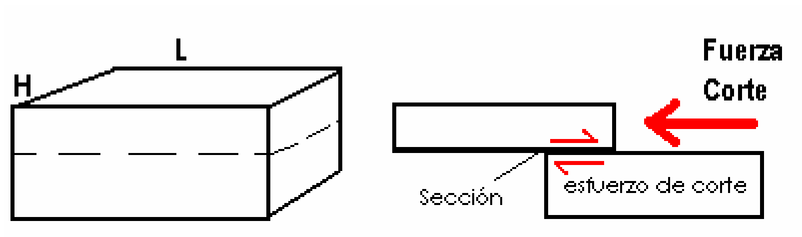
en el ejemplo solo consideraríamos las aproximación a la pieza y no la salida con L_s=0.

II) POTENCIA

Analizaremos entonces la potencia necesaria en el mecanizado por arranque de viruta. El corte de material o desprendimiento de viruta se puede analizar en una primer instancia con un modelo muy elemental de donde deduciremos las fuerzas involucradas en nuestro cálculo y en función de la velocidad de desprendimiento la potencia requerida para el mecanizado.

De forma muy elemental tenemos una porción de material que se desprenderá de nuestro cuerpo durante el proceso:

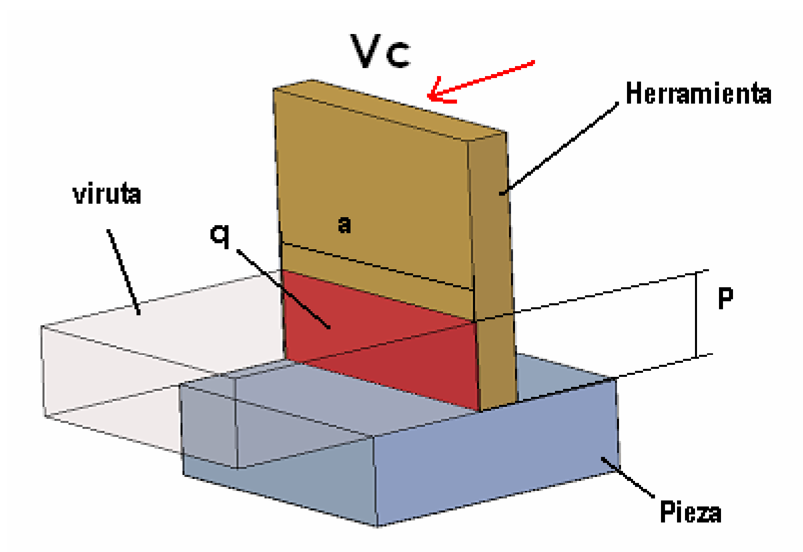
El esfuerzo de corte en general se caracteriza por relacionar una fuerza resultante por una sección de deslizamiento.



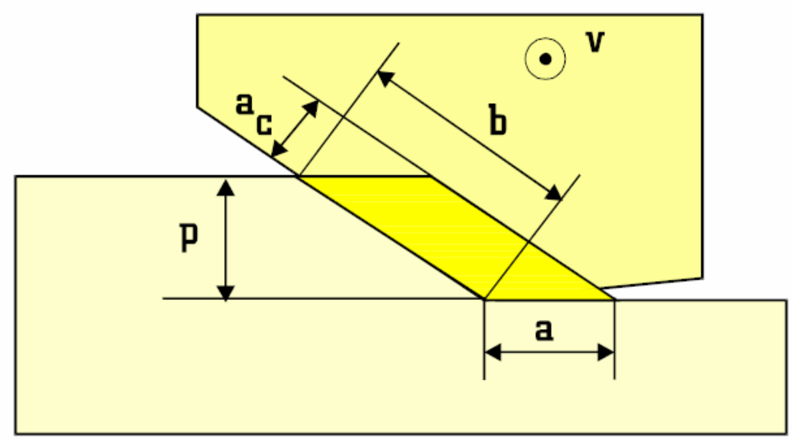
Entonces tenemos la sección de deslizamiento tal como: *S = H x L*, el esfuerzo de corte τ_c y la fuerza resultante.

$$F_C = \tau_c \times S$$

Ampliando este concepto elemental en un proceso de mecanizado estudiaremos un esfuerzo equivalente pero con relación a otra sección y es aquella sección normal a la velocidad de corte (V_C) sobre el flanco de la herramienta que esta actuando sobre la viruta. Aquí hablaríamos de q = a x P.



Esta sección "*q*" es usualmente denominada <u>sección de viruta</u>; "P" representa la profundidad del corte y "a" el avance de la herramienta o pieza tras cada pasada. Otra igualdad obtenemos al considerar el ancho de la arista de corte en el filo de la herramienta (b) y el espesor de viruta indeformada (a_c).



- Sección normal a la velocidad de corte.

Entonces:

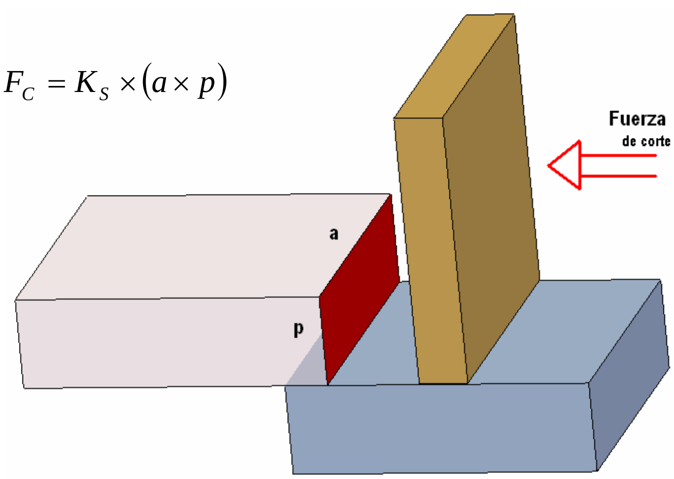
$$q = a \times P = b \times a_C \qquad \text{(Sección de viruta)}$$

Definida la sección normal a velocidad de corte definimos un método empírico pero muy acertado para el cálculo de solicitaciones en el proceso de corte de materiales durante el mecanizado. Establecemos entonces una relación directa entre la fuerza requerida para el corte y la sección de viruta. Esta constante de proporcionalidad es el *<u>esfuerzo específico de corte</u>:* K_s [Kg/mm^2]

$$F_C = K_S \times q$$

o

$$F_C = K_S \times (a \times p)$$



Este valor de proporcionalidad K_S que relaciona la F_C con la sección de viruta q depende principalmente de:

- Material a mecanizar (σ_R del material)
- Geometría de corte (en especial el ángulo de ataque o desprendimiento)
- Sección de viruta (q)
- Velocidad de corte (V_C)
- Condiciones generales de corte (Lubricación, desgaste de la HC, etc.)

K_S es concretamente la fuerza equivalente requerida para arrancar un milímetro cuadrado de material y se obtiene a partir de formulas o tablas deducidas de diversas teorías de corte. Un ejemplo es la Teoría de Corte de Kronemberg; donde afirma a K_S no como constante sino fuertemente dependiente de las condiciones de corte así como se mencionó anteriormente.

$$K_S = \frac{C_{K_S}}{\sqrt[E_{K_S}]{q}}$$

C_{K_S} y E_{K_S} son constantes que dependen del material de la pieza y la herramienta y pueden encontrarse en forma de tablas. Existen muchos otros métodos cuyo estudio corresponde a Teoría de Corte.

Definamos, ahora sí, el concepto de potencia. La potencia se relaciona con el trabajo realizado por unidad de tiempo. En términos de energía la potencia también queda vinculada con la capacidad de entregar trabajo en unidad de tiempo de la máquina en este caso. Energía es la capacidad de entregar o realizar trabajo y el trabajo en fin una magnitud de fuerza por una distancia recorrida.

Trabajo (W):

$$W = F \times \Delta X \qquad [W] = N \times m$$

F : Fuerza
ΔX : desplazamiento

Si este trabajo lo analizamos por unidad de tiempo, o sea la capacidad de entregar trabajo por unidad de tiempo definimos:

Potencia (*N*):

$$N = \frac{W}{\Delta t} = \frac{F \times \Delta X}{\Delta t}$$

de aquí podemos obtener una relación muy interesante y en este caso relaciona directamente una de las velocidades del proceso. Teníamos que la velocidad de corte quedaba definida por:

$$V = \frac{\Delta X}{\Delta t} \Rightarrow V_C = \frac{\Delta X_{filo}}{\Delta t}$$

y en términos de potencia si reemplazamos la velocidad:

$$N = F \times \frac{\Delta X_{filo}}{\Delta t} = F \times V_C$$

En este caso estaríamos analizando la velocidad con la que el filo desprende material en forma de viruta y el esfuerzo característico en dicho proceso involucra la fuerza necesaria para el corte del material dado, o sea la *Fuerza de corte* (F_C).

$$N = F_C \times V_C = K_S \times q \times V_C$$

Para poder terminar de relacionar todos los parámetros y que exista consistencia en nuestra deducción debemos introducir una constante para acomodar las unidades y obtener los valores de potencia en las unidades estándar.

$$N = \frac{F_C \times V_C}{C}$$

donde C se deduce de la siguiente manera:

$$[W] = \frac{Nm}{seg}$$

$$N = q \times K_s \times V_C = [mm^2] \times \left[\frac{Kg}{mm^2}\right] \times \left[\frac{m}{\min}\right] = \frac{Kgm}{\min}$$

como primer medida podemos arreglar las unidades para obtener potencia en unidades de [W] por lo que debemos multiplicar por una constante C':

$$[C'] = \left[\frac{\min}{seg}\right] \times \left[\frac{N}{Kg}\right] \cong \frac{1}{60} \times \frac{10}{1}$$

$$[N \times C'] = \left[\frac{Kgm}{\min}\right] \times \left[\frac{\min}{seg}\right] \times \left[\frac{N}{Kg}\right] = \left[\frac{Nm}{seg}\right] = [W]$$

si además convertimos a unidades de [hp] tenemos C:

$$[C] = [C'] \left[\frac{hp}{W} \right] \cong [C'] \frac{1}{750} = \frac{1}{4500}$$

En general en la bibliografía se encuentran los valores de potencia en [hp]:

$$N = \frac{q \times K_s \times V_C}{4500}$$

y por último para quedar próximos a la realidad incluimos el rendimiento de la máquina:

$$N = \frac{q \times K_s \times V_C}{4500 \times \eta} \qquad \text{(Potencia)}$$

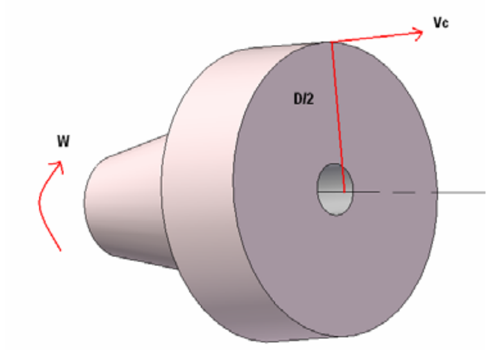
En el caso particular de elementos de rotación, esta velocidad V_C queda definida por:

$$V_C = \frac{\pi \times D \times n}{1000}$$

$$[D] = mm \qquad [n] = R.P.M. \qquad [V_C] = m/\min$$

En movimientos rectilíneos, será la velocidad de desplazamiento de la herramienta o la pieza en su movimiento.

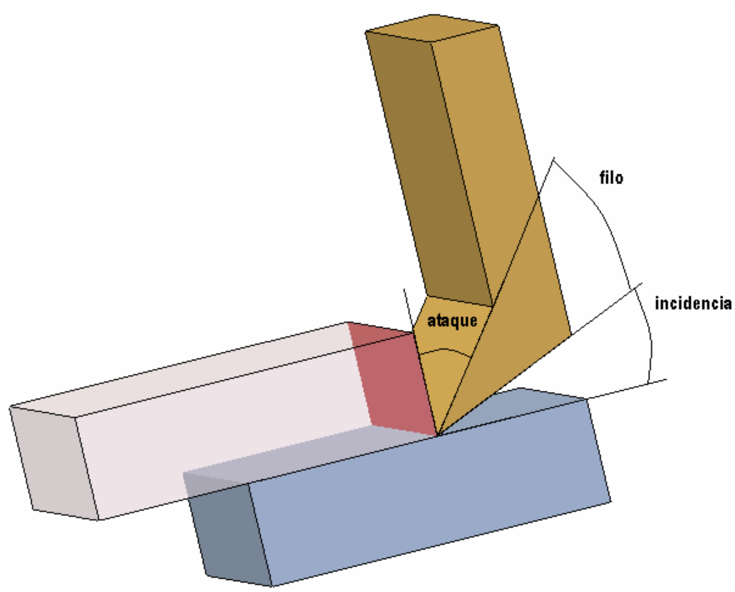
Analizando los esfuerzos en un eje en rotación (sea un cuerpo que gire o el vástago de una herramienta de corte rotante) debemos poder despejar la fuerza involucrada a partir del Momento torsor (M_t) generado. Así queda:



$$M_t = \frac{F_C \times D}{2 \times 1000} [Kgm]$$

siendo la F_C tangente al diámetro en el punto de contacto.

Redefiniendo el modelo elemental podemos encontrar una optimización en la geometría de la herramienta para lograr un mejor desprendimiento de la viruta. Así definimos tres ángulos característicos:

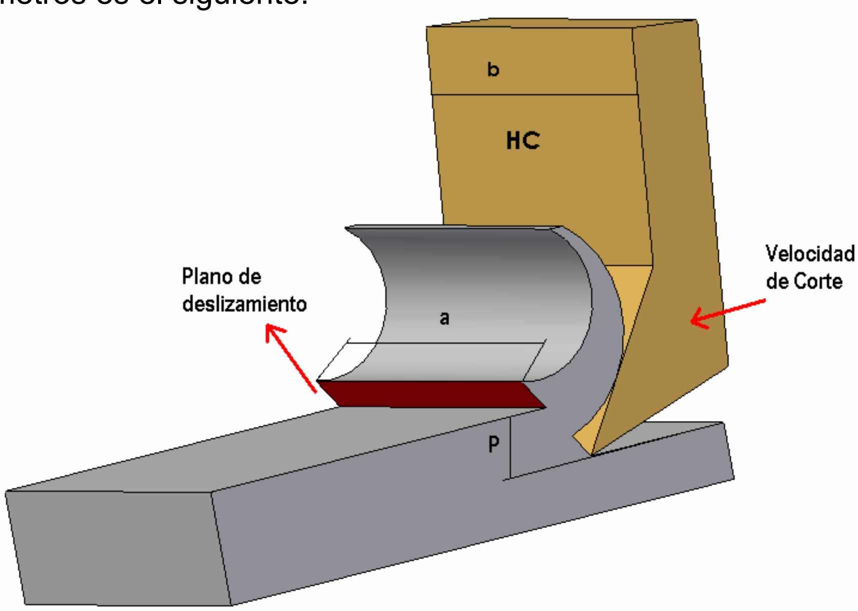


Ángulo de Ataque: favorece el efecto cuña para introducir la herramienta de corte en el material y deslizar la viruta sobre la superficie de ataque generada.

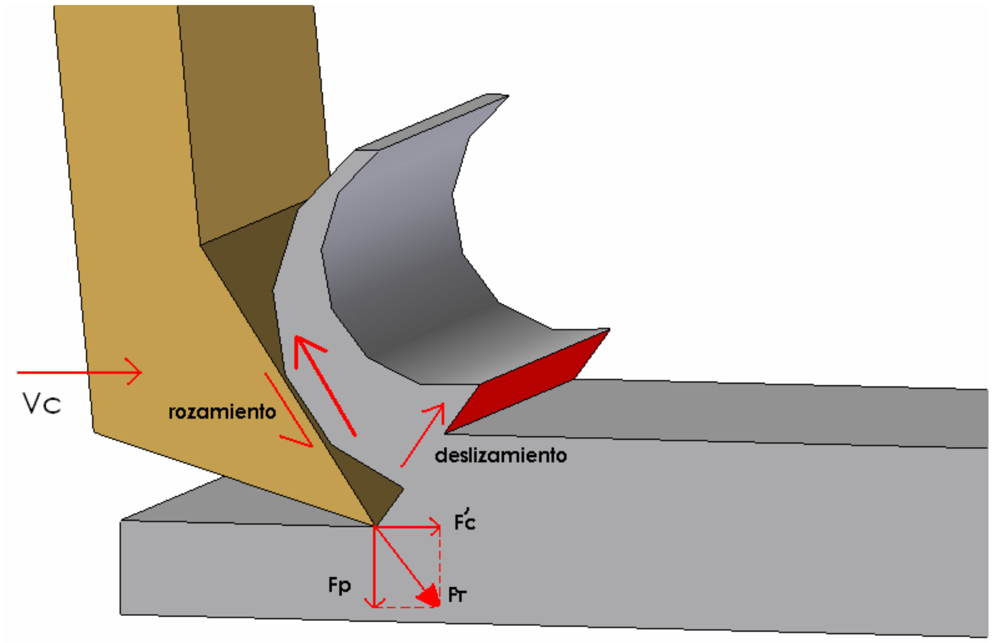
Ángulo de incidencia: despeja la herramienta de la superficie de trabajo evitando rozamiento directo entre esta y la superficie de incidencia generada en la herramienta.

Ángulo de filo: propio de la herramienta determina el filo de la misma y la cuña resultante.

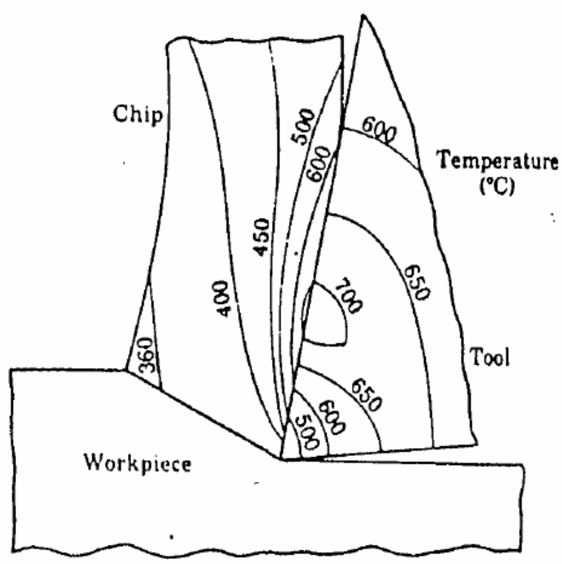
De aquí obtenemos un modelo más próximo a la realidad y respetando todos los parámetros es el siguiente:



Realizando una descomposición de fuerzas obtenemos los esfuerzos involucrados:



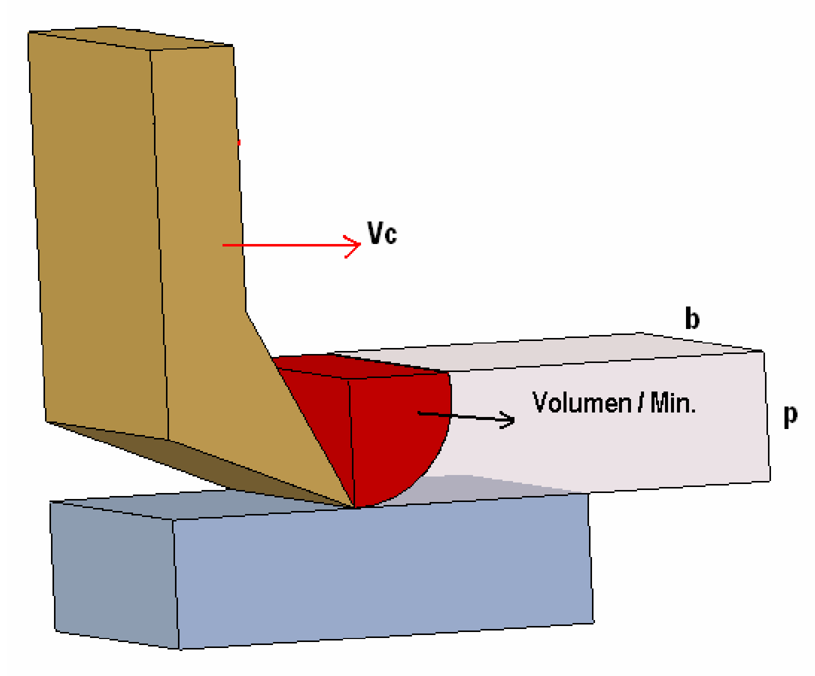
De esta última vista observamos una fuerza de rozamiento importante entre la viruta desprendiéndose y la superficie de ataque, esto originará un aumento considerable de la temperatura y la potencia requerida en el mecanizado. Aquí se representan algunas temperaturas típicas en la zona de corte:



Para lograr las expresiones más amplias y generales en el cálculo de potencias nos servirá referir este valor de potencia al requerido para eliminar una cantidad de material por unidad de tiempo.

Aquí definimos entonces el parámetro $\dot{Z}$: (volumen de material eliminado por unidad de tiempo)

$$\dot{Z} \cong b \times p \times V_C$$



Volviendo a la formula de potencia tenemos:

$$N = \frac{q \times K_s \times V_C}{4500 \times \eta} = \frac{b \times p \times K_s \times V_C}{4500 \times \eta} = \frac{\dot{Z} \times K_s}{4500 \times \eta}$$

y relacionamos finalmente el volumen de material eliminado, con la resistencia del mismo a ser arrancado bajo determinadas condiciones y el rendimiento de la máquina empleada.

Para extrapolar estos resultados a otros procesos de mecanizado deberemos definir adecuadamente el volumen de material eliminado por unidad de tiempo según el proceso.

TORNO:

- Cilindrado / Roscado

Aquí el volumen de material eliminado por unidad de tiempo ($\dot{Z}$):

$$\dot{Z} \cong a \times p \times V_C$$

con

$$V_C = \frac{\pi \times D \times n}{1000}$$

siendo D el diámetro final de la pasada.

- Refrentado / Ranurado

Aquí el volumen de material eliminado por unidad de tiempo ($\dot{Z}$):

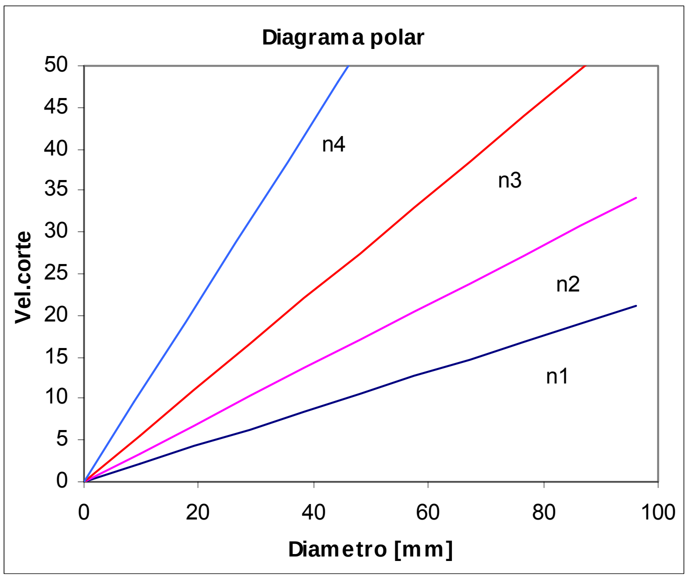
$$\dot{Z} \cong a \times p \times V_C$$

donde la V_c no es constante ya que depende del diámetro D variable desde el diámetro exterior hasta cero si se refrenta toda la cara.

$$V_C = \frac{\pi \times D_{(a)} \times n}{1000}$$

Para los casos anteriores es necesario obtener para cada torno sus velocidades características y construir las tablas de [V_c – D] para cada n:

Por ejemplo:

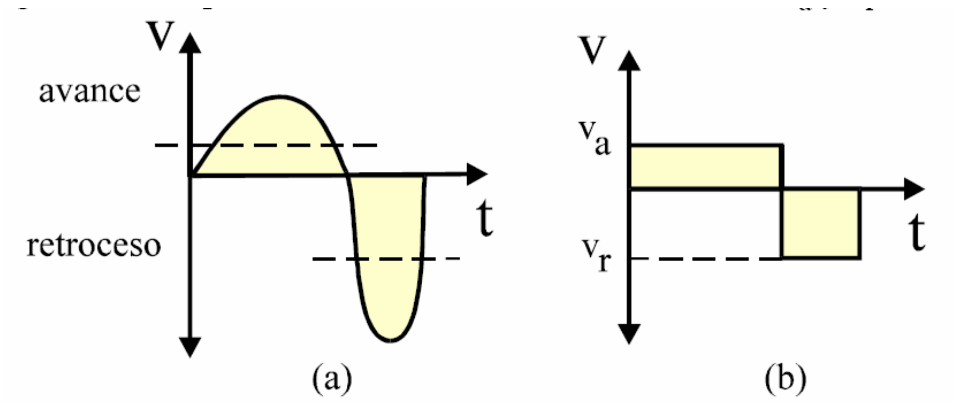


CEPILLADO:

Aquí el volumen de material eliminado por unidad de tiempo ($\dot{Z}$):

$$\dot{Z} \cong a \times p \times V_C$$

equivalente al calculado en el torno, pero no es corte, ni velocidad continua sino alternativa. Una buena aproximación del diagrama de velocidades para los procesos de cepillado es el siguiente:



donde (a) es el diagrama de velocidades real y (b) simboliza una aproximación práctica para el cálculo. Considerando cómo carrera activa aquella en la cual se realiza trabajo y consume potencia a la velocidad V_a.

TALADRADO

Considerando la velocidad de avance cómo a [mm/rev.] tenemos:

$$V_a = a \times n$$

Aquí el volumen de material eliminado por unidad de tiempo ($\dot{Z}$):

$$\dot{Z} = Area \times V_a = \pi \times \frac{D^2}{4} \times a \times n$$

siendo D el diámetro de la broca.

FRESADO

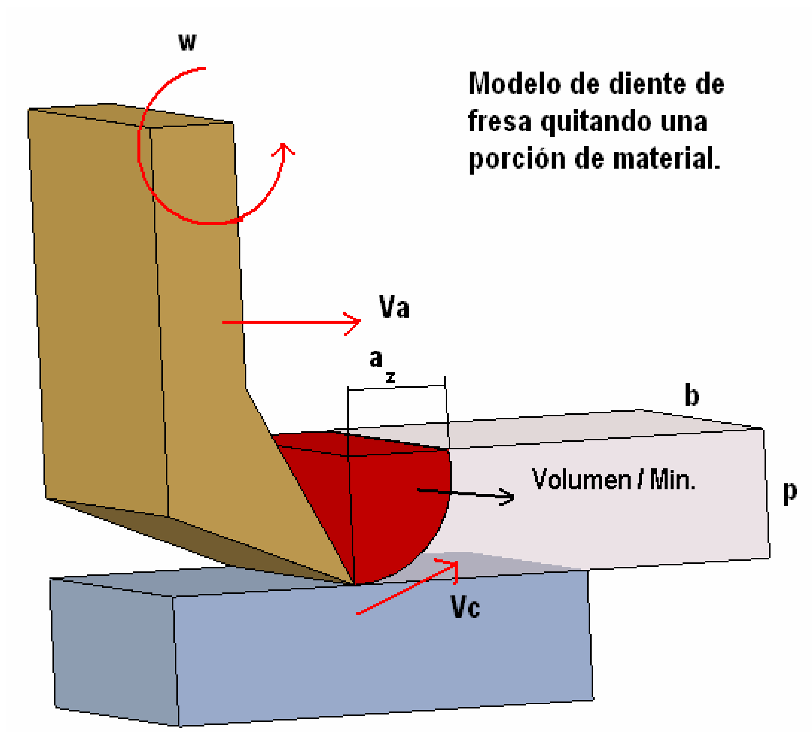
El fresado es un caso particular ya que la herramienta de corte es multifilo; en cuyo caso son muchos los filos que arrancan material alternadamente en una unidad de tiempo. Para considerar los multifilos hacemos una primera consideración:

$$a_z = \frac{a}{z}$$

a_z = avance por filo.

a = Avance de la herramienta fresa.

z = número de dientes.



Pero para un cálculo simple de potencia podemos considerara nuevamente el volumen de material eliminado e involucrar parámetros característicos de las geometrías de las herramientas y condiciones de corte en Ks. Así obtenemos que $\dot{Z}$:

$$\dot{Z} = q \times V_a = b \times p \times a \times n$$

Debemos recordar que esta eliminación no es continua cómo el caso de un torno o taladro; sino que es alternativa al avance de cada diente de la fresa.