

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**



## **INTRODUCCION A LA TEORIA DEL CORTE DE METALES**

**SEMINARIO DE TESIS QUE PRESENTAN  
PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

*201*  
*123*

**SERGIO RIVA PALACIO CHIANG  
SALVADOR ARCOS TERRON  
EGBERTO IBARRA NAVARRO**

**1 9 7 9**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# I N D I C E

PROLOGO

PAG.

## CAPITULO I

### I. FUNDAMENTOS DEL MAQUINADO DE METALES

1. Breve Bosquejo Histórico
2. Algunos Términos y Definiciones
3. Herramientas de Corte
  - a) De una sola punta
  - b) De puntas múltiples

## CAPITULO II

### II. MECANICA DEL CORTE DE METALES

1. Formación de Viruta
  - 1.1 Viruta Continua
  - 1.2 Viruta Continua con Borde Acumulado
  - 1.3 Viruta Discontinua
2. Fuerzas que Actuan Durante el Corte y su Medición
3. Presión Específica de Corte
4. Fuerza de Arado y el "Efecto del Tamaño"
5. Significado de Fuerza de Corte Aparente para el Material de Trabajo.
6. Espesor de Viruta
  - 6.1 Teoría de Ernest y Merchant
  - 6.2 Teoría de Lee y Shaffer
7. Fricción en el Corte de Metales

III. TERMODINAMICA EN EL CORTE DE METALES

1. Generación de Calor en el Corte de Metales
2. Transferencia de Calor en el Material en Movimiento.
3. Distribución de Temperaturas en el Corte de Metales.
  - 3.1 Temperaturas en la Zona de Deformación Primaria.
  - 3.2 Temperaturas en la Zona de Deformación Secundaria.
  - 3.3 Ejemplo
  - 3.4 Efecto de la Velocidad de Corte en las Temperaturas.
4. Medición de las Temperaturas de Corte  
Anexo: Análisis Dimensional de Unidades

## CAPITULO IV

IV. VIDA Y DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

1. Introducción
2. Desgaste Progresivo de la Herramienta
3. Formas de Desgaste en el Corte de Metales
  - 3.1 Desgaste de Cráter
  - 3.2 Desgaste de Flanco
  - 3.3 Fallas Repentinas de Herramienta
  - 3.4 El Efecto de Borde Acumulado
  - 3.5 El Efecto de los Angulos de la Herramienta.
  - 3.6 El Efecto de la Velocidad de Corte y la Alimentación.

- |   |      |
|---|------|
| 4. El Material de la Herramienta                        | PAG. |
| 5. El Material de Trabajo                               |      |
| 6. Desgaste de Herramienta y Pruebas de Maquinabilidad. |      |

## CAPITULO V

### V. FLUIDOS DE CORTE Y ASPEREZAS DE SUPERFICIE

1. Fluidos de Corte
2. La Acción de los Refrigerantes
3. La Acción de Lubricantes
  - 3.1 Límites de Lubricación
  - 3.2 Lubricación en el Corte de Metales
4. Asperezas de la Superficie
  - 4.1 Aspereza de Superficie Ideal
  - 4.2 Aspereza de Superficie Natural

## CAPITULO VI

### VI. NOMENCLATURA DE LA HERRAMIENTA DE CORTE

1. Corte Tridimensional
2. Sistemas de Nomenclatura de Herramienta de - Corte.
  - 2.1 Sistema Británico de Inclinación Máxima
  - 2.2 Sistema Americano (A.S.A.)
  - 2.3 Sistema Alemán (D.I.N.)
  - 2.4 Sistema de Inclinación Normal
3. Los Angulos Básicos de la Herramienta

## CAPITULO VII

### VII. ECONOMIA EN EL CORTE DE METALES

1. Introducción
2. Efecto de la Velocidad y Alimentación en la Vida de la Herramienta.
3. Velocidad de Corte Optima

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

## PROLOGO

El propósito de este trabajo, es principalmente, tratar de exponer de una manera clara y sencilla, la comprensión de los principios de la teoría del corte de metales, lo cual servirá de gran ayuda a estudiantes y profesores que de algún modo se ven involucrados en el estudio de este tema.

Se podrá observar a lo largo de la lectura de este trabajo, los diferentes tópicos contenidos en el mismo de una manera clara y de fácil comprensión. No se ha hecho el intento de presentar datos empíricos, tales como velocidades y alimentaciones en el corte de metal, puesto que dicha información, existe en los diversos manuales del ramo y no contribuye a un mejor entendimiento del proceso.

Se puede hacer mención a los diferentes capítulos que constituyen este trabajo, tal como se indica a continuación.

En el Capítulo I, se mencionan los fundamentos del maquinado de metales,

desde un pequeño bosquejo histórico del desarrollo del corte de metales en sus inicios, hasta el desarrollo de las máquinas herramientas más usadas en nuestros días. Después se mencionan algunos términos y definiciones utilizadas dentro del lenguaje del corte de metales, para poder tener una comprensión más exacta de cuales son sus principales características, tales como la Geometría de las Herramientas de Corte, tipos de herramienta en los diferentes tipos de maquinado (torneado, fresado, cepillado, taladrado, brochado, etc.)

En el Capítulo II, estudiamos lo que es la mecánica del corte de metales, donde se ve el proceso de formación de viruta, nombrando los diferentes tipos de ésta y las condiciones que prevalecen para su formación. A continuación se estudia la relación que existe entre el producto de la velocidad de corte y la fuerza de corte que es el grado de consumo de energía y se puede llegar a que el consumo de energía por unidad de volumen de metal removido es conocido como la presión específica de corte, se estudian diferentes tópicos, tales como las fuerzas que se involucran durante el proceso de corte de metales como son: la fuerza de arado, fuerza friccional, fuerza de corte de material de trabajo, etc., las teorías de Ernest y Merchant y de Lee Shafer que tratan de resolver las incógnitas que se presentan dentro de la Geometría del Corte ortogonal de metales y un estudio de la fricción en corte, para poder determinar las condiciones óptimas en las cuales el proceso pueda minimizar los efectos negativos de ésta.

En el Capítulo III, se estudia la termodinámica en el corte de metales y se pueden ver las diferentes consideraciones que se utilizan para la determinación de las temperaturas que se generan durante el proceso, en las diferentes zonas de deformación de metal y en la zona de contacto de la herramienta y el material de trabajo.

El Capítulo IV, trata el tema de las causas y motivos por los cuales, una herramienta se ve afectada por los diferentes tipos de desgaste, tales como la abrasión, adhesión, difusión y desgaste electroquímico. Se estudian las formas de desgaste en el corte de metales y se hace mención a las principales, tales como el desgaste por cráter, desgaste de flanco, fallas repentinas de la herramienta, efecto de borde acumulado, efecto de los ángulos de la herramienta, efecto de la velocidad de corte y la alimentación y la importancia que tiene la buena selección del material de la herramienta y el material que se va a trabajar. También se mencionan varios procedimientos para determinar el grado de desgaste de la herramienta mediante pruebas de maquinabilidad.

En el Capítulo V, se mencionan las principales características que tienen los fluidos de corte para mejorar las operaciones de maquinado, tanto en lubricación como en refrigeración, y la selección de éstos según el tipo de operación ya sea por las condiciones de corte, por el tipo de herramienta o material utilizado. También se estudian las características de la as -

pereza de superficie en la cual se ve el tipo de ésta, ya sea aspereza de superficie ideal o natural. En la primera se ve el estudio teórico, que por medio de la Geometría se puede determinar la aspereza de superficie esperada y la segunda influenciada por todos los factores que se presentan durante la operación de corte.

La importancia del Capítulo VI, estriba en la necesidad de poder dar una nomenclatura a la Geometría de la herramienta, para así poder determinar de una manera sencilla los principales ángulos de la herramienta dependiendo de las características del corte. Se mencionan los diferentes sistemas de nomenclatura, sus características, ventajas y desventajas. Los sistemas mencionados son: el Sistema Británico de Inclinación Máxima, el Sistema Americano (ASA), el Sistema Alemán (DIN), el Sistema de Inclinación Normal y el Sistema descrito por la ASTME, basado en la ASA.

El Capítulo VII, estudia la economía en el corte de metales, donde se ve la importancia de determinar las condiciones de corte para poder mejorar la economía durante los procesos de corte. Y estas condiciones pueden ser, el efecto de la velocidad y alimentación en la vida de la herramienta, ya que es un elemento muy importante dentro del análisis de costos de producción de componentes.

## CAPITULO I

### Introducción:

#### FUNDAMENTOS DEL MAQUINADO DE METALES

##### 1. Breve Bosquejo Histórico.

El inicio de los estudios en el corte de los metales se encuentra en los finales del siglo XVIII. Antes de esto, no existían las máquinas - herramientas tan usadas en nuestros días.

En 1776, James Watt construyó la primera máquina de vapor y uno de los principales problemas en el desarrollo de la máquina, fué el formado del modelo del cilindro. Su primer cilindro fue manufacturado de lámina, presentándosele el problema de deformación, debido a que quedaba un agujero entre el pistón y el cilindro, el cual se intentó llenar con paño, sebo, cuero, no obstante siguió el problema.

Y este fué resultado eventualmente por John Wilkinson, cuando él inventó el taladro horizontal.

Dicho taladro fue la primera máquina-herramienta efectiva, que hizo posible la invención de la primera máquina de vapor.

El corte de metales como lo conocemos ahora, se inició con la introducción de ésta máquina-herramienta. Ahora las máquinas-herramientas y de corte de metales, están presentes directa o indirectamente, en la manufactura de todos los productos de nuestra industria, por eso no es sorprendente que el esfuerzo de la investigación, esté basado en el pasado, para entender la naturaleza del corte y de ahí desarrollar mejores técnicas de maquinado. La investigación en el corte de metales se inició aproximadamente 70 años después de la introducción de la primera máquina-herramienta.

No es propósito dar aquí una historia completa de la investigación del corte de metales, para indicar algunos de los pasos más importantes de los que ha sido objeto.

Las partículas removidas durante el corte de metales se llaman virutas y los primeros intentos para explicar como se formaban, fueron publicados en 1870 por TIME y TRESCA en 1873. En 1871, Mallock sugirió correctamente que el proceso de corte era básicamente, el arranque de material y éste formaba la viruta, y enfatizó la importancia del efecto de fricción que se estaba efectuando en la cara de corte de la herramienta cuando la viruta estaba siendo removida.

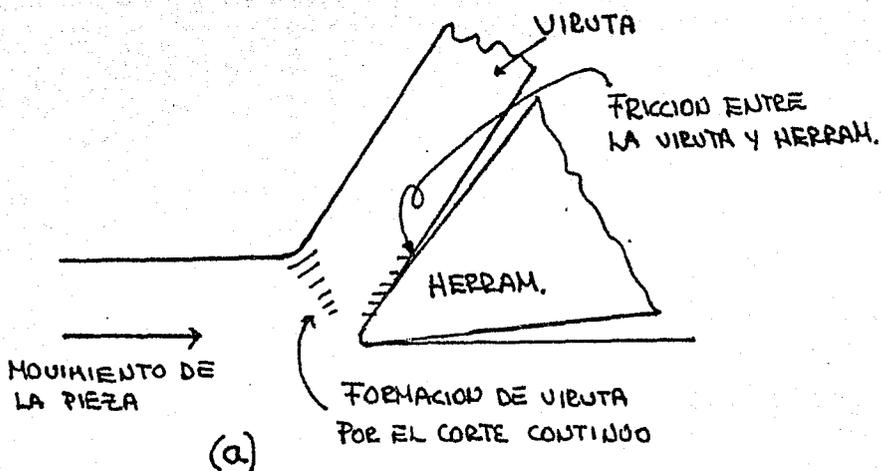


fig. 1 Modelo del Proceso de Corte  
(a) Modelo Reciente

Mallock, dibujó diagramas de la formación de viruta en la que unas eran pulidas y otras no, y además estableció que no eran virutas completas. Hizo observaciones del efecto del filo del cortador en el proceso de corte, y las razones de inestabilidad en el proceso de corte, que producían vibraciones indeseables; muchas de estas observaciones, son sorprendentemente cercanas a las teorías modernas aceptadas y aún siguen siendo repetidas después de 80 años.

Finie, reporta que la comprensión del proceso del corte de metales se completó en 1900 cuando Reuleaux, sugirió la grieta formada adelante de la herramienta y también que el proceso puede ser comparado con el corte de la madera. Esto sugirió y dió el modelo de corte similar al indicado en la figura 2.

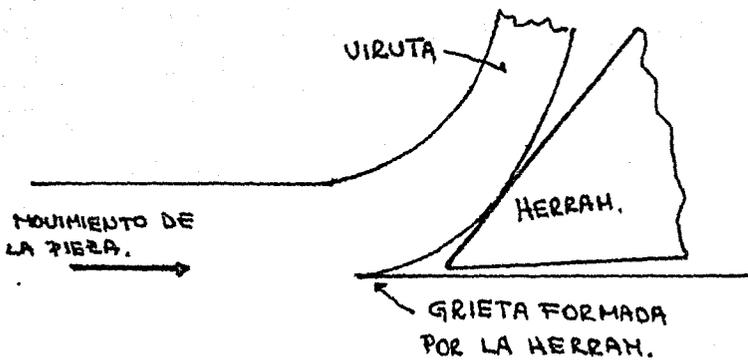


fig. 2 Modelo del Proceso de Corte  
(b) Concepción Errónea

Esta fue una mala interpretación, la cual encontró un apoyo popular por muchos años. Por este tiempo Taylor, publicó los resultados de cerca de 26 años de búsqueda, investigación y experiencia.

El principal objeto fue determinar las leyes empíricas, las cuales podrían establecer una mejora en las condiciones de corte.

Taylor pudo incrementar la producción de la compañía Bethlehem Steel, cerca de un 500%. Es interesante hacer notar, que las leyes empíricas que gobiernan las relaciones entre la velocidad de corte y la vida de la herramienta sugeridas por Taylor, están todavía vigentes y han sido empleadas para las bases de muchos estudios de economía sobre máquinas, hechas recientemente.

Un descubrimiento de naturaleza fundamental, hecho por Taylor, fué que la temperatura existente en el filo de la herramienta de corte, es proporcional al grado de desgaste de la herramienta. Desde 1907, cuando el artículo de Taylor fué publicado, el volumen de trabajo empíricos y principios sobre el corte de metales, se han venido incrementando gradualmente.

## 2. Algunos Términos y Definiciones.

Todas las operaciones en el corte de metales pueden ser comparadas con el proceso indicado en la figura 3.

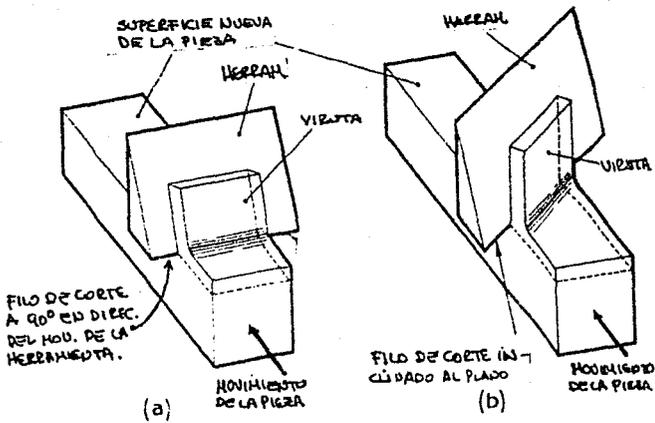


fig. 3 a) Corte Ortogonal  
b) Corte Oblicuo

La herramienta de corte es una especie de cuña llamada buril, que tiene un borde afilado y recto y está sujeto al movimiento relativo de la pieza de trabajo, de tal manera que el metal que se tiene que desprender, es removido en forma de viruta. Las figuras 3 nos muestran el caso general de corte, conocidos como corte ortogonal y corte oblicuo.

Un caso especial de corte, donde el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección relativa del movimiento de la herramienta de trabajo, es llamado corte ortogonal.

La cuña de corte, básicamente consiste en dos superficies intersectadas que forman el filo de corte.

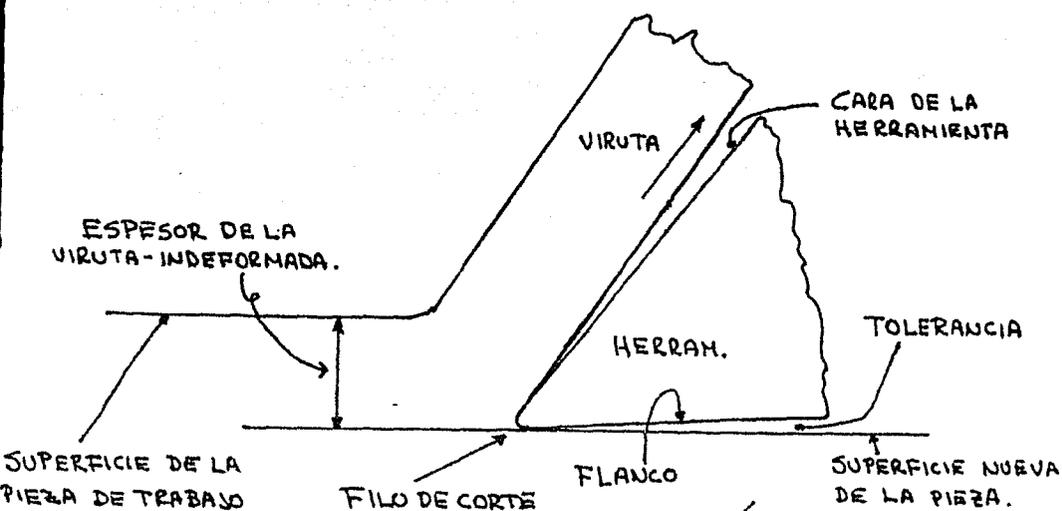


fig. 4 Términos Usados en el Corte de Metales

La superficie por donde fluye la viruta, es conocida como cara, y la superficie formada en la parte de atrás del claro de la pieza maquina

da, es conocida como flanco. Así, durante el corte con buril, existe un claro (grieta) entre el flanco de la herramienta y la nueva superficie de la pieza de trabajo. El espesor del material removido por la acción de la herramienta, es conocido como espesor indeformable, a través de las operaciones prácticas de corte. Esta dimensión, a menudo varía según el procedimiento del corte.

Para simplificar las investigaciones de trabajo, es común dejar constante el espesor de la viruta indeformada para variar operaciones de corte, esto está ilustrado en las figuras siguientes: Una de las más importantes variables en el corte de metales, es la pendiente de la cara de la herramienta y ésta es especificada en el corte ortogonal, por el ángulo que se forma entre la cara de la herramienta y la perpendicular a la nueva superficie de la cara de trabajo, figura 5.

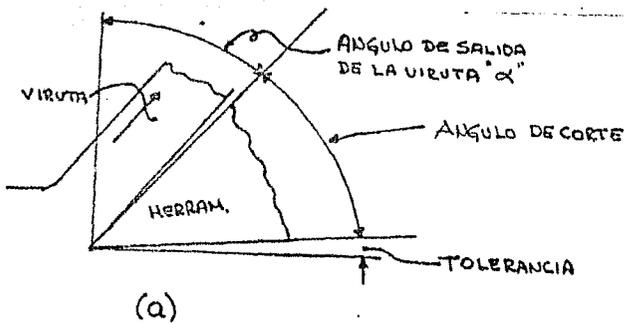
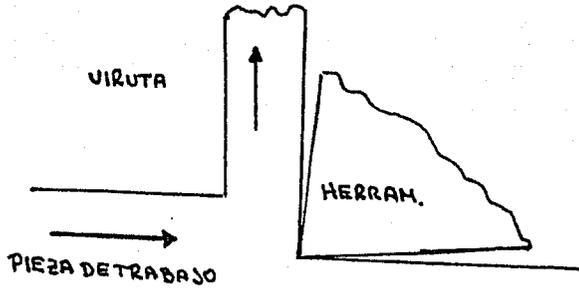


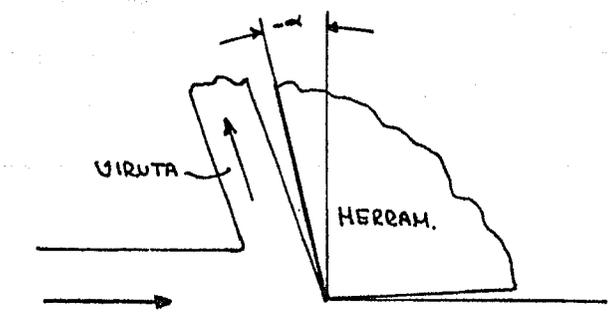
fig. 5 Angulos de la Herramienta de corte de un solo filo.

Angulo de la herramienta de corte " $\alpha$ ".

- a) Positivo
- b) Cero
- c) Negativo



(b)



(c)

Dicho ángulo, se conoce como ángulo de la herramienta de corte y la figura 5 nos muestra como puede ser definido éste ángulo. La comprensión y definición de las herramientas de corte en el caso de corte oblicuo, serán posteriormente discutidas. El flanco de la herramienta no juega parte en el proceso de remoción de viruta. Sin embargo, el ángulo entre el flanco y la nueva superficie de la pieza de trabajo, puede afectar el grado en el cuál se usan las herramientas de corte y queda definido como ángulo de tolerancia. Así, de la figura 5.

Ángulo de la Herramienta de Corte + Tolerancia + Ángulo de Corte =  $90^\circ$   
Ángulo de Corte = Incluye el ángulo entre la cara y el flanco.

### 3. Herramientas de Corte

Las herramientas de corte pueden ser divididas en dos categorías:

- a) Herramientas de una punta o filo
- b) Herramientas de puntas múltiples o filos múltiples.

Estos términos son por sí solos explícitos y la herramienta de corte de puntas múltiples, puede ser considerada como varias herramientas de una sola punta, unidas y sujetas, de tal manera que cada filo contribuye al proceso de arranque de metal.

a) Herramientas de una sola Punta o Filo

Usualmente consiste en una pieza de material de sección rectangular, llamada buril, en el que al final, la forma de las caras y los flancos, se intersectan para formar los filos cortantes. La herramienta y la pieza de trabajo son sostenidas en la máquina, de tal manera que cuando los movimientos apropiados, son aplicados por la máquina, el filo de la herramienta genera un desgaste en la pieza de trabajo. Caso del cepillado mostrado por la figura 6.

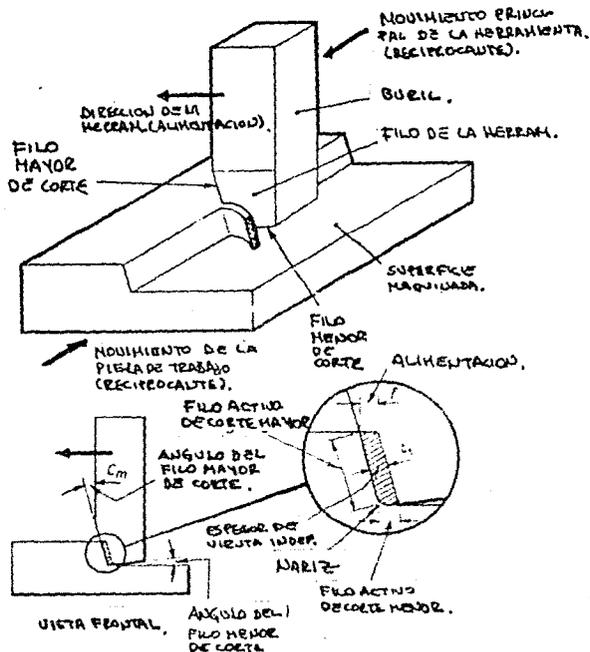


fig. 6 Cepillado

En el caso anterior, una superficie lisa es generada en la pieza de trabajo por el movimiento alterno de la herramienta y la alimentación de la pieza en una posición perpendicular al movimiento alternado. En el cepillado, la pieza de trabajo avanza transversalmente y la herramienta es alimentada verticalmente.

De la figura podemos observar, que los dos tipos de corte se ven aplicados en esta operación.

En el buril, el filo mayor de corte es principalmente el responsable del arranque de viruta y es usualmente el de más uso en la carga de corte. El filo menor de corte es responsable principalmente del acabado que queda en la superficie. Los ángulos con los que trabajan estos filos, en la herramienta de corte, son llamados ángulos mayor y menor de corte respectivamente y están indicados en la figura anterior. Claro que solamente, parte de los filos de corte, provistos en la herramienta tienen contacto con el material de trabajo y reciben el nombre de "filos activos de corte" y esto puede ser subdividido en: filos activos de corte, mayor y menor.

Los filos de corte mayor y menor, son usualmente relacionados uno al otro, por medio de un radio y su parte de filo es -

común en la nariz de la herramienta. El radio de la nariz de la herramienta juega una parte muy importante en el acabado de la superficie maquinada.

El espesor de la viruta indeformada  $t_1$ , en el plano, está determinada por el movimiento de alimentación, (siendo  $f$  el movimiento relativo de la herramienta a través del trabajo - para cada carrera ) y el ángulo mayor de filo de corte  $C_m$ .

Considerando la figura anterior, observamos que:

$$t_1 = f \cos C_m \dots \dots \dots (1)$$

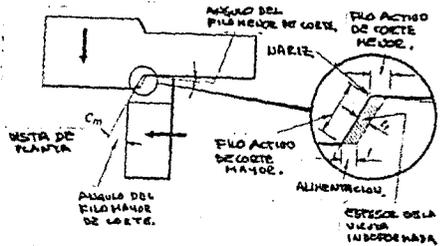
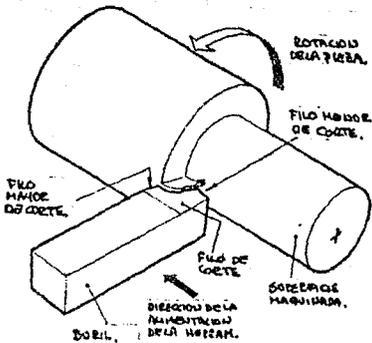


fig. 7 Torneado

La operación de torneado, está indicada en la figura 7 y es similar para las operaciones de cepillado, excepto que el corte cilíndrico es generado en la pieza de trabajo por rotación y la alimentación de la herramienta en dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo. La máquina herramienta usada generalmente para esta operación es el torno. Los filos activos de corte mayor y menor son indicados en la figura 7 y el espesor de la viruta cortada, está dado otra vez por la ecuación (1). El refrentado y el barrenado son también operaciones que pueden ser realizadas en el torno. En el refrentado la superficie es generada por la alimentación de la herramienta a través del final de la pieza de trabajo en rotación y con dirección normal al eje de la misma. El torneado interior es donde la herramienta es usada para maquinarse una superficie cilíndrica interna, con herramienta de un sólo filo conocida como barra de interiores, como en la figura 8.

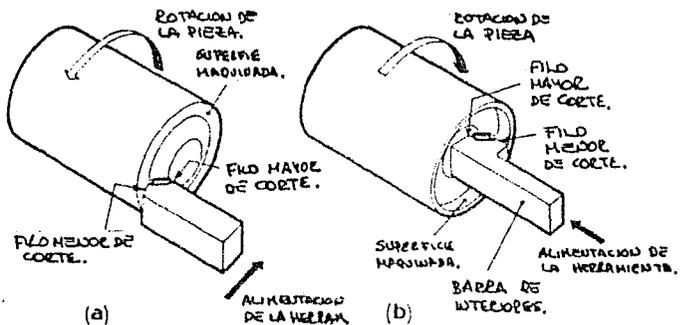


fig. 8 a) Refrentado

b) Barrenado

Se notará que en todos estos procesos se utilizan herramientas de un sólo filo, que son básicamente las mismas y los términos usados tienen el mismo significado en cada caso.

**b) Herramientas de Filos Múltiples**

Cualquier herramienta de filos múltiples, puede ser catalogada como una serie de dos o más herramientas de un sólo filo, conformados en una sola pieza. El movimiento relativo entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte, está sujeto a que cada filo de la herramienta, contribuya a la remoción de material de la pieza de trabajo. Por ejemplo en el taladro de la figura 9.

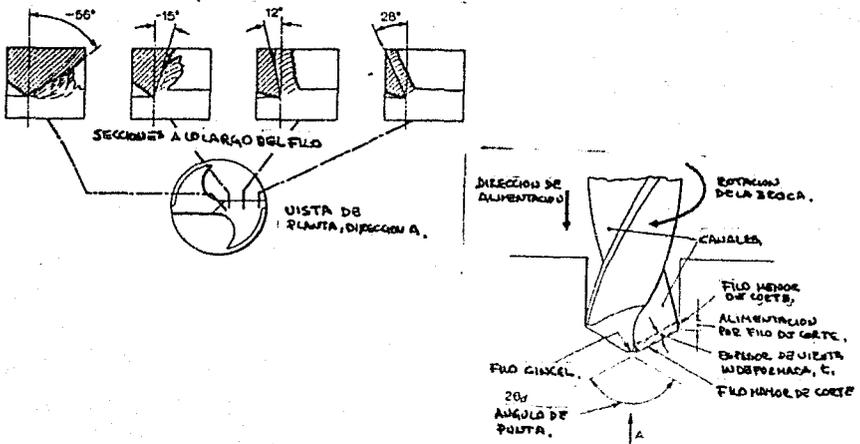


fig. 9 Taladrado

Puede ser considerado como dos herramientas de corte de un solo filo arregladas en una sola pieza, la cual es girada sobre su eje. Como la broca es alimentada en dirección paralela a su eje, cada filo de corte remueve la misma parte de material de trabajo. Así, si el avance es de " $f$ " pulgadas por revolución, entonces la alimentación por filo de corte es de  $f/2$  y el grueso de la viruta se ve en la figura anterior, y la ecuación es:

$$t_1 = (f/2) \text{ sen } \Theta_d \dots\dots\dots (2)$$

$$\Theta_d = 1/2 \text{ ángulo de punta de la broca}$$

En una broca, el desgaste varía a lo largo de los filos de corte, desde positivos fuera del radio, o negativos cerca del centro de rotación, como la ilustra la fig. 9: obviamente la velocidad de corte (la velocidad del movimiento relativo de la herramienta de trabajo), varía desde un máximo en el exterior del radio, a cero en el centro.

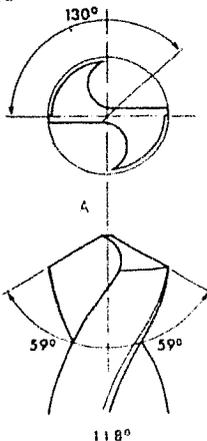
Para ejemplificar la importancia de otro tipo de taladro, el filo de cincel, puede ser considerado como una herramienta de corte, teniendo un desgaste negativo muy largo y las condiciones de corte muy pobres. Esto por supuesto, no tiene efecto sobre la calidad del agujero producido, esto será de -

terminado únicamente por el mejor filo de corte en la periferia, donde son mejores las condiciones de corte.

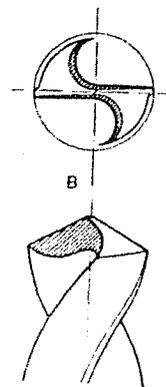
A continuación se mencionan los diferentes tipos de afilado en relación con los materiales a trabajar.

Punta Normal: Tipo de punta con un ángulo de  $118^\circ$ , ó  $59^\circ$  por lado, ha sido seleccionado para trabajos normales. Este filo trabaja bien en la mayoría de aceros al carbono y aceros aleados suaves.

Reducción del Núcleo: Se adelgaza el núcleo de la punta de una broca, cuando ésta se ha gastado o recortado, quedando el núcleo demasiado grueso, haciendo necesaria más presión para taladrar. El adelgazamiento se hace con un esmeril delgado con los cantos redondos. Hay que tomar en cuenta, que el núcleo quede centrado y que el adelgazamiento no sea exagerado, ya que se debilitaría la broca. Las brocas de  $1/8"$  de diámetro deben tener un grueso de núcleo de un 20% de su diámetro bajando en proporción hasta arriba de  $1"$  en que será el 11% de su diámetro.

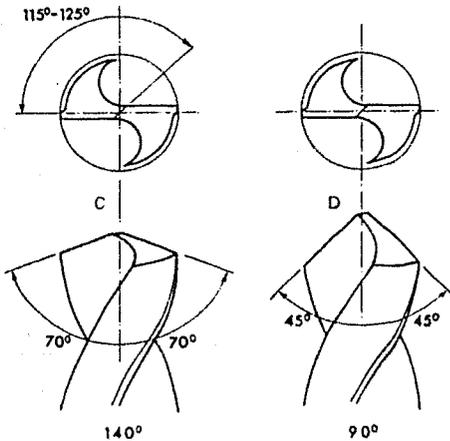


A) Punta Normal  
B) Reducción de Núcleo



Punta Roma: Este tipo de punta es usado con bastante ventaja taladrando materiales duros y tenaces. Un ángulo de la punta de  $130^\circ$  a  $140^\circ$  se recomienda para taladrar aceros al manganeso y aceros inoxidables (Austeníticos), para taladrar aceros tratados y aceros forjados se recomienda un ángulo de punta de  $125^\circ$  a  $130^\circ$ .

Punta Aguda: Este tipo de punta se usa para taladrar materiales suaves, madera, bakelita, fibras, etc., también es usado en hierro fundido suave y en algunos plásticos se usa un ángulo con punta hasta de  $60^\circ$ , y una hélice muy abierta y también pulidas las ranuras.



C) Punta Roma

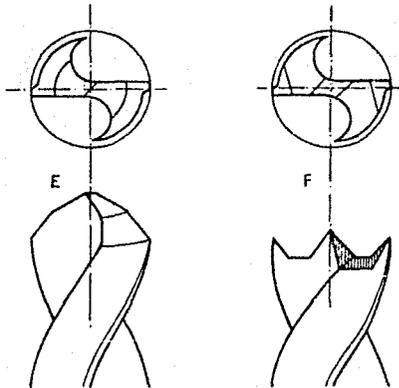
D) Punta Aguda

Punta Doble Angulo: Este tipo de punta, tiene mucho más duración cuando se está taladrando hierro fundido abrasivo.

Este doble ángulo evita el desgaste en las orillas periféricas del filo de corte de la broca. En la práctica se ha visto que la vida del afila

do se puede aumentar de 200 a 300% en algunos trabajos.

Punta Espuela: Este tipo de punta se usa para madera, bakelita - y algunas fibras donde se requiere un acabado perfecto. Su ventaja - está en que la punta central se usa como guía y las dos puntas laterales son los filos de corte que no astillan el material al terminar de ta-  
ladrar, dejando el barreno bastante liso.



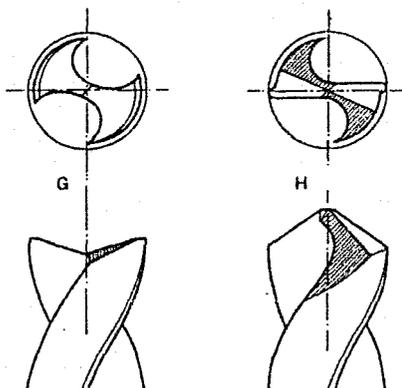
E) Punta Doble Angulo

F) Punta Espuela

Punta Cola de Pescado: Este tipo de punta se usa para barre-  
nar láminas delgadas, en donde se necesita que solamente los extre-  
mos corte, para evitar que la lámina se flexione y a su vez oponga re\_

sistencia al endurecerse cuando se calienta la sección de contacto. -  
Para usar este tipo de afilado se usará una guía para que la broca no  
"balle". Al usar este afilado, el acabado es perfecto y se hacen más  
barrenas que con cualquier otro tipo de filo.

Punta Cigüeñal o Ranurada: Este tipo de punta fue especial-  
mente diseñado para taladrar barrenos profundos en los cigüeñales, -  
se usa en brocas extralargas que tiene el núcleo más grueso que las -  
brocas normales.



G) Punta Cola de Pescado  
H) Punta Cigüeñal

Dentro del proceso de taladrado se mencionan las siguientes sugestio-  
nes para poder obtener las condiciones óptimas deseadas.

Mantener siempre las brocas bien afiladas y nunca usarlas con filos-

en mal estado.

Fijar bien la pieza para taladrar, así como la broca.

Comprobar que NO hay juego en el eje del taladro que ponga en peligro la broca y la redondez del agujero.

Al colocar la broca en el "Chuck" o en el "Cono Morse", NO golpear ni ésta, ni aquello,; en caso necesario, hacerlo con un martillo hecho de un material suave, como madera.

Usar la velocidad periférica y avance recomendados. En todo trabajo inicial, deberá empezarse con la menor velocidad y avance, aumentando gradualmente hasta obtener el máximo rendimiento por afilado.

Siempre usar el lubricante adecuado.

No permitir que la rebaba se atasque en la espiral de la broca, sobre todo en taladros profundos. Debe sacarse de vez en cuando, para que se libere de la viruta.

Se recomienda que mientras más profundo sea el barreno se reduzca la velocidad.

Para taladrar acero inoxidable, se recomienda marcar con punzón triangular en vez de normal para reducir el endurecimiento en el centro de

la marca.

Fresado: En el fresado horizontal, se presentan ciertas complicaciones dentro del trabajo de taller. El cortador, el cual tiene un número de filos helicoidales, es girado sobre un eje, y la pieza de trabajo, pasa por debajo del cortador. Cada filo del cortador remueve una capa de material y gradualmente se incrementa el espesor como se indica en la figura 10.

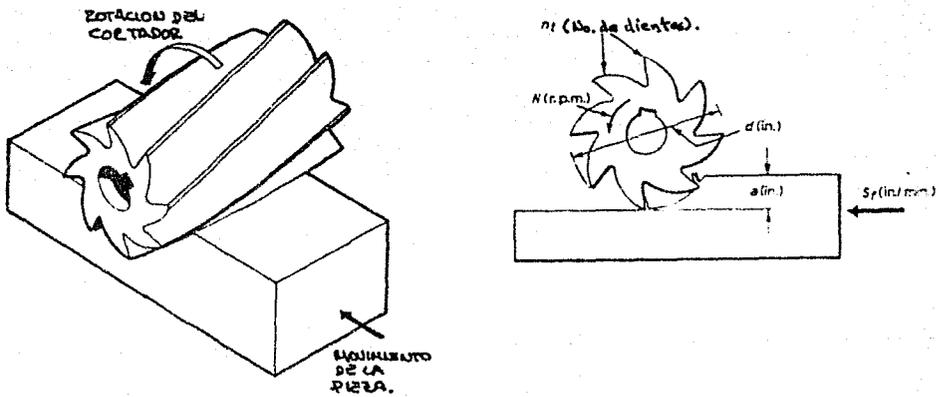


fig. 10 Fresado Horizontal

La máquina fresadora es sumamente versátil, debido a la gran variedad de fresas cortadoras existentes. Estos cortadores se clasifican generalmente de acuerdo con su forma y apariencia general, si bien en algunos casos se clasifican según su forma de montaje, material usado en los dientes, o el método usado para afilar éstos.

Existen tres diseños generales de fresas:

1. Fresas de Arbol. Estos cortadores tienen un agujero en el centro para montarlos sobre un árbol.
2. Fresas Vástago. Estas fresas tienen un vástago recto o cónico, integral con el cuerpo del cortador. Cuando se usan estas fresas van montadas en la nariz del husillo o en un adaptador para el mismo.
3. Fresas de Refrentar. Estas fresas van sujetas con tuercas o soporadas en el extremo de árboles cortos y se usan generalmente para fresar superficies planas.

Tipo de Cortadores:

1. Fresa Común. Una fresa común es un cortador en forma de disco, tiene dientes sólo sobre la circunferencia. Los dientes pueden ser rectos o helicoidales, si el ancho excede de 15 mm., son generalmente helicoidales. Los cortadores helicoidales anchos de este tipo que se usan para trabajo pesado en placas, pueden tener muescas en los dientes para quebrar las rebabas y facilitar su remoción. (rompe-virutas).
2. Fresas para Corte Lateral. Este cortador es similar a un cortador simple, excepto que tiene dientes en un costado. En algunos ca

sos. cuando dos cortadores operan juntos, de un lado son lisos y del otro tienen dientes. Las fresas laterales pueden tener dientes rectos, en espiral o alternados.

3. Fresa-Sierra para Ranurar. Este cortador se asemeja a una fresa simple o lateral, excepto que se hace en espesores pequeños, generalmente de 4.5 mm o menos. Las fresas comunes de este tipo, se rebajan de los lados para darles desahogo.
4. Fresa de Corte Angular. Cualquier fresa formada en ángulo cae dentro de esta clasificación. Se les fabrica de un sólo ángulo o de ángulo doble. Las fresas de ángulo simple tienen una superficie cónica, mientras que las de ángulo doble tienen dientes sobre dos superficies cónicas. Las fresas de ángulo se usan para cortar ruedas de trinquete, colas de milano, estrías sobre fresas y rimas.
5. Fresas Formadoras. Este nombre se aplica a cualquier cortador cuyos dientes tengan una forma especial. Este grupo incluye cortadores cóncavos y convexos, cortadores de engranes, cortadores de estrías, redondeadores de aristas y muchos otros.
6. Fresas Frontales. Estos cortadores tienen una flecha integral para sus movimientos, y tienen dientes tanto en la periferia, como

en los extremos. Las estrías pueden ser rectas o helicoidales. - Los cortadores de gran tamaño llamados frontales huecos, tienen separada la parte cortante y se sujetan a un árbol corto. Debido al costo del acero de alta velocidad, esta construcción resulta en un ahorro considerable en el costo del material. Las fresas frontales se usan para refrentar proyecciones, escuadrar extremos, cortar ranuras y ejecutar trabajo en rincones como en la hechura de matrices.

7. Cortadores para Ranuras en T. Las fresas de este tipo se semejan a las fresas comunes o de corte lateral pequeñas, que tienen una flecha recta o cónica integral para su movimiento. Se usan para cortar ranuras en T. Una de las formas especiales es el cortador de cuñeros Woodruff, hecho en tamaños normales para el corte de asientos redondos para las cuñas Woodruff.
8. Cortadores con Dientes Removibles. Conforme aumentan en tamaño los cortadores, es económico insertar los dientes de material costoso en el cuerpo de acero ordinario más barato. Los dientes de tales cortadores se pueden sustituir cuando se han desgastado o roto.

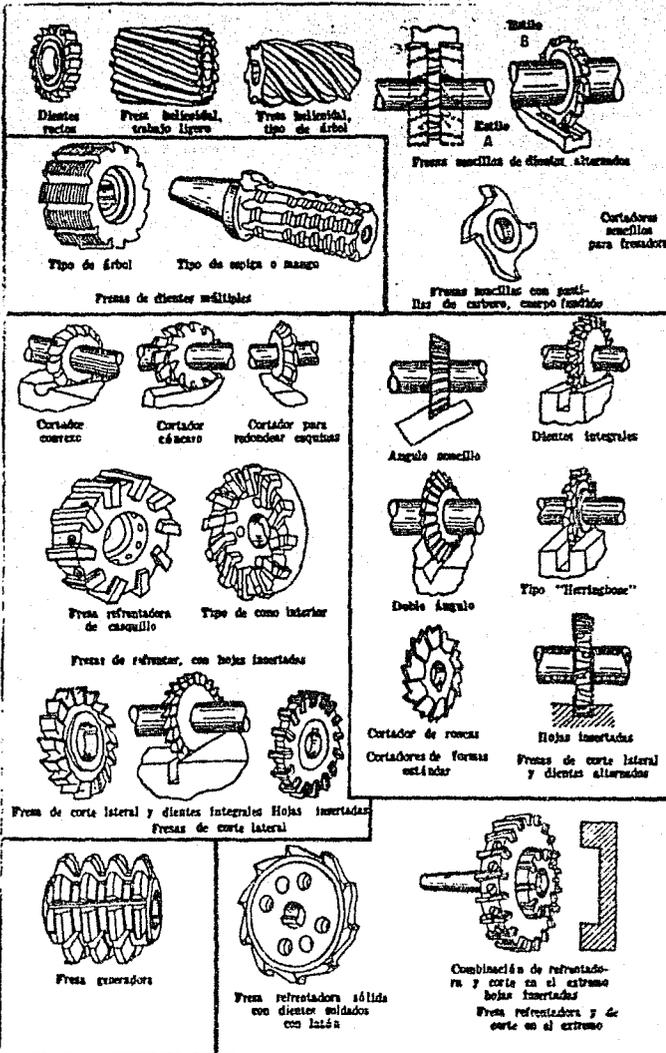


fig. 10' Tipos Comunes de Cortadores para Fresadora

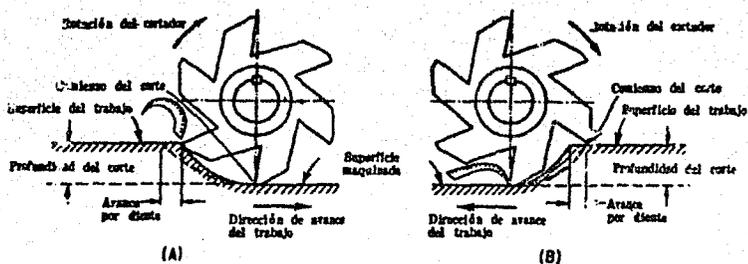
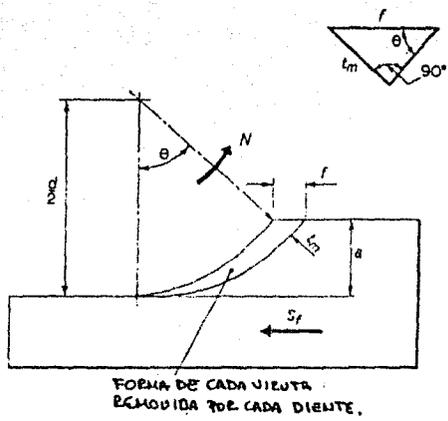


fig. A) Fresado Ascendente  
B) Fresado Descendente



Espesor de viruta indeformada

$$t_m = \frac{2S_f \sqrt{a/d}}{N n_t} \text{ aprox.}$$

Máximo espesor de viruta

$$t_m = \frac{2S_f \sqrt{a/d}}{N n_t} \text{ aprox.}$$

- $n_t$  = número de dientes en el cortador
- $d$  = diámetro del cortador (pulg)
- $a$  = ancho de corte (pulg)
- $S$  = velocidad de alimentación de la pieza de trabajo (pulg)/(min),  
= alimentación por diente (pulg)  
= máximo espesor de viruta (pulg)  
= velocidad angular del cortador (R P M)

fig. 11 Forma de la Viruta en el Fresado

En el análisis de fresado es necesario tener una estimación del máximo espesor  $t_m$  de cada viruta y esto se puede calcular de la siguiente forma: de la figura 11, tenemos que:

$$t_m = f \operatorname{sen} \theta \quad \dots (3)$$

donde  $f$  = alimentación por diente

Ahora

$$\frac{\cos \theta - d/2 - a}{d/2} = \frac{L - 2a}{d} \quad \dots (4)$$

Donde

d.- diámetro del cortador en pulg.

a.- profundidad de corte en pulg.

$$\operatorname{sen} \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta} = 2\sqrt{a/d - a^2/d^2}$$

En la práctica  $a$  es muy pequeña comparada con  $d$  y el término  $\frac{a^2}{d^2}$  puede ser omitido.

por consiguiente:

$$\operatorname{sen} \theta = 2\sqrt{a/d} \quad \dots (5)$$

Y la alimentación de la pieza de trabajo por revolución del cortador - está dada por  $\frac{Sf}{\dots}$  pulg/rev.

Entonces la alimentación por diente será:

$$f = \frac{S_f}{N n_t} \quad \text{pulg.} \dots (6)$$

sustituyendo (6) (5) en (3)

$$t_m = \frac{2 S_f \sqrt{a/d}}{N n_t} \quad \text{pulg.} \dots (7)$$

donde:

$S_f$  = velocidad de alimentación del material.

$N$  = velocidad de rotación del cortador

$n_t$  = número de dientes del cortador.

La geometría del fresado vertical de la figura 12, es más complicada que la del fresado horizontal. Aquí, no solamente varía el espesor de la viruta durante el corte, sino que también el ángulo de filo mayor de corte  $C_m$ . Entonces en el fresado vertical, la alimentación horizontal por diente, está dada por:

$$f = \frac{S_f}{N n_t} \quad \text{pulg./rev.} \dots (8)$$

Y el máximo espesor de viruta  $t_m$  está dado por:

$$t_m = \frac{S_f \cos C_m}{N n_t} \quad \text{pulg.} \dots (9)$$

En el brochado (fig. 13) tenemos otro ejemplo de herramienta de filos múltiples. En el brochado, la herramienta es forzada a pasar por la pieza de trabajo a una velocidad baja y cada filo remueve una peque

ña porción de material.

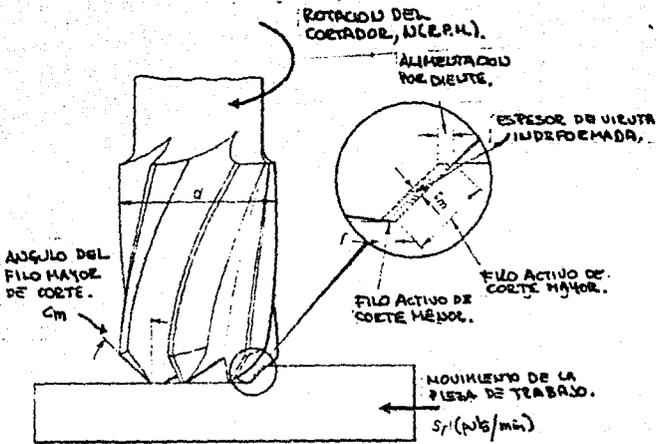


fig. 12 Fresado Vertical

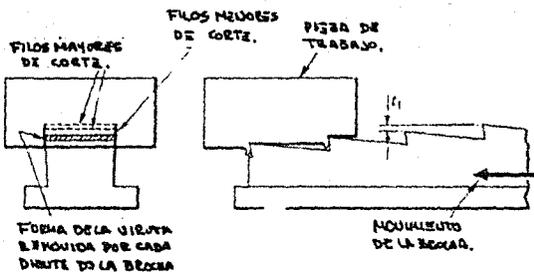


fig. 13 Brochado

## Brochas.

La herramienta más común de puntas múltiples y recorrido lineal es la brocha. Las brochas se emplean para producir superficies tanto interiores como exteriores. Las superficies producidas pueden ser planas, circulares o de perfiles bastante intrincados, vistos en una sección normal al recorrido de la herramienta. Una brocha es esencialmente una serie de herramientas de un solo filo seguidos uno de otros en dirección axial a lo largo de un cuerpo de herramienta o sujetador. Los dientes sucesivos varían de tamaño y forma en tal manera, que cada diente cortará una viruta del espesor apropiado.

El espaciado y forma de los dientes de la brocha se determinan por la longitud de la pieza de trabajo y el espesor de la viruta por diente así como por el tipo de viruta formada. El espacio de la viruta entre los dientes de la brocha debe ser suficiente para encargarse del volumen de virutas generado. Los dientes de la brocha están provistos con ángulos de inclinación y de alivio en la misma forma que las otras herramientas de corte. La nomenclatura estándar del brochado designa el ángulo de inclinación como el "ángulo de la cara" y la holgura de alivio como "ángulo de destalonado". Los ángulos de inclinación quedan en la misma amplitud que los utilizados para las otras herramientas, pero los ángulos de destalonado son de ordinario bastante pequeños, en una zona entre  $1/2$  y  $3\ 1/2$  grados. En las brochas se

utilizan ángulos de destalonado pequeños para minimizar la pérdida de tamaño en el reafilado. Con frecuencia se proveen dientes de acabado final que no trabajan detrás del borde cortante para asegurar el tamaño apropiado del corte en la pieza. Algunas veces, dientes bruñidores sin acción cortante siguen a los dientes de corte final.

Las brochas interiores son del tipo de tracción, o bien, empujadas a través del trabajo. Consideraciones de resistencia limitan el diseño de tales brochas. Las brochas para superficies (fig. 14) son transportadas de ordinario, sobre grandes arietes guiados; aquí la resistencia no es tan crítica puesto que la carga de corte puede ser transferida al ariete en muchos puntos a lo largo de la longitud de la brocha.

Las brochas se hacen, por lo general, de acero de corte rápido como unidades sólidas, pero algunas veces son económicas las brochas con puntos de carburo o de hojas insertadas. Esto es cierto, particularmente en el caso de brochas para superficie, que se adaptan mejor a tal montaje de los dientes. Las brochas pueden ser empleadas para cortar formas interiores helicoidales, si la máquina está equipada para hacer girar a la brocha en el sentido apropiado, según pasa a través del trabajo.

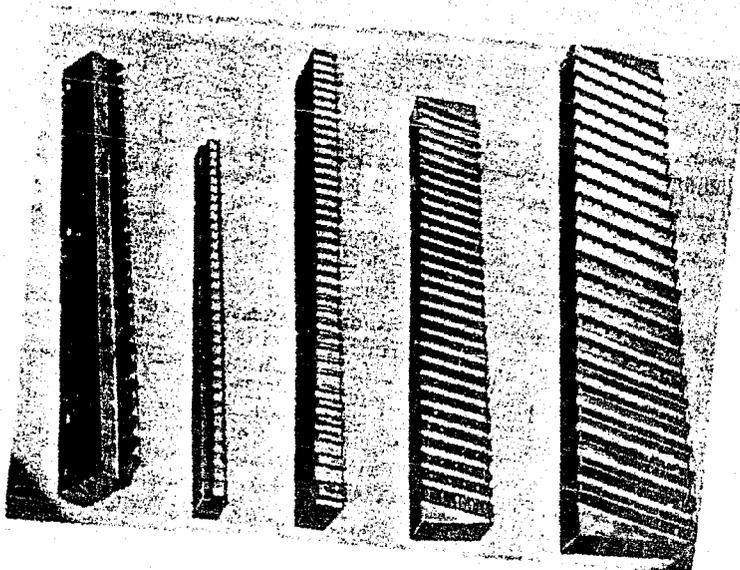


fig. 14 Brochas de Superficies

## CAPITULO II

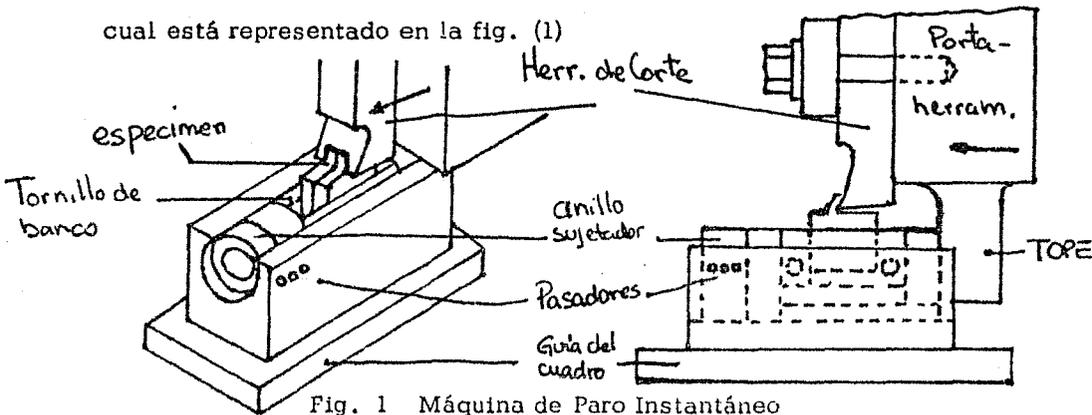
### MECANICA DEL CORTE DE METALES

#### 1. Formación de Viruta.

Durante el maquinado de cierto material, la formación de viruta va a depender de dos condiciones:

1. El tipo de material.
2. Las condiciones de corte usadas durante el proceso.

Una de las técnicas más usadas para la formación de viruta es la técnica del paro instantáneo, con esta técnica es posible "suspender" o "parar", la acción del corte y subsecuentemente poder efectuar un riguroso examen con el microscopio de la viruta producida durante el proceso. Un dispositivo típico de paro instantáneo, podría ser el cepillo, el cual está representado en la fig. (1)



En este proceso la pieza de trabajo se sujeta al aparato mediante un tornillo de banco, el cual está libre de deslizarse en la gúfa del cuadro.

Durante el corte, el tornillo de banco se sostiene en su lugar mediante un anillo sujetador, el cual a su vez se mantiene en su posición mediante unos pasadores insertados entre el cuadro gúfa y el anillo sujetador, los pasadores son proyectados para poder soportar la fuerza necesaria - usada en la remoción de material. Cuando se completa parcialmente el corte, un tipo de porta-herramientas hace contacto con el tornillo de - banco y se truenan los pasadores y empujan el tornillo de banco soste - niendo el tornillo adelantado.

Esta acción de parar el corte por aceleración de la pieza de trabajo, - hace que la velocidad de la herramienta se incremente muy rápido. Con unos cálculos cuidadosos, se pueden tener tiempos de parado extrema- damente pequeños, por ejemplo, sobre el proceso de parado descrito al tiempo de paro efectivo, calculado para detener la máquina es de: - 0.00 017 seg; cuando la velocidad de corte es de 160 pies/min.

Ejemplos de los especímenes obtenidos con este proceso son mostrados por las figuras 2, 3 y 4.

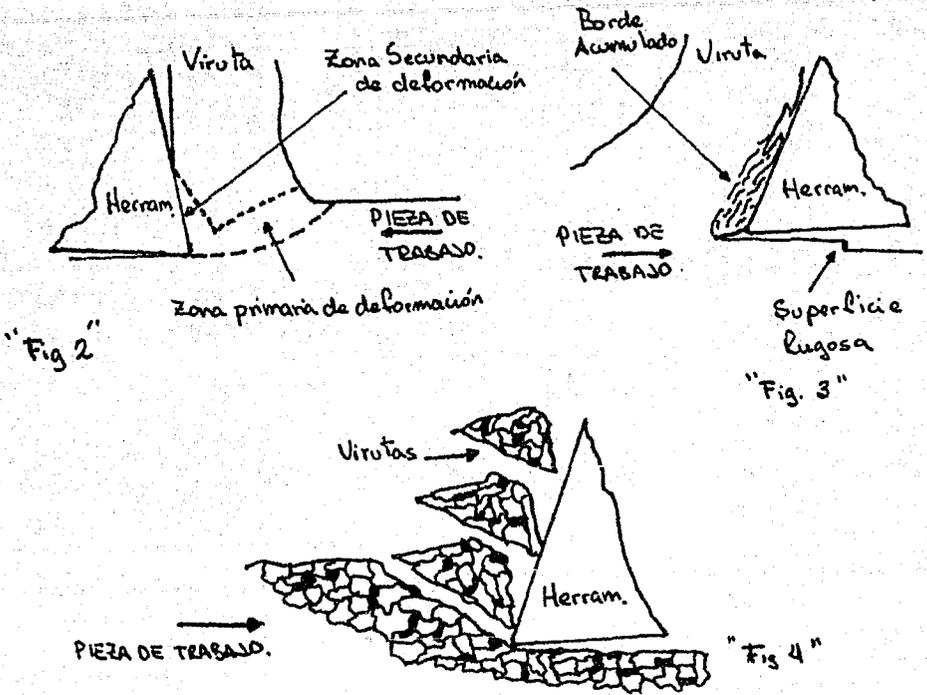


fig. 2 Viruta Continua

fig. 3 Viruta Continua con Bordes Acumulados

fig. 4 Viruta Discontinua

La velocidad de corte en estos casos fue de 160 pies/min., esto significa que durante la acción retardante del corte, la herramienta había recorrido una distancia de solamente 0.0028 pulg. en el espécimen, que en el caso de la fig. 2 fue aproximadamente igual a una décima del espesor de viruta.

Estos cálculos suponen que el espécimen obtenido con esta técnica, es representativo de la formación de viruta durante el corte, los especímenes mostrados anteriormente fueron escogidos, porque represen -

tan los tipos básicos de formación de viruta, que ocurre en la práctica.

### 1.1 Viruta Continua

La fig. 2, nos muestra la formación de viruta continua, este tipo de viruta es común cuando se maquinan materiales dúctiles, tales como, el hierro, hierro forjado, acero suave, cobre y aluminio. Se puede ver que trabajando bajo estas condiciones se tiene un proceso de "estado estable". Por esta razón la mayoría de las investigaciones dentro del corte de metales han sido conducidas a la producción de viruta continua. Básicamente esta operación consiste en el desvaste de material de trabajo para formar viruta y el deslizamiento de la misma a lo largo de la cara de corte de la herramienta. La formación de viruta se lleva a cabo entre la zona formada por el filo cortante de la herramienta y la superficie nueva de la pieza de trabajo y es conocida como "zona de deformación primaria". Deformar el material de esta manera nos provoca que las fuerzas pueden ser transmitidas a la viruta a través de la interfase entre la misma herramienta y la viruta. Y estas son suficientes para deformar la capa interior de la viruta y la deslizan a lo largo de la cara de la herramienta (zona de deformación secundaria).

### 1.2 Viruta Continua con Borde Acumulado.

Bajo ciertas condiciones de trabajo, la fricción existente entre -

la viruta y la herramienta, hace que ésta se solde a la cara de la herramienta y ante la presencia de esta unión se hace ver un incremento de la fricción que conduce al crecimiento de un empalme extra en la base de la viruta. El resultado de esta acumulación de material, se conoce con el nombre de "BORDE ACUMULADO". Y lo podemos ver en la fig. 3.

A menudo el borde acumulado continúa su crecimiento hasta que se presenta la ruptura y se convierte en inestable, las piezas quebradas son llevadas así por debajo de la viruta y la nueva superficie de trabajo. La fig. 3, nos muestra la superficie rugosa que se obtiene bajo estas condiciones. El estudio de la formación del borde acumulado, en el corte de metales, es tan importante, como uno de los principales factores que afectan el acabado de las superficies y tienen una consideración dentro de la potencia consumida y el desgaste de la herramienta. Estos efectos serán discutidos posteriormente.

### 1.3 Viruta Discontinua

Durante la formación de viruta, bajo severos esfuerzos y con material quebradizo, ocurren fracturas en la zona de deformación primaria, y cuando la producción de viruta es solo en partes, bajo estas condiciones la viruta es segmentada. Y es llamada "for



(conocida como fuerza de corte  $F_C$ ) y la otra normal a la dirección de corte (fuerza de empuje  $F_t$ ).

En la mayoría de los dinamómetros para el corte en metales la fuerza de la herramienta es determinada por la medición de la deflexión o el esfuerzo en los elementos de soporte de la misma. Es esencial que el instrumento tenga una rigidez y una alta frecuencia natural, tal que la exactitud dimensional en la operación de corte sea constante y la tendencia a las vibraciones que ocurren durante el corte sean minimizadas.

El dinamómetro, sin embargo, registra esfuerzos o desplazamientos grandes que no permiten hacer la medición con exactitud.

El diseño de un dinamómetro depende principalmente de los esfuerzos y desplazamientos a medir y a la instrumentación utilizada.

La fig. 6, nos muestra las componentes de un dinamómetro de tipo viga cantiliver de dos componentes de corte, donde la herramienta de corte está sostenida al final del cantiliver.

Las componentes vertical y horizontal de la deflexión del cantiliver bajo la acción de la fuerza de corte, son consideradas como una medida de las componentes de dicha fuerza. Las dos componentes de la fuerza resultante "R",  $F_c$  y  $F_t$ , medidas con el dinamómetro pueden ser

usadas para el cálculo de otras variables importantes dentro del proceso de formación de viruta continua.

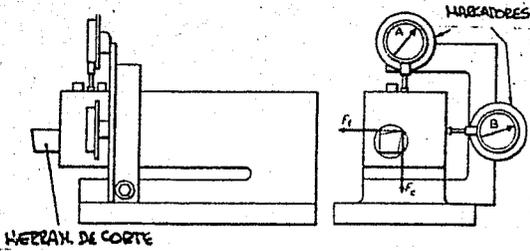


fig. 6 Dinamómetro Tipo Viga Cantiliver de dos Componentes de Corte. (Uso en Torno)

3. Presión Específica de Corte.

La relación de energía consumida durante el corte ( $W_c$ ), es el producto de la velocidad de corte ( $V_c$ , pies/min.), y la fuerza de corte ( $F_c$  - Lbs.) por lo tanto, tenemos:

$$W_c = F_c V_c \text{ (Pies Lb./min)} \dots \dots \dots (1)$$

El grado de remoción de material y el grado de consumo de energía son proporcionales a la velocidad de corte, dando un parámetro como una

indicación de eficiencia del proceso, independientemente de la velocidad de corte, por lo tanto, el consumo de energía por unidad de volumen de metal removido (conocido como la presión específica de corte), está dado por:

$$P_s = \frac{W_c}{A_o V_c} = \frac{F_c V_c}{A_o V_c} = \frac{F_c}{A_o} \quad (\text{Lb./pulg.}^2) \dots\dots\dots (2)$$

$P_s$  - Presión específica de corte

$A_o$  - Sección transversal del área de corte

La presión específica de corte puede variar considerablemente para un material dado y también es afectado por los cambios de velocidad, de alimentación, ángulo de corte de la herramienta, etc. Sin embargo, para un ángulo de corte dado a elevadas velocidades y grandes relaciones de alimentación, la presión específica de corte tiende a permanecer constante como se puede ver en la fig. 7

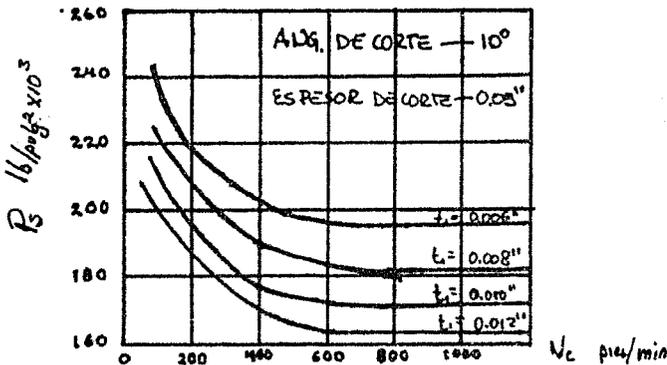


fig. 7 Presión específica de corte para acero suave en torneado.

El cálculo de esta constante puede ser una valiosa guía en la práctica, para estimar fuerzas requeridas en el corte del material dado, a grandes velocidades y alimentaciones y para obtener la gráfica mostrada en la fig. 7. Para acero suave,  $P_s$  es de un valor aprox. de 160,000 Lb./pulg.<sup>2</sup>

#### 4. Fuerza de Arado y el "Efecto del Tamaño".

La fuerza resultante de la herramienta en el corte de metales, está distribuida sobre las áreas donde la herramienta tiene contacto con la viruta y la pieza de trabajo. La herramienta de corte no siempre se encuentra bien afilada y una idealización de esto se muestra en la fig. 8.

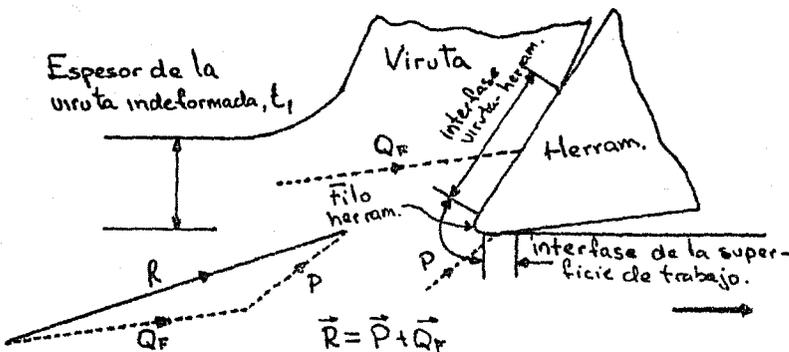


fig. 8 Regiones de Contacto de la Herramienta de Corte  
 $R$  = fuerza resultante de la herramienta  
 $P_f$  = fuerza actuante en la interfase viruta-herramienta  
 $P$  = fuerza de arado

El filo de corte está representado por la superficie cilíndrica que une el flanco de la herramienta con la cara de la misma. Con anterioridad se realizaron ciertas observaciones que nos indican que el radio de este filo (corte), varía de 0.0002 pulg. a 0.0012 pulg., aproximadamente. La fuerza que actúan sobre el filo simula una acción de arado, que es una manera a través de la cual el material de trabajo formará una pequeña proporción de la fuerza de corte a grandes relaciones de alimentación pero no puede ser despreciado este efecto, aunque estemos operando con bajas relaciones de alimentación.

Debido a los elevados esfuerzos que actúan en el filo de corte de la herramienta, ocurre una deformación del material de la herramienta en esta región y dentro de una pequeña área del flanco de la herramienta podría presentarse un contacto entre ésta y la nueva superficie de la pieza de trabajo. De este modo se presentan mayores fuerzas de fricción en esta región. Y esta fuerza empezará a formar una pequeña parte de la fuerza de corte a elevadas relaciones de alimentación cuando se usan herramientas de corte afiladas.

Ninguna fuerza actuante en el filo de la herramienta, nivela la fuerza que puede actuar en el flanco de la misma, contribuyen a la remoción (arranque) de la viruta y estas fuerzas están denominadas conjuntamente como "FUERZAS DE ARADO", P.

La existencia de una fuerza de arado puede provocar importantes efectos y nos puede explicar el llamado "efecto de tamaño". Este término se refiere al incremento de la presión específica de corte o trabajo dado por unidad de volumen de metal removido, a valores bajos de espesor de viruta, por ejemplo en la figura 9. El significado de la presión específica de corte es trazado contra el espesor de la viruta para una operación de fresado.

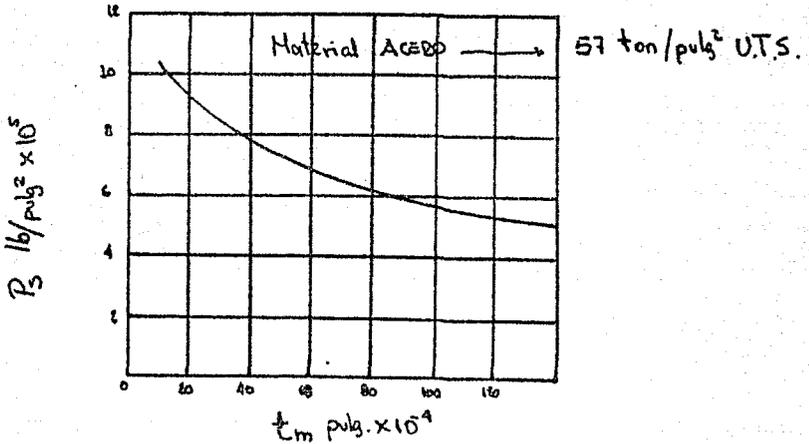


fig. 9 Efecto del espesor de viruta ( $t_m$ ) en la presión específica de corte ( $P_s$ ) durante el fresado.

En este proceso los valores del espesor de viruta son relativamente pequeños, la presión específica de corte  $P_s$ , se incrementa rápidamente con la disminución del espesor de viruta. Este es el concepto de que la fuerza de arado  $P$ , es constante y posteriormente se aumenta a

una gran porción del total de la fuerza de corte, conforme a la alimentación decrece.

Cuando la fuerza total de corte, es dividida por el área de la sección transversal de la viruta indeformada para dar  $P_s$ , la parte de  $P_s$  contribuye al arranque de viruta y se mantendrá constante en la porción resultante de la fuerza de arado  $P$ , que se incrementará.

Esto explica el porqué, estos procesos que producen viruta delgada consumen una gran cantidad de energía para remover cierto volumen de material.

### 5. El Significado de la Fuerza de Corte Aparente para el Material de Trabajo.

En la fig. 10, podemos ver un modelo idealizado de la formación de viruta continua, empleado en muchos de los trabajos previos de la mecánica del proceso de corte, dos de los primeros que emplearon este modelo fueron Ernest y Merchant, que sugirieron que la zona de deformación primaria, se podría representar como un plano llamado "plano de corte".

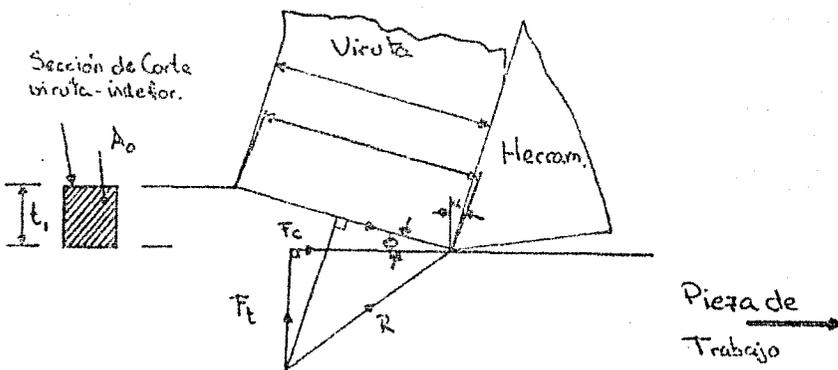


fig. 10 Modelo del plano de corte en la formación de viruta continua.

El ángulo de inclinación del plano de corte con respecto a la dirección de corte, es llamado ángulo de corte y puede ser determinado de la figura anterior y la longitud del plano de corte está dado por la expresión siguiente:

$$L_s = \frac{t_1}{\text{Sen } \phi} = \frac{t_2}{\text{Cos } (\phi - \alpha)} \dots \dots \dots (3)$$

entonces:

$$\frac{t_1}{t_2} \text{Cos } (\phi - \alpha) = \text{Sen } \phi \dots \dots \dots (4)$$

y ordenando:

$$\text{Tan } \phi = \frac{T_1/T_2 \text{ Cos } \alpha}{(1 - T_1/T_2 \text{ Sen } \alpha)} \dots \dots \dots (5)$$

Y si a la relación  $t_1/t_2$  le llamamos "rc" que es conocida como el radio de corte, la expresión anterior nos queda de la siguiente manera:

$$\text{Tan } \phi = \frac{r_c \text{ Cos } \alpha}{(1 - r_c \text{ Sen } \alpha)} \dots \dots \dots (6)$$

En trabajos experimentales el ángulo de la herramienta y el espesor de la viruta indeformada son conocidos y el espesor de la viruta cortada - puede ser medido directamente con un micrómetro o también obtenerlo - del peso de una longitud conocida de viruta, de la siguiente manera:

$$t_2 = \frac{W}{L b \omega \rho} \text{ (pulg.)} \dots \dots \dots (7)$$

donde:

$W$  = peso del espécimen de viruta, Lb.

$Lb$  = longitud del espécimen de viruta, pulg.

$\omega$  = ancho de la pieza de trabajo, pulg.

$\rho$  = densidad del material de trabajo, lb/pulg.<sup>3</sup>

Si la fuerza resultante de la herramienta se encuentra alojada paralela al plano de corte, la fuerza  $F_s$  necesaria para el corte del material de trabajo y la forma de la viruta, pueden ser obtenidos.

Esta fuerza puede ser expresada en términos de la fuerza de corte  $F_c$ , y la fuerza de empuje  $F_t$ , que son las componentes de la fuerza resultante "R" de la herramienta.

Refiriéndonos a la figura 10 tenemos que:

$$F_s = F_c \cos \phi = F_t \operatorname{Sen} \phi \dots \dots \dots (8)$$

El área de corte  $A_s$ , está dada por:

$$A_s = A_o / \operatorname{Sen} \phi \dots \dots \dots (9)$$

Entonces la resistencia de corte aparente del metal en el plano de corte puede encontrarse:

$$S = F_s / A_s \dots \dots \dots (10)$$

$$S = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \operatorname{Sen} \phi) \operatorname{Sen} \phi \text{ (lb/pulg.}^2\text{)}}{A_o} \dots \dots \dots (11)$$

Trabajos experimentales no han mostrado que "S" calculada de esta manera, se mantiene constante para un material de trabajo dado, sobre una extensa variedad de condiciones de corte. Se ha observado, sin embargo, que "S" se incrementa con una disminución en la alimentación o en el espesor de la viruta indeformada a relaciones bajas de alimentación.

Esta excepción de la invariancia de "S", puede ser explicada por la existencia de la constante de la fuerza de arado P, si "P" es eliminada de la fuerza resultante de corte "R" entonces  $Q_f$ , la fuerza requerida para remover la viruta y actuar en la cara de la herramienta, es obtenida por la siguiente expresión:

De la fig. 8:

$$\overline{Q_f} = \overline{R} - \overline{P}$$

Como se indica, si las componentes de  $Q_f$ , son usadas para el cálculo de la fuerza de corte aparente del material de trabajo, entonces de esta manera se mantiene constante con respecto a los cambios en relación de alimentación, entonces tenemos que:

$$S' = (F'_c \cos \phi - F'_t \sin \phi) \frac{\text{Sen } \phi}{A_0} \dots \dots \dots (12)$$

Dónde:

$F'_c$  - Componente de corte de  $Q_f$

$F'_t$  - Componentes de empuje de  $Q_f$ .

Y entonces se puede decir que  $S'$ , es una constante propia del Material de Trabajo. Trabajos en la deformación de metales a elevadas relaciones de esfuerzo nos indican que se logra una deformación del material a tensión constante, cuando la relación de esfuerzos es suficientemente grande. En el corte de metales, las relaciones de esfuerzos están calculadas para variar en el orden de  $10^3$  a  $10^5$  por segundo y bajo estas condiciones, la resistencia al corte de los metales puede ser constante e independiente de la relación de esfuerzo, esfuerzos y temperatura. Esto así sugerido explica el porqué en el corte del material de trabajo es constante e independiente de la velocidad y ángulo de corte y el filo de la herramienta. Todo esto dentro de los rangos de estas condiciones normalmente encontradas en el corte de metales.

## 6. El Espesor de Viruta

El espesor de viruta  $t_2$ , en el corte de metales no está afectada solamente por la geometría de la herramienta y el espesor de la viruta indeformada  $t_1$ , sino como se verá, puede ser influenciada por las condiciones de fricción en la interfase herramienta-viruta.

A este respecto el proceso de corte difiere fundamentalmente de otros procesos de deformación de metales donde la forma final del material deformado está determinado por la forma o desgaste de la herramienta utilizada. Esto ha hecho que el análisis del proceso de corte de metales

les se haya dificultado grandemente y antes de cualquier predicción sobre las fuerzas de corte que pueden ser hechas, el espesor de viruta  $t_2$ , puede ser determinado.

Como se ha demostrado en la ecuación 6, ahora sabemos que conociendo el ángulo de corte  $\phi$  podemos calcular  $t_2$  para un conjunto de condiciones de corte. Experimentalmente se ha encontrado el valor de  $\phi$  y por lo tanto, la relación de corte depende de las condiciones de trabajo y material de la herramienta. Se han desarrollado varias investigaciones para establecer una ley teórica, la cual nos puede decir cuál es el ángulo  $\phi$  y dos teorías que se elaboraron, que se muestran a continuación.

### 6.1 Teoría de Ernest y Merchant

Aunque ya se había realizado una tentativa para resolver el problema por Phispane en 1937, el resultado del primer análisis completo, llamado "solución al ángulo de corte", fué presentado por Ernest y Merchant. En este análisis de viruta es considerada como un cuerpo rígido sostenido en equilibrio por la acción de las fuerzas transmitidas a través de la interfase herramienta-viruta y a través del plano de corte.

Por conveniencia en la fig. 11, la resultante de la fuerza de la herramienta "R", se muestra actuando en la orilla de la herramien

ta de corte y es descompuesta en las componentes  $N$  y  $F$ , en dirección normal a lo largo de la cara de la herramienta respectivamente, y en los componentes  $F_n$  y  $F_s$  normales a lo largo del plano de corte respectivamente. A continuación se muestran las componentes de la resultante, fuerza de corte,  $f_c$  y la fuerza de empuje  $f_t$ .

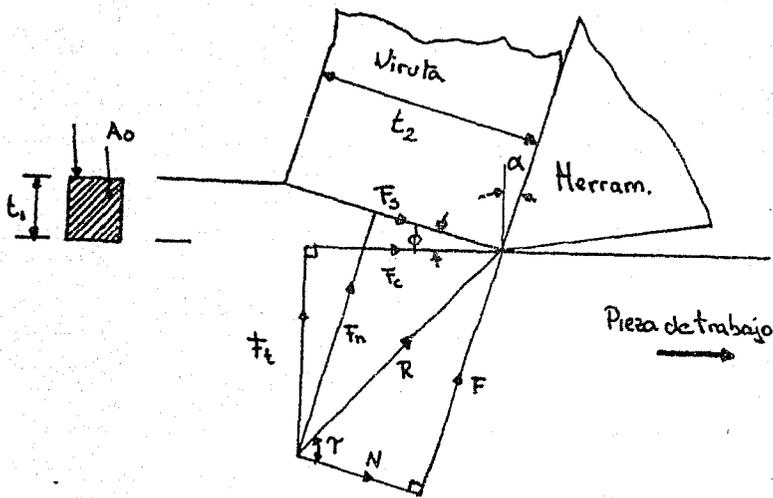


fig. 11 Diagrama de Fuerzas en el Corte Ortogonal

donde:

$R$  = Fuerza resultante de la herramienta

$F_c$  = Fuerza de corte

$F_t$  = Fuerza de empuje

$F_s$  = Fuerza de corte en el plano de corte

$F_n$  = Fuerza normal en el plano de corte

$F$  = Fuerza de fricción en la cara

$N$  = Fuerza normal en la cara

$\phi$  = Angulo de corte

$\gamma$  = Angulo promedio de fricción

$\alpha$  = Angulo de la herramienta de corte

$A_0$  = Area del corte seccional de la viruta

$t_1$  = Espesor de la viruta indeformada

$t_2$  = Espesor de la viruta

Se ha considerado en general que la fuerza resultante de corte es transmitida a través de la interfase herramienta-viruta y que no actúa ninguna fuerza en el filo de la herramienta o en el flanco (caso de la fuerza de arado  $P = 0$ ).

Las bases de la teoría de Ernest y Merchant, sugirieron que el ángulo de corte  $\phi$  podría tomarse como el valor que tiene al realizar un trabajo mínimo.

Puesto que dadas las condiciones de corte, el trabajo efectuado es proporcional a  $F_c$  y sería necesario desarrollar una expresión para  $F_c$  en términos de  $\phi$  y por ésta obtener el valor de  $\phi$  para la cual  $F_c$  es mínimo.

De la figura 11, tenemos que:

$$F_s = R \cos (\phi + \tau - \alpha) \dots\dots\dots (13)$$

y

$$F_s = S A_s = \frac{S A_o}{\text{Sen } \phi} \dots\dots\dots (14)$$

donde:

S = Fuerza de corte del material en el plano de corte.

A<sub>s</sub> = Area del plano de corte

A<sub>o</sub> = Area de la sección transversal de la viruta indeformada.

τ = Angulo de fricción entre la viruta-herramienta (Tan F/N).

α = Angulo de herramienta de corte.

ahora las expresiones 13 y 14.

$$R = \frac{S A_o}{\text{sen } \phi} \frac{1}{\text{Cos } (\phi + \tau - \alpha)} \dots\dots\dots (15)$$

ahora por geometría:

$$F_c = R \cos (\tau - \alpha) \dots\dots\dots (16)$$

por lo tanto:

$$F_c = \frac{S A_o}{\text{sen } \phi} \frac{\text{Cos } (\tau - \alpha)}{\text{Cos } (\phi + \tau - \alpha)} \dots\dots\dots (17)$$

La ecuación 17 puede ser ahora diferenciada con respecto a φ e igualada a cero para encontrar el valor de φ para el cual F<sub>c</sub> es mínimo. El valor requerido está dado por:

$$2 \phi + \tau - \alpha = 90^\circ \dots\dots\dots (18)$$

Merchant encontró que esta teoría daba un buen resultado en compará

ción con los resultados obtenidos experimentalmente cuando se cortaba plástico sintético, pero daba un pobre resultado para acero maquinado con herramientas de carburo sinterizado.

Se puede ver que en la ecuación diferenciada 17, con respecto a  $\phi$  se asume que  $A_0$ ,  $\alpha$  y  $S$  deben ser independientes de  $\phi$ .

Reconsiderando los puntos de Merchant, este decidió incluir en una nueva teoría:

$$S = S_0 + kS_n \quad \dots \dots \dots (19)$$

La cual indica que la fuerza de corte del material se incrementa linealmente con el incremento en el esfuerzo normal en el plano de corte; si el esfuerzo normal es cero tenemos que  $S = S_0$ .

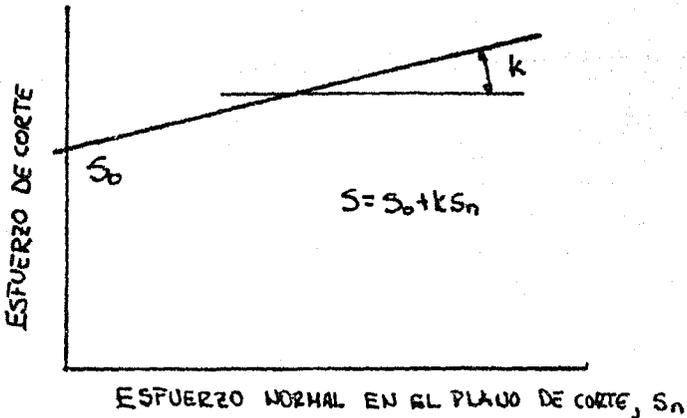


fig. 12 Dependencia de  $S$  en  $S_n$ , durante la 2a. Teoría de Merchant

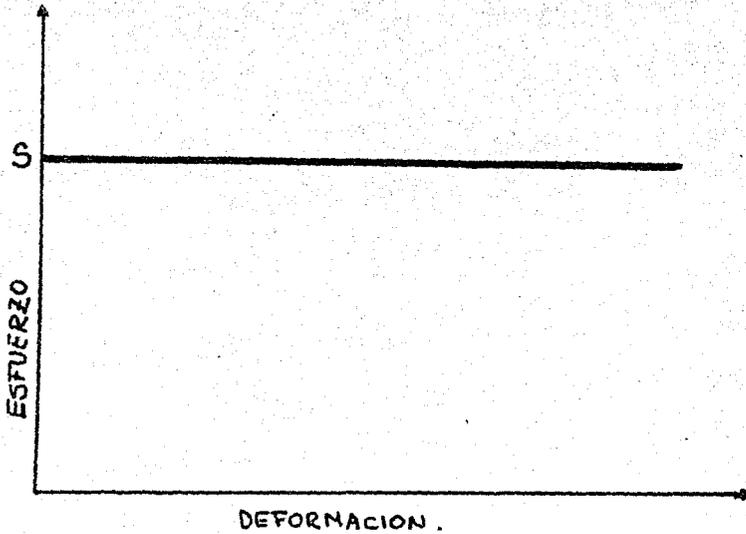


fig. 13 Curva Esfuerzo-Deformación para un Material Rígido-Plástico

- II) El comportamiento del material es independiente de la relación de deformación.
- III) El efecto del incremento de temperatura durante la deformación despreciado.
- IV) El efecto de inercia durante la aceleración del material durante la deformación es despreciable.

Estas consideraciones están dirigidas para tener soluciones útiles para muchos problemas de plasticidad y estas son las razones para suponer que podría tenerse una aproximación en el actual comportamiento -

de materiales de trabajo durante el corte de metales. Esto es por los altos esfuerzos y valores de deformación que ocurren en el proceso de - corte,

Se sabe que la relación de endurecimiento por trabajo, en la mayoría de los metales disminuye rápidamente con el incremento de deformación y que el efecto de altas relaciones de deformación es para elevar la re - sistencia en el punto de cedencia del metal, con respecto a estos últi - mos esfuerzos. También con las altas deformaciones encontradas, la - deformación elástica debe considerarse como una proporción desprecia - ble de la deformación total. Por consiguiente, la curva esfuerzo-defor - mación del material de trabajo debe aproximarse al caso ideal de la fi - gura 13 mostrada anteriormente.

En la solución al problema, en plasticidad, la construcción de un cam - po combinado de líneas (divididas). Esto consiste en dos familias de - líneas ortogonales (llamadas líneas divididas) indicando en cada punto de la zona plástica, las dos direcciones ortogonales de máximo esfuer - zo de corte. El campo de líneas divididas, propuesto por Lee y Shaffer para el corte ortogonal de una viruta continua, está mostrado en la fig.

14.

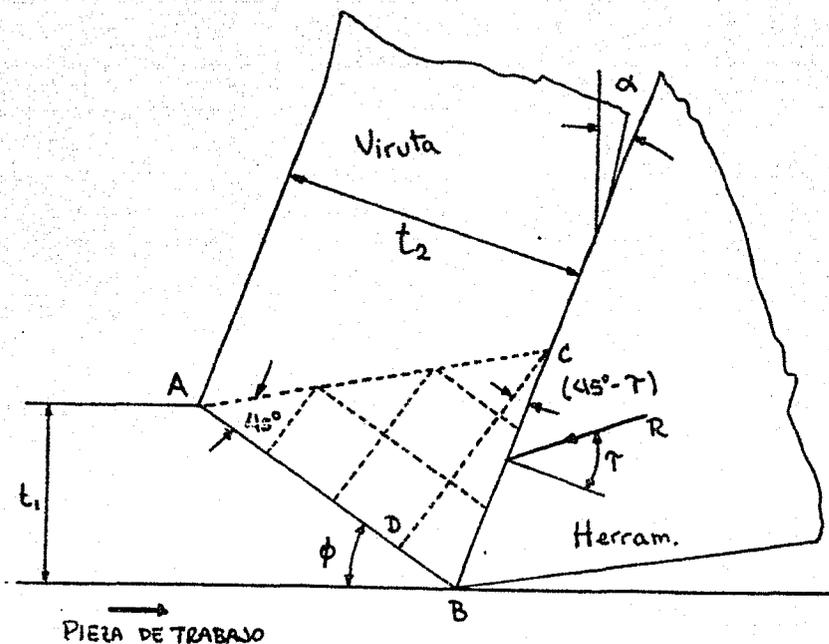


fig. 14 Campo de Líneas Divididas para la Solución de la Teoría de Lee y Shaffer en el Corte Ortogonal

Puede verse que Lee y Shaffer utilizaron un modelo ideal del plano de corte, donde todas las deformaciones tuvieron lugar en un plano extendido desde el filo de la herramienta de corte a el punto de intersección de la superficie libre de trabajo y viruta.

Dada esta consideración la manera en la cual las fuerzas de corte aplicadas por la herramienta son transmitidas a través de la viruta, a el plano de corte.

Este resultado en la zona plástica, forma el triángulo ABC donde no ocu

ren deformaciones pero donde el material es forzado sobre su punto de -  
cedencia. Entonces el máximo esfuerzo de corte a través de esta zona -  
es "S" (el esfuerzo de corte en el plano de corte), y las dos direcciones  
de este esfuerzo máximo de corte está indicado por dos conjuntos de lí-  
neas de fuerzas ortogonales (líneas divididas).

Considerando los límites de esta zona triangular, está claro que el pla-  
no de corte AB, puede dar la dirección de un conjunto de líneas segmen-  
tadas desde el esfuerzo máximo de corte que puede ocurrir a lo largo del  
plano de corte. También sabiendo que no actúan esfuerzos en la viruta -  
después de haber pasado los límites AC y que no pueden transmitir es--  
fuerzas a través de este límite, por consiguiente en AC no se pueden -  
transmitir esfuerzos por ser considerado como una superficie libre y la -  
dirección de esfuerzos máximo de corte siempre se encuentra libre a  $45^\circ$   
(el ángulo CAB  $45^\circ$ ). Finalmente considerando que los esfuerzos que -  
actúan en la interfase de la viruta-herramienta son uniformes (una con-  
sideración irracional como se verá después), el esfuerzo principal de -  
éste límite BC se encuentra entre el límite de los ángulos  $\gamma$  y  $\gamma$   
 $+ 90^\circ$  (donde  $\gamma = \tan^{-1} F/N$  que es el ángulo de fricción de la -  
interfase de la viruta-herramienta). La dirección del esfuerzo máximo -  
de corte está a  $45^\circ$  de la dirección de esfuerzo principal y por consi -  
guiente, el ángulo BCD =  $45^\circ - \gamma$

Y ahora de la figura 14 tenemos que:

$$\phi + 45^\circ + \gamma - \alpha = 90^\circ$$

o sea:

$$\phi + \gamma - \alpha = 45^\circ \quad \dots\dots\dots (26)$$

que es la solución del ángulo de corte requerida.

Lee y Shaffer notaron que la ecuación 26 no podía ser aplicada cuando  $\gamma = 45^\circ$  y  $\alpha = 0$ , porque con estos valores  $\phi = 0$  y sin embargo consideraron que con tales condiciones de alta fricción y bajos ángulos de corte conducen a la formación de borde acumulado, en la práctica. Para encontrar este punto, se presentó una segunda solución para la nueva geometría, donde el borde acumulado está presente en la cara de la herramienta.

## 7. Fricción en el Corte de Metales

Está claro de que por varios mecanismos no completamente comprendidos, el comportamiento friccional en la cara de la herramienta afecta a la geometría del proceso de corte, antes de considerar las condiciones de fricción en el corte de metales, es necesario discutir la naturaleza de la fricción entre superficies secas deslizantes.

La ley de fricción de Amontonn, que fue formulada en 1699, establece

que la fricción es independiente del área aparente de contacto y proporcional a la carga normal entre las dos superficies. En 1785 COULOMB, verificó estas leyes e hizo unas interesantes observaciones:

Que el coeficiente de fricción es sustancialmente independiente de la velocidad de deslizamiento. El trabajo de Bowden y Tabor, explica estas leyes empíricas.

Exámenes microscópicos indican que aún con los preparativos más cuidadosos en superficies planas metálicas, contienen numerosos valles y colinas (rugosidades). Cuando dos superficies son unidas, el contacto es establecido por solo unas pocas irregularidades en cada superficie. (fig. 17).

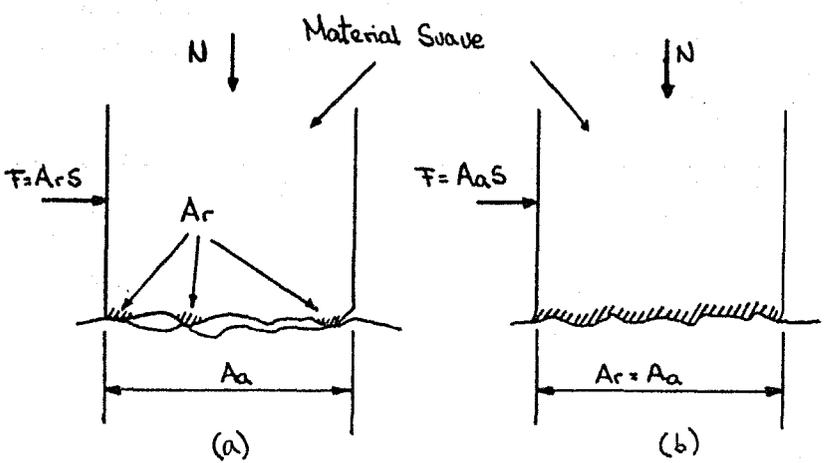


fig. 17 Fricción Existente para un Contacto Suave  
 a) Fricción Deslizante      b) Fricción "Sticking"

De la fig. 17:

F = Fuerza de fricción

N = Carga normal

Ar = Area real de contacto

Aa = Area aparente de contacto

s = Fuerza de corte de un material suave.

Si una carga normal es aplicada, ocurre un tipo de contacto áspero y el área de contacto Ar, se incrementa hasta que es capaz de soportar la carga aplicada. Para la mayoría de las aplicaciones en ingeniería, esta área real de contacto es solamente una pequeña fracción del área aparente de contacto y está dado por:

$$A_r = \frac{N}{P} \dots \dots \dots (27)$$

donde P = presión de cedencia de un material suave.

La adhesión debida al contacto íntimo metálico de estas asperezas, ha recibido el nombre de "soldadura" y cuando resbala es necesaria una fuerza para continuar el corte de la unión soldada: para los tipos de estas asperezas, la fuerza total de fricción está dada por:

$$F = SA_r \dots \dots \dots (27')$$

Por consiguiente de 27 y 25, el coeficiente de fricción está dado por:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{S}{P} \dots \dots \dots (28)$$

La ecuación 28 nos muestra que el coeficiente de fricción es independiente del área de contacto aparente y como la relación  $s/p$ , se espera que sea constante para el material dado, la fuerza de fricción es proporcional a la carga normal (caso/ de  $\mu = \text{cte}$ ) por lo tanto, las leyes de fricción se cumplen.

Durante el corte de metales, se ha observado generalmente que el coeficiente promedio de fricción entre la viruta y la herramienta, puede variar considerablemente y verse afectado por los cambios de velocidad y ángulo de corte, etc.

Esto es debido a las elevadas presiones normales, las cuales se desarrollan en la interfase de la viruta-herramienta. Por ejemplo, cuando se maquina acero, estas presiones normales pueden ser grandes como 500,000 lb/pulg.<sup>2</sup> y pueden causar una área real de contacto, para aproximarla o igualarla al área aparente de contacto, sobre una porción de la interfase viruta-herramienta ( $A_r/A_a = 1$ ). De este modo, bajo estas circunstancias  $A_r$ , ha alcanzado su valor máximo y constante. La fuerza de fricción  $F$ , es siempre dada por la ecuación 27' ( $F = SA_r$ ).

Pero ahora, es independiente de la fuerza normal  $N$  y las leyes de fricción ordinarias, no alcanzan esta aplicación. Bajos estas condiciones, la acción de corte no es limitada a las asperezas de la superficie, pero toma lugar si el cuerpo del material es suave (fig. 17 B).

Considerando el comportamiento de la fricción en el corte de metales, - tiene primacía el modelo del corte ortogonal con viruta continua con - borde acumulado, indicados en la fig. 18.

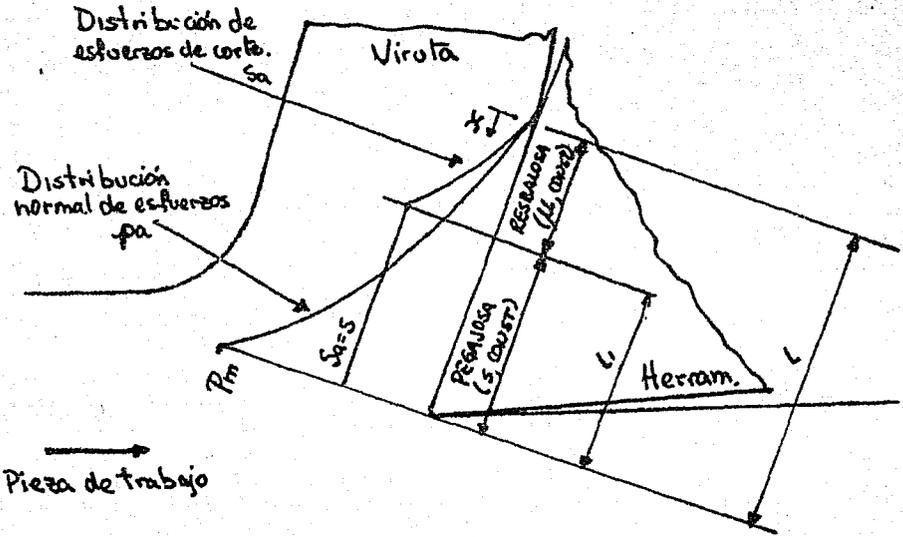


fig. 18 Modelo de la Fricción Entre la Viruta-Herramienta en el Corte Orgonal de Metales

donde:

- $P_m$  = Máximo esfuerzo normal
- $P_a$  = Esfuerzo normal aparente
- $S_a$  = Fuerza de corte aparente
- $l$  = Ancho de contacto entre la viruta-herramienta
- $l_1$  = Ancho de contacto de la región-sticking

Aquí, la presión normal entre la viruta y la herramienta es suficientemente grande a causa de  $A_r/A_a$  como para aprovechar la unidad bajo la

región del largo  $l_1$ , adyacente al filo de corte de la herramienta, determinada como región (sticking) pegajosa. En el largo  $l-l_1$ , extendido desde la región "sticking" hasta el punto donde la viruta cierra contacto con la herramienta, el radio  $r_r/Aa$  es más pequeño que la unidad y sin embargo, el coeficiente de fricción es constante, esta región se llama "deslizante".

En trabajos previos, existen evidencias de un contacto friccional "pegajoso", y esto debido al examen realizado en la superficie inferior de la viruta en especímenes, donde la acción del corte fue suspendida rápidamente. Un resultado típico está mostrado en la figura 19.

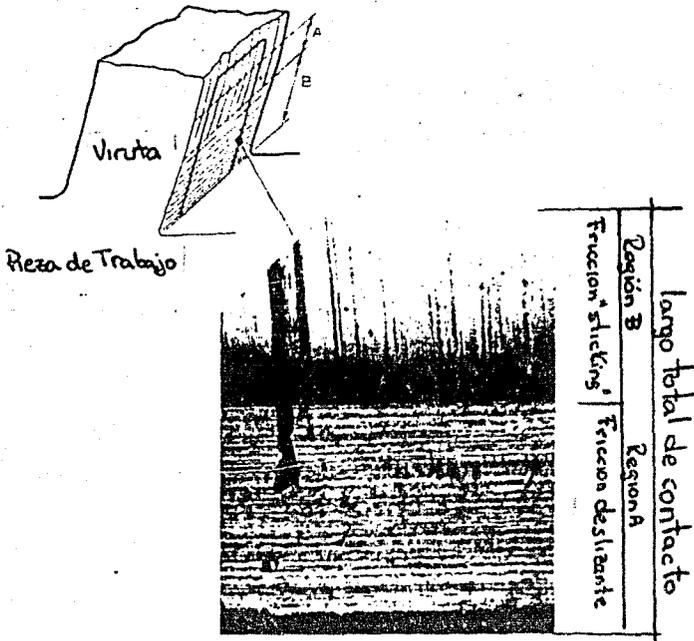


Fig. 19. Fotografía de la interfase de la viruta-de corte. mostrando el contacto deslizante y pegajoso. (Después de WALLACE Y BOOTHROYD).

Donde se puede ver que en la región adyacente al filo de corte de la herramienta, las marcas de esmerilado en la cara de la herramienta fueron imprimidas en la superficie inferior de la viruta, indicando que no existe movimiento relativo entre la viruta y la herramienta, que se había notado, y que las áreas reales y aparentes de contacto son iguales en esa región.

Bajo estas condiciones, el ángulo promedio de fricción en la cara de la herramienta, dependerá de la forma de la distribución de los esfuerzos normales; el contacto de la viruta y la herramienta en la longitud, la fuerza de corte promedio de la viruta en la región pegajosa y el coeficiente de fricción en la región "deslizante". Obviamente un valor del ángulo promedio de fricción es insuficiente para describir completamente las condiciones de fricción en la cara de la herramienta.

Un análisis de la distribución de esfuerzos en la cara de la herramienta está mostrada en la fig. 18 y fué recientemente presentada por Zorev, quién supuso que la distribución del esfuerzo normal puede ser representado por la ecuación:

$$P_a = q X^Y \dots \dots \dots (29)$$

donde:

x = Distancia a lo largo de la cara de la herramienta desde el punto donde la viruta pierde contacto con la herramienta.

$q, Y = \text{Constantes}$

El esfuerzo normal máximo  $P_m$  ocurre cuando  $X = L$  y entonces:

$$P_m = q L^Y \dots \dots \dots (30)$$

$$q = P_m / L^Y \dots \dots \dots (31)$$

sustituyendo a  $q$  en la ecuación 29

$$P_a = P_m \left( \frac{X}{L} \right)^Y \dots \dots \dots (32)$$

En la región deslizante, desde  $X = 0$  a  $X = L - L_1$ , el coeficiente de fricción  $\mu = \text{cte}$  y la distribución de los esfuerzos de corte  $S_a$ , en esta región está dada por:

$$S_a = P_a \mu = \mu P_m \left( \frac{X}{L} \right)^Y \dots \dots \dots (33)$$

En la región sticking el esfuerzo de corte se convierte en máximos y - desde que  $X = L - L_1$  a  $X = L$

$$S_a = S \dots \dots \dots (34)$$

Integrando la expresión 31 para encontrar la fuerza normal  $N$ , que actúa en la cara de la herramienta.

$$\begin{aligned} N &= W \int_0^L P_m \left( \frac{X}{L} \right)^Y dX \\ &= \frac{P_m W L}{L + Y} \dots \dots \dots (35) \end{aligned}$$

donde:

$W$  es el ancho de corte.

La fuerza de fricción  $F$  en la cara de la herramienta está dada por:

$$\begin{aligned}
 F &= W \left[ SL_1 + \int_{L_1}^{LL} \mu P_m \left( \frac{X}{L} \right)^Y dx \right] \\
 &= SWL_1 + \frac{\mu P_m W (L-L_1)^{Y+1}}{L^Y (L+Y)} \dots \dots \dots (36)
 \end{aligned}$$

a el punto  $X = L - L_1$  el esfuerzo normal  $P_a$  está dado por  $S/\mu$  y de nuevo de la ecuación 31 está dada por:

$$\frac{P_m (L - L_1)^Y}{L}$$

entonces:

$$\mu \frac{P_m (L - L_1)}{L} = S \dots \dots \dots (37)$$

sustituyendo la ecuación 37 en la ecuación 36 para simplificar la expresión, encontramos que para F, tenemos:

$$F = SWL_1 + \frac{SW (L - L_1)}{1 + Y} \dots \dots \dots (38)$$

El coeficiente promedio de fricción en la cara de la herramienta puede ahora encontrarse por las ecuaciones 34 y 38.

por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 \text{Tan } \gamma &= \frac{F}{N} \\
 &= \frac{S}{P_m} \left( 1 + Y \frac{L_1}{L} \right) \dots \dots \dots (39)
 \end{aligned}$$

De la expresión 35 el esfuerzo normal promedio en la cara de la herra-

mienta  $P'$  está dada por:

$$P' = \frac{N}{W L} = \frac{P_m}{1 + Y}$$

esto es:

$$P_m = (1 + Y) P' \dots\dots\dots (40)$$

sustituyendo para  $P_m$  en la ecuación 39, tenemos que:

$$\tau = \text{Tan}^{-1} \left[ \frac{S}{P'} \left( \frac{1+Y}{1+Y} \frac{L}{L'} \right) \right] \dots\dots\dots (41)$$

En trabajos experimentales se ha encontrado que el término  $S \frac{(1+Y)L/L}{1+y}$  permanece sensiblemente constante para un material dado sobre un amplio rango de condiciones de corte no lubricadas y entonces la expresión del ángulo promedio de fricción será:

$$\tau = \text{Tan}^{-1} \frac{K}{P'} \dots\dots\dots (42)$$

donde  $K = \text{constante}$

Esta ecuación 42 muestra que el ángulo promedio de fricción es principalmente dependiente del esfuerzo normal promedio en la cara de la herramienta y este resultado puede ser usado para explicar el efecto de los cambios en el ángulo de corte  $\alpha$  en el ángulo promedio de fricción  $\tau$

Como  $\alpha$  incrementa la componente de la resultante de la fuerza normal de la herramienta en la cara de la misma, esta disminuirá, descen

derá, y por lo tanto el esfuerzo normal promedio bajará. De la expresión 42 por lo tanto, a un incremento de  $\alpha$  podría ser esperado un incremento en el ángulo promedio de fricción  $\tau$ . Este resultado concuerda con los resultados del trabajo experimental donde un incremento en  $\alpha$  tiene como resultado un incremento en  $\tau$  para una extensa variedad de materiales de trabajo.

## CAPITULO III

### TERMODINAMICA EN EL CORTE DE METALES

Durante el corte de metales, se generan altas temperaturas en la región del filo de la herramienta y estas temperaturas tienen una fuerte influencia en el grado de desgaste de la herramienta de corte y en la fricción que existe en la interfase viruta-herramienta. A causa de esto, se tiene una gran atención para la determinación de las temperaturas en la herramienta, viruta y pieza de trabajo, en el proceso de corte de metales.

#### 1. Generación de Calor en el Corte de Metales

Se ha establecido que el grado de consumo de energía durante el corte de metales, está dado por la expresión:

$$W_c = F_c v_c \text{ (pies lb/min)} \quad \dots \quad (1)$$

donde:

$F_c$  = componente de la fuerza resultante de la herramienta, en lbs.

$v_c$  = velocidad de corte, pies/min.

Cuando un material sufre una deformación elástica, la energía utilizada, es almacenada en el material como una energía potencial y no se genera calor. Sin embargo, cuando el material sufre una deformación -

plástica, siempre, toda la energía utilizada se transforma en calor. En el corte de metales, el material está sujeto a esfuerzos extramadamente altos y las deformaciones elásticas son una pequeña proporción de la deformación total, por consiguiente, se puede considerar que toda la energía se transforma en calor:

$$Q = \frac{Wc}{J} ; Q = \frac{Fc \cdot c}{J} \text{ Chu/min} \dots \dots \dots (2)$$

donde:

$$Q = \text{calor total generado, Chu/min}^{(*)}$$

$$J = \text{equivalente mecánico de calor } (= 1,400 \text{ pies lb/Chu})$$

Esta energía de corte se transforma en calor en dos principales zonas de deformación plástica (fig. 1), la zona de corte o zona de deformación primaria, AB y la zona de deformación secundaria, BC. Si en las mejores circunstancias, la herramienta de corte, no está perfectamente afilada, una tercera fuente de calor podría presentarse, debido a la fricción existente en la zona de la herramienta y la nueva superficie de la pieza de trabajo, zona BD. Sin embargo, a no ser que la herramienta esté severamente desgastada, esta calor generado puede ser de muy pequeña magnitud y se puede despreciar en el presente análisis, - esto es:

$$Q = Q_s + Q_f \dots \dots \dots (3)$$

donde:

-----

(\*) Donde Chu = 1.8 (Btu)  
(análisis dimensional al final del capítulo).

$Q_s$  = calor generado en la zona primaria (calor de corte)

$Q_f$  = calor generado en zona secundaria (calor friccional)

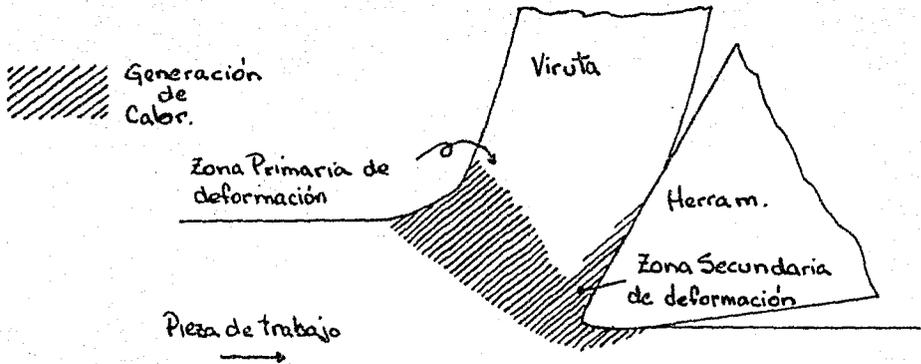


fig. 1 Generación de Calor en el Corte Ortogonal

$Q_f$ , está dado por la expresión  $\frac{F v_f}{J}$  donde  $F$  es la fuerza friccional de la herramienta en la cara de corte y  $v_f$ , es la velocidad de flujo de la viruta ( $= v_c r_c$ ). Entonces, conociendo  $Q_f$  y  $Q$ ,  $Q_s$  se puede obtener de la ecuación 3.

Conociendo como se transfiere el calor en estas zonas por la pieza de trabajo, viruta y materiales de la herramienta, es necesario considerar, primero la transferencia de calor en el material, la cual es debida al movimiento relativo a la fuente de calor.

## 2. Transferecia de Calor en el Material en Movimiento.

Considerando el elemento ABCD (fig. 2), el cual tiene una unidad de espesor y a través del cual el material fluye en la dirección  $-x$ . El punto A tiene unas coordenadas  $(x, y)$ . Se considera que el material en ese punto tiene una temperatura instantánea  $\theta$ . Las temperaturas y coordenadas de los puntos B, C y D están indicadas en la fig. 2.

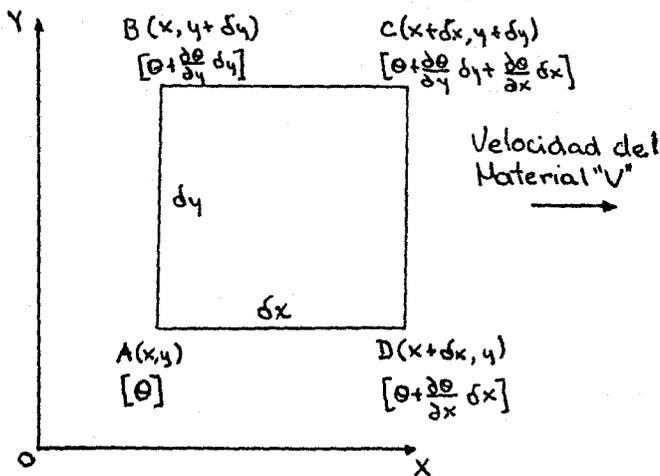


fig. 2 Elemento a Través del Cual Fluye el Material Calentado

El calor es transferido a través de los límites AB y CD por conducción, porque los gradientes de temperatura son en la dirección X. Y por transportación causada por el flujo del material caliente a través de estos -

límites. Debido a que no existe flujo de material a través de los límites BC y AD, el calor solamente es transferido por conducción. La transferencia de calor a través de AB está dada por:

$$- K \frac{\partial \theta}{\partial x} dy + \rho c v \left( \theta + \frac{1}{2} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) dy$$

a través de CD

$$- K \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right) dy + \rho c v \left( \theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial \theta}{\partial y} dy \right) dy$$

a través de AD

$$- K \frac{\partial \theta}{\partial y} dx$$

a través de BC

$$- K \frac{\partial}{\partial y} \left( \theta + \frac{\partial \theta}{\partial y} dy \right) dx$$

donde:

$K$  = conductividad,  $\text{Chu/pulg. hr } ^\circ\text{C}$ .

$c$  = calor específico,  $\text{Chu/lb } ^\circ\text{C}$ .

$\rho$  = densidad,  $\text{lb/pulg.}^3$

$v$  = velocidad relativa de la fuente de calor  $\text{pulg/hr}$ .

Si las fuentes de calor son constantes y no existe calentamiento en el elemento, el flujo neto de calor dentro del elemento es cero, esto es:

$$- K \frac{\partial \theta}{\partial x} dy + \rho c v \theta dy + \frac{\rho c v}{2} \frac{\partial \theta}{\partial y} dy dy + K \frac{\partial \theta}{\partial x} dy$$

$$+ K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dx dy - \rho c v \theta dy - \rho c v \frac{\partial \theta}{\partial x} dx dy - \frac{\rho c v}{2} \frac{\partial \theta}{\partial y} dy dy$$

$$- K \frac{\partial \theta}{\partial y} dx + K \frac{\partial \theta}{\partial y} dx + K \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} dy dx = 0$$

ó

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{R_t}{t} \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \dots \dots \dots (4)$$

Donde  $R_t = \frac{\rho c v t}{K}$  y es conocido con el nombre de "número térmico" donde  $t$ , es una dimensión lineal.

En el corte de metales el número térmico es tomado como  $\frac{\rho c v t_1}{K}$  donde  $v_c$  = velocidad de corte y  $t_1$  = espesor de la viruta indeformada.

La solución de la ecuación 4, no puede ser posible, excepto por la simplicidad de las condiciones de límite. Sin embargo, es usual considerar que la solución de esta ecuación para un caso unidimensional, es válida y esto está demostrado en la fig. 3, para el caso de un metal en movimiento a alta velocidad. Aquí se puede ver que un punto en el material aproximándose a la fuente de calor, es calentado rápidamente, alcanzando su máximo de temperatura dentro de la misma y ya después se mantiene constante. Con estos resultados, no se considerará la distribución de temperaturas que ocurre en el corte del metal

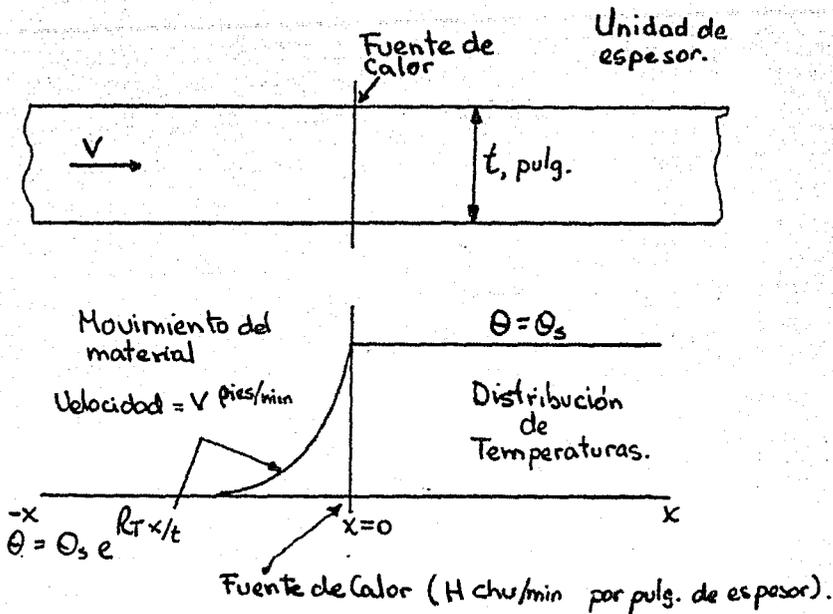
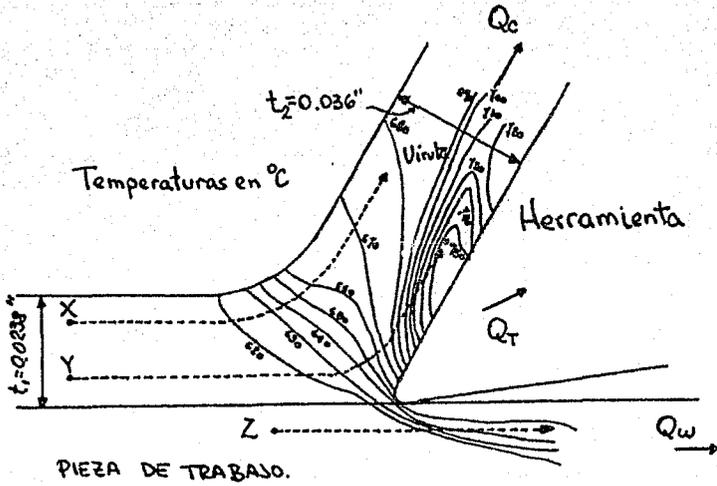


fig. 3 Distribución de Temperaturas en un Material con Movimiento Rápido (caso unidimensional)  $\theta_s = \frac{H}{\rho c v t}$

### 3. Distribución de Temperaturas en el Corte de Metales

La fig. 4, nos muestra experimentalmente la distribución de temperaturas en la pieza de trabajo y la viruta durante el corte ortogonal de metales. Sea el punto  $x$ , en el material, el cual se mueve hacia la herramienta de corte, se aproxima y pasa a través de la zona de deformación primaria y es calentado hasta que se aleja de esta zona y es llevado así por la viruta. El punto  $y$ , sin embargo, pasa a través de ambas zonas de deformación y el calentamiento continua hasta que sea alejado de la zona de deformación secundaria.



" Mat. acero suave "   
 Vel. de corte = 75 pie/min   
 ancho de corte = 0.25'   
 Ang. de corte = 30°   
 Temperatura = 611°C   
 " "

fig. 4 Distribución de Temperaturas en la Pieza de Trabajo y Viruta Durante el Corte Ortogonal

Después se enfría, y como el calor es conducido dentro del cuerpo de la viruta, ésta sale a una temperatura uniforme. Entonces la máxima - temperatura ocurre a lo largo de la cara de la herramienta, en cierta - distancia a partir del filo de corte. El punto Z, permanece en la pieza de trabajo, y se calienta como si pasara por debajo del filo de la herramienta de corte, por conducción de calor, en la zona de deformación - primaria. Parte de este calor, es transmitido a la zona de deformación secundaria por conducción al cuerpo de la herramienta, entonces:

$$Q = Q_C + Q_w + Q_t \text{ (Chu/min) } \dots \dots \dots (5)$$

donde:

$Q$  = calor total generado

$Q_c$  = calor transportado dentro de la viruta

$Q$  = calor conducido dentro de la pieza de trabajo.

$Q_t$  = calor conducido dentro de la herramienta.

La viruta tiene un flujo rápido dentro de la herramienta, por lo tanto, -  
aumenta la capacidad de remover el calor de la misma. Por esta razón -  
 $Q_t$ , usualmente forma una pequeña porción de  $Q$ , y puede ser suprimido,  
excepto cuando se trabaja a muy bajas velocidades de corte.

### 3.1 Temperaturas en la Zona de Deformación Primaria

El calor generado en la zona de deformación primaria es  $Q_s$ , (Chu/  
min.) y la fracción  $\beta$ , del calor conducido dentro de la pieza  
de trabajo; el resto  $(1 - \beta) Q_s$ , es transportado dentro de la vi  
ruta. Entonces, el aumento de temperatura promedio del material -  
que pasa a través de la zona de deformación primaria, está dada -  
por:

$$\theta_s = \frac{(1-\beta) Q_s}{\rho c v_c t_w} \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots (6)$$

donde:

$\beta$  = proporción de  $Q_s$ , conducido dentro de la pieza de traba

- $\rho$  = densidad del material (lb/pulg.<sup>3</sup>)  
 $C$  = calor específico del material (a temperatura  $\Theta_s$ )  
 Chu/lb °C.  
 $v_c$  = velocidad de corte (Pulg/min).  
 $t_1$  = espesor de la viruta indeformada (pulg)  
 $\omega$  = ancho de corte (pulg).

La ecuación 6, nos muestra que si  $\beta$ , es conocida por un conjunto de condiciones de corte dado,  $\Theta_s$  puede ser determinado.

Varios análisis teóricos de la temperatura en la pieza de trabajo y en la zona de corte, han sido estudiados por WEINER y RAPIER. En la fig. 5 nos indica el modelo ideal del proceso de corte empleado. Se supuso que la zona de deformación primaria, podría ser considerada como una fuente plana de calor de intensidad uniforme, en la cual no existen pérdidas de calor en la superficie libre de la pieza de trabajo y viruta y que las propiedades térmicas del material de trabajo, fueran constantes e independientes de la temperatura. El problema fue resolver la ecuación 4, la ecuación básica de transferencia de calor y el ancho de los límites de la pieza de trabajo. Una solución exacta de este problema, no fue posible encontrarla y fue necesario tomar nuevas consideraciones. La sugerencia más

acertada fue elaborada por WEINER, el cual consideró, que no se -  
 conduce el calor en el material en la dirección de su movimiento. -  
 Esta consideración, fue mostrada para justificar el porqué en el -  
 corte de metales a altas velocidades, la transferencia de calor en  
 dirección del movimiento, es principalmente por transportación y -  
 el término conducción se desprecia.

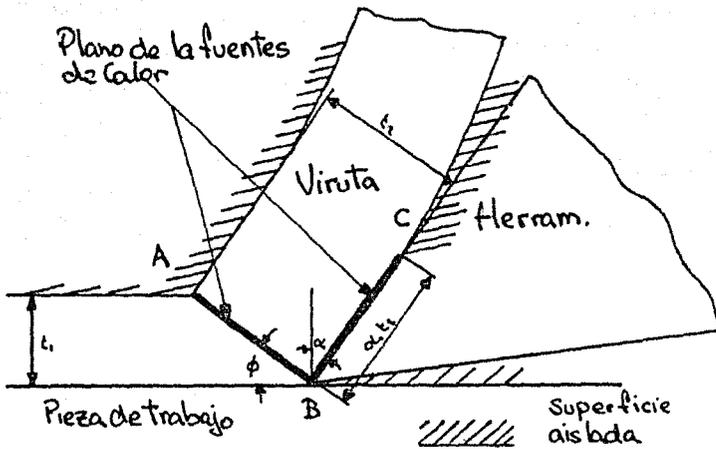


fig. 5 Modelo Idealizado del Proceso de Corte Empleado en el  
 Trabajo Teórico de las Temperaturas de Corte

Esto nos muestra que la ecuación 4 puede ser arreglada teniendo:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} - \frac{Rt}{t} \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

WEINER, pudo resolver esta ecuación (7), sin estipular las condiciones del límite para la pieza de trabajo y desarrolló una nueva expresión con  $\beta$  (la proporción de Qs conducida dentro de la pieza de trabajo), como una función única de  $Rt \tan \phi$  (donde  $\phi =$  ángulo de corte). Estas relaciones teóricas entre  $\beta$  y  $Rt \tan \phi$  son comparadas con los resultados experimentales en la fig. 6, donde se puede ver que la teoría es ligeramente indeterminada  $\beta$  para altos valores de  $Rt \tan \phi$  (para altas velocidades y alimentaciones). En la teoría donde la fuente plana de calor fue considerada, el calor puede fluir solamente dentro de la pieza de trabajo por conducción, mientras que en realidad, la fuente de calor está distribuida bajo una extensa zona, parte de la cual se extiende dentro de la pieza de trabajo. El efecto de esto, trae por consecuencia, importante incremento a altas velocidades y alimentaciones y explica el ligero desacuerdo entre la teoría y la práctica, para grandes valores de  $Rt \tan \phi$ .

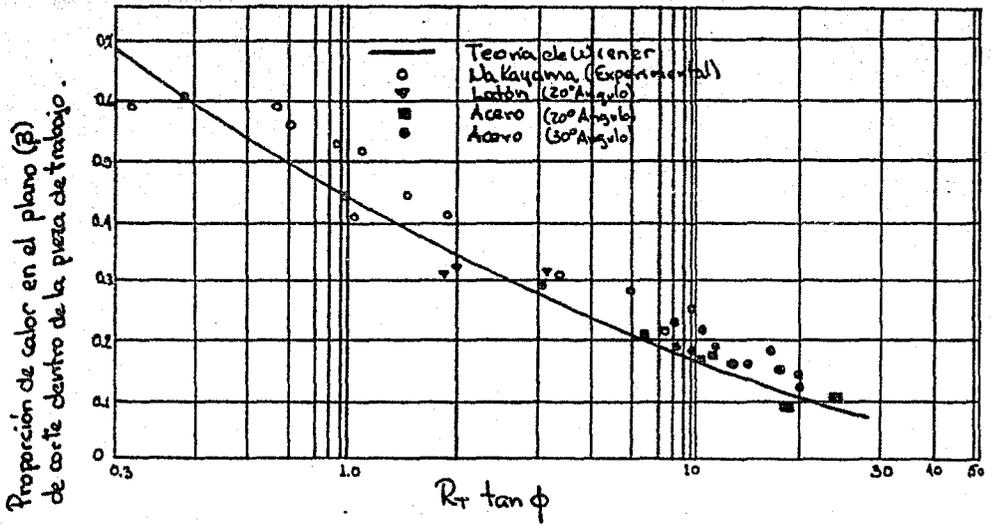


fig. 6 Efecto de  $R_t \tan \phi$  de una División de Corte en la Zona de Calor Entre la Pieza de Trabajo y la Viruta

### 3.2 Temperaturas en la Zona de Deformación Secundaria

La zona de deformación secundaria, es donde la viruta alcanza su máxima temperatura (punto C, fig. 1) y está dada por:

$$\Theta_{\text{máx}} = \Theta_m + \Theta_s + \Theta_o \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \dots \dots \dots (8)$$

donde:

$\Theta_m$  = es la elevación de temperatura en el material que pasa a través de la zona de deformación secundaria.

$\Theta_s$  = incremento de temperatura que pasa por la zona de deformación primaria (dada por la ecuación 6)

$\Theta_0$  = temperatura inicial de la pieza de trabajo

En un análisis de la temperatura de la viruta, RAPIER, consideró que la fuente de calor, debida a la fricción entre la viruta y la herramienta en una fuente plana de calor de intensidad uniforme (fig. 5), podrá ser resuelta por la ecuación 7 dentro de las condiciones de límite indicadas. La siguiente expresión se obtuvo:

$$\frac{\Theta_{m}}{\Theta_f} = 1.13 \sqrt{\frac{Rt}{\alpha_1}} \dots (9)$$

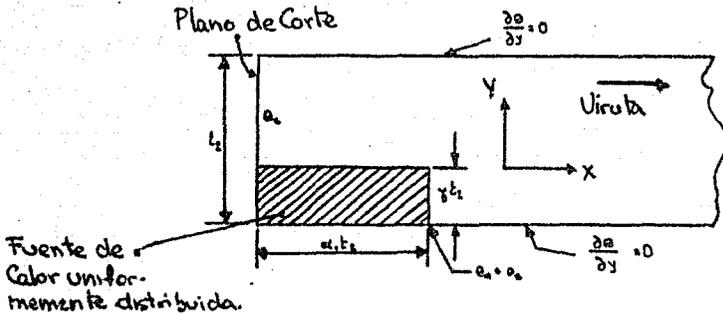


fig. 7 Condiciones del Límite de la Viruta

donde:

$\Theta_m$  = incremento máximo en la temperatura de la viruta.

$\alpha_1 t_2$  = longitud de la fuente de calor

$t_2$  = espesor de la viruta

$Rt$  = número térmico

siendo:

$\Theta_f$  = la elevación promedio temperatura dada a la viruta, por la fuente friccional de calor y está dada por:

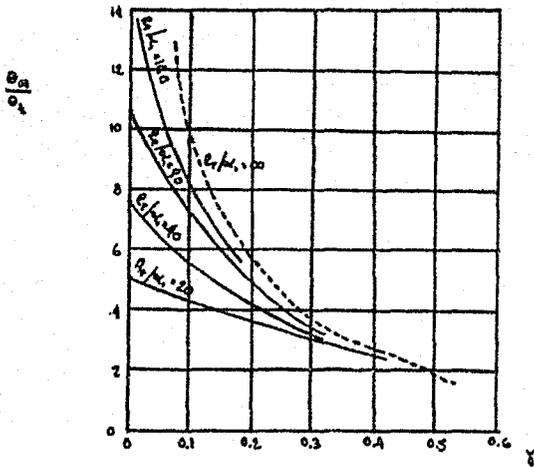
$$\theta_f = \frac{Q_f}{\rho c v_c t_1 \omega} \quad (10)$$

Una comparación de la ecuación 9, con los resultados experimentales, indicaron que la teoría de RAPIER tenía una considerable subestimación de  $m$  y se sugirió que esto era debido a que durante el corte, la fricción entre la viruta y la herramienta, causaba una severa deformación en el material y el efecto de la fuente de calor, podría extenderse a cierta distancia dentro de la viruta. Las condiciones de límite indicadas en la figura 7, muestran una aproximación a las condiciones reales y el análisis basados en el modelo que se realizó, y se apoya en el producto de los resultados, los cuales son aunados a los datos experimentales. Estos resultados son mostrados en la figura 8, e indican el efecto de las variaciones en el ancho de la distribución de la fuente de calor.

Usando estas curvas,  $\alpha_1$ , puede estimarse a partir del grado de desgaste de la cara de la herramienta y el ancho de la fuente de calor, puede ser estimada de una microfotografía de la sección transversal de la viruta.

Un pequeño esbozo de la sección transversal típica de la viruta se muestra en la fig. 9, donde las líneas de máxima elongación

de grano son curvadas, y puede considerarse que el material ha pasado a través de la zona de deformación secundaria.



$R_T$  = número térmico.  
 $d_1 t_2$  = largo de contacto - viruta - herramienta.  
 $\delta t_2$  = ancho de la zona - secund. de deform.  
 $\Theta_m$  = Aumento máx. de temp. en la viruta.  
 $\Theta_f$  = Aumento de la temp. promedio en la viruta.

fig. 8 Efecto del Ancho de la Zona de Deformación Secundaria en la Temperatura de la Viruta

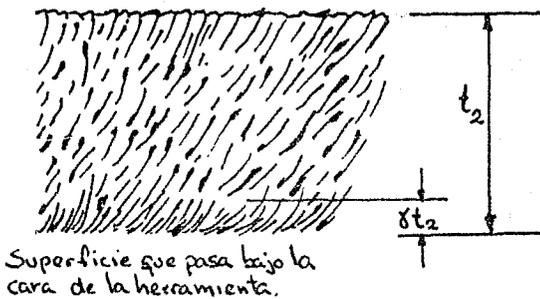


fig. 9 Dígrama de la Deformación de Grano en la Sección a Través de la Viruta

### 3.3 Ejemplo:

Para mostrar, la aplicación de las teorías y ecuaciones derivadas - acerca del trabajo realizado, tenemos un ejemplo donde la máxima temperatura a lo largo de la cara de la herramienta, son estimadas bajo las siguientes condiciones de corte:

#### Corte Orotogonal de Acero Suave:

Angulo de corte de la herramienta	$\alpha =$ cero
Fuerza de Corte	$F_c = 300 \text{ lb.}$
Fuerza de Empuje	$F_t = 200 \text{ lb.}$
Velocidad de Corte	$U_c = 350 \text{ pies/min.}$
Espesor de Viruta Indeformada	$t_1 = 0.02 \text{ pulg.}$
Audio de Corte	$\omega = 0.2 \text{ pulg}$
Radio de Corte	$r_c = 0.25$
Longitud de Contacto entre la Viruta y la Herramienta	$d.t_2 = 0.025 \text{ pulg.}$

La relación de calor generado, está dado por la ecuación 2, entonces:

$$Q = \frac{W_c}{J} = \frac{F_c U_c}{J}$$
$$= \frac{300 \text{ y } 350}{1400} = 75 \text{ Chu/min}$$

$$Q = 75 \text{ Chu/min.}$$

El calor generado debido a la fricción entre la viruta y la herramienta está dado por:

$$Q_f = \frac{W_f}{J} = \frac{F U_f}{J} = \frac{F U_c r_c}{J}$$

Para este ejemplo  $\alpha = 0$  y por consiguiente  $F = F_t$ , entonces:

$$Q_f = \frac{F U_c r_c}{J}$$

$$= \frac{200 \times 350 \times 0.25}{1400} = 12.5$$

$$Q_f = 12.5 \text{ Chu/min}$$

El calor generado debido al corte es dado por la ecuación 3, entonces:

$$Q_s = Q - Q_f$$

$$= 75 - 12.5 = 62.5$$

$$Q_s = 62.5 \text{ Chu/min.}$$

Para estimar  $\theta_s$  usando la ecuación 6, es necesario obtener primeramente  $\theta$  de la figura 6 y para este propósito el valor de  $R_t \tan \phi$  se requiere.

El número térmico  $R_t = \frac{\rho C \sqrt{c t_1}}{K}$  y asumiendo que  $\rho = 0.26 \text{ lb/pulg.}^3$ ;  $K = 2.1 \text{ Chu/pulg hr}^{\circ}\text{C}$  y  $C = 0.12 \text{ Chu/lb}^{\circ}\text{C}$  para acero

dulce obtenemos que:

$$R_t = \frac{0.26 \times 0.12 \times 350 \times 12 \times 60 \times 0.02}{2.1} =$$

$$R_t = 74.88$$

Cuando el ángulo de corte,  $\alpha = 0$ ,  $\tan \phi = \mu_c$

entonces:

$$R_t \tan \phi = 74.88 \times 0.25 = 18.72$$

$$R_t \tan \phi = 18.72$$

la proporción de calor de corte conducido dentro de la pieza de trabajo, se obtiene ahora de la curva en la figura 6.

Tenemos que :

$$\beta = 0.08$$

sustituyendo para  $Q_s$  y  $\beta$  en la ecuación 6, obtenemos:

$$\begin{aligned} \theta_s &= \frac{(1-\beta) Q_s}{\rho c v_c t_w} \\ &= \frac{(1 - 0.08) \times 62.5}{0.26 \times 0.12 \times 350 \times 0.02 \times 12 \times 0.2} = \frac{57.5}{0.52416} = 110 \end{aligned}$$

$$\theta_s = 110^\circ \text{ C}$$

Esta es la elevación de temperatura en la zona de deformación primaria.

El aumento promedio de temperatura de la viruta debido a la fuente friccional de calor, está dado por la ecuación 10, entonces:

$$\Theta_f = \frac{Q_f}{\rho c v_c t_w}$$
$$= \frac{12.5}{0.52416} = 24.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Theta_f = 24.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(despreciando el calor conducido dentro de la herramienta de corte).

$$\delta = \frac{\text{ancho de la zona de deformación secundaria}}{\text{espesor de viruta, } t_2}$$

y se considera para el acero  $\delta \approx 0.2$  bajo condiciones de corte sin lubricación

$$\alpha_1 = \frac{\text{longitud de contacto viruta-herramienta}}{t_2}$$

$$\alpha_1 = \frac{(\text{longitud de contacto viruta-herramienta})}{t_1}$$

$$\alpha_1 = \frac{0.0025 \times 0.25}{0.02} = 0.3125$$

Por lo tanto:

$$R_t/\alpha_1 = \frac{74.88}{0.3125} = 239.74$$

El radio  $\theta_m/\theta_f$  puede ser ahora obtenido de la curva en la figura 8, tenemos que:

$$\theta_m/\theta_f = 5.8$$

$$\theta_m = 5.8 \times 24.03 = 139.37 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Suponiendo que la temperatura de la pieza de trabajo es de  $22^\circ\text{C}$ , la máxima temperatura a lo largo de la cara de la herramienta de corte está dada por la ecuación 8.

$$\begin{aligned}\theta_{\text{máx}} &= \theta_m + \theta_s + \theta_o \\ &= 139.37 + 110 + 22 = 271.37^\circ\end{aligned}$$

$$\theta_{\text{máx}} = 271.37 \text{ } ^\circ\text{C}$$

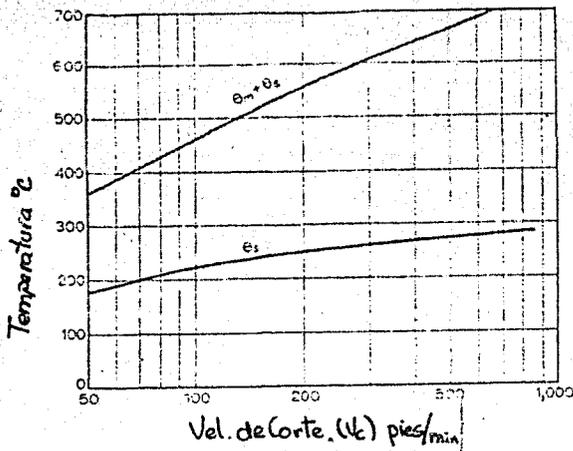
Se nota en estos cálculos, y se puede suponer que las propiedades térmicas del material son constantes e independientes de la temperatura. Sin embargo, en muchos materiales en ingeniería, el calor específico y la conductividad térmica, varían considerablemente con los cambios de temperatura y si, para las predicciones más exactas de la temperatura en las herramientas, se requiere que las relaciones entre las propiedades térmicas del material y temperaturas deban conocerse y tener cuidado en usar los valores apropiados para los cálculos.

### 3.4 Efecto de la Velocidad de Corte en las Temperaturas

Si suponemos que las fuerzas en la herramienta y el radio de corte no se alteran con los cambios de la velocidad de corte, y tomando estas condiciones del ejemplo ante las relaciones entre la temperatura y velocidad de corte, se pueden obtener, tal como se indica en la figura 10. Cabe hacer notar que la temperatura promedio de la zona de corte se incrementa escasamente con el aumento de la velocidad de corte y tiende a ser constante, mientras la máxima temperatura de la cara de la herramienta ( $\Theta_m + \Theta_s$ ) se incrementa muy rápido con el aumento de la velocidad de corte.

### 4. Medición de las Temperaturas de Corte.

El resultado mostrado en la figura 4, fué obtenido de una fotografía infra-roja de la operación de corte. La técnica usada para producir este resultado, fue la utilización de un horno de temperaturas controladas conocidas, y después se fue fotografiando simultáneamente con la operación de corte usando una placa sensitiva infra-roja y permitiendo que la densidad óptica de la placa pudiera ser calibrada contra esa temperatura. Algunos resultados de estos experimentos son mostrados en la figura 6 y la confirmación experimental en la figura 8, donde se obtuvo por este método.



$\Theta_s$  = Aumento de temperatura en la zona aparente de corte

$\Theta_m + \Theta_s$  = Temperatura máxima en la cara de la herramienta.

Fig. 10. Efecto de la velocidad en la temperatura de corte (teórico).

El resto de los resultados experimentales mostrados en la figura 6, fueron obtenidos usando la técnica del termopar, ilustrada en la figura 11. En estos experimentos, el aparejo se giró sin cortar y la lectura en mili volts se tomó debido a la acción del roce del alambre de "constantan" - en la pieza de trabajo. Esta lectura fue subsecuentemente restada a las lecturas medidas mientras el corte iba en progreso. Con este método, - fueron medidas las temperaturas de los puntos seleccionados a lo largo de la pieza tubular de trabajo y después fueron usadas para calcular la proporción de calor de la zona de corte conducido dentro de la pieza de trabajo.

Otras técnicas de la unión térmica (TERMOPAR), técnicas calorimétricas,

pirométricas (pirómetros de radiación), sensores químicos de temperatura, han sido empleados con limitaciones para investigar las temperaturas en el corte de metales. La técnica más extensamente usada para el estudio de las mediciones de la temperatura en el corte de metales, ha sido la técnica del termopar colocado en la pieza de trabajo. En esta técnica, la f.e.m., generada por el empalme entre la pieza de trabajo y los materiales de la herramienta, es tomada como una medida de la temperatura de esta región. Un típico arreglo del termopar en la herramienta de trabajo usada en el torno, está indicada en la figura 12 y es importante hacer notar que cuando se usa esta técnica, se debe aislar el circuito del termopar de la máquina, pero cuando se va a calibrar se debe utilizar el mismo circuito. Se puede considerar que la lectura dada por este método, es una indicación de la temperatura promedio a lo largo de la interfase de la viruta-herramienta.

Esta técnica, fué usada extensamente en el pasado, para investigar el efecto de los cambios en las condiciones de corte y para obtener las relaciones empíricas entre la temperatura y el grado de desgaste de la herramienta. Sin embargo, este método no dá indicaciones de la distribución de temperaturas a lo largo de la cara de la herramienta de corte, por lo tanto, tiene ciertas limitaciones.

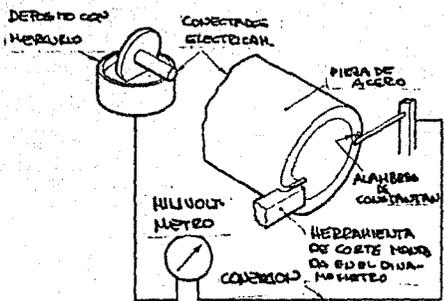


Fig. 11. Arreglo para la medición de temperaturas.  
(Después de NAKAYAMA).

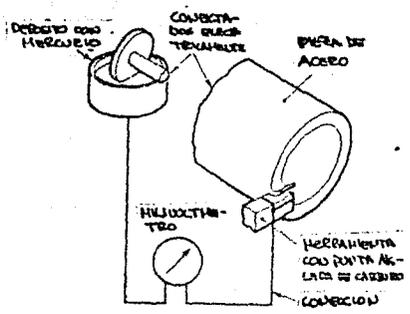


Fig. 12. Termopar del circuito Trabajo-Herramienta.

ANEXO:

\* Análisis Dimensional.

Del equivalente mecánico del calor, tenemos las siguientes igualdades:

$$J = 1400 \left[ \frac{\text{ft} - \text{lb}}{\text{Chu}} \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$J = 778.64 \left[ \frac{\text{ft} - \text{lb}}{\text{BTU}} \right] \dots\dots\dots (2)$$

Igualando la ecuación (1) con la (2), llegamos a que:

$$1400 \left[ \frac{\text{ft} - \text{lb}}{\text{Chu}} \right] = 778.64 \left[ \frac{\text{ft} - \text{lb}}{\text{BTU}} \right]$$

de donde:

$$778.64 [\text{Chu}] = 1400 [\text{BTU}]$$

$$[\text{Chu}] = \frac{1400}{778.64} [\text{BTU}]$$

$$\circ \circ \quad \underline{\text{CHU} = 1.8 \text{ BTU}}$$

A manera de comprobación, a continuación se va a tratar de encontrar este mismo valor, pero procediendo de otros valores.

$$R = 1.987 \text{ BTU} / (\text{lb} - \text{mol})^\circ \text{R} \text{ ----- (I)}$$

Y

$$R = 1.987 \text{ CHU} / (\text{lb} - \text{mol})^\circ \text{K} \text{ ----- (II)}$$

donde se ve que la variación de las unidades va a depender de los °R (grados ranklin) y los °K (grados kelvin).

$$^{\circ}\text{C} + 273.18 = ^{\circ}\text{K} \quad ^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{K} - 273.18 \quad (\text{a})$$

$$^{\circ}\text{K} + 460 = ^{\circ}\text{R} \quad ^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{R} - 460 \quad (\text{b})$$

y

$$(^{\circ}\text{C} + 17.8) 1.8 = ^{\circ}\text{F} \quad (1)$$

Sustituyendo los valores de (a) y (b), en la expresión (1), tenemos que:

$$[(^{\circ}\text{K} - 273.18) + 17.8] 1.8 = ^{\circ}\text{R} - 460$$

$$(^{\circ}\text{K} - 255.4) 1.8 = ^{\circ}\text{R} - 460$$

$$1.8^{\circ}\text{K} - (255.4) 1.8 = ^{\circ}\text{R} - 460$$

$$1.8^{\circ}\text{K} - 460 = ^{\circ}\text{R} - 460$$

$$1.8^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{R}$$

$$^{\circ}\text{K} = 0.555^{\circ}\text{R} \quad ^{\circ}\text{R} = 1.8^{\circ}\text{K}$$

Igualando las ecuaciones I y II y sustituyendo los 2 últimos valores; te  
nemos que:

$$\frac{\text{BTU}}{^{\circ}\text{R}} = \frac{\text{CHU}}{^{\circ}\text{K}}$$

$$\text{BTU} = \frac{^{\circ}\text{R}}{^{\circ}\text{K}} \text{CHU}$$

$$\text{BTU} = \frac{1.8^{\circ}\text{K}}{^{\circ}\text{K}} \text{CHU}$$

$$0.555 \text{ BTU} = \text{CHU}$$

$$\therefore \underline{\underline{\text{CHU} = 1.8 \text{ BTU}}}$$

## CAPITULO IV

### VIDA Y DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

#### 1. Introducción

La vida de la herramienta de corte es una de las consideraciones económicas más importantes en el corte de metales. En las operaciones vastas, los variados ángulos de la herramienta, velocidades de corte y alimentaciones, son usualmente escogidos para dar un ahorro de la vida de la herramienta. Las condiciones que dan una vida corta a la herramienta son anti-económicas, porque el costo de afilado y reemplazo de la herramienta son muy altos. Por otro lado las bajas velocidades y alimentaciones son anti-económicas también por dar muy bajas relaciones de producción. Evidente es que en cualquier mejora hecha a la herramienta será benéfica, por tal razón se han hecho en el pasado muchos esfuerzos para comprender la naturaleza del desgaste u otras fallas de la herramienta y así formar una base para tales mejoras.

La vida de la herramienta de corte puede ser considerada en varias formas, pero éstas pueden ser divididas en dos grandes grupos:

1. El gradual o progresivo desgaste de ciertas regiones de la cara y

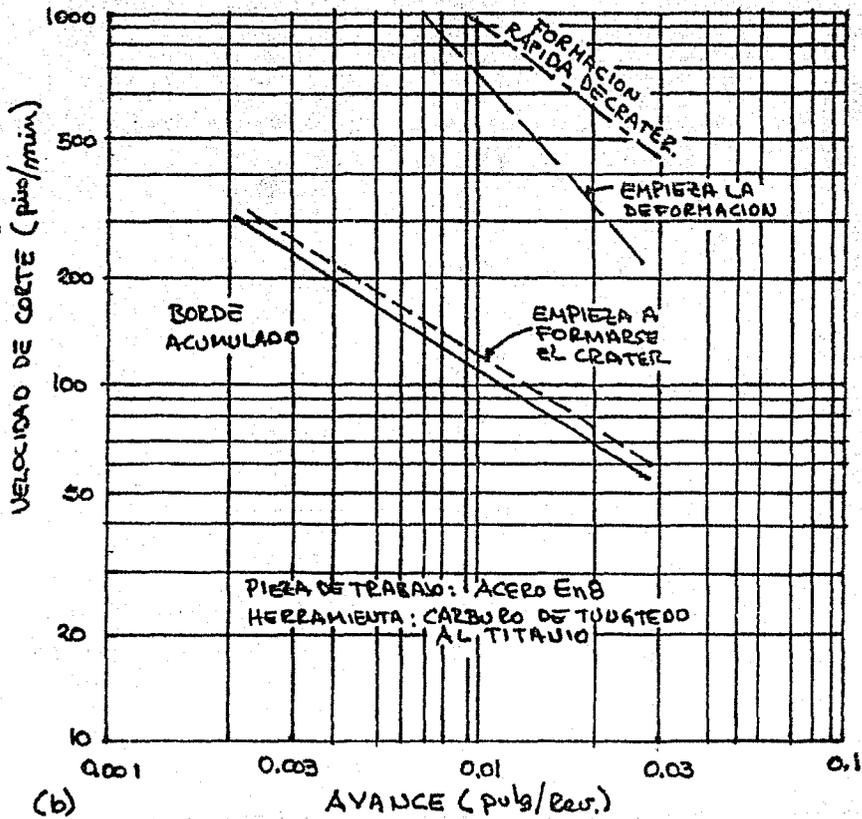


fig. 8 (b) Carta de Desgaste para Herramienta de Carburo-Tungsteno-Titanio (después de Trent)

No es posible generalizar para el efecto de cambios de alimentación en la relación de desgaste del flanco. Claramente, un cambio en la alimentación no afectará la velocidad relativa de trabajo-herramienta, sobre la superficie de desgaste del flanco, pero puede afectar la temperatura en esta región. El trabajo descrito en el capítulo N°. III, ha enseñado que un aumento en la alimentación o espesor de viruta indeformada, resultará en una disminución en la proporción del calor generado en la zona de deformación primaria, que es conducida dentro de la pieza de trabajo.

Este efecto puede, tender a bajar las temperaturas en la región del flanco de la herramienta, pero la situación se complica por el aumento de la temperatura media en la zona de deformación primaria. Como la zona de deformación primaria termina en la región del filo de corte de la herramienta, este último efecto puede, bajo determinadas circunstancias, ser un factor de fatiga. Lo tratado anteriormente no tiene efectos marcados en la relación del desgaste en el flanco de la herramienta.

#### 4. El Material de la Herramienta

Uno de los pasos más grandes obtenidos para el desarrollo del maquinado de los metales, fue dado por TAYLOR, que descubrió el proceso de tratamiento térmico, usado para producir herramientas de corte de ace

ro de altas velocidades. El acero de estas herramientas, hizo posible -  
mayores proporciones de desgaste de material debido al mejoramiento -  
en el material de la herramienta. Desde este descubrimiento, se desa -  
rrolló la ciencia metalúrgica y la tecnología, llevando mejores materia -  
les para las herramientas, tales como aleaciones a base de cobalto y -  
del tipo "estelita", carburos cementados y más recientemente óxidos -  
sinterizados y cerámica. La experiencia nos ha enseñado que el mate -  
rial de las herramientas, de una sola punta es mejor para determinada -  
operación y un solo tipo de corte, donde no hay problemas serios, la -  
propiedad deseada parece ser un valor de alta dureza que se mantenga  
en altas temperaturas. Desafortunadamente un aumento en la dureza, -  
es usualmente acompañado por una disminución en la resistencia al im -  
pacto del material; eso hace que aumenten los problemas de manufactu -  
ra de las herramientas. Consecuentemente los materiales que han sido  
desarrollados y que se han encontrado más aceptables para el corte -  
continuo con herramientas de un solo filo, pueden raramente ser usa -  
dos en herramientas de filos múltiples. Puesto que las herramientas de  
un solo filo forman la minoría del total de las herramientas usadas en  
la práctica, incluyendo las herramientas de golpe, troqueles, brocas,  
escariadores, fresas, etc., la mayoría de los cortes en metal, se lle -  
van a cabo con herramientas fabricadas con acero de alta velocidad.

## 5. Material de Trabajo.

El término maquinabilidad es con frecuencia aplicado a materiales, para describir sus propiedades de mecanizado, y puede tener diversos significados, dependiendo del proceso de corte en consideración. Cuando se ha establecido que el material A, es más maquinable que el material B, esto puede significar que se obtiene un menor desgaste de herramienta, con el material A, o también se puede decir que con el material A, se requiere una menor cantidad de energía para el maquinado. Obviamente el proceso de acabado, el desgaste de herramienta y acabado de superficies, son de más consideración. Debe ser notado que cualquier información respecto a la "maquinabilidad", solamente se puede aplicar bajo el grupo de circunstancias particulares que existen durante la observación. Por ejemplo, bajo un grupo de consideraciones, puede obtenerse un mejor acabado de superficie con el material A, que con el material B, sin embargo, bajo otro grupo de condiciones, digamos con un material diferente de herramienta la situación puede invertirse. Un comportamiento similar, puede suceder con otros criterios de maquinabilidad, como la relación de desgaste de herramienta, y consumo de potencia. Para complicar más la situación, si un grupo de materiales se colocan en orden de maquinabilidad con respecto al desgaste de herramienta, estos pueden ser colocados en diferente orden, si los criterios de acabado de superficie o consumo de energía son aplicados. Obvia-

mente el término de maquinabilidad tiene un pequeño significado, excepto en el sentido de pérdidas cualitativas. A pesar de esto, se han hecho muchos intentos en el pasado, para obtener medidas cuantitativas de la maquinabilidad o número de maquinabilidad. El método para obtener tal índice, si los resultados son significativos puede ser de gran ayuda particularmente para los fabricantes de acero que deben desarrollar alguna forma de probar las propiedades de maquinabilidad de sus productos. Debido a que los usuarios de metal quieren aumentar su productividad, están muy interesados en las propiedades de maquinado de sus materiales de trabajo y por lo tanto darán la bienvenida a un método rápido y confortable para comprobar esta propiedad. Diversos métodos ingeniosos para obtener antecedentes de maquinado han sido propuestos en el pasado y algunos se usan todavía. No obstante que son de dudoso significado - pueden usarse en medir algunas propiedades de maquinado de materiales que tienen la misma especificación nominal. Será muy difícil demostrar que los resultados de estas pruebas rinden la información cuantitativa - en las propiedades de maquinado que sean de interés en la práctica, no obstante la experiencia ha mostrado que pueden ser una guía para estas propiedades.

### Desgaste de Herramienta y Pruebas de Maquinabilidad

Los datos de producción de desgaste de herramienta tal como se ha de-

mostrado en las figuras 3 y 8, son extremadamente tediosos e involucran una serie de cuidados en las mediciones por largos períodos de tiempo. Estas pruebas consumen una considerable cantidad de material de trabajo y con frecuencia algunas herramientas experimentales. Las inclusiones en los materiales comerciales pueden variar de tal manera, debido a la segregación, que causan variaciones considerables en la relación de desgaste en la herramienta, a partir del interior del espécimen hacia el exterior, las variaciones también pueden ocurrir en la longitud del espécimen. Considerables variaciones pueden ocurrir entre materiales de la misma especificación nominal. Con herramientas calzadas con carburo, se colocaron ejemplares de puntas juntas en el horno durante el proceso de sinterizado y se vió que en el desgaste, su comportamiento fue muy diferente el uno al otro. Con herramientas de acero rápido, es todavía mayor la variación, las temperaturas de temple son críticas a la menor variación del tratamiento, y esto hace que el comportamiento de la herramienta sea también diferente.

Las razones dadas anteriormente son los resultados de pruebas de desgaste de herramienta, y pueden con frecuencia olvidarse, ya que existe el peligro de que tanto, el material de trabajo y la herramienta varíen sus propiedades en una serie de pruebas. Algún sistema rápido de prueba de desgaste, consumiendo una pequeña cantidad de material de trabajo y necesitando solamente una herramienta es el requerimien

este método, es que las características del desgaste medido, son las que suceden en el fallo inicial de la herramienta y puede no ser siempre representativo del comportamiento de la herramienta, en posteriores pasos del desgaste.

Una técnica posterior para medir pequeñas cantidades de desgaste de la herramienta, es la técnica trazadora radio-activa. En este método la herramienta de corte de prueba es irradiada por una fuente radio-activa inmediatamente antes a la prueba de corte. Este método es útil solamente como una prueba comparativa, pero nunca es ampliamente usado en la práctica, por la cantidad de precauciones que se deben tomar.

Una propuesta más reciente para efectuar una prueba de desgaste rápido es donde la herramienta se prepara inicialmente para pulir una superficie de desgaste artificial en su flanco. Se miden los aumentos de magnitud de desgaste debidos al pequeño maquinado en el flanco y así se obtiene la relación de desgaste de la porción lineal central de la curva de desgaste. En esta prueba se deberá tener cuidado de pulir el campo de desgaste inicial con un "espacio libre", ligeramente negativo para que el contacto friccional requerido entre la herramienta y la pieza de trabajo, se establezca al principio de la prueba.

En todas las teorías de desgaste progresivo de la herramienta, la relación de desgaste se deberá esperar a que aumente con el incremento del

to necesario para la realización de estas pruebas.

Un sistema rápido de prueba es el conocido con el nombre de "prueba de desgaste acelerado", en el cual se utiliza el torno. En esta prueba, la pieza de trabajo se gira a gran velocidad y la herramienta es cruzada desde la línea central de la pieza de trabajo hacia afuera radialmente. Las condiciones se escogerán de tal manera que la falla completa sucede antes que la herramienta llegue a la parte exterior de la pieza de trabajo. La distancia radial maquinada se toma como la medida de las características del maquinado de una combustión particular de herramienta-pieza de trabajo. Por lo tanto, este método es útil como una prueba comparativa para diversos materiales de trabajo y herramienta, estos resultados, dan cierta información con respecto a la verdadera naturaleza del desgaste en maquinado y no dan una medida absoluta del rendimiento de la herramienta; es una medida que puede relacionar su comportamiento en circunstancias prácticas.

Otro tipo de prueba de desgaste rápido, es donde se emplea una técnica especial para medir cantidades extremadamente pequeñas de desgaste. En este sistema, la superficie de trabajo de la herramienta de corte se prepara cuidadosamente y es pulida, entonces la herramienta se usa para cortar la pieza de trabajo, en prueba, en un tiempo reducido y el pequeño desgaste que hubo en el flanco es medido. La desventaja de -

contacto metálico entre la pieza de trabajo y la herramienta, así como con el aumento de la temperatura. En el capítulo II, se mostró que la fricción entre la viruta y la herramienta, es mayormente dependiente del contacto metálico en la superficie de contacto y de ésta manera poder esperar que exista alguna relación entre el desgaste de la herramienta y la temperatura. Se ha visto en el pasado la veracidad de lo anterior y explica el por qué bajo muchas condiciones, las mediciones de fricción viruta-herramienta y las temperaturas de corte pueden dar una guía útil para el comportamiento del desgaste para determinada combinación de trabajo-herramienta. Tales métodos se usan como pruebas de maquinabilidad y tienen la gran ventaja de ser pruebas cortas y requieren una pequeña cantidad de material de trabajo.

Muchos factores afectan la maquinabilidad de los metales. Considerando los aspectos del desgaste de la herramienta, se puede decir en general, que el metal puro tiende a adherirse a la superficie de trabajo de corte de la herramienta y da grandes relaciones de fricción y alta relación de desgaste de herramienta. Por ejemplo, cuando se maquina hierro puro, los esfuerzos de corte y el desgaste de la herramienta son muy altos, tan altos como cuando se maquinan algunas aleaciones tenaces tales como las "nimonics" (aleación de gran resistencia mecánica y gran resistencia a la oxidación a altas temperaturas (450-700°C) y está formada por una aleación de níquel-cromo, molibdeno, deriva -

dos de la aleación tipo Nichrome 80-20).

La deliberada adición de azufre, plomo o telurio a metales no ferrosos, así como a los aceros, hace posible el aumento de porcentajes de producción y mejoramiento de acabado de superficies, pero el por qué de la función de estas adiciones, no se ha logrado conocer completamente. Parece ser que dichas adiciones reducen el contacto metálico entre la herramienta y el material de trabajo, reducen la fricción y la relación de desgaste en la herramienta; estos constituyentes en las cantidades, no afectan grandemente las propiedades mecánicas a la temperatura ambiente del metal, pero a altas temperaturas pueden ser seriamente afectadas. Esto limita desde luego el uso de estos metales llamado de "libre maquinado", pero no obstante encuentran en la práctica una amplia aplicación y su demanda sigue aumentando. La falta de teorías con respecto a los efectos del material de trabajo sobre el desgaste de la herramienta, crean dificultades para los ingenieros y metalurgistas que intervienen en la producción. Por ejemplo, con el aumento de la automatización en los procesos de maquinado, es más importante mantener las características consistentes en el desgaste de la herramienta, pero es bien sabido que existen grandes diferencias en el desgaste de herramientas en el corte de metales, de la misma especificación nominal. Estas diferencias no son relacionadas con las propiedades del material normalmente medidas.

Se encuentran especiales dificultades con metales desarrollados para aplicaciones a altas temperaturas, tales como los usados en las turbinas. La adición de elementos de libre maquinado no es posible con estos metales y por lo tanto se deja a los ingenieros diseñadores de herramienta y producción, la resolución de los problemas de maquinado, tal como el maquinado electroquímico, que resultan menos costosas al usarse, los cuales se discutirán posteriormente.

## CAPITULO V

### FLUIDOS DE CORTE Y ASPEREZAS DE SUPERFICIE

#### Fluidos de Corte

La utilización de los fluidos de corte dentro del proceso de formación de la viruta, sirven para mejorar sus condiciones operativas. Estas mejoras pueden tomar varias formas, dependiendo de los materiales de trabajo y de la clase de herramienta que se utiliza, donde también tiene gran importancia las condiciones de corte y los fluidos y lubricantes. Las dos principales formas donde actúa un fluido de corte, son : primera como refrigerante y segundo como lubricante. La mayoría de los fluidos refrigerantes, tienen como base un aceite mineral o vegetal, el mineral es el que tiene mayor aplicabilidad dentro de la práctica. Algunos de estos aceites están preparados para aplicarse como una emulsión en agua, el residuo será usado limpio, ya sea en forma simple o en combinación con ciertos aditivos. En general, la emulsión de aceite y agua (con frecuencia llamada "mezcla"), es usada cuando la acción refrigerante es el requisito más importante, debido a que tiene mayor conductividad de calor que los aceites simples. Alrededor de un 90% de las herramientas utilizan una emulsión de aceite-agua. Aceites limpios se utilizan cuan

do la acción lubricante es de mayor consideración; su uso está principalmente confinado a cortes a baja velocidad, tales como: roscado, brochado y fresado de engranes.

## 2. La Acción de Refrigerantes

Se obtienen importantes ventajas con la aplicación de refrigerantes en los procesos de corte; (1) aumento de la vida de la herramienta debido a la reducción de la temperatura en la región de filo cortante; (2) fácil manejo de la pieza terminada; (3) reducción de la distorsión térmica, causada por el gradiente de temperatura generado dentro de la pieza de trabajo durante el maquinado. Los dos últimos factores son más importantes durante el proceso de esmerilado. Se ha obtenido una información cuantitativa del efecto de un refrigerante en la vida de una herramienta de corte en pruebas de desgaste de una broca y se ha demostrado el mejoramiento en la vida de la misma, aplicando refrigerante. Esto parece ser por la reducción de temperaturas en la región del corte, que por las temperaturas ya descritas en el capítulo III, sugieren que la pérdida de calor de la superficie expuesta a alta temperatura de la herramienta y la pieza de trabajo, tienen poco efecto en la región del filo. Solo se puede suponer, por lo tanto, que la relación de desgaste de la herramienta, es extremadamente sensible a los pequeños cambios de temperatura en la región de la superficie de desgaste, que es un resultado de la aplica

ción del refrigerante.

## La Acción de Lubricantes

### 3.1 Límites de la Lubricación

Bowden y Tabor, demostraron que bajo condiciones de altas temperaturas, presión elevada y reducida velocidad de deslizamiento, no se puede mantener una película hidrodinámica y entonces sobreviene un contacto metálico. La resistencia friccional al movimiento bajo estas circunstancias se eleva, desde una combinación de asperezas de corte con el fluido viscoso de corte; esto es conocido como los límites de lubricación y es grandemente afectado por la naturaleza de la capa absorbida del fluido ("Límite de Capa"), por unas pocas moléculas en las superficies de los metales deslizantes

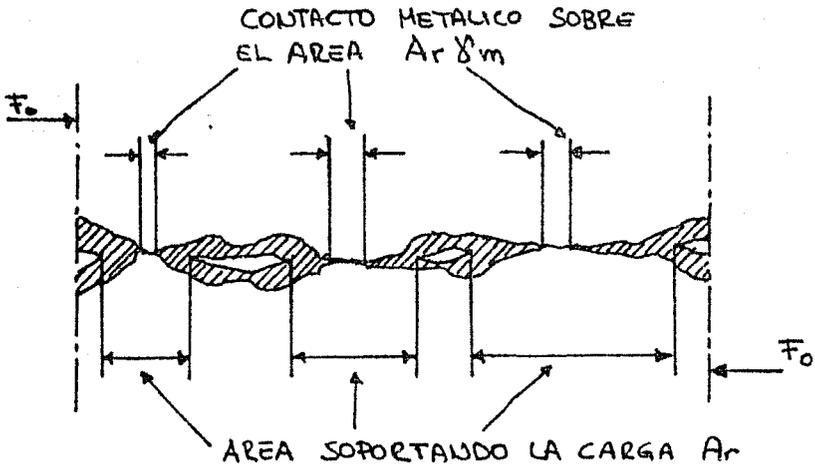


fig. 1 Deslizamiento Entre Superficies con una Película Sólida Lubricante

$$\text{Fuerza friccional } F_o = Ar [\delta_m S_1 + (1 + \delta_m) S_2]$$

donde:

S1 = resistencia al corte del metal suave

S2 = resistencia al corte de la capa lubricante.

Las funciones de una capa lubricante, reducen el área de contacto íntimo metálico entre dos superficies. Algunos lubricantes, tienen ingredientes reactivos (aditivos de extrema presión a base de azufre, fosfatos o cloruros), que pueden ofrecer una protección de su superficie considerablemente mayor, durante el deslizamiento por la formación de una capa sólida lubricante. Esta capa lubricante sólida, es con frecuencia, el producto de una reacción química entre el lubricante líquido y la superficie metálica, la cual permanecerá efectiva a temperaturas un poco mayores de su punto de fusión.

Cuando dos superficies metálicas, cada una teniendo una capa de lubricante sólido absorbido, se colocan juntas y se les aplica una carga normal, la deformación resultante en las asperezas de la superficie, causará alguna penetración en la película lubricante y el contacto metálico queda establecido (fig. 1).

Si el área real de contacto  $A_r$ , se piensa que es el área soportante de la carga y  $\delta_m$  es la proporción de esta área en la que tiene lugar el contacto metálico, entonces la fuerza friccional  $F_o$ , re

querida para cortar continuamente las juntas entre las asperezas de las superficies, se puede expresar:

$$F_o = A_r ( \gamma_m S_1 + ( 1 - \gamma_m ) S_2 ) \dots\dots (1)$$

Donde  $S_1$  y  $S_2$  son las fuerzas de corte del metal más suave y la fuerza de la capa lubricante respectivamente. Así,  $\gamma_m$  permanece esencialmente constante para determinados valores de  $S_1$  y  $S_2$  y la fricción de la fuerza será proporcional a  $A_r$ , de tal manera que sostendrá la ley de Amontons, para superficies deslizantes no lubricadas. Si la temperatura en la interfase se eleva hasta el grado en que la capa lubricante se funde, entonces ésta pierde su rigidez y se presenta un gran aumento en el contacto metálico. Si  $S_1$  es mayor que  $S_2$ , resulta un aumento en  $F_o$ . Como la temperatura de la interfase aumenta más, la fuerza friccional y el daño en la superficie sobrevienen como característica de una superficie deslizante en contacto, no obstante estar el lubricante presente en la superficie. La capa lubricante, se dice que ahora será desabsorbida o completamente móvil. Entonces la ecuación (1), nos mostrará que el punto de fusión de la capa límite lubricante, está excedida y  $\gamma_m$  tiende a la unidad y  $F_o$  tiende a  $A_r S_1$ . Esto aproxima a la condición deslizante seca.

### 3.2 Lubricación en el Corte de Metales:

Bajo determinadas condiciones, la aplicación de un lubricante al

proceso de corte, puede resultar en una disminución de la fricción en la cara de la herramienta de corte; esto puede causar una disminución en el consumo de energía específica, un aumento en la vida de la herramienta y aun más importante, un mejoramiento en el acabado de la superficie del elemento maquinado por la reducción del efecto del borde acumulado. La acción del lubricante de corte tiene en el pasado, innumerables tópicos muy fascinantes para la investigación fundamental. Se ha considerado que la disminución del coeficiente medio de fricción en la cara de la herramienta, se puede lograr bajo determinadas condiciones, con la aplicación del lubricante correcto. Sin embargo, muchos de los lubricantes aceptados en la ingeniería, pueden tener un efecto pobre al aplicarlos en la práctica del proceso de corte. Se ha visto también que otros fluidos y productos químicos (por ejemplo el tetracloruro de carbono), que nunca se habían usado como lubricantes en ingeniería, pueden tener buenos efectos en el proceso de corte, reduciendo el consumo de energía específica hasta un 60%, en algunos casos.

Las presiones extramadamente altas que existen en la superficie de contacto entre la viruta y la herramienta durante el maquinado, no permiten tener una lubricación hidrodinámica, donde la herramienta y la viruta se encuentran separadas por una película muy

delgada del fluido. Ciertamente, se ha mostrado por algún tiempo - que la acción lubricante para el corte es principalmente de naturaleza química. Hablando, por ejemplo, del efecto lubricante del tetracloruro de carbono ( $CCl_4$ ) cuando se maquina cobre, la fricción en la superficie de contacto entre la viruta-herramienta, se reduce considerablemente por la aplicación de este fluido. Se ha notado que - este efecto es debido a la formación de una película de baja resistencia al corte, formando un cloruro de cobre, que actúa como lubricante, en la superficie de contacto entre la viruta y la herramienta, previendo que se vaya a presentar un contacto íntimo metálico, en una gran extensión. Este último efecto, está claramente ilustrado en las microfotografías de la figura 3. Bajo condiciones de corte seco, el contacto íntimo entre la viruta y la herramienta, resulta - en una extensa zona de deformación secundaria, que tiene la apariencia del borde acumulado. El efecto de lubricación consiste en - reducir la intimidad entre la viruta y la herramienta y por consiguiente eliminar el borde acumulado en la zona de deformación secundaria. Esto hace que se reduzca la fricción en la superficie y por consiguiente también se reduce la fuerza requerida para formar la viruta, resultando un incremento en el ángulo de corte. Una característica importante de este trabajo, es la evidencia de una pequeña región de fricción "adherente" en el flanco de la herramienta, duran

te el corte en seco, y esto también puede ser evitado con la aplicación de tetracloruro de carbono.

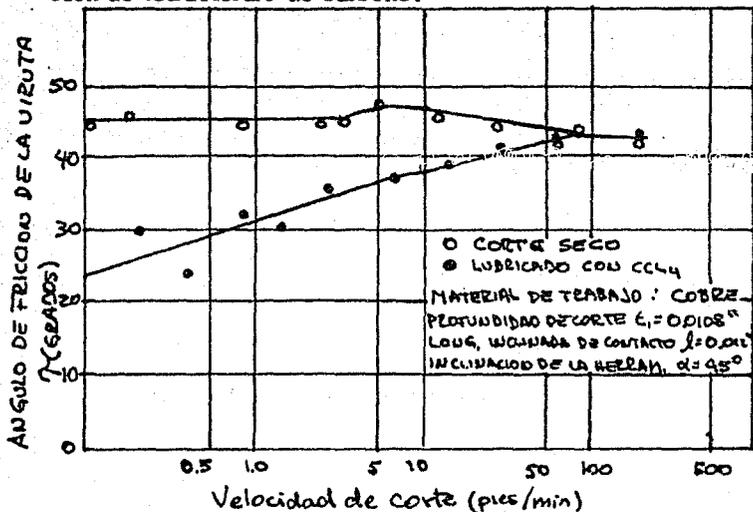


fig. 2 El Efecto de Velocidad de Corte en la Acción Lubrificante del Tetracloruro de Carbono

(Después de Casin y Boothroyd)

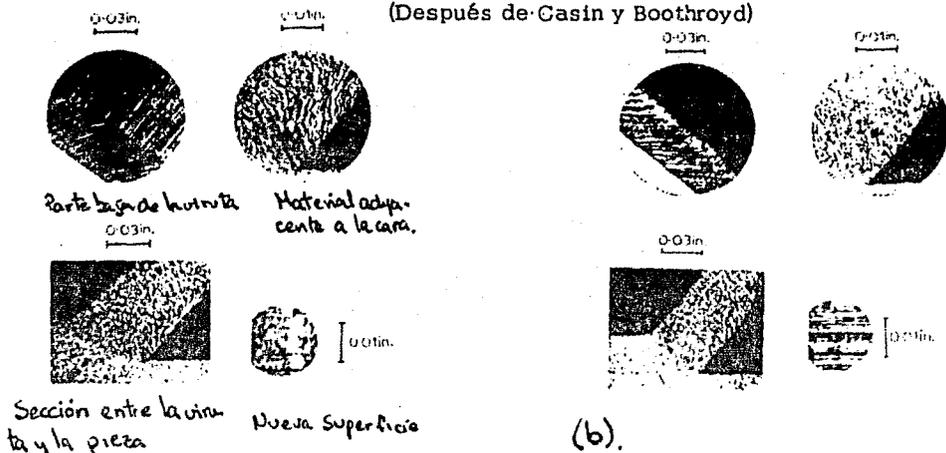


fig. 3 Efecto del CCl<sub>4</sub> Cuando se Maquina Cobre (Después de Casin y Boothroyd)

- (a) Condiciones de lubricación seca.
- (b) Condiciones completas de lubricación en el corte.

La figura 3, se ha tomado del trabajo de Cassin y Boothroyd, en el mecanismo del efecto de lubricación de  $\text{CCl}_4$  cuando se maquina cobre y se puede notar que consiste en dos etapas:

(1) El fluido, debido a su pequeño tamaño molecular, penetra o se difunde a través de una estructura ranurada en la zona de deformación primaria. Este efecto penetrante, se indica claramente en la figura 4, donde la acción de lubricante de una sola gota de tetracloruro de carbono, puesta en la parte superior de la pieza de trabajo de cobre, durante la operación de cepillado, está medida por varios espesores de viruta indeformada.

Para valores de espesor de viruta, tan pequeños como 0.008 pulg. el efecto de lubricación de una sola gota de  $\text{CCl}_4$  aplicada en esta forma fue mayor, que cuando la región de corte fue completamente cubierta con el lubricante. Para un espesor de viruta mayor de 0.015 pulg., una sola gota de lubricante no tiene efecto, esto indica que el lubricante no puede penetrar a esta profundidad antes de que la viruta haya sido removida de la cara de la herramienta.

(2) Cuando el  $\text{CCl}_4$  llega a la interfase de la viruta-herramienta, esta reacciona nuevamente bajo la superficie de la viruta formada.

Esta superficie todavía no ha sido expuesta a la atmósfera y por lo tanto no existe oxidación u otro tipo de contaminación.

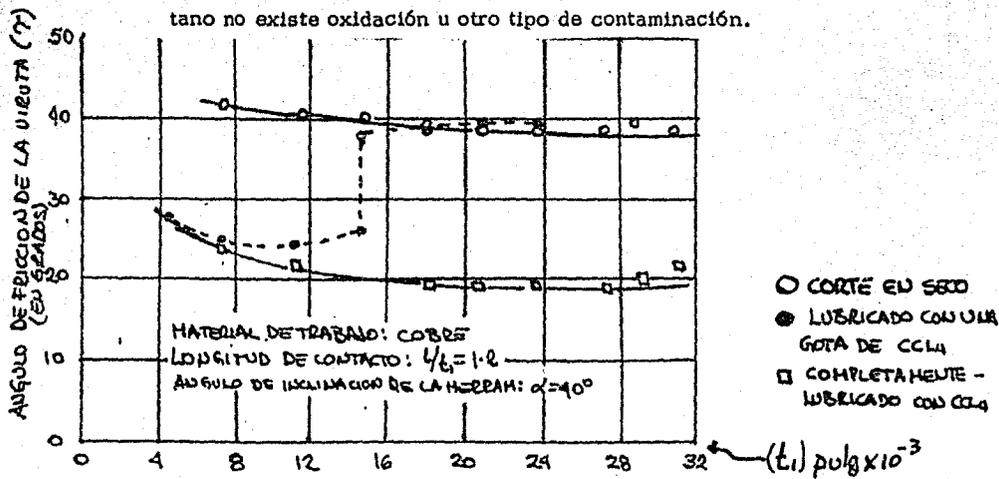


fig. 4 El Efecto del Espesor de la Viruta Indeformada en la Acción Lubricante del  $CCl_4$

La alta presión existente en esta región ayuda a la caída del  $CCl_4$  y por consiguiente los cloros libres reaccionan químicamente con la superficie limpia del cobre. Esto hace que se forme una capa de cloturo de cobre, la cual actúa como un lubricante sólido, el trabajo descrito, sugiere que para un compuesto químico puro que actúa como un lubricante eficiente en el corte de metal, deberá cumplir con las siguientes propiedades:

1. Un pequeño tamaño molecular que permita una rápida difusión y penetración en la interfase de la viruta-herramienta.

2. Contener un apropiado ingrediente reactivo, el cual cuando reacciona con el material de trabajo, forma ciertos compuestos que a bajas fuerzas de corte, actúa como lubricante en los límites del material de trabajo.
3. Ser suficientemente inestable, para descomponerse a bajas temperaturas y presiones existentes en la interfase de la viruta-herramienta.

El tetracloruro de carbono  $CCl_4$ , cloroformo  $CHCl_3$  y tricloroetano  $CH_2Cl_2$  y algunos otros hidrocarburos clorinados, se han encontrado como lubricantes eficientes cuando se cortan metales a bajas velocidades. Una importante excepción a esto, es el plomo.

El compuesto que se forma al usar los productos antes mencionados, es el cloruro de plomo cuya dureza es mayor que el mismo plomo. Bajo estas condiciones, un aumento en la zona de fricción entre la viruta-herramienta, sucede al aplicarsele este fluido.

La principal desventaja en el uso de los compuestos puros antes mencionados, es su toxicidad. El uso de  $CCl_4$  en cualquier proceso que involucre altas temperaturas, esta fuera de uso ya que cuando se calienta, produce un gas altamente venenoso (fosgeno). Sin embargo, una forma de metil-cloroformo (tricloroetano inhibido)

es un lubricante extremadamente eficiente en condiciones de baja velocidad, se ha visto que tiene relativamente una baja toxicidad y es un éxito el uso que ha reportado en el brochado y machuealeado.

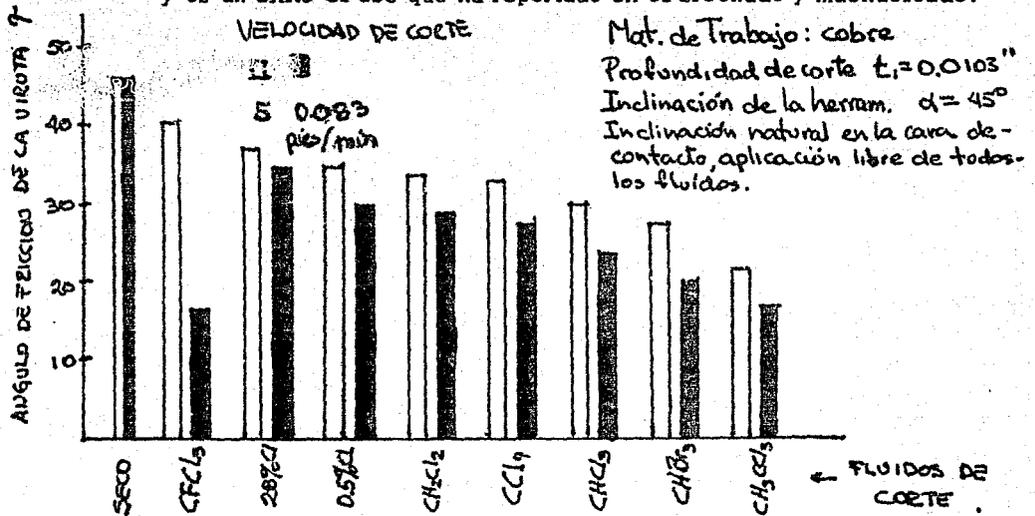


fig. 5 Acción Lubricante de Diversos Fluidos (Después de Cassin y Boothroyd)

La figura 5, indica la magnitud del efecto lubricante cuando se maquina cobre, una variedad de compuestos y dos fluidos comerciales, conteniendo aditivos clorinados. Se puede observar que el efecto lubricante de los fluidos comerciales, es relativamente pequeño y esto es debido probablemente a la poca penetración de dichos fluidos en la superficie de contacto entre la viruta y la herramienta durante el proceso de maquinado. Obviamente se pueden obtener grandes beneficios, si un compuesto limpio puede encon-

trarse lo suficientemente apto, para usarse dentro de los límites prácticos de las condiciones de corte.

La efectividad de todos los lubricantes, disminuyen al aumentar la velocidad de corte. Un ejemplo de esto, está ilustrado en la figura 2, donde la aplicación de  $\text{CCl}_4$  durante el maquinado de cobre, no tiene efecto en el ángulo de fricción de la viruta-herramienta a velocidades mayores de 100 pies/min. Este efecto puede explicarse parcialmente, por una pérdida de penetración del fluido en la interfase de la viruta-herramienta a estas velocidades y parcialmente por el aumento de la temperatura, que de acuerdo con lo dicho anteriormente, deberá esperarse que se reduzca la efectividad del lubricante sólido formado.

Lo discutido anteriormente ha sido concerniente al efecto de un lubricante, en la fricción existente entre la viruta y la herramienta, mientras se lleva a cabo la operación de maquinado.

Esto, en sí mismo, es de poco interés para el operador quien estará más interesado en el acabado de la superficie, particularmente a bajas velocidades de corte, donde el efecto del borde acumulado deberá ser más pronunciado. Desde luego, una reducción en la fricción existente en la zona de interfase viruta-herramienta, deberá implicar una reducción en el tamaño del borde acumulado o su eli

minación y esto deberá dar un mejoramiento del acabado de la superficie. Por lo tanto, se deberá aceptar, que las mediciones de los efectos de lubricantes sobre la superficie de fricción entre la viruta y herramienta, den una guía adecuada para su ejecución en la práctica.

#### 4. Asperezas de la Superficie

La aspereza de la superficie final que se obtiene durante una operación práctica de maquinado, deberá ser considerada como la suma de dos efectos independientes:

1. La aspereza superficial ideal, que es un resultado de la geometría de la herramienta y la relación de alimentación.
2. La aspereza de la superficie natural, que es un resultado de las irregularidades de la operación de corte.

##### 4.1 Aspereza de Superficie Ideal.

La aspereza de superficie ideal, es el mejor acabado posible que puede obtenerse para determinado perfil de herramienta y grado de alimentación y que solo puede tener acceso a ella si se eliminan los bordes acumulados, traqueteos, inexactitudes, etc., en el movimiento del maquinado. Considerando la operación de torneado, donde se usa una herramienta de un solo filo en la nariz.

el acabado ideal de superficie que puede obtenerse bajo estas condiciones antes mencionadas, está ilustrada en la figura 6a.

Para propósito de comparaciones cuantitativas y un análisis detallado, es útil poder expresar la aspereza de las superficies maquinadas, en términos de un solo factor o índice. El índice más común usado es el conocido con las siglas "L.C.P." (línea central promedio), que es un valor que se determina de la siguiente manera.

Refiriéndose a la figura 6b, que nos muestra una sección cruzada a través de la superficie en consideración, se encuentra primero una línea media que es paralela a la dirección general de la superficie y divide a ésta de tal manera, que la suma de las áreas formadas arriba es igual a la suma de las áreas formadas abajo de la línea. El valor de L.C.P., es ahora dado por la suma de todas las áreas arriba y abajo de la línea media, dividida por la longitud total y está expresada en micropulgadas.

\* nota: ver fig. pag. sig.

fig. 6 Asperezas de Superficie Ideal para Herramientas de Corte Afiladas en Naríz.

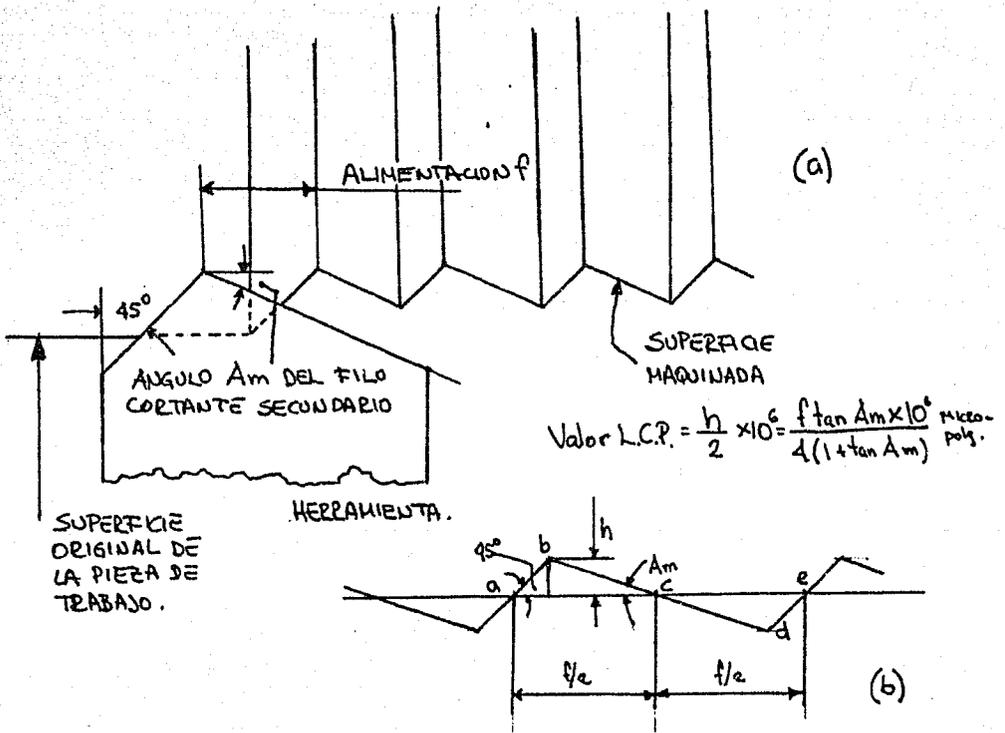


Fig. 6. Asperezas de Superficie Ideal para Herram. de Corte. Afiladas en nariz.

Así por ejemplo en la figura 6b, el valor de L.C.P., está dado por:

$$\text{Valor L.C.P.} = \frac{10^6}{f} (\text{área abc} + \text{área cde}) \dots\dots\dots (2)$$

donde:

f = grado de alimentación en pulg/revolución

Puesto que las áreas abc y cde son iguales:

$$\begin{aligned} \text{Valor L.C.P.} &= \frac{2 \times 10^6}{f} (\text{área abc}) = \\ &= \frac{2 \times 10^6}{f} \left( \frac{fh}{4} \right) = \frac{h}{2} \times 10^6 \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

donde:

h = altura de triángulo abc.

Es interesante hacer notar que a esta altura, el valor de L.C.P., para una superficie que tiene irregularidades triangulares uniformes, es igual a 1/4 de la altura extrema de las irregularidades - (que se llama el pico de la altura del valle).

Ahora por geometría:

$$h = \frac{(f - h)}{2} \tan A_m \dots\dots\dots (4)$$

donde:

A m = ángulo menor de corte

arreglando, tenemos:

$$h = (f \tan A_m) / 2 (1 + \tan A_m) \dots\dots\dots (5)$$

sustituyendo  $h$ , en la ecuación 3.

$$\text{Valor de L.C.P.} = (f \tan A_m \times 10^6) / 4 (1 + \tan A_m) \dots \dots \dots (6)$$

Dicha ecuación nos muestra que el valor de L.C.P., para tal superficie, es directamente proporcional al grado de alimentación y que la curva de la figura 7, donde la ecuación 6 está trazada para una relación constante de alimentación, nos muestra que el valor de L.C.P., está afectado por el ángulo de corte de la herramienta.

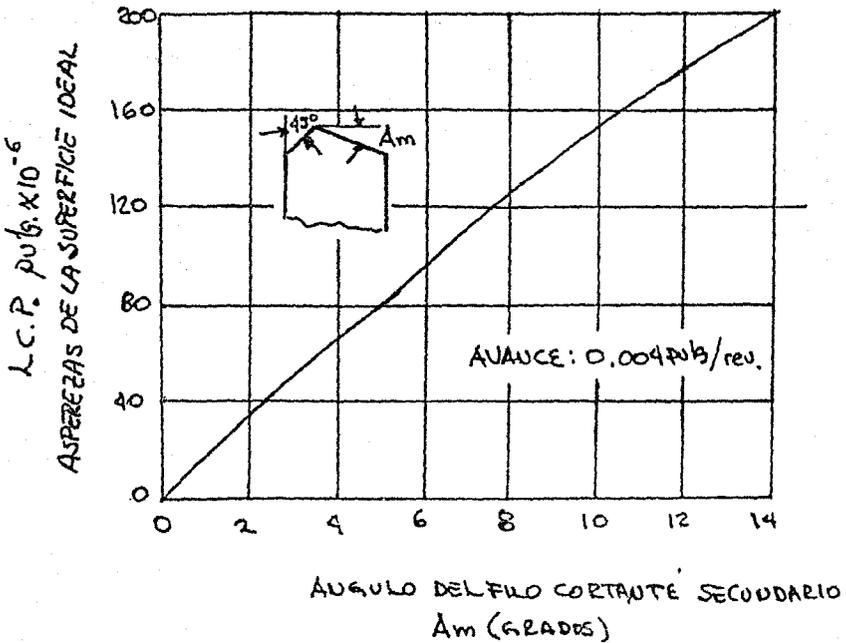


fig. 7 Efecto del Angulo Menor de Corte en Asperezas de Superficie Ideal

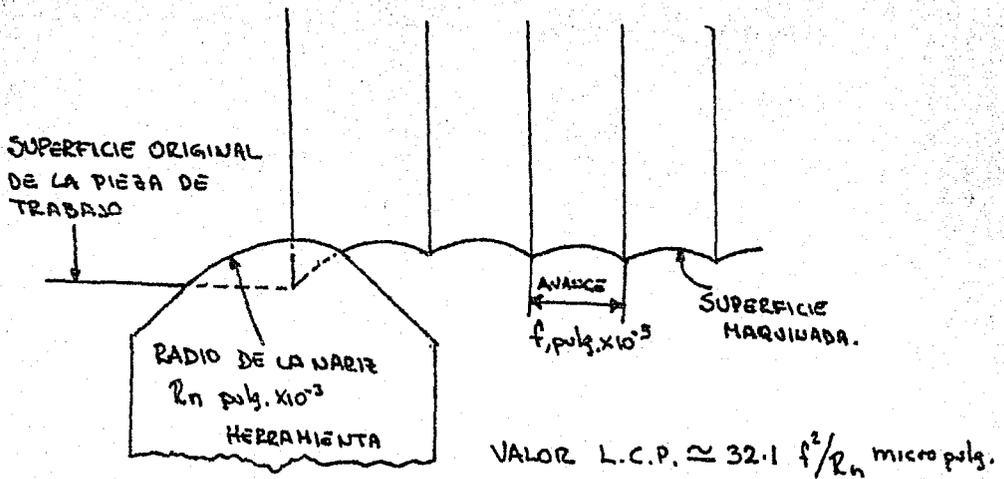


fig. 8 Asperezas de Superficie Ideal para Herramienta de Nariz Redonda

Las herramientas del tipo discutido anteriormente, son raramente usadas en la práctica ya que se puede presentar un rápido desgaste donde existe una esquina afilada en la nariz de la herramienta. Por esta razón práctica, las herramientas de corte se proveen de una curva en la nariz y en la figura 8, se muestra la superficie producida por tal herramienta bajo condiciones "ideales" La derivación de la ecuación teórica, dado el valor de L.C.P., para tal superficie, es mucho más difícil que el ejemplo proporcionado anteriormente, pero puede que este valor de aspereza esté relacionado

estrechamente al grado de alimentación y el radio de la nariz de la herramienta está dado por la siguiente expresión:

$$\text{Valor de L.C.P.} = 32.1 f^2/R_n \text{ micropulgadas} \dots\dots\dots (7)$$

donde:

$f$  = grado de alimentación en pulg.  $\times 10^{-3}$  por revolución.

$R_n$  = radio de la nariz de la herramienta en pulg.  $\times 10^{-3}$

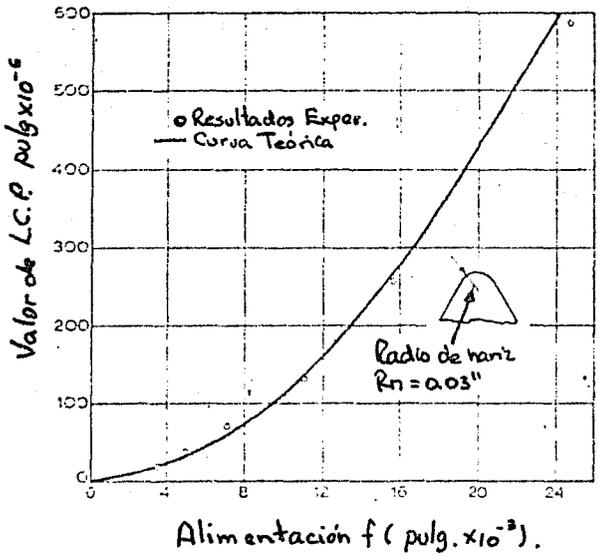


fig. 9 Comparación de Resultados Experimentales con Asperezas de Superficie "Ideal"

En la figura 9, la relación teórica entre el valor de L.C.P. y el grado de alimentación dado por la ecuación 7, está comparada con resultados experimentales. En estos experimentos el material de trabajo (cobre), y las condiciones de corte fueron cuidadosamente escogidas, de tal manera que la aspereza de superficie natural fuera extremadamente baja y no existieran imperfecciones debidas a la acción del corte (traqueteo, borde acumulado, etc.) y fueron visibles en las probetas. La operación de torneado y las herramientas, fueron cuidadosamente pulidas con el radio de nariz correcto antes de cada prueba. La figura 9, muestra que la aspereza en las probetas eran muy cercanas a la ideal para cada relación de alimentación usada y en la figura 10, se reproduce un trazo de una superficie típica, donde se ilustra el grado de perfección que se puede obtener, en condiciones ideales.

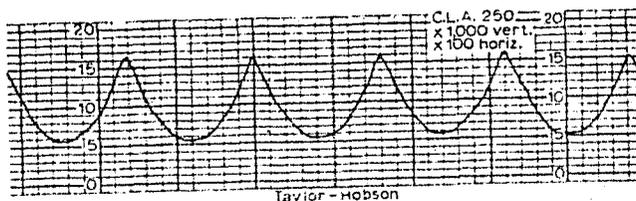


fig. 10 Trazo "Talysurf" de una Superficie Maquinada Bajo Condiciones Ideales

Radio de la nariz de la herramienta	0.03 pulg.
Alimentación	0.0157 pulg.
Material de trabajo	cobre
Herramienta de corte	carburo-cementado
Angulo de inclinación de la herramienta	20°
Velocidad de corte	1 200 pies/min.

#### 4.2 Aspereza de Superficie Natural

En la práctica no es posible conseguir condiciones como las mencionadas anteriormente y normalmente la aspereza de la superficie natural, forma una gran proporción de la aspereza actual. Uno de los principales factores que contribuyen a la aspereza de superficie, es la presencia del borde acumulado, el cual puede estar formándose constantemente y a la vez rompiéndose, las partículas fracturadas son sacadas hacia la superficie bajo la viruta y la superficie nueva de la pieza de trabajo. Así, se puede esperar que tan grande como sea el borde acumulado, así será la aspereza de superficie formada y que los factores que tienden a reducir la fricción entre la viruta y herramienta y también a reducir o eliminar la formación del borde acumulado, que dan como resultado un mejor acabado de superficie. Tales factores pueden, por lo tanto, resultar en un aumento en la velocidad de corte, un cambio de herramienta con material de carburo cementado; la introducción de materiales de

corte libre, tales como los aceros emplomados o resulturizados, la aplicación de un lubricante correcto a bajas velocidades, etc. Un ejemplo del efecto de velocidad de corte, se muestra en la figura 11, donde el valor de L.C.P., para componentes torneados es grande a bajas velocidades de corte y se reduce al aumentar las velocidades, mientras se aproxima a la superficie ideal a grandes velocidades de corte.

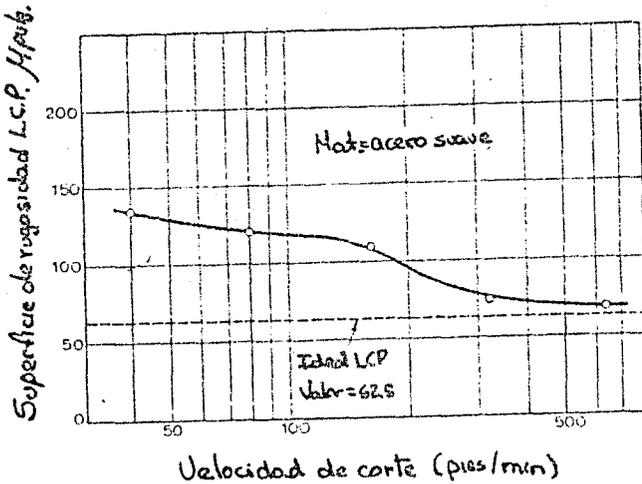


fig. 11 Mostrando el Efecto de la Velocidad de Corte en la Aspereza de Superficie en Muestras Torneadas

Otros factores que comunmente contribuyen a la aspereza de superficie natural en la práctica, son la presencia del traqueteo o vibraciones de la máquina-herramienta, inexactitudes en los movimientos de la máquina-herramienta, tales como el movimiento del fuste de un torno, irregularidades en el mecanismo de alimentación,-

defectos de la estructura del material de trabajo, formación de viruta discontinua, cuando se maquinan materiales quebradizos, ragado del material de trabajo cuando se cortan materiales dúctiles - a bajas velocidades de corte, daño de la superficie por causa del flujo de viruta, etc.

La discusión anterior ha sido limitada principalmente a la aspereza de la superficie producida por operaciones con herramientas de un solo filo y obviamente cuando se trata de superficies producidas por herramientas de varios filos o muelas abrasivas el problema se vuelve más complejo. Sin embargo, un conocimiento general de la cantidad de acabados producidos por varios procesos, es una guía para el ingeniero de producción y una indicación de estos, está dada por la siguiente tabla.

OPERACION	RELACION DE ACABADO PRODUCIDO VALORES L.C.P.
Pulido	1 - 4
Esmerilado	2 - 100
Torneado Diamante	4 - 30
Cepillado	32 →
Torneado	16 →

## CAPITULO VI

### NOMENCLATURA DE LA HERRAMIENTA DE CORTE

#### 1. Corte Tridimensional.

En la figura 1, tenemos una herramienta de un solo filo, indicando los diversos términos aplicados a sus caras y aristas. Los puntos principales de una herramienta de corte son las aristas, las caras y flancos que se cruzan para formar ésta.

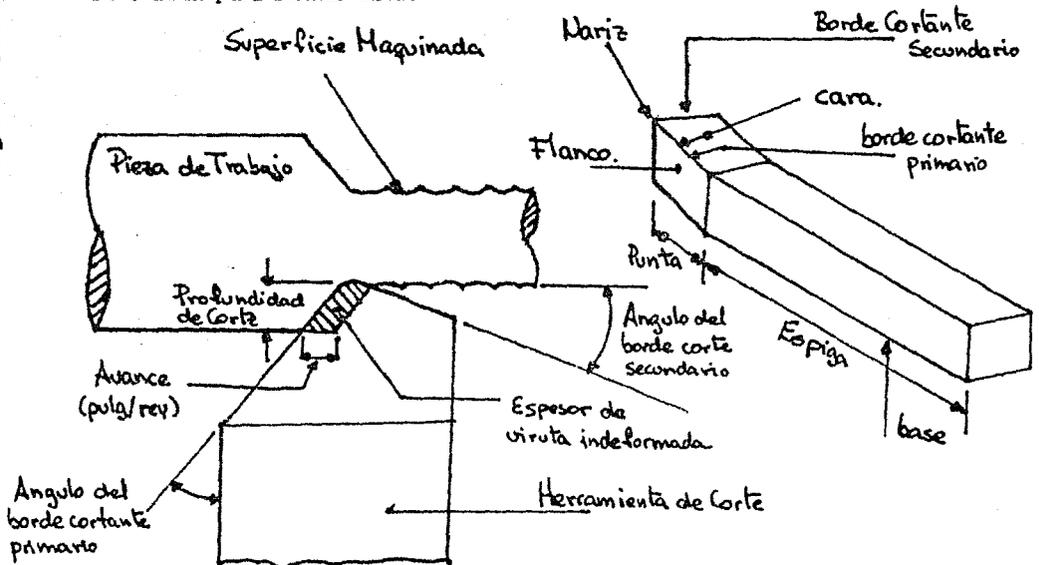


fig. 1 Términos Aplicados para Herramientas de un Solo Filo y Operaciones de Corte de un Solo Cortador.

Es importante darse cuenta que en realidad existen dos filos de corte - en una herramienta de un solo punto, (1) el filo principal de corte que remueve la mayorfa del metal; (2) el filo secundario que controla principalmente el acabado final de superficie de la pieza de trabajo (fig. 1).

La geometría y nomenclatura de las herramientas de corte, aun en las - herramientas de un solo filo, son sorprendentemente complicadas. Las - dificultades empiezan cuando se trata de decir en qué planos deben me - dirse los diversos ángulos de una herramienta de corte, particularmente la inclinación de la cara de la herramienta.

Para poder apreciar las ventajas y desventajas de diversas nomenclatu - ras, es preciso entender primero, los procesos de corte tridimensiona - les; en muchos trabajos de investigación sólo se ha considerado el ar - glo geométrico artificial, llamado corte ortogonal. Esto se muestra en - la figura 2a., y se ve que la arista de corte de la herramienta entra en forma de cuña en ángulo recto con referencia a la dirección de corte. - Este caso no se encuentra muy seguido en la práctica y la mayoría de - las operaciones de corte prácticas, cuentan en el caso más general de "corte oblicuo", representado en la figura 2b, donde la arista de corte está a un ángulo  $\delta_c$  (conocido como la inclinación de la arista de corte), hacia una línea dibujada en ángulos rectos a la dirección de - corte y medida en el plano de la nueva superficie de la pieza de traba -

jo (en el corte ortogonal  $\gamma_c = 0$ ). Con el corte oblicuo, la viruta fluye hacia la cara de la herramienta haciendo un ángulo  $\beta_c$  (ángulo de flujo de viruta), con una línea dibujada en la cara en ángulo recto a la arista de corte. La figura 3, muestra el desarrollo de una viruta producida durante un corte oblicuo, esta parte del diagrama abajo de la línea indicando la arista de corte, es una vista normal de la nueva superficie de la pieza de trabajo y la parte que queda arriba de la arista de corte, es una vista normal de la cara de la herramienta. El diagrama muestra que si la viruta no cambia de ancho durante su formación, entonces:

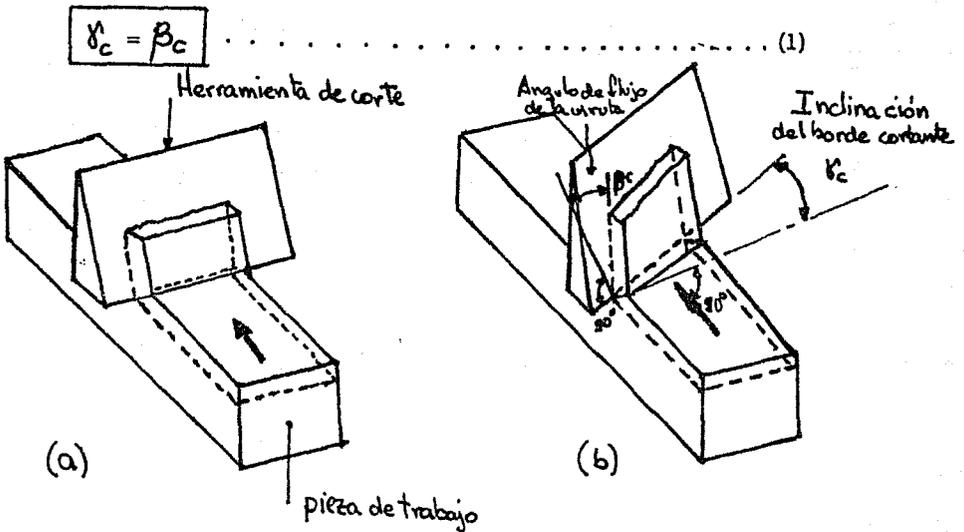


fig. 2 Operaciones Básicas de Corte

- (a) Corte Ortogonal
- (b) Corte Oblicuo

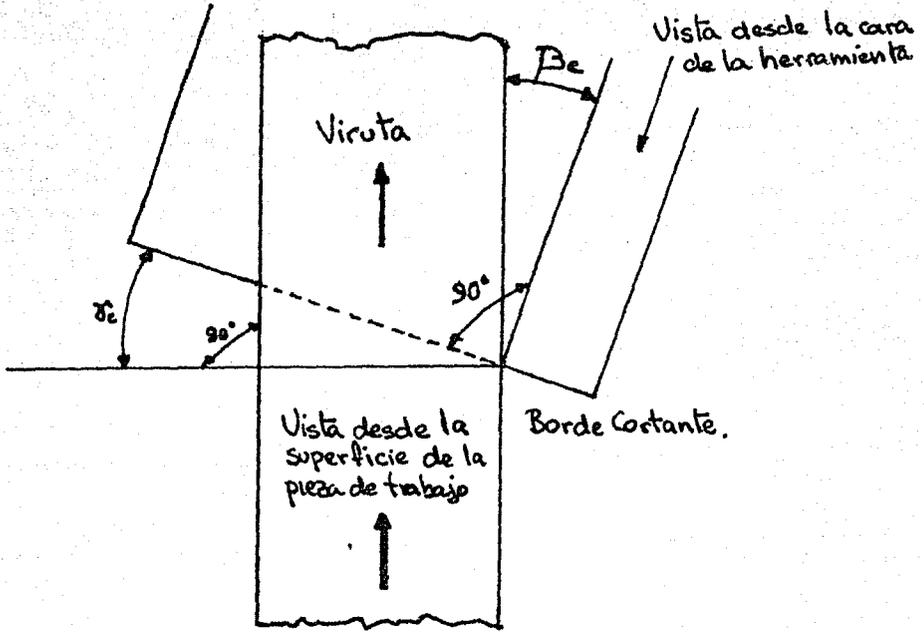


fig. 3 Demostración de la Ley de Stabler del Flujo de Viruta  
 (  $\delta_c = \beta_c$  )

Varios experimentos nos han demostrado que las variaciones a esta igualdad de inclinación y ángulo de flujo de viruta, pueden suceder en la práctica, pero en la mayoría de los casos, la ecuación (1) que fue propuesta por STABLER, es conocida comunmente como la Ley de Flujo de Viruta de Stabler. Lo importante es que la inclinación del filo de corte  $\delta_c$ , es el parámetro que tiene mayor determinación de la dirección en que la viruta fluye de la región de corte y es, por lo tanto, un factor importante para tomarse en cuenta cuando se diseñan herramientas de corte prácticas. Así, cualquier sistema aceptable de nomenclaturas de

herramientas, debe incluir una definición de la inclinación de la arista de corte, para que el sistema tenga algún significado en relación con el proceso. Otro punto que se debe considerar cuando se escoge un sistema de nomenclatura, se refiere al esmerilado de las herramientas de corte y deberá ser posible especificar el ángulo de la herramienta directamente en el soporte o guía de la esmeriladora. Teniendo esos dos puntos importantes en consideración, los diversos sistemas de nomenclatura para herramientas de corte usados en el pasado, se considerarán ahora.

## 1. Sistemas de Nomenclatura de Herramienta de Corte

### 2.1 Sistema Británico de Inclinación Máxima.

La figura 4, ilustra este sistema, donde el declive de la cara de la herramienta sobre la que la viruta resbala (conocida como la "cara") está medido en un plano perpendicular a la base de la herramienta, en dirección al máximo declive. Este método tiene la ventaja de que los ángulos especificados pueden fijarse en el soporte del esmerilador y la cara pulirse al ángulo deseado.

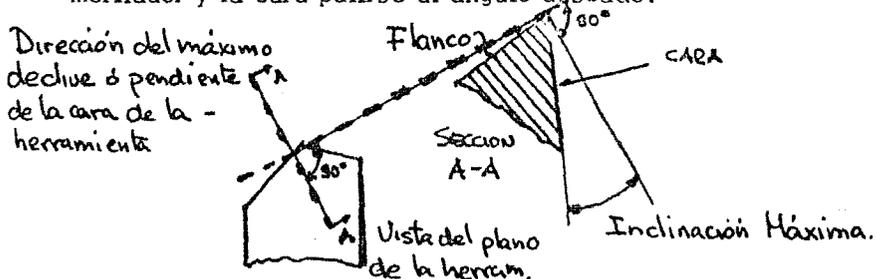


fig. 4 Sistema Británico de Inclinación Máxima.

la dificultad con este sistema es que los ángulos especificados, - son independientes de la posición de la arista de corte y por consi- guiente, de complicada expresión y para estimar la dirección de flu- jo de la viruta, se deberán usar un grupo de curvas. Se piensa que esta idea nació de la teoría de que la viruta fluye en la dirección - de la inclinación máxima de la cara de la herramienta. Como esto - no puede ser cierto, el sistema no tiene ningún valor físico en rela- ción con el proceso de corte, en efecto, se ha sugerido que se - abandone el sistema de la máxima inclinación y se revisará su es- pecificación.

## 2.2 Sistema Americano (A.S.A.)

El sistema indicado en la figura 5a, especifica que la cara de la - herramienta, define su declive con los dos planos ortogonales, uno paralelo y el otro perpendicular al eje de la herramienta de corte; - ambos planos, son perpendiculares a la base de la herramienta. Los ángulos así especificados, son conocidos como ángulos de inclina- ción posterior e inclinación lateral americana (fig. 5a).

En este sistema, como en el británico de máxima inclinación, los - ángulos son especificados independientemente de la posición de - la arista de corte y por consiguiente, no dan una indicación del - comportamiento de la herramienta en la práctica. La ventaja de es-

te sistema, estriba en la simplicidad de su uso cuando se pulen las herramientas de un solo filo y sin embargo, una herramienta no puede ser pulida con exactitud en la inclinación posterior y lateral americanas, sin usar ecuaciones o curvas que describan su comportamiento.

Por ejemplo, supóngase que un soporte de dos ejes es usado para pulir la herramienta. El soporte tiene ejes alargados A y B, perpendiculares entre sí y los dos descansan en planos horizontales cuando se colocan en posición cero. La herramienta se monta en el soporte, de tal manera que el eje superior de los dos; A, es paralelo al eje de la herramienta. Suponiendo que la cara de la herramienta es la superficie por pulir, entonces el soporte deberá colocarse de tal manera, que la cara futura de la herramienta quede en un plano horizontal. Si el eje B, se usa primero para inclinar la herramienta hacia adelante en un ángulo  $\theta_a$ , para colocar la inclinación posterior americana (fig. 5b), entonces el eje A, puede ser usado para girar la herramienta sobre su propio eje a un ángulo  $\alpha_a$  - igual a la inclinación lateral americana. Desafortunadamente esta última operación ha hecho que se gire el plano en que la inclinación posterior deberá medirse y por consiguiente, el primer arreglo deberá ajustarse, ya que el arreglo de la inclinación posterior está sobre un plano vertical. Las consideraciones de la figura 5b, mues

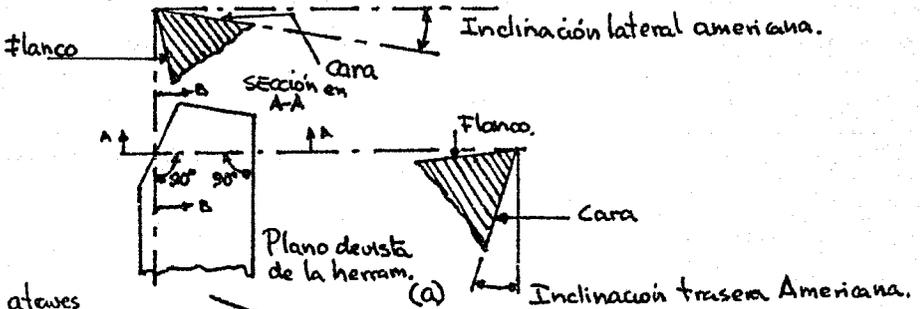
tran que si la inclinación posterior requerida americana es  $\Theta_a$ , entonces el eje B, deberá ser arreglado a  $\Theta'a$  que puede ser obtenida de la siguiente expresión:

$$\tan \Theta'a = \cos \alpha_a \quad \tan \Theta_a \quad \dots \dots \dots (2)$$

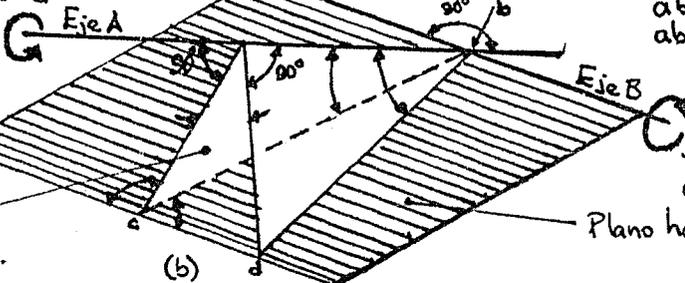
donde:

$\alpha_a$  = inclinación lateral americana

En la práctica, esta compensación es casi siempre olvidada y cuando los dos ángulos tienen un pequeño error resultante, se desprecian. No obstante el sistema tiene una gran desventaja que consiste en que los ángulos son independientes del filo de corte.



2. Rotación a través del ángulo  $\alpha_a$



$$\begin{aligned} ab &= ac \cot \Theta'a \\ ab &= ad \cot \Theta_a \\ \therefore \frac{ac}{ad} &= \cos \alpha_a = \frac{\tan \Theta_a}{\tan \Theta'a} \end{aligned}$$

4. Rotación a través del ángulo  $\Theta'a$

fig. 5a Sistema Americano (A.S.A.)

fig. 5b Construcción para determinar la compensación de la inclinación posterior americana, debida al arreglo de inclinación lateral.

(Eje A, es el eje superior en el soporte).

### 2.3 Sistema Alemán (D.I.N.)

En este sistema, también se especifican los ángulos de inclinación como: ángulo de inclinación posterior y ángulo de inclinación lateral (fig. 6). Pero en este caso, los ángulos se relacionan a la posición de la arista de corte. La inclinación posterior alemana, es el declive de la arista de corte, medida en un plano que contiene esta arista y es perpendicular a la base de la herramienta; la inclinación lateral alemana es la pendiente de la cara de la herramienta, medida en un plano perpendicular a la base de la misma. Este sistema tiene cierto significado físico en relación con el proceso de corte, porque ambos ángulos están relacionados con la arista de la herramienta que ejecuta la operación de corte.

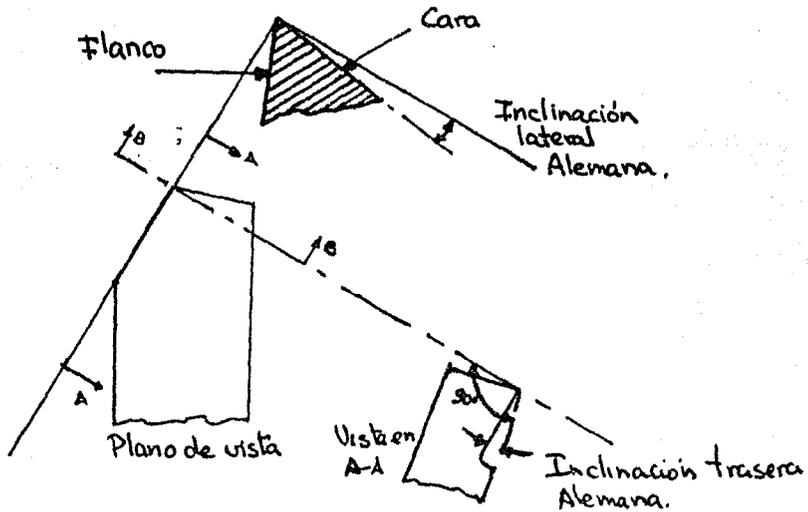


fig. 6 Sistema Alemán (D.I.N.)

El procedimiento de pulido es el siguiente:

- a) La herramienta se sujeta a un soporte universal con tres ejes - alargados ortogonales A, B y C puestos en cero.
- b) El ángulo principal de corte deseado, se coloca en un eje vertical A, de tal manera que el filo de corte futuro, descansa paralelo al tercer eje, bajo C.

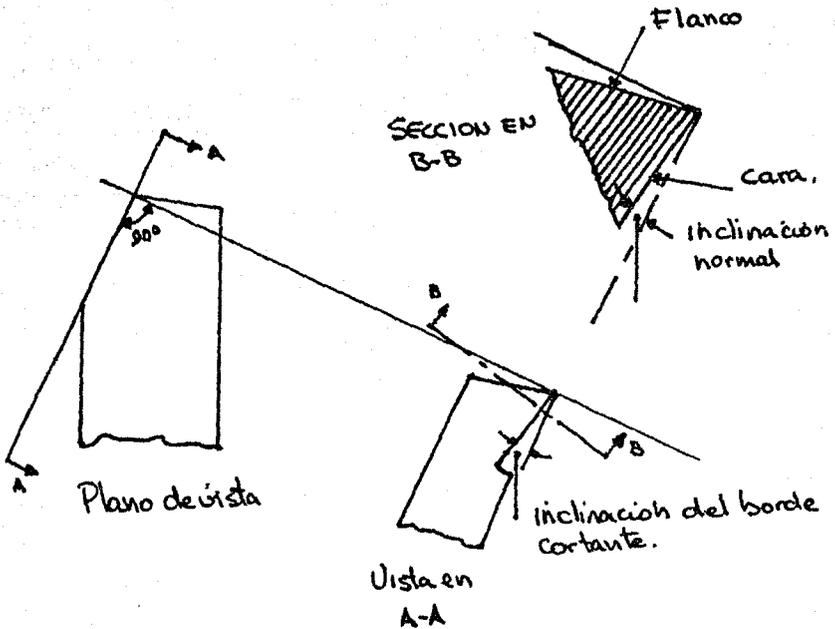


fig. 7 Sistema Normal de Inclinación.

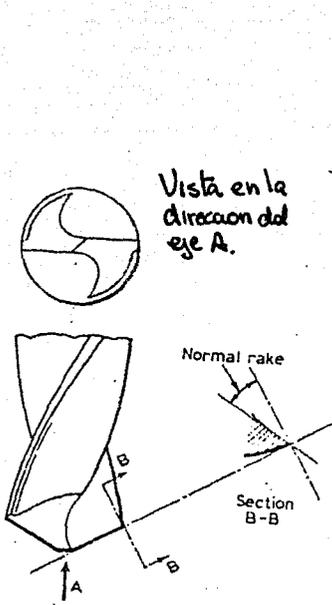


fig. 8 Inclinación Normal de un Taladro.

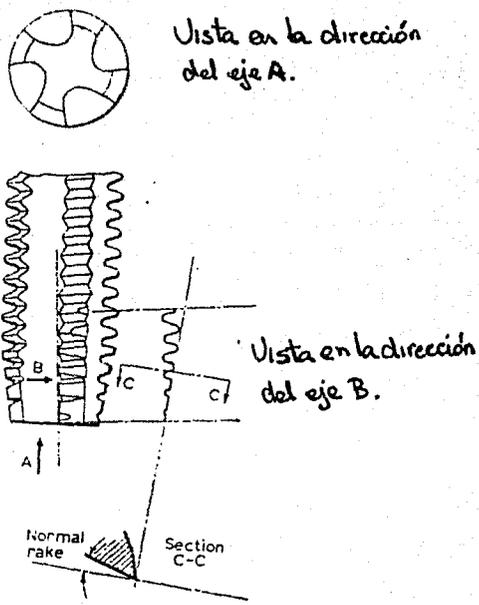


Fig. 9 Inclinación Normal de un

- c) El ángulo posterior alemán deseado, se coloca en el segundo - eje horizontal B, para tener el futuro filo de corte, en un plano horizontal.
- d) El siguiente paso es colocar el ángulo lateral alemán en el eje del filo C, pero deberá verse que al girar este eje, lo haga la - herramienta cerca del futuro filo de corte. Así para un pulido - exacto, el montaje sobre el eje C, deberá ser ajustado, depen - diendo este ajuste de las ecuaciones o curvas, de manera simi

lar al sistema americano. Obviamente estas dificultades pueden evitarse si la inclinación lateral se mide en un plano perpendicular, al filo de corte de la herramienta. Este ángulo puede ser aplicado sobre el eje C, sin necesidad de compensaciones. Esta idea forma parte de un sistema de nomenclatura llamado "sistema de inclinación normal", el que tal vez tenga mayores posibilidades de aceptación.

#### 2.4 Sistema de Inclinación Normal

Este sistema es similar al sistema alemán, con la excepción de que la inclinación lateral, es medida en un plano normal al filo de corte y se le da el nombre "Inclinación Normal" (figura 7). Se espera que en las nuevas normas, la inclinación posterior tenga el nombre de "Inclinación del Filo de Corte". Deberá notarse que este sistema, como el alemán, tiene cierto significado físico, porque los ángulos de la herramienta se especifican con relación al filo de corte, pero al contrario del sistema alemán, los ángulos especificados, deberán ser colocados directamente en porta-herramientas universal de tres ejes sin necesidad de compensación.

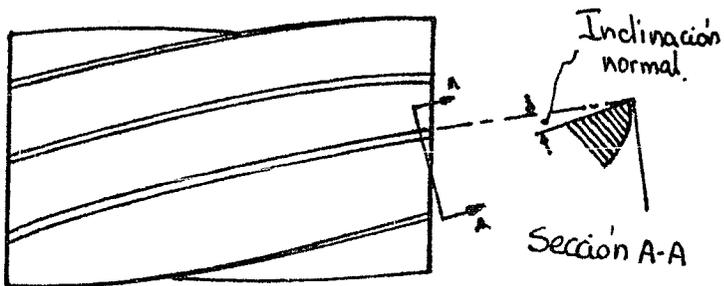


fig. 10 Inclinación Normal para una Fresadora

Deberá notarse que este sistema (de inclinación normal) ha sido incorporado por algún tiempo en las normas americanas como una alternativa al sistema descrito en la sección anterior.

Las figuras 8, 9 y 10, nos muestran cómo la inclinación normal, - puede ser aplicada a herramientas de varios filos de corte.

Es interesante hacer notar que la nomenclatura del sistema normal de inclinación fue propuesta por Stabler en 1955.

### 3. Los Angulos Básicos de la Herramienta.

Las herramientas de corte se diseñan con bordes agudos para reducir el contacto por roce entre la herramienta y la pieza de trabajo. Las variaciones en la forma de la herramienta de corte influye en la vida de la - herramienta, el acabado de la superficie de la pieza y la cantidad de - esfuerzo requerido para cortar una viruta del metal principal. Los diversos ángulos hechos por esmerilado sobre una herramienta de corte se - denominan "ángulos básicos de la herramienta" y componen lo que con frecuencia se nombra "la geometría de la herramienta". La clave es - una secuencia de números que enlistan los diversos ángulos, en gra - dos, y el tamaño de los radios de la "naríz" o punta. Este método nu - mérico de identificación ha sido normalizado por la American Standard Association, y se ilustra en la figura 11, junto con los elementos que forman la clave de la herramienta.

### Angulo de Inclinación Posterior.

Este es el ángulo entre la cara de la herramienta y una línea que es paralela a la base del porta-herramientas. Se le mide en un plano que es paralelo al borde lateral de corte y perpendicular a la base. Las variaciones en el ángulo de inclinación posterior afectan la dirección de flujo de la viruta. Según se aumenta este ángulo, mientras las otras condiciones permanezcan constantes, la vida de la herramienta aumentará ligeramente en tanto que disminuirá el esfuerzo de corte requerido. Debido a que el continuo reafilado de este ángulo reduce el espesor de la herramienta con su debilitamiento resultante, la pendiente del ángulo de inclinación posterior se obtiene por alteración del ángulo de inclinación lateral más bien que por la del posterior.

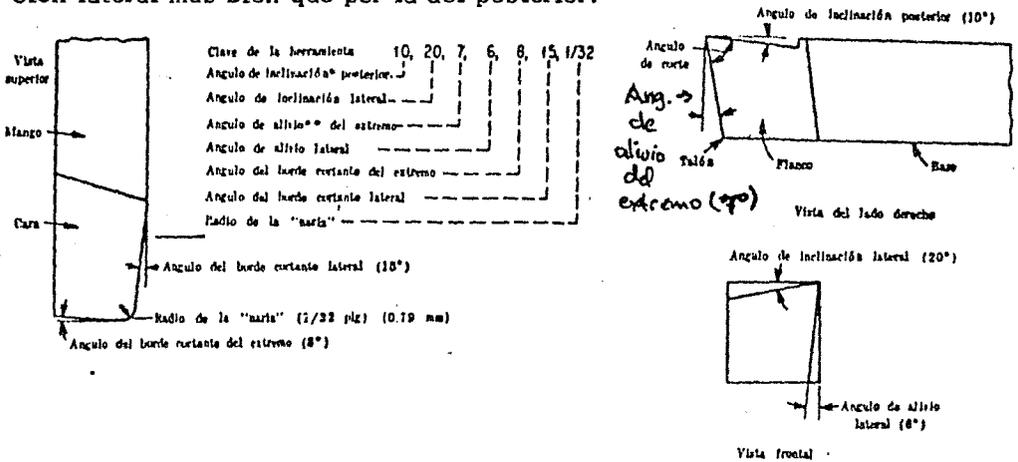


fig. 11 Herramienta del Mango Recto, corte a la derecha y una sola punta, ilustrando los elementos de la clave de la misma tal como están designados por la A.S.A. Se muestran los ángulos de inclinación positiva.

### Angulo de Inclinación Lateral

Este ángulo se define como el ángulo entre la cara de la herramienta y un plano paralelo a la base de la herramienta. Se le mide en un plano perpendicular tanto a la base del porta-herramientas como al borde lateral de corte. Las variaciones en este ángulo afectan la dirección del flujo de la viruta. Según se aumenta el ángulo, resulta una reducción en el esfuerzo cortante, aumenta la duración de la herramienta y se mejora el acabado de la superficie.

### Angulo de Alivio del Extremo

Este es el ángulo entre el flanco del extremo y una línea perpendicular a la base de la herramienta. El propósito de este ángulo es el de prevenir el roce entre la pieza y el flanco del extremo de la herramienta. Un ángulo de alivio excesivo reduce la resistencia de la herramienta, por lo que el ángulo no deberá ser mayor de lo necesario.

### Angulo de Alivio Lateral

Este es el ángulo entre el flanco lateral de la herramienta y una línea trazada perpendicular a la base. Los comentarios relacionados con los ángulos de alivio extremos son aplicables también a los ángulos de alivio lateral. Para operaciones de torneado, el ángulo de alivio lateral debe ser lo suficientemente grande para permitir el ángulo de avance -

helicoidal sobre el saliente de la pieza.

#### Angulo del Borde Cortante del Extremo

Este es el ángulo entre el borde de extremo de la herramienta y un plano perpendicular al lado del mango de la herramienta. El propósito del ángulo es el de evitar el roce entre el borde de la herramienta y la pieza. Igual que con los ángulos de alivio del extremo, los ángulos excesivos del corte del extremo reducen la resistencia de la herramienta - sin beneficios adicionales.

#### Angulo del Borde Cortante Lateral

Este es el ángulo entre el borde cortante recto del lado de la herramienta y el lado del mango de la misma. Este borde lateral proporciona la mayor acción cortante y deberá mantenerse tan agudo como sea posible. El aumento de este ángulo tiende a ensanchar la delgada viruta e influye en la dirección del flujo de la misma. Un Excesivo ángulo del borde cortante lateral puede causar vibración y deberá evitarse. Según aumenta, el ángulo, se aumenta la duración de la herramienta y puede esperarse un mejoramiento secundario en el acabado de la superficie. Sin embargo, estos beneficios se perderán de ordinario si se produce vibración, de manera que debe procurarse un ángulo máximo óptimo.

## Radio de la "Nariz"

El radio de la nariz o punta conecta los bordes cortantes lateral y del extremo y deberá mezclarse con ellos suavemente para facilitar el afilado. Aunque algunas veces se esmerilen chaflanes rectos para formar la nariz, se obtienen resultados más satisfactorios cuando esta última se hace en la forma de un arco. Las herramientas de punta aguda tienen un radio de nariz igual a cero. El aumento del radio de la nariz desde cero evita una gran concentración de calor en la punta aguda. Según se aumenta el radio de la nariz se mejora la duración de la herramienta y el acabado de la superficie y resulta, de ordinario, una ligera reducción del esfuerzo cortante. Sin embargo, existe un límite en el tamaño del radio que debe ser considerado. Si el radio es demasiado grande, se producirá vibración, deberá buscarse un valor máximo óptimo.

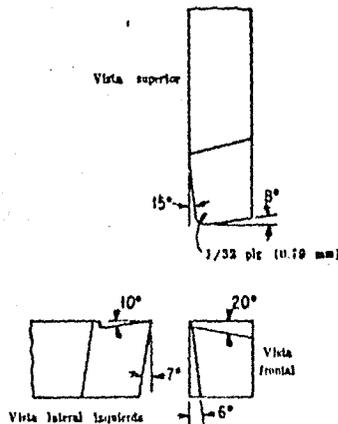


fig. 12 Herramienta de Corte a la Izquierda. Los demás aspectos son idénticos a los de la figura 11.

## Clave de la Herramienta

Los siete elementos que componen la clave de la herramienta cortante de una sola punta siempre van en el orden siguiente:

Angulo de inclinación posterior, ángulo de inclinación lateral, ángulo de alivio del extremo, ángulo de alivio lateral, ángulo de borde cortante del extremo, ángulo del borde cortante lateral y radio de la nariz. La figura 11, ilustra y enlista la clave de una herramienta de una sola punta como 10, 20, 7, 6, 8, 15, 1/32 (0.79 mm.). Es práctica usual omitir los símbolos para los grados y las pulgadas, sencillamente se enlista el valor numérico de cada componente. A menos que se especifique lo contrario, se entiende que los ángulos de inclinación son positivos, tal como se muestra. En la figura 13, se ilustran los ángulos de inclinación negativos.

Una comparación de las figuras 11 y 12, ilustra la diferencia entre una herramienta de corte a la derecha y una de corte a la izquierda. Las Herramientas se afilan, de ordinario, como del tipo de corte a la derecha. En algunos casos, se emplean ángulos secundarios de alivio u holgura, como se ilustra y especifica en la figura 13. Los ángulos adicionales se añaden a la clave de la herramienta tal y como se ilustra.

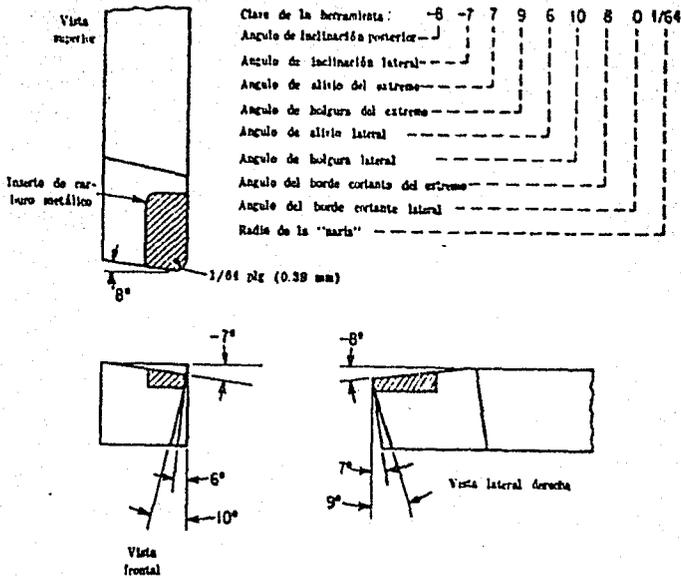


Fig. 13 Herramienta de una sola punta, mango recto, corte a la derecha y pastilla de carburo metálico sinterizado. Los ángulos de inclinación son negativos y se ilustran los ángulos secundarios de holgura lateral y del extremo.

La figura 14, muestra el efecto de utilizar un sujetador que sitúa la base de la herramienta en un plano que no es paralelo con el plano del movimiento de avance. Se utiliza un porta-herramienta de 15° y la clave de la herramienta indica los ángulos que resultan cuando la herramienta se coloca en el sujetador. El ángulo de inclinación posterior especificado de 0° requiere afilar un ángulo de inclinación posterior de 15° negativo sobre la herramienta antes de colocarla en el sujetador. Para evitar confusión, no hay dos ángulos de los mostrados en la ilustración.

tracción que sean iguales. La clave real de la herramienta tiene, con frecuencia, varios ángulos que son iguales. Los ángulos de alivio se afilan frecuentemente a la misma magnitud, aunque se les muestra con diferentes valores en las ilustraciones.

Las tablas 11, 12, 13, dan los ángulos recomendados para las herramientas de una sola punta de acero de corte rápido, carburo metálico y aleaciones fundidas respectivamente.

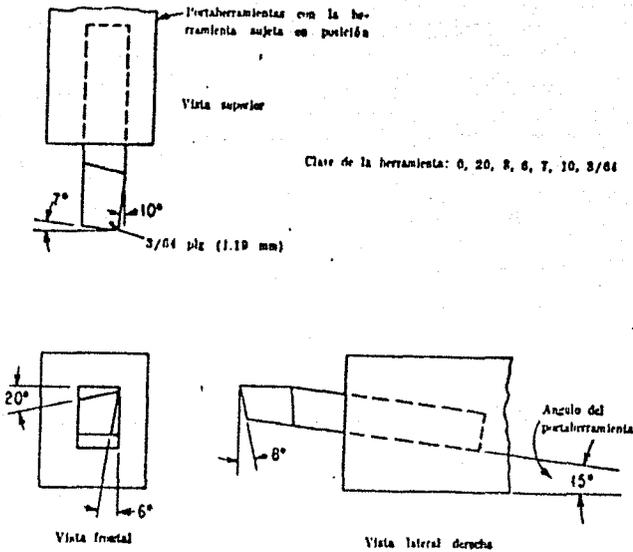


Fig. 14 Herramienta de una sola punta, y corte a la derecha, montada en un porta-herramienta de 15 grados. Nótese que la clave de la herramienta enlista los ángulos que resultan cuando la herramienta se sujeta al porta-herramienta.

TABLA 1-1. ANGULO RECOMENDADO PARA HERRAMIENTAS DE UNA SOLA PUNTA Y CORTE RAPIDO

Material	Angulo de alivio lateral, grad.	Angulo de inclinación frontal, grad.	Angulo de inclinación posterior, grad.	Angulo de inclinación lateral, grad.
Aceros de corte rápido, aleados, de alto contenido en carbono y aceros inoxidables .....	7 a 9	6 a 8	5 a 7	8 a 10
Aceros SAE:*				
1020, 1035, 1040 .....	8 a 10	8 a 10	10 a 12	10 a 12
1045, 1095 .....	7 a 9	8 a 10	10 a 12	10 a 12
1112, 1120 .....	7 a 9	7 a 9	12 a 14	12 a 14
1314, 1315 .....	7 a 9	7 a 9	12 a 14	14 a 16
1385 .....	7 a 9	7 a 9	12 a 14	14 a 16
2315, 2320 .....	7 a 9	7 a 9	8 a 10	10 a 12
2330, 2335, 2340 .....	7 a 9	7 a 9	8 a 10	10 a 12
2345, 2350 .....	7 a 9	7 a 9	6 a 8	8 a 10
3115, 3120, 3130 .....	7 a 9	7 a 9	8 a 10	10 a 12
3135, 3140 .....	7 a 9	7 a 9	8 a 10	8 a 10
3250, 4140, 4340 .....	7 a 9	7 a 9	6 a 8	8 a 10
6140, 6145 .....	7 a 9	7 a 9	6 a 8	8 a 10
Aluminio .....	12 a 14	8 a 10	30 a 35	14 a 16
Baquellita .....	10 a 12	8 a 10	0	0
Latón, de corte fácil .....	10 a 12	8 a 10	0	1 a 3
Rojo, amarillo, bronce fundido, bronce comercial .....	8 a 10	8 a 10	0	-2 a -4
Bronce, de corte fácil .....	8 a 10	8 a 10	0	2 a 4
Bronce fosforoso duro .....	8 a 10	6 a 8	0	0
Hierro fundido, gris .....	8 a 10	6 a 8	3 a 5	10 a 12
Cobre .....	12 a 14	12 a 14	14 a 16	18 a 20
Aleaciones de cobre:				
Dura .....	8 a 10	6 a 8	0	0
Blanda .....	10 a 12	8 a 10	0 a 2	0
Fibra .....	14 a 16	12 a 14	0 a 2	0
Fórmica .....	14 a 16	10 a 12	14 a 16	10 a 12
Hierro-níquel .....	14 a 16	10 a 12	6 a 8	12 a 14
"Miscrita" .....	14 a 16	10 a 12	14 a 16	10 a 12
Monel y níquel .....	14 a 16	12 a 14	8 a 10	12 a 14
Plata de níquel .....	10 a 12	10 a 12	8 a 10	0 a -2
Hule, duro .....	18 a 20	14 a 16	0 a -2	0 a -2

\* Tablas de la Society of Automotive Engineers, Inc. Las números que siguen a las tablas indican el número de la tabla, la clase a que pertenece el acero, la segunda cifra, en el caso de los aceros aleados, indica, por lo común, el tanto por ciento del elemento de aleación y las dos o tres últimas cifras indican el contenido en carbono en centésimas (N. del T.)

TABLA 1-2. ANGULOS RECOMENDADOS PARA HERRAMIENTAS DE CARBURO DE UNA SOLA PUNTA

Material	Alivio del extremo normal, grad.	Alivio lateral normal, grad.	Inclinación posterior normal, grad.	Inclinación lateral normal, grad.
Aluminio y aleaciones de magnesio	6 a 10	6 a 10	0 a 10	10 a 20
Cobre .....	6 a 8	6 a 8	0 a 4	15 a 20
Latón y bronce .....	6 a 8	6 a 8	0 a -5	+8 a -5
Hierro fundido .....	5 a 8	5 a 8	0 a -7	+6 a -7
Aceros de bajo carbono hasta 1020 SAE .....	5 a 10	5 a 10	0 a -7	+6 a -7
Aceros al carbono 1025 SAE y superiores .....	5 a 8	5 a 8	0 a -7	+6 a -7
Aceros de aleación .....	5 a 8	5 a 8	0 a -7	+6 a -7
Aceros de maquinado fácil, series 1100 y 1800 SAE .....	5 a 10	5 a 10	0 a -7	+6 a -7
Aceros inoxidables, austeníticos ..	5 a 10	5 a 10	0 a -7	+6 a -7
Aceros inoxidables, endurecibles ..	5 a 8	5 a 8	0 a -7	+6 a -7
Aleaciones de níquel (Monel, Inconel, etc.) .....	5 a 10	5 a 10	0 a -3	+6 a +10
Aleaciones de titanio .....	5 a 8	5 a 8	0 a -5	+6 a -5

TABLA 1-3. ANGULOS DE CORTE PARA HERRAMIENTAS DE ALEACIONES FUNDIDAS\*

Material	Angulo de inclinación posterior, grad.	Angulo de inclinación lateral, grad.	Angulo de alivio lateral, grad.	Angulo de alivio frontal, grad.	Angulo del borde cortante lateral, grad.	Angulo del borde cortante del extremo, grad.
Acero .....	8-20 †	8-20 †	7	7	10	15
Acero fundido .....	8	8	5	5	10	10
Hierro fundido .....	0	4	5	5	10	10
Bronce .....	4	4	5	5	10	10
Acero inoxidable .....	8-20 †	8-20 †	7	7	10	15

\* Herramientas para torneado de Fatalla BSM2.  
† El ángulo depende del grado y tipo del acero. Las herramientas para el torneado de interiores usan la misma inclinación pero un ángulo de alivio mayor para libras el trabajo

## Rompe-Virutas

El rompe-virutas es un pequeño escalón o ranura esmerilado dentro de la cara de la herramienta, o una pieza separada sujeta a la herramienta o porta-herramienta para causar que la viruta se curve y rompa en tramos cortos.

Cuando se efectúan operaciones de maquinado, la elevada resistencia a la tensión y ductilidad del acero y de otros materiales de las piezas de trabajo resultan en una viruta continua que es peligrosa y difícil de quitar de la vecindad del filo cortante. Los rompe-virutas hechos por esmerilado proporcionan medios de curvar y romper las virutas en pequeños segmentos.

La figura 14a y la tabla 14 proporcionan la forma y dimensiones pertinentes para usos generales.

TABLA 1-4. DIMENSIONES PARA ROMPEVIRUTAS DE TIPO PARALELO Y ANGULAR

Profundidad del corte	Avance	0.006-0.012	0.013-0.017	0.018-0.025	0.028-0.040	Over 0.040
	R *	0.010-0.025	0.015-0.065	0.015-0.065	0.015-0.065	0.015-0.065
	T *	0.010	0.015	0.020	0.030	0.030
$\frac{1}{16}$ - $\frac{1}{8}$	W	$\frac{1}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{16}$
$\frac{1}{16}$ - $\frac{1}{4}$	W	$\frac{3}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$
$\frac{3}{16}$ - $\frac{1}{2}$	W	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$
$\frac{1}{16}$ - $\frac{3}{4}$	W	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$
Sobre $\frac{3}{4}$	W	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{1}{4}$

\* Todas las dimensiones en pulgadas.

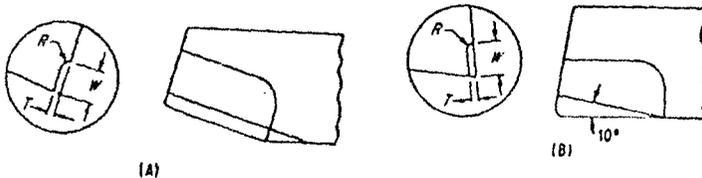


FIG. 1-4A

## CAPITULO VII

### ECONOMIA EN EL CORTE DE METALES

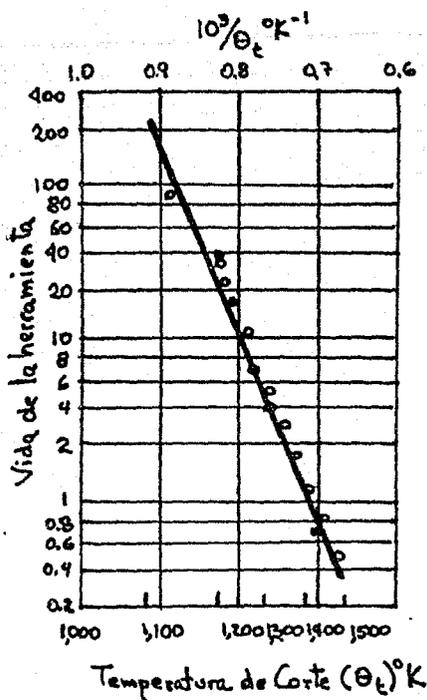
#### 1. Introducción

Es de vital importancia, para la producción en ingeniería, el medio por el cual, las condiciones de corte y técnicas de maquinado pueden ser seleccionadas para obtener un conjunto de componentes a un mínimo costo. El análisis de costos de manufactura, es un tema difícil y complicado en extremo y en algunos casos el análisis es solo aplicable a componentes particulares. Sin embargo, la experiencia a través de los años ha sido conducida acertadamente a reglas empíricas y principios fundamentales. Por tal motivo, este estudio tratará de ilustrar lo establecido. El costo total para producir un componente, aparte del costo del material, involucra muchos elementos del costo en el maquinado. Por ejemplo, la materia prima debe ser llevada a la máquina y colocada en la misma, es ahora cuando el proceso de maquinado se inicia luego, el producto debe ser retirado y almacenado temporalmente y transportado al segundo período de maquinado. Esto se fundamenta en la práctica, en el costo de manejo de componentes de máquina a máquina y puede representarse como una parte sustancial del costo total de manufactura.

Sin embargo, esto no se propone aquí para discutir el problema del manejo del material y ninguna de las discusiones económicas de los diferentes tipos de máquinas herramientas, pero solo para concretar sobre algunos costos, que estas involucran cuando el producto es terminado en la máquina herramienta. Apoyar la presente discusión, debe ser considerado la manera en que los costos se afectan por los cambios en la velocidad de corte y el espesor de la viruta indeformada (alimentación).

Suponiendo que el conjunto de componentes, debe ser maquinado en un torno y que la herramienta de corte apropiada ha sido escogida, las únicas variables a determinar son la velocidad de corte y la alimentación, cualitativamente se puede establecer que el costo por pieza debido a los costos de máquina y operador, disminuirán al incrementarse la velocidad de corte y la alimentación.

Cada factor tiene el mismo efecto, en la relación de producción y se incrementa ya sea que baja el costo por pieza en el conjunto, debido solo a la operación de la máquina. Sin embargo, al incrementarse la velocidad y la alimentación, el desgaste de la herramienta aumenta. Esto significa que la vida de la herramienta, se acortará entre los afilados y el costo por componente atribuible al afilado de las herramientas y el costo de reemplazo se incrementará. Claramente un sistema óptimo de condiciones de corte debe ser establecido para cada aplicación. Estas condi



○ Alimentación .0078 pulg/rev.  
Velocidad variable.

● Velocidad 528 pies/min.  
Alimentación variable.

Material de trabajo: aleación resistente al calor.

Material de la herramienta: Carburo.

(Criterio de la vida de la herramienta:

0.024 in, desgaste del flanco.)

fig. 1 Relaciones entre la Temperatura de Corte y Vida de la Herramienta

En el resultado mostrado en la figura 2, la temperatura es función de:

$v_c f^{0.5}$  y se puede establecer en general que  $x$ , en la ecuación

1, es usualmente menor que la unidad.

Puesto que ha sido demostrado, que la vida de la herramienta es una función de la temperatura, independiente de los cambios en la velocidad o alimentación, puede ser establecido que la vida de la herramienta es una función de  $v_c f^x$ , donde  $x$  es menor que la unidad.

ciones establecerán un compromiso entre la baja velocidad y alimentación y alta velocidad y alimentación, proporcionando bajos costos de operación en la máquina.

2. Efecto de la Velocidad y Alimentación en la Vida de la Herramienta.

Para proseguir en orden este análisis cualitativo, es necesario considerar los efectos relativos de la velocidad y alimentación sobre la vida de la herramienta. Esto se ha basado, en que para cada material a maquinar, con una herramienta dada, existe una única relación entre la vida de la herramienta y la temperatura en el filo de corte. Por ejemplo, la figura 1, muestra algunos resultados experimentales de "TAKEYAMA Y MURATA", cuando se maquina una aleación resistente al calor. Estos resultados son para metales típicos y muestran que la vida de la herramienta, es una función de la temperatura de corte, medida por el parámetro, pieza-herramienta; dicha relación es independiente de la velocidad o la alimentación. Otros trabajos empíricos han mostrado que la temperatura de la herramienta, es relacionada a la velocidad y alimentación por una ecuación de la forma:

$$\theta_t = \text{función} (V_c f^x) \dots\dots\dots (1)$$

donde:

$\theta_t$  = temperatura de la herramienta

$V_c$  = Velocidad de corte

$f$  = Alimentación

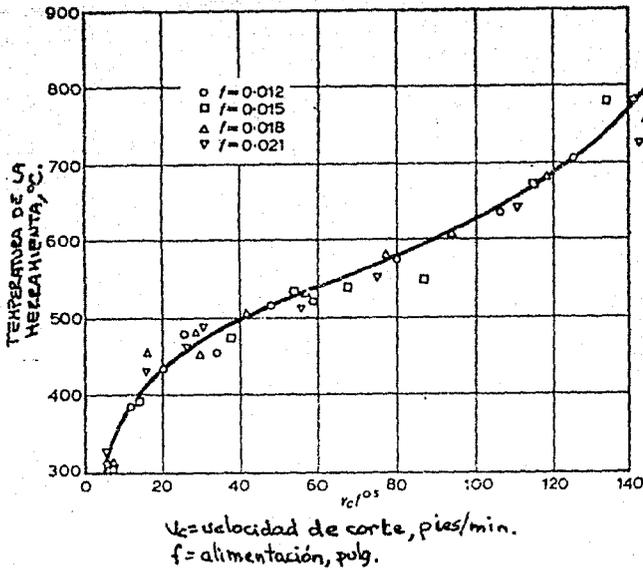


fig. 2 Muestra de los Efectos Relativos de la Velocidad y Alimentación en la Temperatura de la Herramienta

De la gráfica se pueden sacar resultados importantes tales como, un incremento en la alimentación siempre resultará en una pequeña disminución en la vida de la herramienta, que corresponde a un incremento proporcional en la velocidad de corte. En otras palabras, si la relación de producción es incrementada, en un desvaste grueso, esto se pagará con un incremento de la relación de la alimentación, que a su vez incrementará la velocidad de corte. Por supuesto este procedimiento no siempre resulta ser práctico, puesto que, en general, un incremento en la alimentación aumentarán los esfuerzos en la herramienta, mientras que

un incremento en la velocidad de corte no lo hará, por consiguiente, - existirá un límite en la alimentación dependiente de los esfuerzos en la herramienta, que la máquina sea capaz de soportar, por lo tanto, esta - discusión nos orienta a seguir los patrones principales, en los cuales - se pueden elegir las condiciones óptimas de corte, ya sea incrementando al máximo posible la alimentación, antes de escoger la velocidad de corte óptima.

### 3. Velocidad de Corte Optima

Regresando al ejemplo de un conjunto de componentes para ser maquinadas en un torno, los tiempos y costos son:

1. Ocurre una vez por grupo

Tiempo inicial establecido:  $T_s$  (min)

2. Ocurre una vez por pieza

Tiempo de carga y descarga:  $T_l$  (min)

Tiempo de avance y retirada:  $T_a$  (min)

(de herramienta)

Tiempo de maquinado:  $T_m$  (min)

3. Ocurre una vez por reafilado

Quitar herramienta, reemplazar

herramienta  $T_g$  (min)

**Gastos ordinarios:**

Paga operarios:	$W_o$ , unidades de costo por min.
Cargos por máquina-herramienta	$M$ , unidades de costo por min.

**Costos de Herramienta:**

Costo inicial de herramienta:	$C_t$ , unidades
Costo reafilado de herramienta:	$C_g$ , unidades
Número de reafiladas posibles por una herramienta:	$r_g$ ,

Suponiendo que existen  $N_b$  componentes en el conjunto y que  $P_G$  componentes, son producidas entre reafilado de herramienta, el costo total de producción del conjunto, esta dado por la suma del costo de preparación, el costo de corte y el costo de herramienta. El costo de preparación, carga y descarga, avance y retroceso de herramienta son independientes de la velocidad de corte y esta dado por:

$$(W_o + M) (N_b (T_L + T_a) + T_s) \dots \dots \dots (2)$$

El costo de reemplazo de herramienta y el reafilado se incrementan con el aumento en velocidad de corte, está dado por:

$$\frac{N_b}{P_G} \left[ (W_o + M) T_g + C_g + \frac{C_t}{r_g} \right] \dots \dots \dots (3)$$

El costo de corte disminuye con el incremento en la velocidad de corte y esta dado por:

$$(W_o + M) N_b T_m \dots \dots \dots (4)$$

Para encontrar la velocidad de corte óptima, para el conjunto de componentes, es necesario conocer la relación entre la velocidad de corte y vida de la herramienta. El trabajo de TAYLOR mostró que existe una relación empírica, entre estas variables (figura 3), sean:

$$V_c T^n = C \dots \dots \dots (5)$$

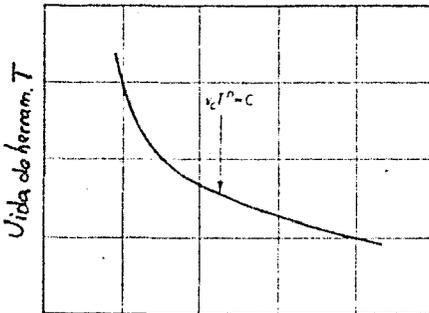
donde:

$V_c$  = velocidad de corte (pies/min)

$T$  = vida de la herramienta (min)

$n$  y  $C$  son constantes

Las constantes  $n$  y  $C$  pueden ser encontradas para casos particulares de una pieza, material de la herramienta y la alimentación en particular  $f$ , ya sea por medio experimental o de tablas.



Velocidad de corte  $V_c$ .

fig. 3 Ecuación de Taylor para la Vida de la Herramienta.

La vida de la herramienta T está dada por la expresión:

$$T = \frac{c}{Vc} \frac{1}{n} \dots\dots\dots (6)$$

En el número de componentes producidos entre los reafilados de herramienta esta dado por:

$$Pg = \frac{T}{Tm} = \frac{1}{Tm} \left( \frac{c}{Vc} \right) \frac{1}{n} \dots\dots\dots (7)$$

Finalmente Tm, que es el tiempo de corte para una pieza de trabajo cilíndrica de longitud L<sub>w</sub> y diámetro d<sub>w</sub> con una alimentación , - puede ser expresada por:

$$Tm = \frac{K}{Vc} \dots\dots\dots (8)$$

Vc, velocidad de corte (pies/min)

y

$$K = \frac{Tm \cdot dw \cdot Lw}{12} = \text{CONSTANTE}$$

así por la ecuación 7 y 8 :

$$Pg = \frac{Vc}{K} \left( \frac{c}{Vc} \right) \frac{1}{n} \dots\dots\dots (9)$$

donde:

$$Pg = Q' Vc \frac{n-1}{n}$$

(1/n)

$$Q' = \frac{c}{K} = \text{CONSTANTE}$$

Sustituyendo para  $T_m$  y  $P_g$  de 8 y 10, en las expresiones, 2, 3 y 4 y sumando a esta expresión a el costo total por conjunto de componentes,  $C_{tot}$  queda dado por:

$$C_{tot} = (W_o + M) (N_b (T_L + T_a) + T_s) + \frac{N_b V_c}{Q'} \left( \frac{1-n}{n} \right) \left[ (W_o + M) T_g + C_g + \frac{C_t}{r_g} \right] + (W_o + M) N_b K V_c^{-1} \dots \dots \dots (11)$$

Para encontrar la velocidad de corte para un mínimo costo total la expresión (11), debe ser ahora diferenciada con respecto a  $V_c$  e igualada a cero.

$$d C_{tot} = \frac{(1-n)}{n} \frac{N_b}{Q'} \left[ (W_o + M) T_g + C_g + \frac{C_t}{r_g} \right] V_c \left( \frac{1-2n}{n} \right) - (W_o + M) N_b K V_c^{-2} = 0 \dots \dots \dots (12)$$

$$\therefore V_{opt} = \left[ \frac{(W_o + M) K n Q'}{(1-n) (W_o + M) T_g + C_g + \frac{C_t}{r_g}} \right]^n \dots \dots \dots (13)$$

El efecto de velocidad de corte en el costo de fabricación, puede ser mostrado claramente en la forma de una gráfica, tal como la vemos en la figura 4. En la figura los tres costos individuales representados por las expresiones 2, 3 y 4, son graficados separadamente y muestra que los costos constantes de preparación, avance y retroceso de herramienta, etc. el costo de reafilado de herramienta se incrementa con el aumen

to en la velocidad de corte y el costo de maquinado disminuye con el incremento de la velocidad de corte. De la figura se puede observar cómo una velocidad de corte óptima se eleva para un conjunto de condiciones dadas.

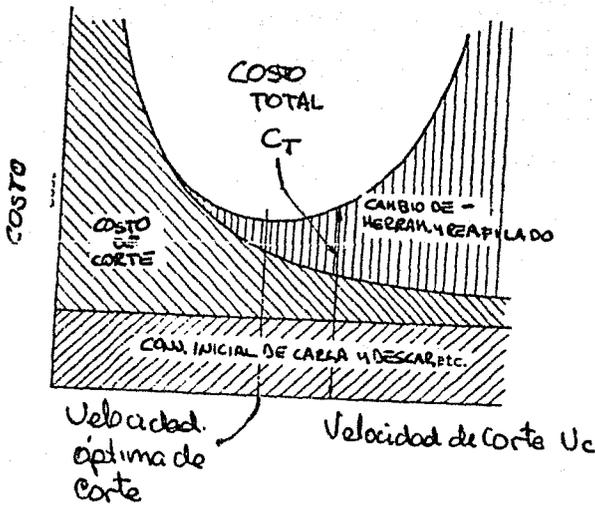


FIG 4. Variación del costo en la velocidad de corte.

## CONCLUSIONES

En la actualidad, México paga muchos millones de dólares\* anuales por concepto de transmisión de tecnología y en el ramo de producción de maquinaria ocupa el 30avo.\* lugar en el consenso mundial de productores de maquinaria.

Como se puede ver, existe la necesidad en el país de formar cuadros técnico-científicos para poder superar el estado de dependencia tecnológica por el cual atraviesa México.

Las conclusiones al presente trabajo se encaminan a formular una autocrítica, así como el deseo de haber interesado al lector en el presente tema.

Algunos temas tratados no se ampliaron más, debido a las limitaciones de espacio, como fueron, economía en el corte de metales.

No obstante, se proporcionaron los conceptos más importantes de ambos temas, por lo que se considera que no están inconclusos.

En relación a la mecánica del corte, se proporcionó un estudio de las teorías más importantes para resolver la geometría en el corte y un estudio sobre las leyes de fricción que actúan en el corte, y son una de las principales causas del desgaste y acabado al final del proceso.

---

\* Fuente: ONUDI-ID/WG 113/13 20 julio 1972.

La selección de corte óptimas de maquinado como se hizo notar, es muy - compleja, en virtud de los diversos factores que intervienen y se observa el beneficio que se obtiene al usar un fluido de corte durante una opera - ción de maquinado es más notable cuando se trabaja con herramienta de - acero, que cuando se hace con carburos metálicos o materiales cerámicos.

Se trató de resaltar la importancia que tienen los tiempos y costos que ocu - rren durante una operación de corte.

Solo una última observación; este trabajo de ninguna manera está concluí - do, sino por el contrario, queda mucho por realizar en el campo del corte de metales. Tampoco se incluyen resultados de pruebas prácticas, debido principalmente a la falta de tiempo para ello, sin embargo, es importante hacer notar que el laboratorio de manufactura de la Facultad de Ingeniería, se encuentra equipado con el instrumental necesario de la más alta preci - sión, para continuar con las investigaciones en este campo.

Esta suposición es de acuerdo con el trabajo de Brigman que experimentando con metales policristalinos, observó que la resistencia al corte - depende del esfuerzo normal en el plano de corte, ahora de la fig. anterior, tenemos que:

$$F_n = R \operatorname{sen} (\phi + \tau - \alpha) \dots \dots \dots (20)$$

$$F_n = S_n A_s = \frac{S_n A_o}{\operatorname{Sen} \phi} \dots \dots \dots (21)$$

De las ecuaciones 20 y 21 tenemos que:

$$S_n = \frac{\operatorname{Sen} \phi}{A_o} R \operatorname{sen} (\phi + \tau - \alpha) \dots \dots \dots (22)$$

Combinando las ecuaciones 15 y 22:

$$S = \operatorname{Cot} (\phi + \tau - \alpha) \dots \dots \dots (23)$$

Y de las ecuaciones 19 y 23:

$$S = \frac{S_o}{1 + K \tan (\phi + \tau - \alpha)} \dots \dots \dots (24)$$

Esta ecuación nos muestra como el valor de "S", puede ser afectado - por los cambios de O y relacionandola con la ecuación 14, obtenemos una nueva ecuación para Fc en términos de O.

$$F_c = \frac{S_o A_o \cos (\tau - \alpha)}{\operatorname{sen} O \cos (\phi + \tau - \alpha) 1 - K \tan (O + \tau - \alpha)} \dots \dots \dots (25)$$

Esto es si se considera que K y S<sub>o</sub> son constantes propias del material de trabajo y que A<sub>o</sub> y α , son constantes para las operaciones de - corte. Esta última ecuación, puede ser diferenciada para que obtenga -

mos el nuevo valor de  $\phi$ . La expresión resultante es:

$$2\phi + \gamma - \alpha = C$$

Donde  $C = \cot^{-1} K$  y es una constante para el material de trabajo, (sin embargo "S" permanece constante para el material de trabajo sobre cierto rango de condiciones de corte).

## 6.2 Teoría de Lee y Shaffer.

La teoría de Lee y Shaffer, fué el resultado de varios intentos para poder aplicar la teoría de la plasticidad al problema del corte ortogonal de metales. En relación con los problemas de la teoría de la elasticidad en el terreno de la plasticidad es necesario aclarar ciertas consideraciones respecto al comportamiento del material de trabajo bajo condiciones de esfuerzos.

- 1). El material es un plástico rígido lo cual significa que esfuerzo elástico es despreciable durante la deformación y que una vez que se llega al punto de cedencia tiene una deformación que excede en el momento que toma lugar un esfuerzo constante. La curva esfuerzo-deformación para un material plástico-rígido está indicado en la fig. 13, donde se ve que el material no se ha endurecido por trabajo.

## BIBLIOGRAFIA

- \* BARROW, G. "THEORY OF METAL CUTTING" APUNTES DE U.M.I.S.T. 1971.
- \* K. KEYSEN, CARL A. "MECHANICAL BEHAVIOIR OF MATERIALS AT ELEVATED TEMPERATURES". ASTME. TOOL ENGINEERS - HANDBOOK. 1969
- \* DR. H.E. TRUCKS. "SELECCIONE AND USE OF HIGH-SPEED STEELS". THE TOOL MANUFACTURING ENGINEER. JUNE/16 REVISTA MENSUAL ESPECIALIZADA.
- \* GERLING, HEINRICH. "ALREDEDOR DE LAS MAQUINAS-HERRA MIENTAS".
- \* BOLETIN TECNICO, GREENFIELD. 1976
- \* FUNDAMENTALS OF TOOL DESIGN, ASTME/1962
- \* TOOL ENGINEERS HANDBOOK, ASTME/1966
- \* BOOTHROYD, G. "FUNDAMENTALS OF METAL MACHINING"/ LONDON.
- \* BOLETIN TECNICO, CLEVELAND. 1974
- \* S.A. TOBIAS, F. "KOENIGSBERGER AND H. OPTIZ ADVANCES IN MECHANIC ENGINEERS HANDBOOK. 1964.

el flanco de la herramienta.

2. Fallas que traen un final prematuro de la herramienta.

## 2. Desgaste Progresivo de la Herramienta.

La naturaleza fundamental del mecanismo del desgaste puede variar mucho según las diferentes condiciones. En el corte de metal, 4 formas principales de desgaste han sido sugeridas en el pasado; abrasión, adhesión, difusión y desgaste electro-químico.

El desgaste por adhesión, puede ser causado por la fractura de asperezas soldadas en las uniones entre los dos metales. En el corte de metales la unión entre la viruta y el material de la herramienta está formado como parte del mecanismo de fricción y cuando estas uniones se rompen, pequeños fragmentos del material de la herramienta son despedados y llevados a la parte baja de la viruta o sobre la superficie nueva del material de trabajo.

El desgaste conocido como abrasión, ocurre cuando partículas duras en la parte baja de la viruta, corren sobre la cara de la herramienta y remueven el material de la misma por acción mecánica. Estas partículas duras pueden ser fragmentos muy endurecidos o rebordes quebradizos inestables, fragmentos de la herramienta dura removidos por desgaste de adhesión o constituyentes duros en el material de trabajo.

La difusión de estado sólido ocurre cuando los átomos de una estructura de cristales metálicos se mueven de una región de alta concentración atómica, a una de baja concentración. Este proceso depende de la temperatura existente y la relación de difusión aumenta exponencialmente con el incremento de temperatura.

En el corte de los metales, donde existe un contacto íntimo entre los materiales de la herramienta y el de trabajo, existen altas temperaturas y la difusión tiene lugar cuando los átomos se mueven del material de la herramienta, al material de trabajo o viceversa.

Este proceso tiene lugar en una zona de reacción muy estrecha y la interfase entre los dos materiales causa un debilitamiento de la estructura en la superficie de la herramienta. Esto es conocido como "desgaste por difusión". Se ha sugerido que el desgaste electroquímico puede ocurrir en el corte de metal, cuando existe un paso de iones entre la herramienta y el material de trabajo, causando un deterioro en la superficie de la herramienta. Debido a las altas temperaturas existentes durante el corte, una f.e.m. termoeléctrica ocurre en la unión de la herramienta de trabajo, ocasionando que circule una gran corriente eléctrica. Esto se debe al paso de iones entre herramienta-trabajo y un consecuente resquebrajamiento del material de la herramienta en la región de interfase viruta-herramienta. Ciertos aspectos relativos al conoci-

miento de las formas de desgaste en el corte de metales no nos permite dar una indicación de su importancia relativa.

### 3. Formas de Desgaste en el Corte de Metal

El desgaste progresivo de la herramienta se lleva a cabo en dos diferentes formas: (1) desgaste en la cara de la herramienta caracterizado por la formación de un cráter (fig. 1).

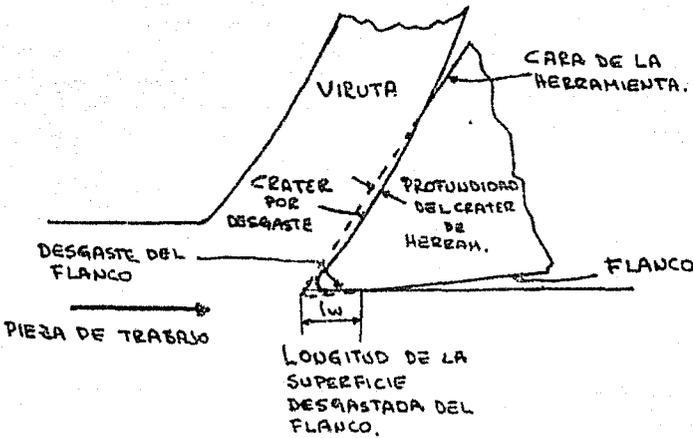


fig. 1 Mostrando las Regiones de Desgaste Progresivo Durante el Corte de Metales

y este es el resultado de la acción de la viruta que fluye a lo largo de la cara (2). El desgaste en el flanco, ocurre donde un desgaste plano -

es formado, debido a la acción rugosa de la nueva superficie generada en la pieza de trabajo.

### 3.1 Desgaste de Cráter

Cuando se cortan metales dúctiles a bajas velocidades, la presencia de grandes rebordes quebradizos, dan lugar a la formación de cráteres o surcos en la cara de la herramienta como se ilustra en la figura 2, este tipo de desgaste, es debido a la acción de superficie dura de la viruta conforme pasa por sobre la cara de la herramienta, causando desgaste por adhesión y por abrasión.

La región angosta cercana al filo de corte de la herramienta, está protegida de la acción de la viruta por la presencia de un borde acumulado.

El cráter que se forma en la cara de la herramienta en condiciones de altas velocidades de corte, se pensó que era parcialmente, debido al desgaste por difusión. Como las temperaturas máximas en la interfase viruta-herramienta, ocurren a cierta distancia de la arista de corte y como el desgaste por difusión se sabe es muy sensitivo a pequeños cambios de temperatura.

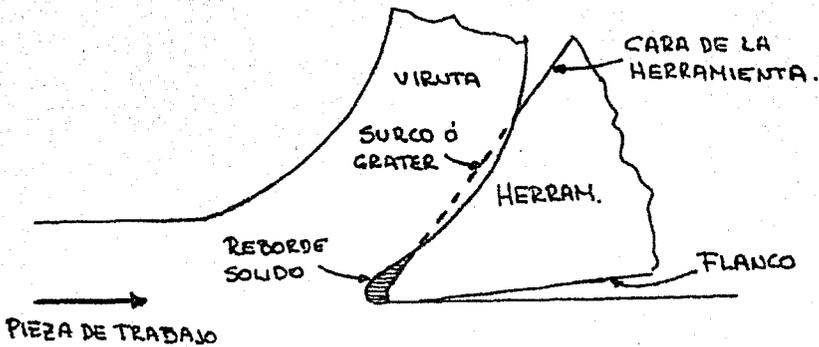


fig. 2 Mostrando Ensucamiento de la Cara de la Herramienta Debido a la Presencia de Reborde Sólido (después de Trent)

esto, puede explicar cómo se forma un cráter en la cara de la herramienta; existe mayor desgaste cuando la temperatura alcanza valores más altos.

En trabajos experimentales, la profundidad del cráter  $d_c$  (fig. 1), se toma comúnmente como la medida de la cantidad de desgaste de cráter y puede determinarse fácilmente por medio de un instrumento de medición de superficies.

Bajo condiciones de muy altas velocidades de corte, el desgaste de cráter es frecuentemente el factor determinante de la vida de la herra-

mienta de corte, la caracterización es tan severa que se debilita el filo de la herramienta y eventualmente llega a la fractura. Sin embargo, cuando se corta bajo condiciones económicas, el desgaste de la herramienta en su flanco, conocido como desgaste del flanco, es usualmente el factor de control.

### 3.2 Desgaste de Flanco

Bajo cualquier condición de corte y con cualquier herramienta o material de trabajo, el desgaste ocurre en el flanco de la herramienta como se muestra en la figura 1, la longitud del plano de desgaste  $l_w$  es usualmente, tomado como medida de desgaste y puede determinarse fácilmente por medio de un microscopio para herramientas.

La figura 3, muestra una gráfica típica del progreso de desgaste del flanco, referido al tiempo o distancia de corte. La curva puede dividirse en tres regiones: La región AB donde la arista afilada se rompe rápidamente en un espacio finito de desgaste, la región BC, donde el desgaste progresa uniformemente; la región CD, donde el desgaste aumenta gradualmente y se piensa que es donde el desgaste de la herramienta de corte se hace sensible al aumento de la temperatura, debido a la presencia del plano de desgaste en la longitud. Obviamente, en la práctica, es aconsejable afilar de nuevo la herramienta antes de que el desgaste del flanco

llegue al final y pueda existir la posibilidad de una falla rápida y es usualmente considerado dejar un campo de desgaste de 0.03 pulg. - de longitud como seguridad, antes de reafilarse la herramienta. Con algunos materiales, sin embargo, como los aceros de muy alta resistencia, de 120 a 140 tons., por pulg.<sup>2</sup>, la herramienta debe ser reafilada cuando solamente tenga un campo de desgaste muy pequeño, porque, con estos materiales, la región del desgaste es relativamente pequeña y una rápida falla ocurrirá, en cuanto se establece un campo finito de desgaste.

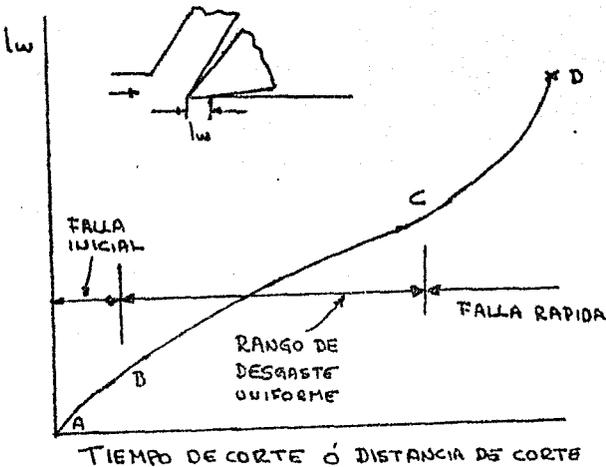


fig. 3 Desarrollo del Desgaste de Flanco con el Tiempo ó Distancia de Corte.

### 3.3 Fallas Repentinas de Herramienta

Muchas herramientas de corte, particularmente las de un solo filo están provistas de puntas de carburo, ya sean soldadas a la espi - ga o adheridas mecánicamente (en el último de los casos se conoce como puntas desechables). Estas puntas de carburo, son sumamente quebradizas y deben ser manejadas cuidadosamente contra car - gas repentinas como caídas de la herramienta o soportar un corte - cargado que pueden ser motivo de fractura. Estas herramientas también son susceptibles de romperse por los esfuerzos térmicos mo - mentáneos, tales como los que ocurren durante los cortes intermi - tentes en las operaciones de fresado o debido a enfriamientos localizados como el resultado de una aplicación inadecuada del fluido de enfriamiento durante el corte. El daño puede causarse también por falta de cuidados en las técnicas de afilado o soldadura, don - de puede agrietarse debido a los esfuerzos térmicos que debilitan la punta de la herramienta.

No obstante, gran parte del trabajo de investigación ha tratado en el pasado con el desgaste progresivo del flanco y el desgaste de - cráter en las herramientas de corte, las formas en las cuales la vi - da de la herramienta puede ser acortada o fallar bruscamente, tie - nen una gran importancia en la práctica.

### 3.4 El Efecto del Borde Acumulado

La presencia del borde acumulado en la cara de la herramienta durante el corte, puede afectar la capacidad de desgaste de la herramienta de varias maneras, algunas de ellas disminuyendo y otras aumentando su vida.

Ya se ha visto que la presencia del borde acumulado puede resultar en la ranuración o craterización a bajas velocidades (fig. 2), y en este caso los fragmentos del borde acumulado fuertemente endurecidos, que se adhieren a la superficie baja de la viruta y en la superficie nueva de la pieza de trabajo, pueden aumentar la relación del desgaste de la herramienta por abrasión en sus caras. Cuando se trabaja con materiales frágiles tales como el hierro colado, la presencia del borde estable acumulado, puede ser benéfica. En este caso, el reborde protege la superficie de la herramienta del desgaste y ejecuta las operaciones del corte en si mismo.

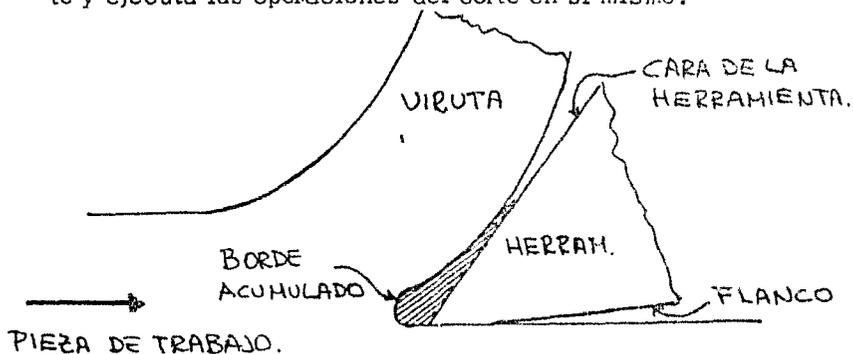


fig. 4 Borde Acumulado Protegiendo la Cara de la Herramienta

El borde acumulado puede, con frecuencia, ser el responsable de fallas repentinas de la herramienta, cuando se usan puntas de carburo. Por ejemplo, cuando el corte es bruscamente suspendido, una porción del reborde, que durante el corte se había soldado a la cara de la herramienta, se puede desprender arrancando un fragmento del material de ésta. Otra forma en que el reborde va en perjuicio de la vida de la herramienta, sucede durante el enfriamiento de la punta de la herramienta al final de un corte. Debido a que el coeficiente de expansión lineal del acero es aproximadamente el doble del material de carburo de la herramienta, pueden producirse grietas en la punta donde hay una contracción en el borde acumulado por efecto del enfriamiento, y está íntimamente unida al carburo de la herramienta. (fig. 5).

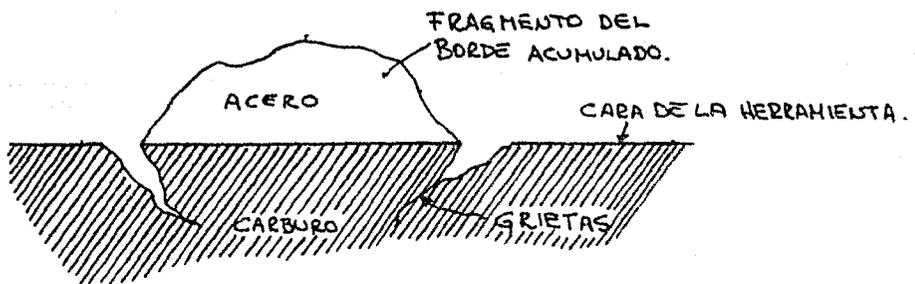


fig. 5 Rajaduras Formadas en la Punta de Carburo Durante el Enfriamiento

### 3.5 El Efecto de los Angulos de la Herramienta

En general, se puede decir que para condiciones de corte pobre e incrementando la presión específica de corte y aumentando la temperatura de la herramienta, dan por resultado mayor desgaste. Porque un aumento en el ángulo de corte de la herramienta, trae por consecuencia un mejoramiento en las condiciones y se puede esperar una duración mayor de la herramienta, sin embargo, con ángulos muy grandes de corte, esto no es posible, porque bajo estas circunstancias el filo de la herramienta se debilita, resultando un desgaste mayor. Por el contrario para otras condiciones constantes de corte, un ángulo óptimo de corte de la herramienta, debe ser dado para obtener una máxima vida de ésta.

Una relación muy típica está mostrada en la figura 6 donde el ángulo de corte óptimo es de aproximadamente  $14^{\circ}$  cuando se cortaba acero de alta tensión, con una herramienta de acero de alta velocidad. La experiencia ha enseñado que el mejor ángulo, es casi constante para determinados materiales de trabajo y herramientas, y los siguientes valores son usados en la práctica.

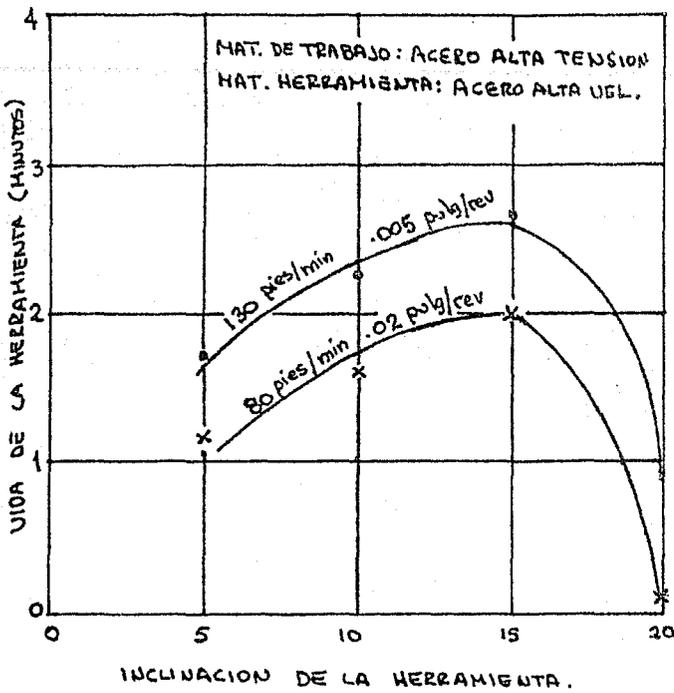


fig. 6 Mostrando el Efecto del Angulo de Corte en la Vida de la Herramienta

Mat. de Trabajo/Mat. de Herr.	H. S. S.	Estelita	Carburo
hierro fund, latón fund.	0°	0°	0°
Latón y bronce	8°	3°	3½°
broncesuave y acero de alta tensión	14°	5°	3½°
Acero suave.	27°	15°	3½°
Aleaciones ligeras	40°	20°	13°

Angulos Normales de Herramienta para Operaciones de Desvaste

En ciertas circunstancias, cuando se fresa con cortadores de puntas de carburo, donde la carga de impacto a cada revolución del cortador tiende a fracturar la punta de la herramienta, entonces se recomienda un ángulo negativo para lograr una mayor resistencia.

La experiencia ha enseñado que la longitud limitante para determinar el desgaste en plano del flanco, es usualmente el factor de vida de la herramienta de corte. Sin embargo, se ha mostrado que las condiciones físicas de esfuerzo, temperatura y flujo de material que determinan la cantidad de desgaste del flanco en la herramienta, son sensiblemente constantes a lo largo del plano de desgaste y para planos de desgaste normalmente pequeños, no son muy afectadas por cambios en la longitud del plano de desgaste. Por estas razones, se deberá esperar que la relación de desgaste del material de la herramienta, hacia el factor de velocidad de la pieza de trabajo, deberá ser constante e independiente de la tolerancia del flanco. La figura 7, muestra que la relación de incremento de la longitud del plano de desgaste del flanco es dependiente de la tolerancia del mismo.

De la figura con ángulo de corte = cero:

$$\frac{dlw}{dt} = \frac{dnw}{dt} \quad \text{Cot } \alpha_c \quad \dots \dots \dots (1)$$

donde:

$\frac{dlw}{dt}$  = relación del incremento  $lw$  del plano de desgaste del flanco

$\frac{dnw}{dt}$  = relación de remoción de material de herramienta normal a la dirección de corte.

$Ac$  = Claro de la herramienta.

Por lo tanto, para una supuesta relación de desgaste constante, normal a la dirección de corte, la relación de desgaste del flanco, determina la vida de la herramienta  $\frac{dlw}{dt}$  y es proporcional a la  $\cot Ac$ . La relación está mostrada en la figura 7, donde se ve que, para valores pequeños de  $Ac$ , un aumento del mismo dará una relación reducida de desgaste. Está claro, sin embargo, que en la práctica, el claro del flanco no puede hacerse muy grande sin correr el riesgo de debilitar la punta de la herramienta.

La experiencia ha mostrado que para la mayoría de los materiales de trabajo el claro del flanco deberá ser de  $8^\circ$ , con herramientas de alta velocidad,  $6^\circ$  con estelita y  $5^\circ$  con carburo, dan mejores resultados entre estos requerimientos.

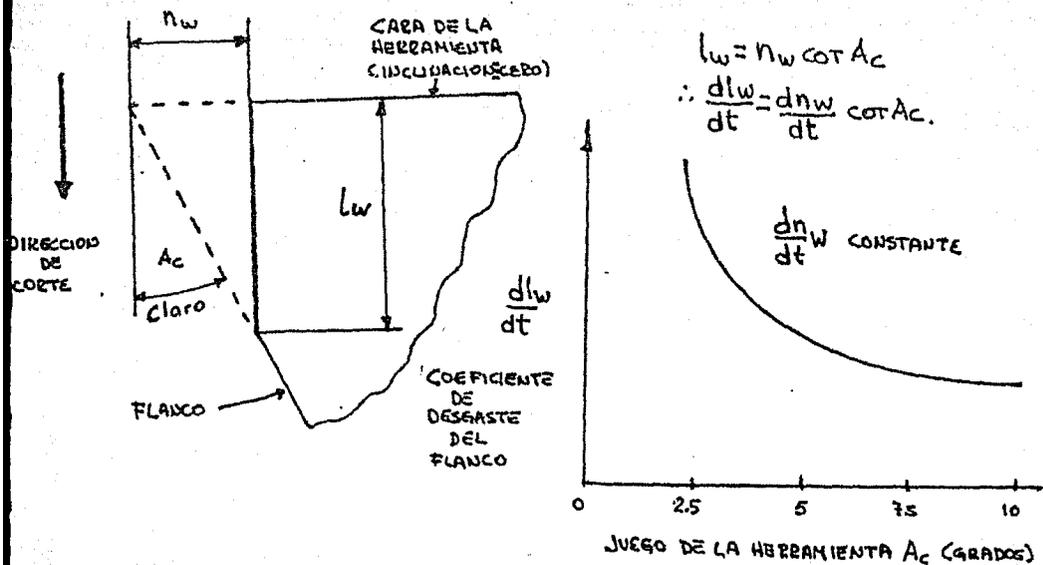


fig. 7 Efecto Teórico del Juego de la Herramienta en la Proporción de Desgaste de la Misma

### 3.6 El Efecto de la Velocidad de Corte y la Alimentación

En el corte de metales, el incremento de velocidad o alimentación resultan en un aumento en la temperatura de la cara de corte de la herramienta. A bajas velocidades se tiende a reducir la fricción - en la interfase de la viruta-herramienta y por lo tanto, tiende a - prevenir la formación del borde acumulado, y a altas velocidades aumenta la cantidad de desgaste por craterización. Los efectos relativos por cambios de velocidad y alimentación se muestran mediante gráficas preparadas por TRENT, de los cuales se ven dos -

ejemplos de la figura 8; estos enseñan que para determinada combinación de material de trabajo y herramienta, los límites de velocidad y alimentación en donde la formación de borde acumulado y una rápida craterización tiene lugar bajo severas condiciones, una falla de la herramienta ocurre rápidamente debido a una deformación en el filo de la misma, como resultado de las altas temperaturas y esfuerzos. Dichas gráficas son sumamente útiles cuando se comparan con comportamientos de diferentes materiales. Los resultados en la figura 8, enseñan por ejemplo, cuando se agrega titanio a una herramienta de carburo de tungsteno, la craterización sucede a unos límites altos de velocidades y alimentación, cuando se maquinan aceros al carburo. Así los límites útiles de velocidades y alimentación están aumentados por el uso de materiales de herramienta de tungsteno-titanio-carburo, para maquinar aceros al carbono.

Sin embargo, no es posible indicar en las gráficas el efecto de velocidad y alimentación en la relación de desgaste del flanco de la herramienta de corte. Es razonable asentar que en general, para un aumento en la velocidad de corte resulta un aumento en la relación de desgaste del flanco de la herramienta, el cual es presumiblemente debido al consecuente aumento de la temperatura y velocidad de fricción en esta zona.

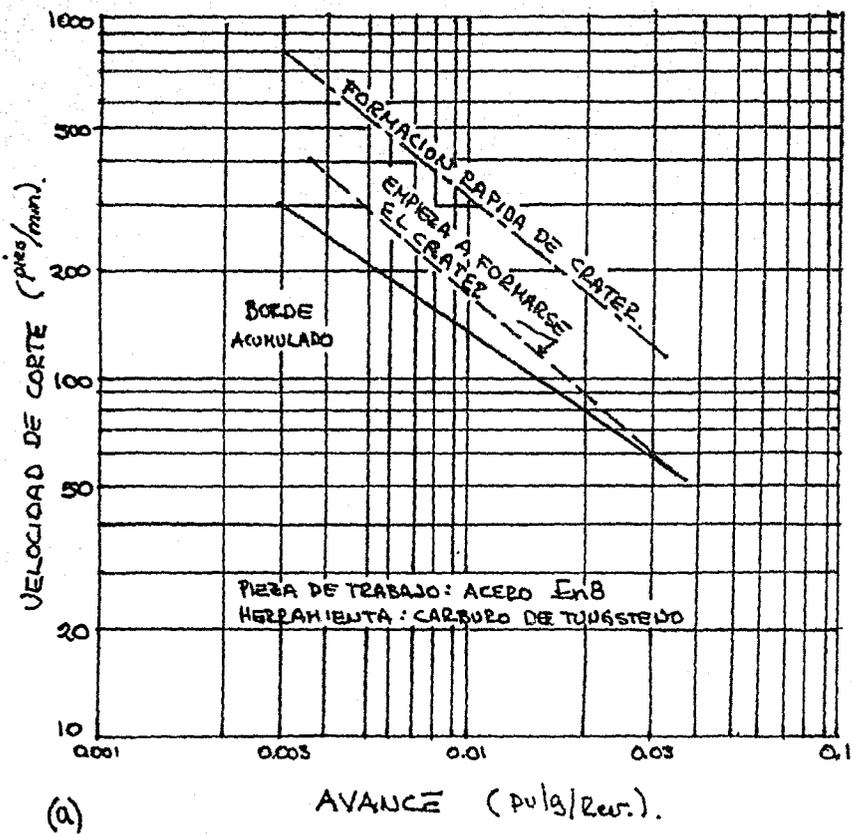


fig. 8 Carta de Desgaste para Herramientas de Carburo de Tungsteno (después de Trent)