

TEORÍA DEL CORTE DE METALES

FUNDAMENTOS DEL CORTE DE METALES

En el maquinado de metales, una apreciación de los fundamentos y una buena comprensión de los hechos empíricos concernientes a la maquinabilidad, se combinan para permitir que los problemas de maquinado puedan manipularse sobre una base de Ingeniería. Aunque el conocimiento en ninguno de estos campos es completo, muchos de los hechos esenciales son ya conocidos. La fórmula para el éxito en su empleo es aplicarlos con una mente abierta y complementarlos con un justo criterio ingenieril.

La parte I revisa el conocimiento general presente de los hechos fundamentales que son activos en el proceso de corte. Los factores básicos que gobiernan la geometría de formación de la viruta son discutidos, como así también las fuerzas actuantes sobre la herramienta, calidad superficial obtenida, duración de la herramienta y vibración.

1.- Nomenclatura empleada

A_o : Sección de viruta (pulgada cuadrada)

α_L : ángulo de inclinación longitudinal de la cara de ataque en herramientas monocortantes, ángulo de inclinación axial en fresas o ángulo de inclinación equivalente en otros tipos de herramientas (grados).

α_T : Ángulo de inclinación transversal de la cara de ataque (side rake angle) en herramientas monocortantes, ángulo de inclinación radial (radial rake) en fresas o ángulo de inclinación equivalente en otros tipos de herramientas (grados)

α_N : Ángulo de inclinación normal de la cara de ataque de la herramienta (rake angle) medido en un plano perpendicular al corte principal (grados). Virtualmente es equivalente al ángulo de ataque **α**.

α : Ángulo de inclinación ortogonal o de inclinación real o **de ataque** (true rake angle) (grados)

B : Constante en la ecuación temperatura de corte vs. duración de la herramienta.

b : Temperatura de la cara de ataque de la herramienta (°C)

C : Constante de maquinado (grados)

κ_F : ángulo de posición o frontal del filo principal (end cutting edge angle) en herramientas monocortantes o ángulo del vértice en fresas o en ángulo equivalente en otros tipos de herramientas cortantes (grados).

F : Fuerza de fricción; componente de fuerza actuante entre la cara de ataque y la viruta (Lb)

F_c : Fuerza de corte; componente de fuerza actuante en la dirección del movimiento de corte (Lb)

F_n : Componente de fuerza actuante en dirección perpendicular al plano de cizallamiento (Lb)

F_s : Fuerza de cizallamiento; componente de fuerza actuante en la dirección del cizallamiento, en el plano de cizallamiento (Lb)

F_t : Fuerza de empuje; componente de fuerza actuante en dirección perpendicular a la superficie generada (Lb)

H : Número de dureza Brinell (BHN)

m : Peso de la viruta por unidad de longitud (milésimos de onza por pulgada)

N : Fuerza normal; componente de fuerza actuante perpendicular a la cara de ataque (Lb)

n : Exponente de endurecibilidad de Meyer.

R : Fuerza resultante, actuante sobre la pieza o sobre la herramienta (Lb)

r_c : Razón de corte t_1/t_2

S_s : Tensión media de cizallamiento sobre el plano de cizallamiento; resistencia media al cizallamiento del metal (psi o lb/pulg²)

T : Duración del filo, o vida de la herramienta, o intervalo de tiempo entre reafilados (min)

- t_1 : Espesor de viruta antes de su remoción (en ciertos casos profundidad de corte) (pulg)
 t_2 : Espesor de viruta luego de su remoción (pulg)
 V_c : Velocidad de corte (velocidad relativa pieza–herramienta) (pie/min)
 V_f : Velocidad del flujo de viruta; velocidad de la viruta relativa a la herramienta (pie/min)
 V_s : Velocidad de cizallamiento; velocidad de la viruta, durante su formación en el plano de cizallamiento, con respecto a la pieza (pie/min)
 W_f : trabajo gastado en vencer la fricción entre viruta y herramienta, por unidad de volumen de metal desprendido (lb–pulg por pulg cúbica)
 W_n : Consumo de potencia específica (neta); cantidad de CV netos requeridos para remover la unidad de volumen de metal en la unidad de tiempo (CV por pulg cúbica por min en el caso de la ecuación 14 ó lb-pulg por pulg cúbica)
 W_s : Trabajo realizado al cizallar el metal por unidad de volumen de metal arrancado (Lb–pulg por pulg cúbica)
 z : Exponente en la ecuación temperatura de corte-vida de la herramienta
 λ_y : Ángulo del flujo de viruta (chip flow angle); ángulo entre una perpendicular al corte principal y la dirección del corte de viruta sobre la cara de ataque.
 λ : Ángulo de inclinación del corte principal; formado entre la dirección del movimiento de la herramienta respecto a la pieza y una perpendicular al corte principal, medido en el plano de la superficie generada (grados). Coincide con el ángulo de inclinación del filo.
 ϵ_c : deformación cizallante de la viruta durante el proceso de remoción
 μ : Coeficiente de rozamiento entre la viruta y la herramienta
 ρ : peso específico de la viruta (metal de la pieza)
 τ : Ángulo de rozamiento (grados)
 ϕ : Ángulo de cizallamiento; entre el plano de cizallamiento y la dirección del desplazamiento de la herramienta (grados)

2.– Geometría de la formación de la viruta

2.1- Principios generales y tipos de viruta

La forma y dimensiones de las virutas obtenidas en el proceso de corte, arrojan considerable luz sobre la calidad y naturaleza de aquel proceso. Prescindiendo del tipo de operación de maquinado (torneado, fresado, taladrado, etc.), **solo se presentan comúnmente tres tipos básicos de virutas**: Tipo 1, viruta discontinua o segmentada; Tipo 2, viruta continua con bordes lisos; Tipo 3, viruta continua con bordes irregulares. Estos tres tipos están ilustrados por las fotomicrografías de la figura 1.

Viruta tipo 1

Consiste en segmentos individuales, los que en algunos casos se adhieren flojamente unos con otros luego que la viruta se ha formado; en otros casos, los segmentos proceden de la herramienta como fragmentos distintos y desconectados. Estos segmentos son producidos por la fractura del metal delante del filo cortante. Este tipo de viruta es muy a menudo hallado en el maquinado de materiales quebradizos o de materiales dúctiles a muy baja velocidad de corte. Cuando está asociada con materiales quebradizos, produce ordinariamente una terminación superficial tersa, bajo consumo de potencia y razonable duración del filo de la herramienta. Empero, en el caso de materiales dúctiles, la terminación puede ser bastante pobre y el desgaste de la herramienta excesivo.

Viruta tipo 2

Es producida por la deformación continua del metal delante de la herramienta sin fractura, seguido por uniforme flujo de viruta sobre la cara de la herramienta. Es obtenida ordinariamente en el corte de materiales dúctiles a velocidades de corte encima de 200pie/min (como en el corte con herramientas de carburos sinterizados) u ocasionalmente por el empleo de un eficaz fluido de corte a velocidades bajas. Este tipo de viruta está asociada con baja fricción entre la viruta y la herramienta. Es el más

deseable tipo de viruta desde el punto de vista del acabado, consumo de potencia y vida de la herramienta. Sin embargo, origina el problema de las virutas largas y continuas, el cual comúnmente se maneja mediante el empleo de rompevirutas y/o conformadores de viruta en las herramientas de corte.

Viruta tipo 3

Es similar al tipo 2, excepto que en la punta de la herramienta se presenta filo recrecido. Este recrecimiento es una masa de metal más o menos estable, la cual se adhiere a la cara de ataque de la herramienta mientras la viruta fluye sobre ella. El filo recrecido no está formado por una acumulación de fragmentos del material de la pieza en un espacio abierto delante del filo como algunas veces se piensa. Más bien, es el resultado de la alta resistencia al desplazamiento de la viruta sobre la cara de ataque. Esta alta fricción da lugar a que una parte de la viruta cizalle separándose del cuerpo de la viruta y permanezca más o menos estacionaria sobre la cara de la herramienta, próxima al borde cortante. El filo recrecido está así asociado con elevada fricción de la viruta sobre la herramienta.

El tipo 3 es una clase de viruta bastante frecuente obtenida en operaciones de maquinado. Se presenta normalmente en el corte de metales dúctiles con herramientas de alta velocidad a velocidades de corte ordinarias.

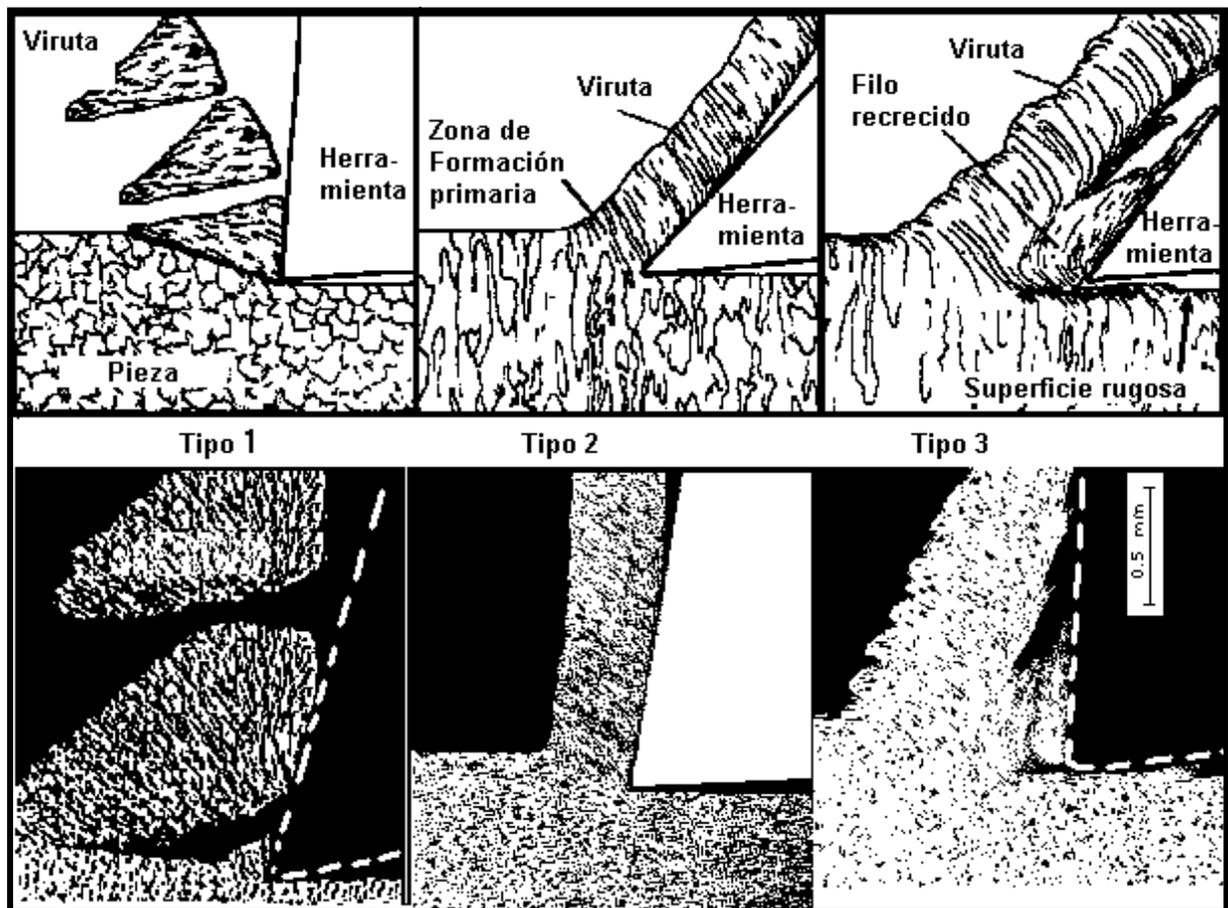


Figura 1

La viruta tipo 3 está asociada con pobre terminación superficial debido a fragmentos de filo recrecido que son continuamente esparcidos sobre la superficie maquinada a medida que la herramienta progresa. Tales fragmentos también desaparecen con la viruta. Un fragmento dejado sobre la

superficie maquinada por el filo recreado puede verse en la microfotografía de la viruta tipo 3 en la figura 1.

2.2.- Corte ortogonal

La mecánica y la geometría de la formación de la viruta son las más simples cuando la viruta tipo 2 se halla combinada con el corte ortogonal, que tiene lugar cuando el filo es perpendicular a la dirección del movimiento principal (ver “Geometría de la herramienta”, figura 13). Este tipo de geometría de herramienta es el que se ilustra en las figuras 2 y 3.

2.3.- Mecánica de la formación de la viruta. Modelo del plano de cizallamiento

El mecanismo básico por el cual se forman las virutas durante el corte, es el mismo para los tres tipos. Consiste en la deformación del metal situado delante del filo por un proceso de cizallamiento. La figura 2 lo ilustra para el caso más simple, aquél de una viruta tipo 2. El metal se deforma por cizallamiento en una estrecha zona que se extiende desde el filo hasta la superficie de la pieza como un solo plano. Esta zona de cizallamiento puede ser tratada, para los fines del análisis matemático, como un simple plano, conocido comúnmente como **plano de cizallamiento**. En la figura 2, está indicado por su traza, la cual forma el ángulo ϕ con la dirección del movimiento de la herramienta.

Ese plano es evidente en las tres microfotografías como la línea de demarcación entre el material no deformado de la pieza y el deformado de la viruta. A medida que el metal situado delante de la herramienta alcanza este plano, es desplazado por cizallamiento para formar la viruta, la cual desliza luego sobre la cara de la herramienta.

En el caso de la viruta tipo 2 ilustrada en la figura 2, este cizallamiento se produce sin fractura del metal y de esa manera se forma una viruta continua. En el caso de la viruta tipo 1, el metal no es apto para sufrir el requerido cizallamiento sin fractura y así la fractura se produce intermitentemente a lo largo del plano de cizallamiento, rompiendo la viruta en pequeños segmentos.

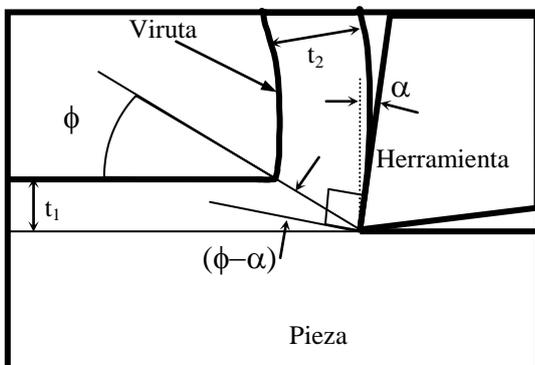


Figura 2

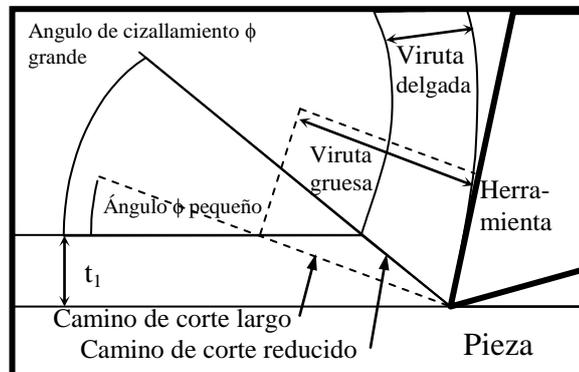


Figura 3

En el caso de la viruta tipo 3, el metal cizalla sin fractura pero la resistencia al cizallamiento de la viruta sobre la cara de ataque produce deformación cizallante adicional en la viruta; la porción del metal de la viruta adyacente a la cara de la herramienta cizalla separándose del cuerpo de la viruta y se rezaga como filo recreado. Además, este recrecimiento cambia constantemente en tamaño a medida que el corte avanza. Recrece debido a más metal que cizalla apartándose de la viruta que fluye y del material de la pieza que pasa por debajo, luego disminuye de tamaño nuevamente a medida que este metal extra se elimina en forma de fragmentos adheridos sobre la viruta y la superficie maquinada.

Como se indicó, la viruta tipo 2 es la más deseable para operaciones de maquinado. Afortunadamente, es la más simple y por ello se presta muy adecuadamente al análisis mecánico y matemático. La geometría y la mecánica asociadas con este tipo de viruta son actualmente bien conocidos. El análisis de las virutas ha guiado a la comprensión de muchos hechos básicos relativos a las fuerzas sobre la herramienta, al acabado y vida de la herramienta en el mecanizado de metales.

2.3.1.- Ángulo de cizallamiento (ϕ)

En la figura 3 se aprecia claramente la importancia del ángulo de cizallamiento ϕ . Este ángulo, que forma el plano de cizallamiento con la dirección del movimiento de la herramienta, en la práctica es variable en magnitud y su valor depende de las condiciones de corte y del material cortado.

En la figura 3 se aprecia que si el ángulo ϕ es pequeño, el camino del corte será largo, la viruta gruesa y la fuerza requerida para remover la capa de metal de espesor t_1 , será grande. Si el ángulo es grande, el camino del corte será más reducido, la viruta delgada y la fuerza requerida para remover la misma capa de metal será más pequeña. Así, el ángulo de cizallamiento es una magnitud geométrica importante en el mecanizado de metales. Una manera simple para conseguir un aumento de ϕ , y así reducir la fuerza, es emplear herramientas con mayor ángulo de ataque α . Como ya se ha visto en “Geometría de la herramienta”, cuando α es negativo la fuerza es aun mayor, y ello se debe a la disminución de ϕ .

Algunas cantidades importantes pueden ser calculadas de las relaciones geométricas derivadas de la figura 2, las que son definidas a continuación.

2.3.2.- Deformación cizallante (ϵ_c)

El monto de deformación que sufre el metal en el proceso de formación de viruta está medido por la deformación cizallante ϵ_c y puede calcularse mediante la ecuación (1) si se conocen el ángulo de cizallamiento ϕ y el ángulo de inclinación normal de la herramienta α_N (virtualmente equivalente al ángulo de ataque α definido en el capítulo “Geometría de la Herramienta de Corte”, por lo que puede usarse α en lugar de α_N).

$$\epsilon_c = \text{ctg } \phi + \text{tg } (\phi - \alpha) \quad (1)$$

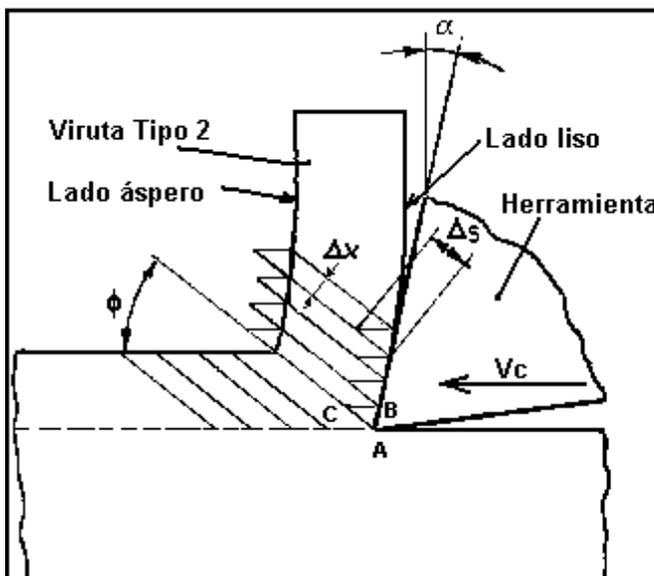
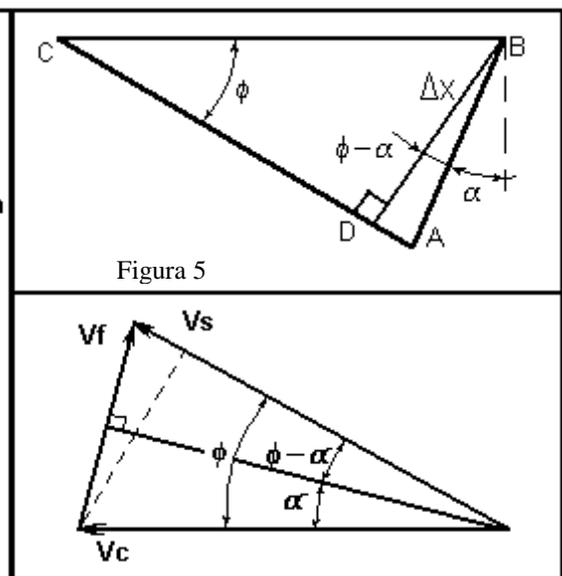


Figura 4



Nota: la deformación que tiene lugar en el proceso de gestación de la viruta, puede ser descripta idealmente como desplazamiento de láminas paralelas. El desplazamiento Δx , tiene lugar para una lámina, al mismo tiempo que se desliza la distancia $\Delta s = AC$ (figura 4) a lo largo del plano de cizallamiento. La deformación cortante o de cizallamiento es igual al deslizamiento dividido por el espesor de la lámina o sea:

$$\epsilon_c = \Delta s / \Delta x = (AD + DC) / DB$$

De la figura 5 obtenemos: $CBD = 90 - \phi$ y $DBA = 90 - (90 - \phi + \alpha) = \phi - \alpha$
 Luego: $AD = \Delta x \operatorname{tg}(\phi - \alpha)$
 $DC = \Delta x \operatorname{ctg} \phi$ lo que conduce a la ecuación (1)

Deformaciones secundarias se producen de la fricción sobre la cara deslizante de la viruta a lo largo de la superficie de ataque de la herramienta. El resultado se ve en la cara suave de un lado de la viruta tipo 2. En contraste, el otro lado es áspero, como está indicado en la figura 4.

2.3.3.- Velocidad de flujo de viruta (V_f)

La velocidad a la cual resbala la viruta sobre la cara de ataque puede calcularse de la ecuación (2) si se conocen la velocidad de corte V_c , el ángulo de cizallamiento y el ángulo de ataque. Las figuras 5 y 6 ilustran suficientemente sobre la relación entre V_c , V_f y V_s . De la figura 6 se deduce fácilmente que:

$$V_f = V_c \frac{\operatorname{sen} \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2)$$

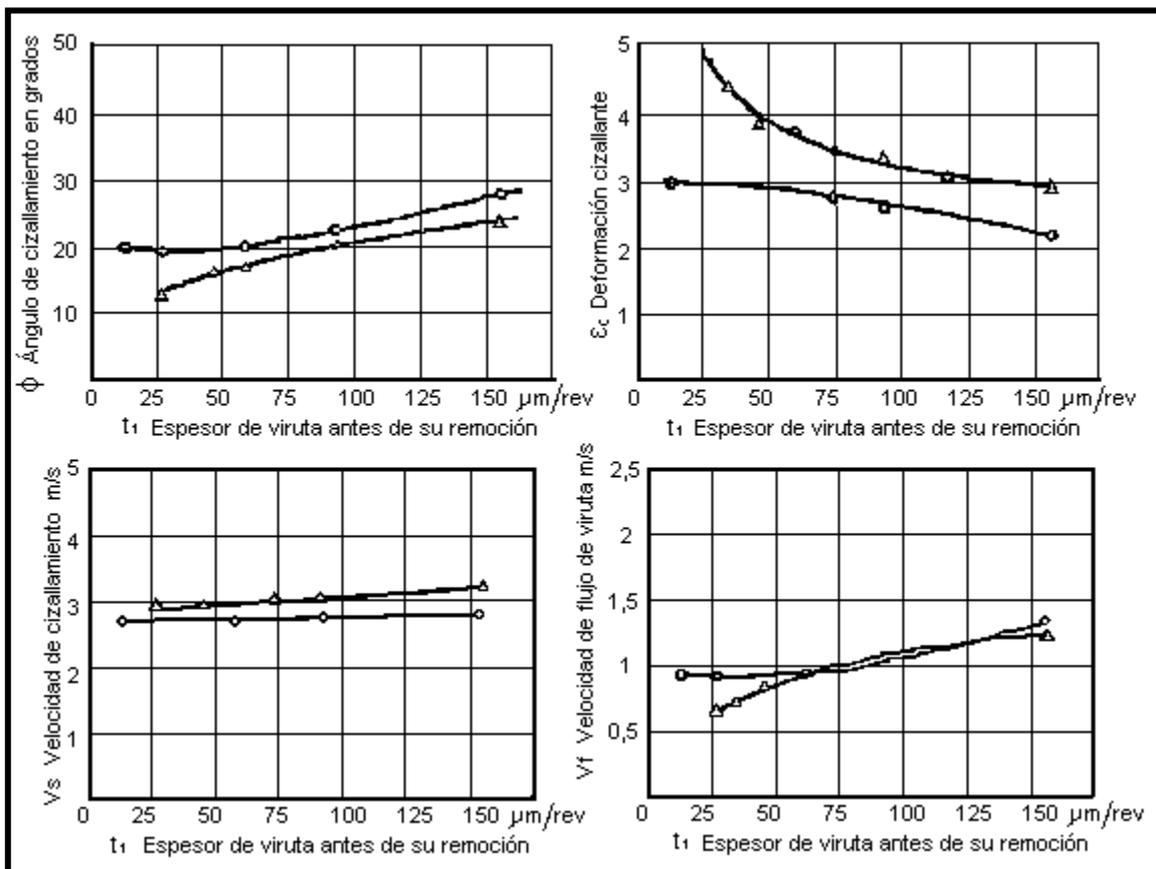


Figura 7 a 10 $\Delta (\alpha = -10^\circ)$ $\circ (\alpha = -10^\circ)$

2.3.4.- Velocidad de cizallamiento (V_s)

La velocidad a la cual se desplaza el metal en el plano de cizallamiento, puede calcularse según:

$$V_s = V_c \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (3)$$

Esta expresión se deduce fácilmente de la figura 6.

Valores típicos de ϕ , ϵ_c , V_f y V_s , en función del espesor de viruta t_1 , obtenidos de mediciones hechas en ensayos de corte ortogonal, son mostradas gráficamente en las figuras 7 a 10 (material: acero SAE 4340, 200 HB, $V_c = 542$ pie/min, Herramienta Metal duro, para los valores de ángulo de ataque siguientes: $\alpha = -10^\circ$ (curvas “Δ”); $\alpha = +10^\circ$ (curvas “O”))

2.3.5.- Razón de corte (r_c)

Para realizar los cálculos indicados, con el fin de analizar una operación de maquinado, es necesario medir el ángulo de cizallamiento ϕ . Esto puede hacerse por varios métodos. Uno de los más sencillos es medir la llamada “razón de corte” r_c , relación entre los espesores de viruta antes y después del arranque (la relación de t_1 a t_2 en la figura 2 o la relación de la longitud de una porción de viruta después del arranque a la longitud de la misma porción de viruta antes del arranque). Esta relación no es difícil de medir y puede usarse para calcular el ángulo de cizallamiento a través de la expresión (4):

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{r_c \cdot \cos \alpha}{1 - r_c \cdot \operatorname{sen} \alpha} \quad (4)$$

Nota: si la sección de viruta es constante y despreciamos su ensanchamiento, el cual generalmente es muy pequeño, y llamando:

l_2 : longitud de la viruta
 l_1 : recorrido de la herramienta

será entonces: $t_1 \cdot l_1 = t_2 \cdot l_2$

Así, la razón de corte, es: $r_c = t_1 / t_2 = l_2 / l_1$

De la figura 11: $\frac{t_1}{t_2} = \frac{\operatorname{sen} \phi}{\cos(\phi - \alpha)}$

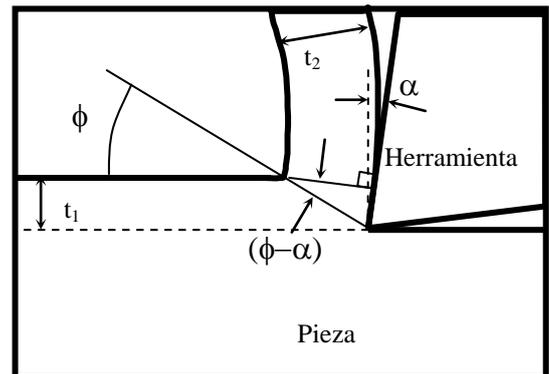


Figura 11

$\therefore \operatorname{tg} \phi =$ ecuación (4), pudiéndose calcular el ángulo de cizallamiento directamente de la ec. (4).

Para un material de viruta continua, l_1 y l_2 se obtienen fácilmente mediante un simple ensayo. Una sola viruta del mecanizado de un pequeño plano en máquina limadora será suficiente. Siendo (l_1) la longitud del plano (preferentemente inferior a 100mm), y (l_2) la longitud de la viruta (que debe enderezarse, previo recocido, para medir su longitud).

Otra forma conveniente para medir r_c es pesando una longitud conocida de viruta. El peso de la viruta será:

$$\text{Peso} = A_0 l_1 \rho = m l_2$$

siendo: $A_0 =$ sección de viruta en $\text{pulg}^2 \cdot 10^{-3}$ $\rho =$ peso específico de la viruta y $m =$ peso de la viruta / unidad de long.

$$\text{Luego: } l_2/l_1 = r_c = A_o \rho / m$$

Y la razón de corte, convirtiendo las unidades, puede calcularse de la siguiente ecuación:

$$r_c = 0,578 \frac{A_o \rho}{m} \quad (5)$$

2.4.- Corte oblicuo

Mientras que en el corte ortogonal, el filo es perpendicular a la dirección del movimiento de la herramienta, en el “corte oblicuo” el filo está inclinado respecto a la dirección mencionada, lo que trae aparejado efectos adicionales, siendo el más importante la modificación de dirección del flujo de viruta sobre la cara de ataque, y la consecuente variación en su evacuación. Cuando el filo está inclinado con respecto a la dirección del movimiento de la herramienta, ordinariamente la viruta no fluye en dirección perpendicular al filo. La geometría de formación de la viruta en este caso, está ilustrada en la figura 12. El ángulo (λ) mide la inclinación del corte principal y se conoce como el “ángulo de inclinación del filo”. A consecuencia de este ángulo, la viruta fluye sobre la cara de ataque con un movimiento lateral medido por el ángulo λ_y . Este flujo lateral, en combinación con el enrollado normal de la viruta, produce la conocida viruta de forma helicoidal. El ángulo λ_y , conocido como “ángulo del flujo de viruta”, es el ángulo de la hélice de la viruta.

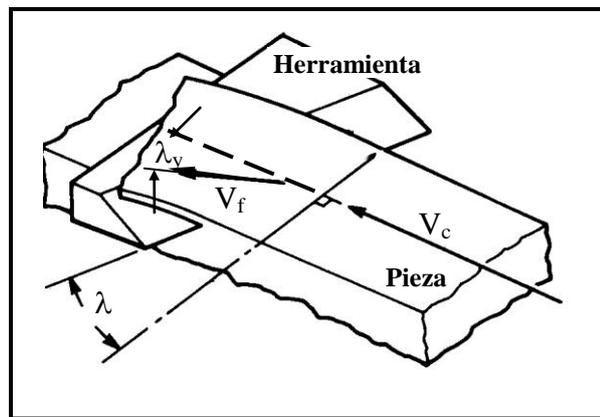


Figura 12.

2.5.- Angulos de la herramienta en la práctica

De lo que precede, es evidente que 2 ángulos básicos juegan importante rol en el mecanizado. Estos son, el ángulo de inclinación normal α_N de la cara de ataque y el de inclinación del filo λ . Para relacionar las discusiones precedentes y las que resultan de la práctica es necesario conocer como son estos dos ángulos, en principio para el tipo más común de herramienta como es la monocortante.

2.5.1.- Angulo de Ataque (α)

En la práctica, el ángulo de inclinación normal α_N es virtualmente equivalente al ángulo de inclinación ortogonal o **de ataque** (α) como se define en el capítulo “Geometría de la Herramienta de Corte”. Este ángulo es una medida de la pendiente de la cara de ataque con respecto a un plano perpendicular al movimiento de corte. Para las herramientas más comunes, la diferencia de valor entre α_N y α es generalmente muy leve.

El ángulo de ataque, para el caso de una herramienta monocortante, es una función de los siguientes ángulos: de inclinación longitudinal α_L y de inclinación transversal α_T (inclinaciones

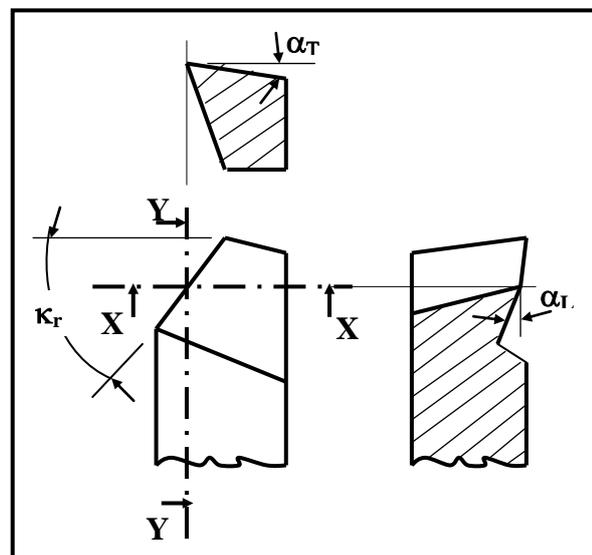


Figura 13.

ambas, de la cara de ataque) y de posición κ_r (frontal del filo principal). Para herramientas diferentes a las monocortantes (por ejemplo: policortantes rotatorias), es función de otros ángulos equivalentes. La figura 13 muestra todos estos ángulos para una herramienta monocortante.

El ángulo de ataque α para una herramienta monocortante puede expresarse en función de sus ángulos componentes mediante la ecuación:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_T \operatorname{sen} \kappa_r + \operatorname{tg} \alpha_L \operatorname{cos} \kappa_r \quad (6a)$$

La importancia del ángulo de ataque como una variable del proceso de mecanizado, se ha puesto de relieve en esta sección por su influencia sobre el ángulo de cizallamiento ϕ , la deformación cizallante ϵ_c , las velocidades de flujo de viruta y de cizallamiento V_f y V_s , y la razón de corte r_c . Nótese que el ángulo de posición κ_r también influye sobre todas estas cantidades debido a su efecto sobre α (ecuación 6a).

2.5.2.- Angulo de Inclinación del filo (λ)

En la práctica, representa la pendiente del filo principal con respecto a un plano perpendicular a la dirección del movimiento de la herramienta (movimiento de corte). Es una función de los ángulos de inclinación longitudinal α_L , transversal α_T y del ángulo de posición κ_r de una herramienta monocortante (o los ángulos equivalentes de herramientas diferentes a las monocortantes). El ángulo de inclinación del filo λ puede expresarse a partir de los ángulos con los cuales está relacionado mediante la ecuación:

$$\operatorname{tg} \lambda = \operatorname{tg} \alpha_L \operatorname{sen} \kappa_r - \operatorname{tg} \alpha_T \operatorname{cos} \kappa_r \quad (6b)$$

Como ya se indicó, la inclinación del filo λ tiene efecto directo sobre la dirección del flujo de viruta, por lo que resulta importante en la práctica. Con una inclinación conveniente, la viruta puede formar bucle hacia la herramienta o hacia la superficie mecanizada, en forma de hélice, en vez de enrollar en compacta espiral como ocurriría si el ángulo λ fuese cero. En operaciones tales como torneado, cepillado o fresado frontal, el flujo lateral lanzará la viruta hacia la superficie mecanizada o lejos de ella, dependiendo del signo del ángulo de inclinación λ . Un ángulo λ negativo, hará fluir la viruta hacia la superficie terminada; mientras que uno positivo hará fluir la viruta lejos de aquella superficie. En las fresas de corte frontal, si las virutas se enrollan hacia la periferia de la fresa, son lanzadas sin trabas hacia fuera, en tanto que si se enrollan hacia adentro, van hacia el eje de la fresa, trabándose e incluyéndose en la superficie de la pieza.

Un ángulo λ grande producirá considerable flujo lateral o enrollado (helixing) de la viruta y viceversa. El flujo lateral puede también incrementarse reduciendo la fricción entre viruta y herramienta, ya sea por el uso de un fluido de corte o con materiales de herramienta de bajo coeficiente de fricción.

2.6.- Endurecimiento producido al mecanizar

La geometría de formación de la viruta tiene una influencia directa sobre el monto de deformación y endurecimiento de las superficies y virutas producidas durante un proceso de maquinado. E.G. Herbert fue el primero en señalar esto en sus clásicos estudios sobre el endurecimiento producido en el corte. Estudios posteriores han completado su descubrimiento. El metal de la viruta y la superficie de la pieza resultan severamente endurecidos en los procesos de maquinado.

Valores de dureza significativamente mayores que aquella del metal que se corta, son a menudo hallados en las porciones de viruta y superficie de la pieza más deformadas. Esto se evidencia en la

figura 14 donde se muestran valores de dureza hallados en distintas partes de la viruta y la superficie mecanizada, para ejemplos típicos de cada uno de los tres tipos básicos de viruta. El endurecimiento es más severo en el caso de la viruta tipo 3; el filo recrecido y los fragmentos desprendidos de él muestran valores de dureza sumamente altos. El metal endurecido de esta manera promoverá, como es natural, rápido desgaste de la herramienta con la cual mantiene un contacto deslizante. La dureza está dada en números Knoop, que pueden transformarse en dureza Brinell multiplicándolos por 0,9.

La figura 15 muestra los valores de dureza hallados en un fragmento típico de material recrecido adherido a la superficie mecanizada. Las superficies cubiertas con tales fragmentos duros son evidentemente muy pobres para usar como superficies de contacto. En otras palabras, la calidad superficial obtenida con una viruta tipo 3 es muy pobre tanto desde el punto de vista del acabado

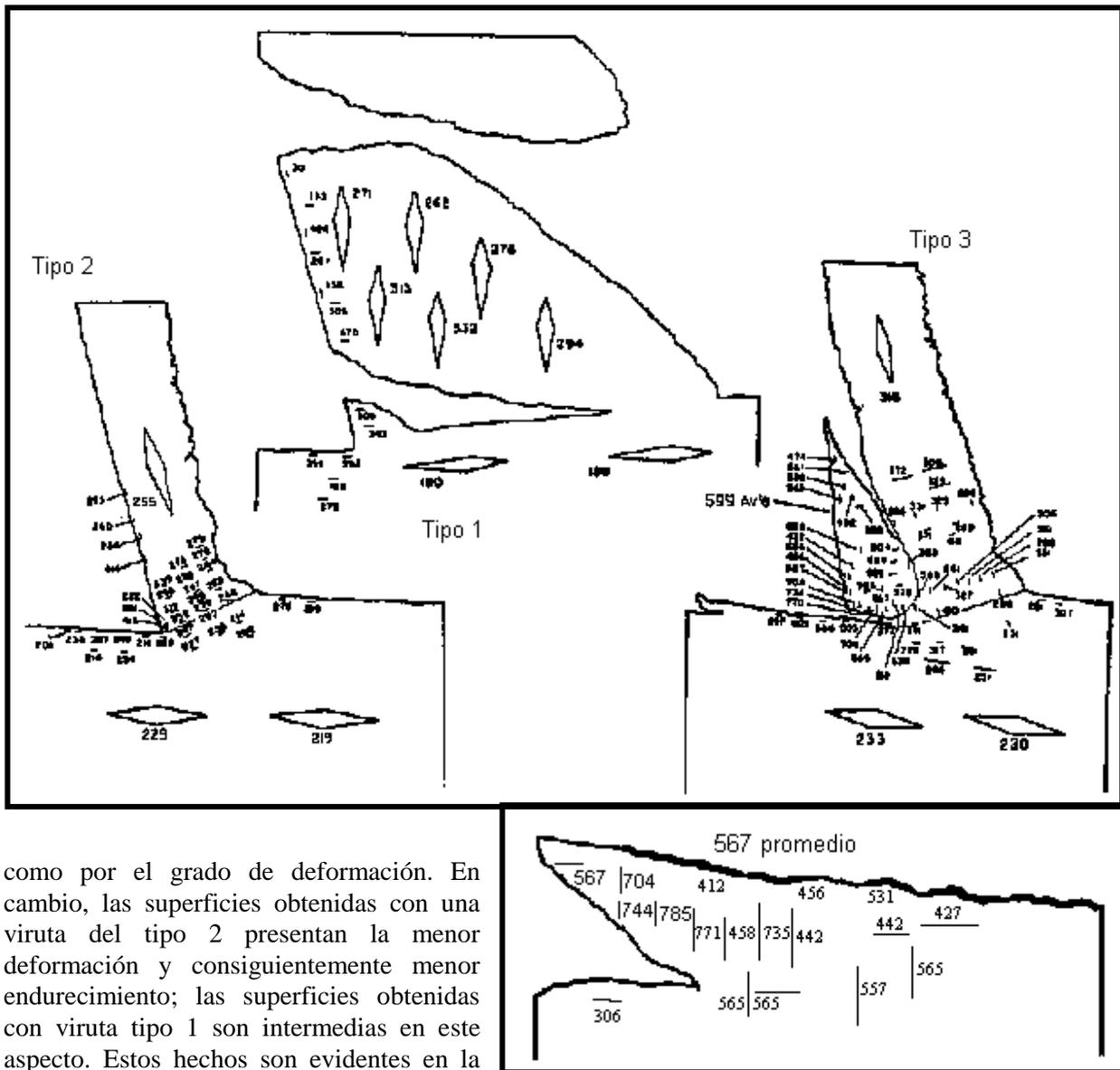


Figura 15

como por el grado de deformación. En cambio, las superficies obtenidas con una viruta del tipo 2 presentan la menor deformación y consiguientemente menor endurecimiento; las superficies obtenidas con viruta tipo 1 son intermedias en este aspecto. Estos hechos son evidentes en la figura 14.

3.- Fuerzas actuantes sobre una herramienta de corte.

3.1.- Principios generales

En el caso general, el sistema de fuerzas actuantes sobre una herramienta, es tridimensional, esto es, el sistema no puede ser representado como situado en un simple plano. La fuerza resultante sobre la herramienta tiene tres componentes básicas. Esta situación existe en todos los casos, excepto en el corte ortogonal, en que la geometría de las fuerzas está considerablemente simplificada; todo el sistema está situado en un simple plano, como muestra la figura 16.

La resultante R puede descomponerse en dos componentes básicas F_c y F_t . La componente F_c en la dirección del movimiento de corte, determina la cantidad de trabajo requerido para desplazar la herramienta una distancia dada. La componente F_t no produce trabajo pero ambas componentes provocan flexiones de la herramienta con relación a la pieza. El sistema de fuerzas de la figura 16 es alcanzado al suponer que la viruta es un cuerpo en equilibrio mecánico estable bajo la acción de las

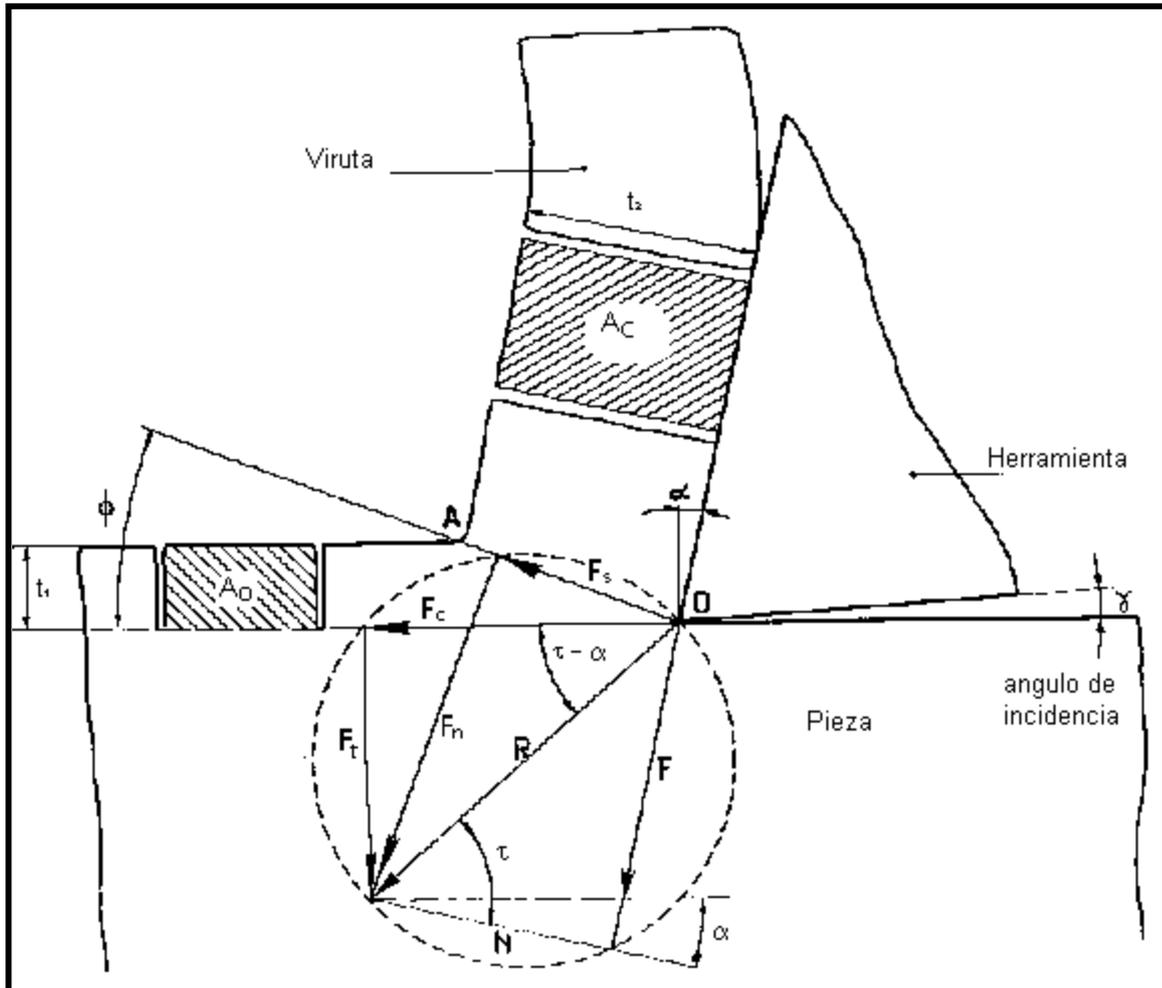


Figura 16

fuerzas ejercidas sobre ella en la cara de ataque de la herramienta y en el plano de cizallamiento. Las componentes F y N actúan sobre la viruta en la cara de ataque; F es conocida como la “fuerza de rozamiento”, y representa la resistencia friccional encontrada por la viruta al resbalar sobre la cara de ataque, mientras que N , es conocida como la “fuerza normal”. La relación F/N es el coeficiente de rozamiento entre viruta y herramienta.

Las componentes actuantes en el plano de cizallamiento son F_s y F_n ; F_s representa la fuerza requerida para cizallar el metal en el plano de cizallamiento y es conocida como “Fuerza de cizallamiento”, y F_n actúa normalmente al plano de cizallamiento provocando una tensión de compresión σ aplicada a aquél plano. La tensión cizallante media sobre el plano de cizallamiento, que es igual a la resistencia al cizallamiento del metal en el proceso de mecanizado, puede obtenerse dividiendo F_s por el área o sección de viruta en el plano de cizallamiento. Correspondientemente, la tensión normal de

compresión sobre el plano de cizallamiento se halla dividiendo F_n por el área o sección de viruta sobre dicho plano.

El trabajo total realizado por la herramienta al cortar el metal se determina en base al valor de la fuerza componente F_c y realmente proviene de dos fuentes. Es la suma del trabajo gastado en vencer la fricción de la viruta al resbalar sobre la cara de ataque y del trabajo consumido para cizallar el metal.

3.2.- Relaciones de fuerzas en el corte ortogonal

De la figura 16 pueden obtenerse ecuaciones que permiten calcular algunas magnitudes mecánicas si ciertas cantidades son conocidas o fácilmente medibles.

Las cantidades conocidas o fácilmente medibles son: los ángulos de cizallamiento ϕ y de ataque α , las fuerzas componentes F_c y F_t , la sección de la viruta A_o y la velocidad de corte V_c . Las magnitudes que pueden ser calculadas con las siguientes:

3.2.1.- Coeficiente de rozamiento (μ)

Del diagrama de fuerzas de la figura 17:

$$\operatorname{tg}(\tau - \alpha) = \frac{F_t}{F_c} = \frac{\operatorname{tg} \tau - \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg} \tau \cdot \operatorname{tg} \alpha}$$

y puesto que $\mu = \operatorname{tg} \tau$, despejando de la anterior resulta:

$$\mu = \frac{F_t + F_c \operatorname{tg} \alpha}{F_c - F_t \operatorname{tg} \alpha} \quad (7)$$

3.2.2.- Fuerza de rozamiento (F)

Del diagrama de fuerzas, figura 18 se deduce fácilmente:

$$F = F_t \cos \alpha + F_c \operatorname{sen} \alpha \quad (8)$$

3.2.3.- Resistencia al cizallamiento (S_s)

Siendo A_s la sección de viruta en el plano de cizallamiento:

$$S_s = F_s / A_s \quad \text{además: } A_s = A_o / \operatorname{sen} \phi$$

Del diagrama de la figura 19:

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \operatorname{sen} \phi \quad \text{y finalmente:}$$

$$S_s = \frac{F_c \cdot \operatorname{sen} \phi \cdot \cos \phi - F_t \cdot \operatorname{sen}^2 \phi}{A_o} \quad (9)$$

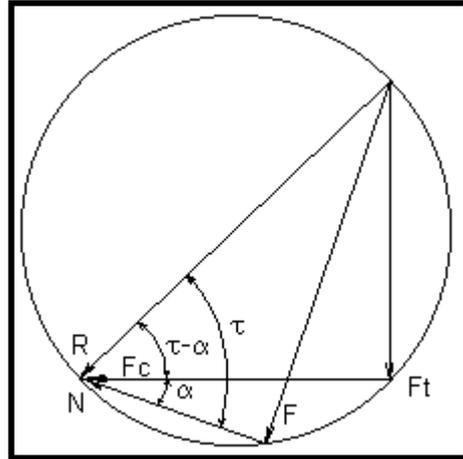


Figura 17

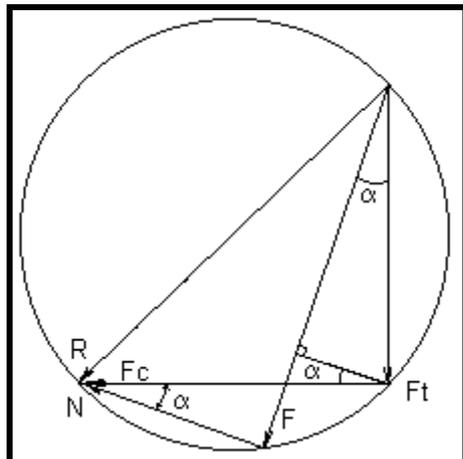


Figura 18

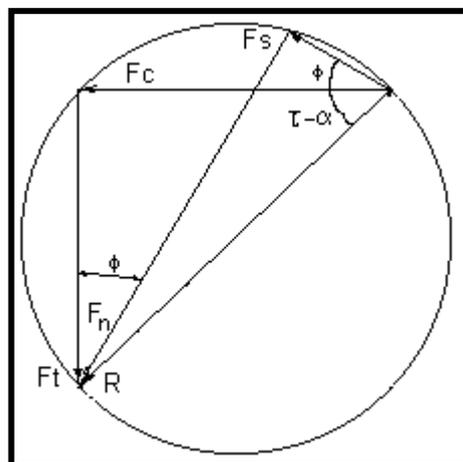


Figura 19

3.2.4.- Trabajo realizado en el cizallamiento (W_s)

El trabajo de la fuerza de cizallamiento por unidad de volumen de viruta, de acuerdo a las figuras 5 y 16, es:

$$W_s = \frac{F_s \overline{AC}}{A_s \Delta x} = \frac{S_s (\overline{AD} + \overline{DC})}{DB}$$

$$\text{Finalmente: } W_s = S_s [\text{ctg } \phi + \text{tg } (\phi - \alpha)] \quad (10)$$

3.2.5.- Trabajo consumido en vencer la fricción (W_f)

La figura 5 indica que al desplazamiento AB de la fuerza de rozamiento corresponde el traslado Δx o DB del segmento de viruta. Y el trabajo de fricción por unidad de volumen será:

$$W_f = \frac{F}{A_s} \cdot \frac{\overline{AB}}{\overline{DB}} \quad \text{de la cual, y de la figura 5, se obtiene:}$$

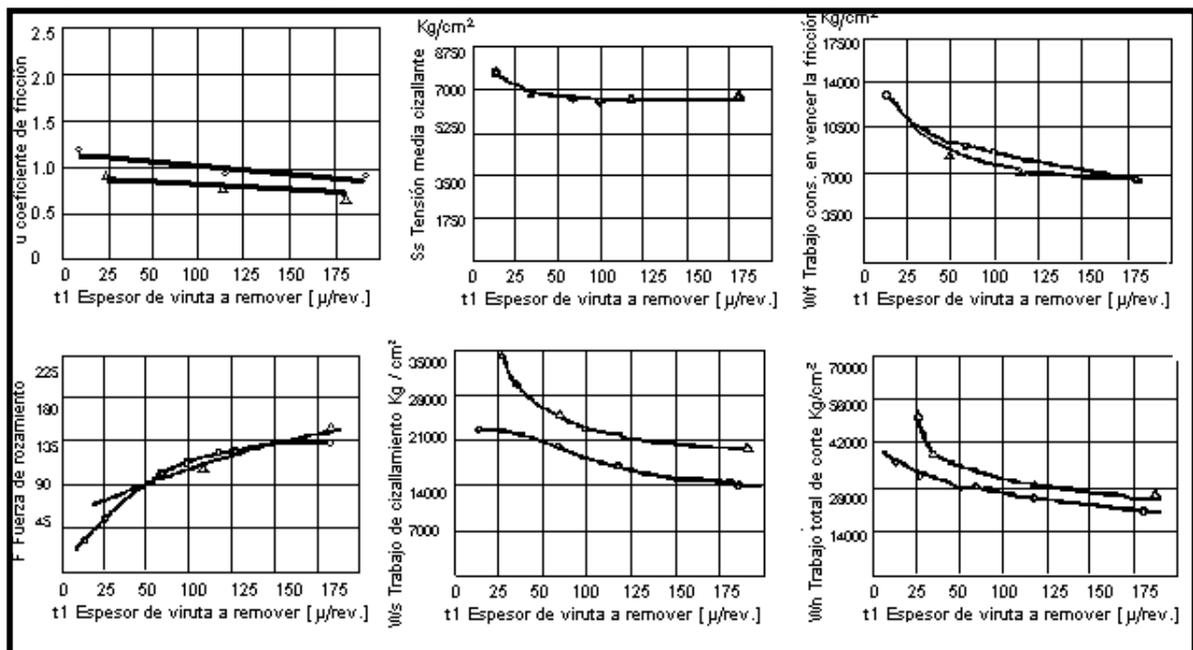
$$W_f = \frac{F}{A_o} \cdot \frac{\text{sen } \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (11)$$

3.2.6.- Trabajo total consumido en el corte W_n (trabajo por unidad de volumen de metal removido, en lb-pulg³/ pulg³). De las figuras 5 y 16, para el recorrido BC de la herramienta arrancando viruta, el volumen removido será ($A_o \cdot BC$) y el trabajo correspondiente será ($F_c \cdot BC$). Entonces:

$$W_n = \frac{F_c \overline{BC}}{A_o \overline{BC}} = \frac{F_c}{A_o} \quad (12)$$

Como se verá más adelante, W_n coincide con la potencia específica (potencia neta requerida para extraer la unidad de caudal viruta) que será definida en la próxima sección.

Los gráficos de las figuras 20 a 25 muestran valores típicos de las magnitudes calculadas con las ecuaciones (7) a (12), con datos provenientes de mediciones realizadas en una operación real de mecanizado con corte ortogonal, sobre acero SAE 4340, 200HB, $V_c=542\text{pie/min}$, Herramienta Metal duro, para los valores de ángulo de ataque $\alpha = -10^\circ$ (curvas "Δ") y $\alpha = +10^\circ$ (curvas "O").



Figuras 20 a 25

 Δ ($\alpha = -10^\circ$) O ($\alpha = +10^\circ$)

3.3.- Magnitudes mecánicas básicas que controlan las fuerzas y la potencia

Ciertas variables activas en el proceso del corte de los metales y discutidas en ítems precedentes, son consideradas de importancia básica en el sentido de que ellas controlan completamente las fuerzas y la geometría en el proceso de formación de la viruta. Dos de ellas son de naturaleza geométrica: el ángulo de ataque α y la sección de viruta A_o . Las otras son de naturaleza mecánica, de las cuales dos han sido ya definidas: la resistencia al cizallamiento S_s y el coeficiente de rozamiento μ ($\text{tg } \tau$). La tercera y última es una propiedad aún no definida, conocida como la constante de maquinado C , que define mediante la siguiente ecuación:

$$C = 2\phi + \tau - \alpha \quad (13)$$

donde $C =$ constante de maquinado (grados).

La constante de maquinado es esencialmente una propiedad del metal particular que se mecaniza; su valor real está estrechamente relacionado con las propiedades plásticas del metal. Puede variar considerablemente de un material a otro, o bajo los efectos de diferentes tratamientos en un mismo material. Puesto que la constante de maquinado tiene influencia directa sobre la magnitud del ángulo de cizallamiento ϕ , ella determina en amplio grado cuan fácilmente un material puede ser maquinado.

Nota: El término “constante de maquinado” como se usa aquí no debe interpretarse como un verdadero índice de maquinabilidad. Aunque esta magnitud está relacionada con la condición física del metal dado, puede verse de la ecuación 13, por ejemplo, que ella tiene la misma importancia que otras magnitudes en las relaciones matemáticas del corte de los metales. La magnitud C es solo una de las muchas magnitudes básicas que influyen sobre la maquinabilidad de un metal, no una de las que por si misma constituye una medida de la maquinabilidad.

3.3.1. Efecto de las magnitudes mecánicas básicas sobre las fuerzas y la potencia

Cuando el ángulo de ataque α y la sección de viruta A_o tienen un valor fijo, las tres magnitudes mecánicas – resistencia al cizallamiento S_s , coeficiente de fricción $\mu = \text{tg } \tau$ y constante de maquinado C controlan totalmente las fuerzas y la geometría de formación de la viruta.

El consumo de potencia en el corte está relacionado a estas tres variables y al ángulo de ataque de la siguiente manera:

$$W_n = \frac{S_s}{198.000} \cdot \frac{\cos(\tau - \alpha)}{\text{sen } C - \text{sen}(\tau - \alpha)} \left[\frac{CV}{\text{pu lg}^3/\text{min}} \right] \quad (14)$$

Seguidamente, se deduce la expresión (14): de la fig. 19, ecuación (12) y la relación $A_o = A_s \text{ sen } \phi$:

$$W_n = \frac{F_c}{A_o} = \frac{F_s \cos \phi + F_n \text{ sen } \phi}{A_s \text{ sen } \phi} = \frac{F_s}{A_s} [\text{ctg } \phi + \text{tg}(\phi + \tau - \alpha)] = S_s [\text{ctg } \phi + \text{tg}(\phi + \tau - \alpha)]$$

y utilizando la (13):

$$W_n = S_s [\text{ctg } \phi + \text{tg}(C - \phi)] \quad (a)$$

$$\begin{aligned} \text{pero } ctg \phi + tg(C - \phi) &= \frac{\cos \phi}{\text{sen} \phi} + \frac{\text{sen}(C - \phi)}{\cos(C - \phi)} = \frac{\cos \phi \cdot \cos(C - \phi) + \text{sen} \phi \cdot \text{sen}(C - \phi)}{\text{sen} \phi \cdot \cos(C - \phi)} = \\ &= \frac{\cos(C - 2\phi)}{\text{sen} C - \cos \phi \cdot \text{sen}(C - \phi)} \quad (\text{b}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \phi \cdot \text{sen}(C - \phi) &= \cos \phi \cdot (\text{sen} C \cdot \cos \phi - \cos C \cdot \text{sen} \phi) = \text{sen} C \cdot \cos^2 \phi - \cos C \cdot \text{sen} \phi \cdot \cos \phi = \\ &= \text{sen} C (1 - \text{sen}^2 \phi) - \cos C \cdot \frac{\text{sen}(2\phi)}{2} = \text{sen} C - \text{sen} C \cdot \frac{(1 - \cos(2\phi))}{2} - \cos C \cdot \frac{\text{sen}(2\phi)}{2} = \\ &= \frac{\text{sen} C}{2} + \frac{\text{sen} C \cdot \cos(2\phi) - \cos C \cdot \text{sen}^2 \phi}{2} = \frac{\text{sen} C}{2} + \frac{\text{sen}(C - 2\phi)}{2} = \frac{\text{sen} C}{2} + \frac{\text{sen}(\tau - \alpha)}{2} \quad (\text{c}) \end{aligned}$$

y reemplazando (c) en la ecuación (b) y ésta en la ecuación (a):

$$W_n = 2S_s \cdot \frac{\cos(\tau - \alpha)}{\text{sen} C - \text{sen}(\tau - \alpha)} \quad (\text{d})$$

Hasta aquí, W_n representa el trabajo realizado para cortar la unidad de volumen de metal y se expresa en lb-pulg/pulg³. También W_n es llamada potencia específica, que es la potencia consumida ($F_c \cdot V_c$) para remover por mecanizado una unidad de volumen de metal en la unidad de tiempo (caudal $A_0 \cdot V_c$), es decir:

$$W_n = \frac{F_c V_c}{A_0 V_c} = \frac{F_c}{A_0}$$

Para que la W_n dada en la expresión (d) represente la potencia gastada para mecanizar la unidad de volumen por minuto, debe tenerse en cuenta que 1 CV = 33.000 lb-pie/min = 396.000 lb-pulg/min, factor de unidades que introducido en la ecuación (d) conduce a la ecuación (14).

Del análisis de la ecuación (14) se desprende que las fuerzas y el consumo de potencia se verán reducidos si la resistencia al cizallamiento S_s o el coeficiente de μ son reducidos, o si la constante de maquinado C es aumentada.

Estos hechos están resumidos

en la tabla 1. El efecto de estas magnitudes mecánicas básicas sobre el acabado superficial y duración (o vida) de la herramienta, que se discutirán seguidamente, también están resumidos en esta tabla 1.

Tabla 1

Propiedad del material	Fuerzas y consumo de potencia	Acabado superficial	Vida de la herramienta
	Efecto al reducir el valor de la propiedad		
Constante de maquinado, C	MALO	?	MALO
Resistencia al cizallamiento, S_s	BUENO	NINGUNO	BUENO
Coefficiente de fricción, m	BUENO	BUENO	BUENO
Dureza Brinell, HB	*	NINGUNO	BUENO
Endurecibilidad por deformación, n	*	BUENO	BUENO
Inclusiones duras y abrasivas en la microestructura	*	NINGUNO	BUENO

3.3.2.- Efecto de las magnitudes mecánicas básicas sobre la Terminación Superficial

La terminación superficial producida al mecanizar puede ser considerada en relación al tipo de viruta obtenida o en relación a las variables básicas ya discutidas. Para la relación entre la terminación superficial y el tipo de viruta, véase la discusión anterior correspondiente a los tipos de virutas (ítem 2.1).

De las tres variables mecánicas básicas: S_s , C y μ , solamente la última es conocida en el sentido de tener un efecto definido sobre la terminación superficial. Si el rozamiento entre viruta y herramienta es alto, el acabado será pobre y viceversa. Sin embargo, hay otro factor mecánico que tiene un marcado efecto sobre la terminación superficial, este es la “**endurecibilidad por deformación**” del metal que se corta. Si el metal tiene alta endurecibilidad por deformación, la terminación será pobre y viceversa. La endurecibilidad por deformación es fácilmente medida mediante el exponente “ n ” de Meyer, que se determina realizando indentaciones en el metal con una bola Brinell con distintos valores de carga. Si los diámetros resultantes de las indentaciones son luego ploteados con las cargas en un gráfico, la pendiente de la línea recta resultante, es n , el exponente de Meyer.

Su valor es siempre 2.0 o más grande. Cuanto mas alto es el exponente de Meyer, mayor es la endurecibilidad por deformación del metal bajo prueba. El exponente de Meyer puede así considerarse otra variable mecánica básica que influye directamente sobre las cualidades de mecanizado de un metal. Sus valores para aceros típicos están dados en la tabla 2. En resumen, puede decirse que por lo menos dos variables básicas son conocidas en el sentido de tener un efecto directo sobre la terminación superficial: el coeficiente de rozamiento entre viruta y herramienta, y la endurecibilidad por deformación del metal que se corta, y sus efectos se indican en la tabla 1. Otras variables cuyos efectos serán luego analizados, también influyen sobre la terminación superficial.

3.3.3.- Efecto de las magnitudes mecánicas básicas sobre la Vida de la Herramienta

Las variables mecánicas básicas S_s , μ y C influyen sobre la energía aplicada en el corte, que se consume para el cizallamiento del metal y para vencer la fricción entre viruta y herramienta. Estas energías, a su vez, influyen sobre los principales factores que afectan a la duración del filo de la herramienta. Estos factores son:

- a) Temperatura de corte.
- b) Acción abrasiva del material de la pieza sobre la herramienta.

- Temperatura de corte

La temperatura en la zona de corte tiene un efecto directo sobre la vida de la herramienta. La relación entre duración del filo y temperatura es de la forma:

$$b \cdot T^z = B \quad (21)$$

- b = temperatura de la cara de ataque ($^{\circ}C$)
- T = tiempo real de corte de la herramienta hasta desgastar el filo (min)
- B = constante
- z = exponente

En la práctica, si la temperatura se mide mediante termocupla pieza-herramienta, el exponente z fluctúa dentro del rango de $1/10$ a $1/25$. El valor de la constante es $B \approx 800$. Un pequeño cambio en la temperatura, tiene un gran efecto en la vida de la herramienta. Esto se ilustra en la figura 26 para tres diferentes aceros. El aumento de temperatura provoca reducción de la dureza del material de la herramienta, y por ende de su resistencia al desgaste.

La temperatura de corte puede ser disminuida aplicando un fluido de corte para extraer el calor o reduciendo la energía gastada en el corte. Una reducción de la resistencia al cizallamiento o del coeficiente de rozamiento o un aumento de la constante de maquinado reducirán la

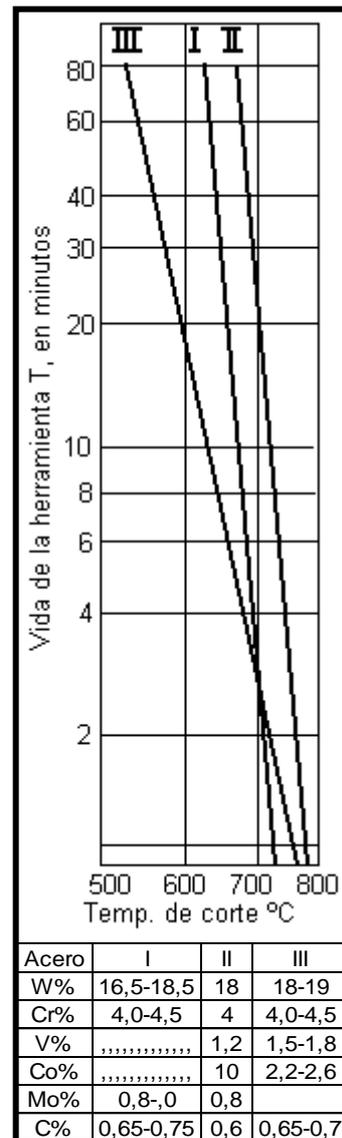


Figura 26

cantidad de energía gastada en el corte, aumentando la duración de la herramienta.

- Acción abrasiva de la pieza sobre la herramienta

La acción abrasiva de la pieza sobre la herramienta tiene por lo menos 2 orígenes: **1) los constituyentes duros** presentes en la microestructura del metal que se está cortando; **2) el endurecimiento** de la superficie de la pieza y la viruta por el proceso de corte.

La primera necesita poca explicación adicional. Las inclusiones duras de la microestructura, ordinariamente producirán rápido desgaste de la herramienta.

La cantidad de abrasión producida por el endurecimiento depende de: **a) la dureza inicial** del metal que se mecaniza (medida por la dureza Brinell H); **b) la endurecibilidad por deformación** (medida por el exponente **n** de Meyer; **c) la cantidad de deformación por cizallamiento** que el metal sufre durante el mecanizado. Esta última es una función del coeficiente de rozamiento entre la viruta y la herramienta y de la constante de maquinado del metal de la pieza. Cuanto mas baja sea la fricción y mas alta la constante de maquinado, en menor grado se deformará el metal durante el mecanizado. Así, en igualdad de otras condiciones, el desgaste de la herramienta se reduce cuando son menores la dureza inicial del metal, su endurecibilidad por deformación y la cantidad de deformación que tiene lugar durante el corte.

Resumiendo: las variables mecánicas básicas cuyos efectos sobre la vida de la herramienta se conocen son: la resistencia al cizallamiento del metal que se mecaniza, el coeficiente de rozamiento entre la viruta y la herramienta, la constante de maquinado, la endurecibilidad por deformación del metal, su dureza Brinell inicial y la cantidad y naturaleza de constituyentes duros en su microestructura. El efecto de estas variables sobre la duración del filo, está resumido en la tabla 1. Otras variables cuyos efectos serán luego analizados, también influyen sobre la vida de la herramienta.

3. 4.- Control de las magnitudes mecánicas básicas S_s , μ y C

Las magnitudes mecánicas básicas, actuando durante una dada operación de corte, son susceptibles de control. Seguidamente, se informa acerca de los factores que permiten controlar sus valores.

La resistencia al cizallamiento S_s , de un material, es alta para materiales duros y resistentes, y es baja para materiales blandos y poco resistentes. El endurecimiento y aumento de la resistencia a la tracción de un metal por tratamiento térmico trae aparejado normalmente, un aumento de la resistencia al cizallamiento.

Sin embargo, el endurecimiento y aumento de la resistencia a la tracción por procesos de deformación en frío (trefilado, laminación), normalmente origina pequeño incremento en la resistencia al cizallamiento. El valor de esta última no es grandemente afectado por las condiciones de mecanizado. Algunos de estos efectos están ilustrados por los datos de la tabla 2.

El coeficiente de rozamiento μ entre la herramienta y la viruta es la variable más susceptible de ser controlada en el corte. El coeficiente μ puede reducirse por el empleo de un eficaz fluido de corte, tomando la viruta mas gruesa (avance por vuelta) o usando una elevada velocidad de corte. También puede ser reducido por la presencia de ciertos aditivos químicos en el material de la pieza. Por ejemplo, la presencia de plomo o inclusiones de azufre en el acero reducirá la fricción de la viruta sobre la cara de ataque puesto que ellos son realmente blandos a las temperaturas del corte y producen una película de material relativamente poco resistente sobre el cual la viruta puede resbalar. Algunos de estos efectos están ilustrados por los datos de la tabla 2

La constante de maquinado C , igual que la resistencia al cizallamiento, no se ve grandemente afectada por las condiciones del corte. En cambio, parece ser apreciablemente influenciada por la

microestructura y el tamaño de grano del material que se mecaniza. El trabajo en frío de un metal, ordinariamente incrementa su constante de maquinado. Esto está ilustrado en la tabla 2. Sin embargo, todavía queda mucho por saber sobre los factores que controlan la constante del maquinado.

La tabla 2 enlista valores típicos de la resistencia al cizallamiento, coeficiente de fricción y constante de maquinado para algunos de los aceros mas comunes, determinados experimentalmente. También se dan en la tabla 2, valores del exponente de endurecimiento por deformación y de durezas Brinell, los que serán analizados más adelante.

Tabla 2

Acero AISI N ^o	Condición	Dureza Brinell	Endurecibilidad por deformación, n	Constante de maquinado C (grados)	Resistencia cortante S _s (kg/mm ²)	Coefficiente de fricción, m
1010	Lam. Cal.	103	2,32	69,8	46	1,32
1019	Lam. Cal.	147	2,24	73,1	54	0,95
1019	Tref. Frío	169	2,16	73,7	52	0,98
1020	Lam. Cal.	109	2,33	69,6	50	0,94
1022 (al Pb)	Lam. Cal.	121	2,29	71,8	52	0,4
1045	Lam. Cal.	190	2,35	78	63	0,96
1045	Tref. Frío	213	2,25	81,2	95	0,94
1070	Lam. Cal.	217	2,34	78,8	75	0,84
1095	Lam. Cal.	182	2,34	73	95	0,89
1113 (sulfurizado)	Tref. Frío	170	2,24	71,1	49	0,53
1340	Lam. Cal.	192	2,25	74,8	63	1,1
2340	Lam. Cal.	197	2,31	76,2	62	0,99
3115	Lam. Cal.	131	2,23	78,4	47	1,14
3130	Lam. Cal.	169	2,32	72,4	56	0,94
3140	Lam. Cal.	185	2,24	70,6	56	1,12
3150	Lam. Cal.	197	2,35	75,7	60	1,13
4340	Lam. Cal.	210	2,25	74,5	63	1,06
52100	Lam. Cal.	186	2,22	71,3	49,5	1,11
52100	Tref. Frío	240	2,17	72,9	53	1,04
Aceros inoxidables						
303 (sulfurizado)	Lam. Cal.	162	2,37	92	72	0,8
304	Lam. Cal.	139	2,9	82	80	1,18
410	Lam. Cal.	217	2,2	79,3	60	0,87
416 (sulfurizado)	Lam. Cal.	215	2,2	82,7	56	0,82
430	Lam. Cal.	156	2,33	73,1	55	0,92
430F (sulfurizado)	Lam. Cal.	181	2,26	74,6	57	0,8

3.4 Cálculo de las fuerzas a partir de la medida del ángulo de cizallamiento ϕ

Es posible calcular las fuerzas actuantes sobre la herramienta de corte y las otras magnitudes relacionadas con esas fuerzas, directamente a partir de la medida del ángulo de cizallamiento con un razonable grado de exactitud en ciertos casos. Esto puede hacerse cuando los valores de la resistencia al cizallamiento y de la constante de maquinado del material que se mecaniza son conocidos. En este caso, las expresiones que se dan a continuación pueden emplearse para calcular las fuerzas y otras magnitudes de interés. Las medidas reales de la fuerza sobre la herramienta son luego innecesarias.

Las fórmulas siguientes son validas para corte ortogonal y viruta de tipo 2:

$$\mu = \operatorname{tg} (C - 2\phi + \alpha) \quad (15)$$

$$F = A_o \cdot S_s \cdot \frac{\operatorname{sen}(C - 2\phi + \alpha)}{\operatorname{sen}\phi \cdot \cos(C - \phi)} \quad (16)$$

$$W_f = S_s [\operatorname{tg} (C - \phi) - \operatorname{tg} (\phi - \alpha)] \quad (17)$$

$$W_n = S_s [\operatorname{tg} (C - \phi) + \operatorname{ctg} \phi] \quad (18)$$

$$F_c = A_o S_s [\operatorname{tg} (C - \phi) + \operatorname{ctg} \phi] \quad (19)$$

$$F_t = A_o S_s [\operatorname{ctg} \phi \operatorname{tg} (C - \phi) - 1] \quad (20)$$

Nota: las anteriores se obtienen de la siguiente manera:

Coefficiente de Rozamiento: de la figura 16 y de la ecuación (13):

$$\mu = \operatorname{tg} \tau = \operatorname{tg} (C - 2\phi + \alpha)$$

Fuerza de Rozamiento: de la figura 16:

$$F = R \cdot \operatorname{sen} \tau = \frac{F_s}{\cos(\phi + \tau - \alpha)} \cdot \operatorname{sen} \tau$$

Siendo: $F_s = A_3 \cdot S_s = \frac{A_o}{\operatorname{sen} \phi} \cdot S_s$; reemplazando F_s por su valor y utilizando la ecuación (13),

$$\phi + \tau - \alpha = C - \phi \quad \text{se arriba a la (16).}$$

Trabajo gastado en la fricción: Introduciendo el valor de F dado por la ecuación (16), en la ecuación (11):

$$W_f = S_s \cdot \frac{\operatorname{sen}(C - 2\phi + \alpha)}{\cos(C - \phi) \cdot \cos(\phi - \alpha)} = S_s \cdot \frac{\operatorname{sen}[(C - \phi) - (\phi - \alpha)]}{\cos(C - \phi) \cdot \cos(\phi - \alpha)} =$$

$$W_f = S_s \cdot \frac{\operatorname{sen}(C - \phi) \cdot \cos(\phi - \alpha) - \cos(C - \phi) \cdot \operatorname{sen}(\phi - \alpha)}{\cos(C - \phi) \cdot \cos(\phi - \alpha)} =$$

cuya simplificación conduce a la (17).

Trabajo total gastado en el corte: Partiendo de la ecuación 12, y en base a la figura 16, relaciones anteriores y ecuación (13):

$$W_n = \frac{F_c}{A_o} = \frac{R \cdot \cos(\tau - \alpha)}{A_o} = S_s \cdot \frac{\cos(C - 2\phi)}{\operatorname{sen} \phi \cdot \cos(C - \phi)} = S_s \cdot \frac{\cos[(C - \phi) - \phi]}{\operatorname{sen} \phi \cdot \cos(C - \phi)} =$$

$$W_n = S_s \cdot \frac{\cos(C - \phi) \cdot \cos \phi + \operatorname{sen}(C - \phi) \cdot \operatorname{sen} \phi}{\operatorname{sen} \phi \cdot \cos(C - \phi)}$$

Cuya simplificación conduce a la ecuación (19).

Fuerza de Empuje: de la figura 16 y ecuación (13):

$$F_t = F_c \operatorname{tg} (\tau - \alpha) = F_c \operatorname{tg} (C - 2\phi)$$

Siendo $F_c = R \cos (\tau - \alpha) = R \cos (C - 2\phi)$;

$$R = \frac{F_s}{\cos(\phi + \tau - \alpha)} = \frac{F_s}{\cos(C - \phi)} \quad \text{y} \quad F_s = \frac{A_o}{\text{sen}\phi} \cdot S_s$$

Reemplazando: $F_t = A_o \cdot S_s \frac{\text{sen}(C - 2\phi)}{\text{sen}\phi \cdot \cos(C - \phi)} = A_o \cdot S_s \frac{\text{sen}[(C - \phi) - \phi]}{\text{sen}\phi \cdot \cos(C - \phi)}$

Desarrollando y simplificando se llega a la (20).

En las Tablas 3 y 4 se dan datos de los diferentes parámetros estudiados, obtenidos en ensayos de corte ortogonal de dos clases de aceros, bajo distintas condiciones de corte. Los valores tabulados permiten analizar los efectos del espesor de viruta t_1 , la velocidad de corte V_c y el ángulo de ataque α , sobre el ángulo de cizallamiento ϕ , la razón de corte r_c , la deformación cizallante ϵ_c , el coeficiente de rozamiento μ , la resistencia al cizallamiento S_s , las fuerzas F_c y F_t actuantes en el corte, y la tensión normal de compresión en el plano de cizallamiento $\sigma = F_n/A_s$. A modo de ejemplo, puede apreciarse que cuando crece t_1 disminuye μ , cuando aumenta α se logra incrementar ϕ , y que un aumento de V_c reduce la fuerza de corte F_c . Análisis de ese tipo permiten confirmar lo visto y discutido hasta aquí, expresado matemáticamente en las ecuaciones enunciadas, entre ellas la (1), (4), (7), (13) y (14). Los datos de potencia, W_t , W_n y W_n/W_t serán analizados en el capítulo “Maquinabilidad de los metales”.

Tabla 3. Datos de corte ortogonal. Material Acero NE 9445 (HB=187). Herramienta: Metal Duro. Ancho de corte 6.35 mm. Sin fluido de Corte.

t_1 mm	V_c m/min	α grados	r_c	ϕ grados	ϵ_c	F_c N	F_t N	μ	S_s Mpa	σ Mpa	W_t Nm/m ³	W_n Nm/m ³	W_n/W_t
0.094	60	+10	0.29	17.0	3.4	1646	1214	1.05	586	793	2758	2013	0.73
0.094	122	+10	0.33	19.0	3.1	1601	1259	1.11	607	945	2689	1834	0.68
0.094	196	+10	0.37	21.5	2.7	1463	965	0.95	621	889	2455	1717	0.70
0.094	362	+10	0.44	25.0	2.4	1348	747	0.81	641	896	2262	1551	0.69
0.094	122	-10	0.32	16.5	3.9	1850	1712	0.64	614	1055	3103	2358	0.76
0.094	194	-10	0.37	19.0	3.5	1708	1450	0.58	621	1048	2861	2151	0.75
0.094	354	-10	0.44	22.0	3.1	1583	1170	0.51	648	1062	2655	1993	0.75
0.001	165	+10	0.33	19.0	3.1	565	449	1.12	710	1131	3206	2124	0.66
0.059	165	+10	0.32	18.5	3.1	1076	827	1.08	638	965	2855	1979	0.69
0.094	165	+10	0.37	21.5	2.7	1495	1005	0.96	627	903	2503	1717	0.69
0.200	165	+10	0.44	25.0	2.4	2691	1401	0.76	614	800	2117	1476	0.70
0.001	165	+10	0.73	12.5	5.0	805	881	0.78	710	1234	4578	3606	0.79
0.059	165	+10	0.30	16.0	4.0	1312	1294	0.70	662	1186	3482	2655	0.76
0.094	165	+10	0.37	19.0	3.5	1784	1557	0.60	648	1131	2992	2110	0.71
0.200	165	+10	0.46	22.5	3.1	3105	2099	0.46	621	952	2441	1862	0.76

Tabla 4. Datos de Corte Ortogonal. Material Acero SAE 4130. Herramienta: Acero Rápido. Ancho de corte 12.1mm. V_c : 27m/min. Viruta continua. Sin fluido de Corte.

t_1 mm	α grados	r_c	ϕ grados	ϵ_c	F_c N	F_t N	μ	S_s Mpa	σ Mpa	W_t Nm/m ³	W_n Nm/m ³	W_n/W_t
0.064	25	0.358	20.9	2.55	1690	996	1.46	571	717	2206	1441	0.65
0.089	25	0.366	21.5	2.48	2113	1250	1.46	514	662	1972	1241	0.63
0.127	25	0.407	24.0	2.23	2860	1588	1.38	521	690	1862	1165	0.63
0.152	25	0.345	20.1	2.65	3238	1770	1.36	454	596	1758	1207	0.69
0.216	25	0.383	22.4	2.38	4412	2451	1.38	459	576	1696	1096	0.65
0.064	35	0.527	31.6	1.56	1130	454	1.53	492	662	1476	772	0.52
0.089	35	0.528	31.9	1.55	1361	543	1.52	422	579	1269	665	0.52
0.127	35	0.529	32.0	1.55	1926	738	1.48	430	572	1255	665	0.53
0.152	35	0.533	32.2	1.54	2255	818	1.43	426	611	1227	658	0.54
0.216	35	0.532	32.0	1.55	3002	1041	1.38	403	558	1151	630	0.55
0.064	40	0.585	35.7	1.32	1032	316	1.54	496	652	1345	648	0.48
0.089	40	0.580	35.4	1.33	1317	387	1.50	459	581	1227	605	0.49
0.127	40	0.611	37.5	1.26	1833	498	1.44	456	600	1193	573	0.48
0.152	40	0.606	37.2	1.27	2113	565	1.42	438	621	1151	559	0.49
0.216	40	0.606	37.2	1.27	2820	681	1.35	424	573	1083	539	0.50
0.064	45	0.670	41.9	1.06	1032	302	1.83	490	790	1345	516	0.38
0.089	45	0.670	41.9	1.06	1268	343	1.74	443	681	1179	472	0.40
0.127	45	0.649	40.2	1.10	1717	418	1.64	440	601	1117	480	0.43
0.152	45	0.642	39.6	1.01	1970	454	1.60	425	557	1069	432	0.40
0.216	45	0.646	39.9	1.11	2584	520	1.51	405	507	993	448	0.45

4.- Vibración y “Vibrado” (chatter)

Las vibraciones de intensidad capaz de producir ruido, deterioro en las máquinas y marcas características en las superficies de las piezas reciben, en el léxico estadounidense, el nombre de “chatter”. A falta de un vocablo mejor traducido, se empleará aquí el término “vibrado”, que en español se aplica más para referirse a los efectos que al origen de los mismos. Convendremos en distinguir el vibrado (chatter) de la vibración (vibration) inofensiva, siempre presente en el proceso de corte.

4.1.- Principios generales

La vibración y el vibrado en el mecanizado de metales son perjudiciales para la duración de la herramienta, el acabado superficial y la exactitud de las piezas maquinadas. La comprensión teórica de estos factores es al presente bastante conocida. No obstante siguen estudiándose estos fenómenos, y sus efectos para casos de materiales que no han sido objeto de suficiente experimentación, para nuevos materiales y geometrías de herramientas de corte, condiciones de mecanizado a alta velocidad, etc.

Las vibraciones que se producen en el mecanizado de metales son de dos tipos: “forzadas” o “auto-inducidas”.

Vibraciones “forzadas” son aquellas que se producen bajo la acción de fuerzas sobre la herramienta variables rítmicamente, siendo las variaciones debidas a causas mecánicas. En otras palabras, la herramienta o la pieza es empujada por una fuerza variable. Tales vibraciones se producen a una frecuencia impuesta por la fuente mecánica de las variaciones de la fuerza, la cual puede ser de una frecuencia bastante diferente a las frecuencias naturales de los elementos vibrantes.

Vibraciones “auto-inducidas” son aquellas que se producen debido al equilibrio inestable del elemento vibrante potencial y una vez iniciadas por algún medio mecánico se auto-perpetúan. La condición necesaria usual para esa inestabilidad es que el desvío del elemento vibrante se produzca en una dirección o modo como para originar un incremento de la fuerza desviadora actuante sobre aquel elemento. Las vibraciones auto-inducidas aparecen a una frecuencia muy próxima a la frecuencia natural del elemento vibrante.

De los dos tipos de vibraciones, la auto-inducida es ordinariamente la más severa. En general, el vibrado es comúnmente del tipo auto-inducido.

4.1.1.- Vibración forzada

La fuente de vibraciones forzadas, en el mecanizado de metales, se halla ordinariamente en la mecánica o en la geometría del proceso de corte. Aunque ocasionalmente, si los mecanismos de la herramienta no están adecuadamente diseñados o ajustados, pueden ser el origen de tales vibraciones. Entre las más comunes fuentes de vibraciones forzadas de la herramienta o de la pieza están los fragmentos desprendidos de filo recrocado (cuando se genera viruta tipo 3) o las fracturas que aparecen delante de la herramienta (cuando se produce viruta tipo 1). A medida que los fragmentos del recrocamiento se evacúan con la viruta o la superficie de la pieza, se originan variaciones de la fuerza sobre la herramienta. Estas variaciones rítmicas de la fuerza producen un movimiento vibratorio de la herramienta, de la pieza o de ambas, que es también comunicado a varias partes de la máquina-herramienta y puede inducirlos a vibrar a su frecuencia natural. En el caso de la viruta tipo 1, las repetidas fracturas del metal en el plano de cizallamiento, delante de la herramienta, producen variaciones rítmicas de la fuerza, las cuales tienen un efecto similar a aquellas descritas antes. En este caso, las vibraciones pueden tornarse bastante severas puesto que los cambios de la fuerza son a menudo grandes. Otra fuente común de vibraciones forzadas se halla en las marcas dejadas sobre la

superficie de la pieza por un corte anterior “vibrado”. A medida que la herramienta progresa sobre esta superficie previamente mecanizada tomando un nuevo corte, el tamaño variable de la viruta, ocasionado por las irregularidades dejadas por el corte anterior vibrado, produce variaciones periódicas de la fuerza, las que originan vibración e inducen vibrado.

4.1.2.- Vibración auto-inducida

Las vibraciones auto-inducidas de las herramientas de corte han sido estudiadas con algún detalle por el Sub-Comité de herramientas de carburo (Metal Duro) del Instituto de Ingenieros Mecánicos. Hallaron que, en el caso de herramientas monocortantes, una importante fuente de la inestabilidad necesaria para la aparición de vibraciones auto-inducidas se encuentra en la variación de la fuerza de corte con la velocidad de corte. Cuando la fuerza de corte disminuye con el aumento de la velocidad de corte (como ordinariamente ocurre en el mecanizado de la mayoría de los materiales), las condiciones son propicias para la generación de vibraciones auto-inducidas.

Bajo estas condiciones, una vez iniciada por medios mecánicos una vibración, se perpetuará. Cuando una herramienta está vibrando, su velocidad relativa con respecto a la pieza cambia constantemente. Cuando la herramienta y la superficie de la pieza se mueven en el mismo sentido, la fuerza sobre la herramienta será alta, teniendo así a producir una gran flexión de la herramienta en el sentido del movimiento de la superficie de la pieza, es decir, la condición de inestabilidad es satisfecha; la flexión provoca un incremento en la fuerza flectora.

Cuando la herramienta alcanza el extremo de esta oscilación y comienza a moverse en sentido opuesto al de la superficie de la pieza, la fuerza de corte disminuye debido al incremento de la velocidad de corte. De esto derivará una facilidad presente en la herramienta para flexionar una gran cantidad en sentido opuesto al movimiento de la superficie de la pieza, después de lo cual el ciclo se repite. Así, el proceso se auto-perpetúa y la vibración aparece a una frecuencia cercana a la frecuencia natural de la herramienta. En este caso, la amplitud de la vibración tiende normalmente a alcanzar un valor aproximadamente igual al que produce la velocidad vibratoria máxima en la punta de la herramienta, igual a la velocidad de la superficie de la pieza.

Un segundo factor que contribuye a originar vibraciones auto-inducidas de este tipo es la interferencia que se produce entre el flanco de la herramienta y la superficie mecanizada. Tal interferencia tiende normalmente a favorecer las vibraciones. Como resultado, las vibraciones se hacen mas pronunciadas a medida que el desgaste del flanco de la herramienta aumenta.

Las vibraciones auto-inducidas tienen menos probabilidades de generarse a bajas velocidades de corte, altas frecuencias de la herramienta o con una herramienta recientemente afilada. Así, estas vibraciones pueden ser controladas en alguna extensión por una adecuada elección de aquellas variables. Similares consideraciones puede esperarse sean aplicables a vibraciones auto-inducidas de la pieza donde ellas se generan.

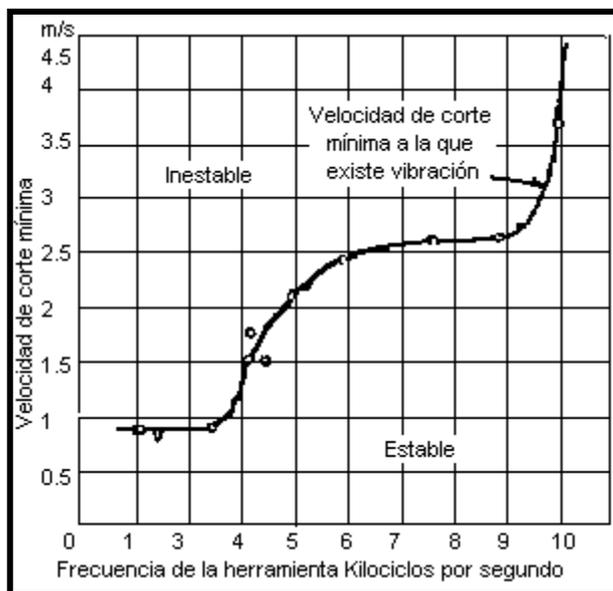


Figura 27

Una típica ilustración de lo reseñado anteriormente, sobre el efecto de la frecuencia de la herramienta y la velocidad de corte en la generación de vibraciones auto-inducidas se muestra en la figura 27.

Los valores fueron graficados para la mínima velocidad de corte a la que se produjeron vibraciones, variando entre amplios límites la frecuencia natural de la herramienta. La curva graficada separa los campos estable e inestable. Obviamente se recomienda operar en la zona estable por debajo de la curva.

Aunque los valores específicos proporcionados por la figura 27 son válidos solo para la disposición utilizada en la obtención de esos datos, la naturaleza de la curva es típica para muchas clases de operaciones de maquinado. Así el empleo de bajas velocidades de corte o de herramientas y montajes de piezas con alta frecuencia natural, conduce ordinariamente a liberar del vibrado.

Bibliografía

- H.Ernst-M.E.Merchant, “Chip formation, friction and high quality machined surfaces”, ASM Vol. 29.
- A.Isnardi, “Formazione del truciolo metallico”, Ed. Hoepli.
- G.F.Micheletti, “Mecanizado por arranque de viruta”, Ed. Blume.
- E.M.Trent, “Metal cutting”, Ed. Butterworths.
- G.Boothroyd, “Fundamentos del corte de los metales y de las máquinas-herramientas”, Ed. McGraw Hill.
- Metals Handbook, “Machining”, ASM International, Ninth Edition, Vol. 16.
- M.C.Shaw, “Metal Cutting Principles”, Ed. Oxford.
- SME, “Tool and Manufacturing Engineers Handbook”, Desk Edition.