



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

**INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TERMICO  
SOBRE LA MAQUINABILIDAD DE UNA  
FUNDICION GRIS.**

**TESIS MANCOMUNADA**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

PRESENTAN

**RAUL VAZQUEZ GONZALEZ**  
**MAXIMINO HERNANDEZ HIDALGO**



## **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 está 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.

# Í N D I C E

	Pág.
I INTRODUCCIÓN	I
II CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA	1
III GENERALIDADES DEL PROCESO DE CORTE	9
IV MATERIALES EXPERIMENTALES	30
V PROCEDIMIENTO	35
VI RESULTADOS Y CONCLUSIONES	39
VII CONCLUSIONES	57
VIII BIBLIOGRAFÍA	58



## I INTRODUCCIÓN

El trabajo que se presenta a continuación analiza el comportamiento de una fundición de hierro grís al ser sometido a un proceso de corte con generación de viruta. Por lo anterior, se pretende introducir a la teoría del corte de los metales para relacionar ésta con lo experimental

El trabajo se divide en tres partes básicamente:

- 1 Bases teóricas
- 2 Experimentación
- 3 Resultados y conclusiones

La primera parte se divide en dos capítulos. En el primero se hace una clasificación general de los procesos de manufactura metalúrgicos y una breve descripción de cada uno de ellos. En el segundo capítulo, se establecen las generalidades teóricas del proceso de maquinado, parte importante para un buen entendimiento de éste.

La segunda parte comprende los capítulos que se refieren a los materiales y equipo con los cuales se realizó el trabajo. Así como el procedimiento experimental.

La tercera y última parte presenta los resultados obtenidos en la práctica y las conclusiones con base en el análisis de los datos.

## II CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA METALÚRGICOS

Existen diversos métodos para que las piezas fabricadas obtengan su forma final. Generalmente, los procesos de manufactura metalúrgicos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- 1 Fundición
- 2 Tratamientos térmicos
  - térmicos
  - termoquímicos
- 3 Conformado mecánico
  - forja
  - laminación
  - extrusión
  - estirado, etc.
- 4 Unión
  - adhesivos
  - presión
  - soldadura
  - tornillos
  - remaches, etc.
- 5 Metalurgía de polvos
  - con viruta
    - torneado
    - cepillado
    - fresado
    - taladrado, etc.
  - sin viruta
    - químico
    - electroquímico
    - ultrasónico
    - descarga eléctrica
- 6 Maquinado

1. Fundición. En este tipo de proceso la producción de piezas metálicas se obtiene introduciendo metal líquido en un molde previamente preparado. El metal líquido permanece en el molde hasta su solidificación, obteniéndose de esta forma la pieza deseada (figura 2.1)
2. Tratamientos térmicos. Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento a que se someten los metales en estado sólido para controlar sus propiedades mecánicas alterando o modificando la microestructura; pero, sin cambiar su composición química.

Los tratamientos termoquímicos a diferencia de los anteriores, modifican la composición química de las piezas en una capa superficial con la adición de carbono, nitrógeno, azufre, boro, etcétera, denominándose por esta razón termoquímicos.

3. Conformado mecánico. En este tipo de procesos se obtiene la forma de la pieza deseada sin recurrir a cambios en el estado físico del material, aplicando esfuerzos en frío o en caliente hasta alcanzar deformaciones permanentes en las cuales, parte del metal es desplazado y su volumen conservado (figura 2.2)
4. Unión. La unión es acomodar entre sí dos o más piezas en forma temporal o permanente. La unión permanente es aquella que se realiza con el fin de crear una unidad desde el punto de vista constructivo con las varias piezas entre las que se efectuó el ensamble. Por unión temporal se entiende aquella que en cualquier momento se puede hacer desaparecer con medios sencillos y efectuarse de nuevo.

5. Metalurgia de polvos. Se llama metalurgia de polvos a un proceso por el cual se obtienen productos compactando polvos finos de metal para darles la forma deseada, usualmente en un molde de metal, bajo presiones considerables y calentando después el polvo comprimido durante algún tiempo a una temperatura abajo del punto de fusión del constituyente más abundante (figura 2.3)
6. Maquinado. Los procesos de maquinado se dividen en dos grandes grupos:
- a) Procesos de maquinado sin generación de viruta; y
  - b) Procesos de maquinado con generación de viruta.
- a) Maquinado sin generación de viruta. El desarrollo y creciente importancia de metales que resultan difíciles de maquinar con los procedimientos tradicionales, y el deseo de posibilitar el maquinado después de darles configuraciones complejas, han conducido al desarrollo de una serie de procesos mediante los cuales se produce la remoción de metal sin arranque de virutas. Tales procesos han sido en la actualidad de considerable importancia comercial.
- b) Maquinado con generación de viruta. En este tipo de procesos denominados comúnmente operaciones de corte, la separación del material se realiza mediante la aplicación de fuerzas que conducen el material al límite de su región plástica donde se produce la ruptura.

La importancia de estos procesos radica en que prácticamente más del 80% de las piezas fabricadas requieren maquinado en algún momento de su manufactura. Este maquinado puede ser desde relativamente tosco y de poca precisión

como la limpieza de piezas de fundición o forja, hasta trabajos donde se requiere un acabado de alta precisión como la generación de superficies con buena tolerancia dimensional y con frecuencia con una geometría compleja. La cantidad de remoción de metal durante el maquinado puede variar hasta aproximadamente el cincuenta por ciento de la pieza de trabajo, dependiendo de la calidad de superficie y la precisión dimensional requerida (figura 2.4 a,b,c y d)

El tema que se desarrolla en el presente trabajo es un proceso de maquinado con generación de viruta. En el siguiente capítulo se dan a conocer los fundamentos teóricos del proceso, los cuales son primordiales para un buen entendimiento del mismo.

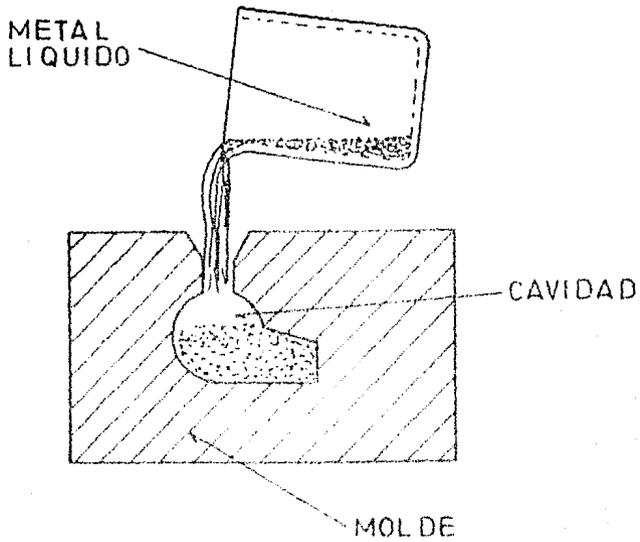


FIG 2.1 FUNDICION

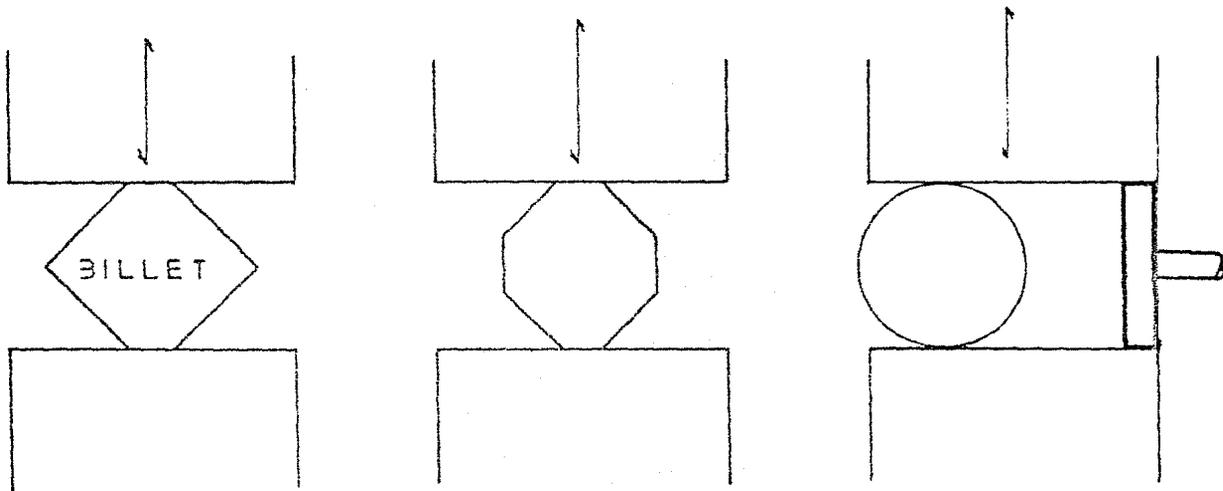


FIG. 2.2 FORJADO DE UN BILLET CON MARTILLO MECANICO  
PARA OBTENER UN EJE

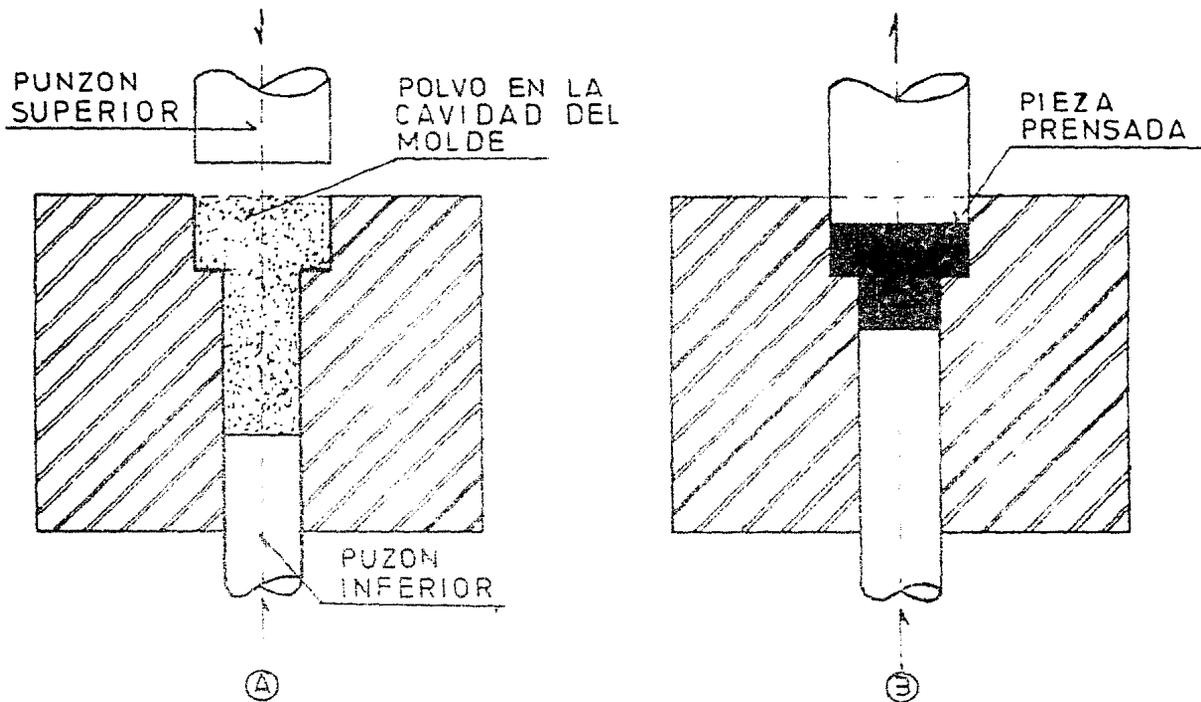


FIG. 23 COMPACTACION DE POLVO METALICO

A) Posicion de carga

B) Complemento del compactado

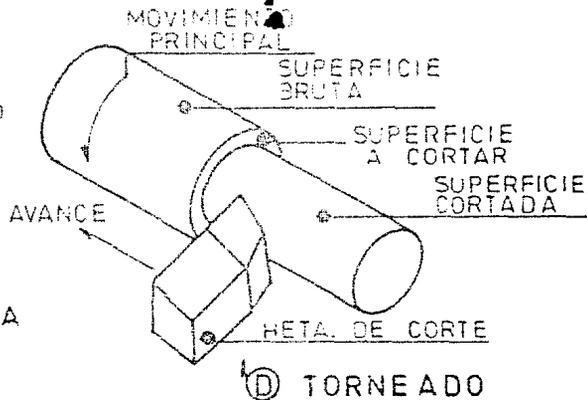
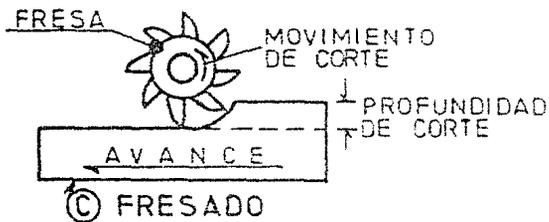
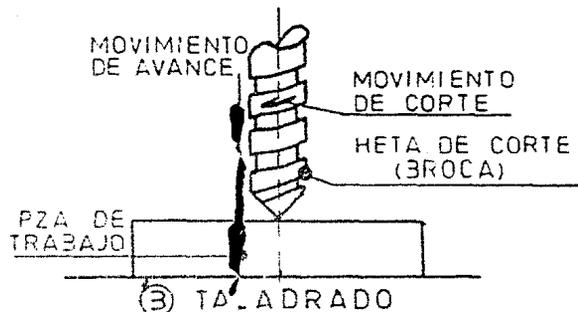
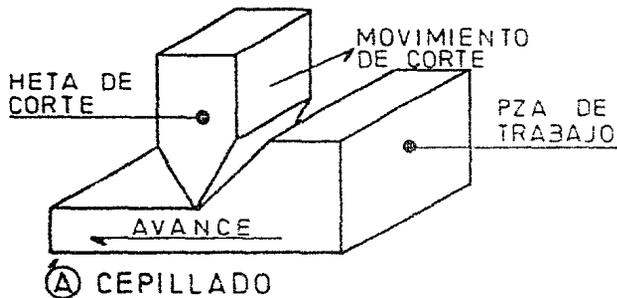


FIG. 2.4 PROCESOS DE MAQUINADO CON GENERACION DE VIRUTA

### III GENERALIDADES DEL PROCESO DE CORTE

Las operaciones de maquinado se basan completamente en el corte de metal por medio de una herramienta cortante.

El proceso de corte involucra la generación de virutas como resultado del movimiento relativo de la herramienta y el material de trabajo. El mecanismo básico involucrado en la formación de virutas consiste en la deformación cortante del material de trabajo y su ruptura inmediatamente delante del borde cortante de la herramienta.

El movimiento relativo entre la herramienta y la pieza de trabajo causa una compresión del material cerca de la herramienta e induce la deformación de cizallamiento o cortante. Esta deformación plástica ocurre en una zona angosta del orden de 0.025 mm o menos, siendo muy aproximada a un plano que se extiende desde la punta del corte de la herramienta a la superficie de la pieza de trabajo, plano 0-0 (figura 3.1)

La figura 3.1 muestra que, como consecuencia de la fuerza compresiva ejercida por la herramienta al avanzar contra la pieza de trabajo, el metal de esta última es comprimido y cizallado de tal forma a lo largo del plano de corte o de cizalladura, que esta acción transforma el metal de espesor  $t$  (espesor de viruta no deformada) y ancho  $w$ ; a una viruta de espesor  $t_c$ , la cual se desliza a lo largo de la cara de la herramienta. Esta deformación por cizallamiento ocurre por un proceso análogo al desplazamiento de un paquete de cartas, con cada carta deslizándose ligeramente sobre la cara adyacente de otra como se observa en la figura 3.2.

Para lograr sacar una viruta, debe tenerse en consideración la existencia de fuerzas de compresión y de cizalladura que al actuar conjuntamente logran una estructura severamente deformada en

el material de trabajo. De esta forma, los niveles de deformación durante el corte en el material delante de la herramienta, son tales que causan deformación plástica a través de la zona de cizallamiento y que superan la resistencia del material y que dan como resultado que el material falle cerca del borde cortante. La tensión asociada con la interacción de la herramienta sobre el material de trabajo para la formación de la viruta, también causa distorsión en la pieza y entonces, la superficie maquinada no es suave (tersa); pero si en cambio desgarrada y fragmentada.

Como consecuencia de la tensión asociada involucrada en el mecanismo de formación de virutas, una cantidad considerable de calor es generado en la zona de corte. Algunos estudios indican que una operación típica de corte desarrolla alrededor del 75% de calor causado por la deformación y cizallamiento del metal y cerca del 25% por fricción. El calor generado se manifiesta en la obtención de temperaturas elevadas en la zona de corte (especialmente en las virutas y en la herramienta de corte, la cual esencialmente está en contacto continuo con la pieza de trabajo durante el corte). Aunque varía considerablemente, típicamente alrededor del 60 al 80% del calor, es elevado o alejado del sistema por la viruta, en tanto que alrededor de un 15% es disipado por la herramienta, y del 5 al 25% por la pieza de trabajo.

Existen varios factores interrelacionados que afectan la formación de virutas de entre ellos los más importantes son:

a) Las propiedades del material de trabajo

Existen dos propiedades básicas del material de trabajo que afectan directamente la formación de virutas. Ellas son: LA DUREZA Y LA DUCTILIDAD.

Los materiales de alta dureza mecánica requieren mayores

fuerzas de la herramienta, y son muy frágiles, lo que provoca mayor deflexión de la herramienta y de la pieza de trabajo.

Un aumento del trabajo realizado y del rozamiento producirán mayor cantidad de calor generado y de esta forma también se disminuirá la vida útil de la herramienta y la calidad de la superficie obtenida. La ductilidad del material de trabajo también está relacionada con la formación de virutas durante el corte, los materiales frágiles como el hierro gris, no poseen la ductilidad necesaria para producir una deformación plástica apreciable de la viruta, y el metal comprimido delante de la herramienta presenta una fractura frágil a lo largo de la zona de corte produciendo fragmentos pequeños a este tipo de virutas así formadas se les llama: "DISCONTINUAS" o "SEGMENTADAS". En contraste, materiales dúctiles como los aceros de bajo contenido de carbono, forman virutas fuertemente deformadas en las que al no producirse falla éstas son largas y espirales a las cuales se les llama "FILAMENTARES" o "CONTINUAS". Una variación de este tipo de virutas que se encuentran frecuentemente en el maquinado de materiales dúctiles, está relacionado con el llamado "BORDE DE ACUMULACIÓN" sobre la herramienta costante. La alta temperatura local y las presiones extremas en la zona de corte provocan la adhesión del material de la viruta continua al borde de la herramienta produciendo un borde de acumulación. Lo anterior da lugar al tipo de virutas llamado "CONTINUA CON BORDE DE ACUMULACIÓN".

El tipo de virutas más deseado en los procesos de maquinado es una de tipo intermedio entre las virutas de origen frágil y las de origen dúctil (tipos de virutas, figura 3.3)

#### b) Geometría de la herramienta

Los elementos geométricos están relacionados con la forma-

ción del borde cortante y con la dirección del corte. Por tanto, la forma y posición de la herramienta relativas a la pieza de trabajo tienen una influencia importante en las características de un corte específico, la inclinación verdadera de la herramienta con respecto al material de trabajo será la inclinación de la cara de la herramienta en el borde cortante, medida en la dirección en que la viruta fluye la inclinación verdadera de una herramienta de corte tiene una influencia fundamental sobre la formación de virutas, determinando en gran medida su pendiente relativa al grado de compresión y la declinación de la zona de corte sobre el material delante del borde cortante; un ángulo de inclinación pequeño producirá una alta compresión, y se creará una viruta gruesa caliente y altamente deformada. Un ángulo de inclinación mayor, reduce la compresión y se producirá una viruta más delgada, menos deformada y más fría.

Debido a que la formación de virutas durante el corte del metal involucra altas tensiones locales, el material de la herramienta debe combinar: resistencia, tenacidad y dureza.

Varios materiales que exhiben tales propiedades en diferente grado han sido desarrollados para usarse en herramientas de corte, por ejemplo: estelita, cerámicos, carburos, aceros de alta velocidad, y algunas veces en condiciones especiales, el diamante. El esquema de la figura 3.4 detalla la forma y terminología descriptiva para una herramienta típica de un solo filo para operaciones de corte.

### c) Interacción entre la herramienta y el metal durante el corte

Este aspecto referido normalmente a las diferentes operaciones de maquinado desarrolladas por diferentes tipos de má-

quinas-herramienta, a pesar de existir diferencias en la construcción, movimientos y terminología. La consideración básica para cada caso es la relación pieza-herramienta durante el corte. Esta relación debe ser descrita generalmente por los siguientes factores: forma de la herramienta, posición, velocidad de corte, profundidad de corte y avance.

Con el fin de obtener las condiciones óptimas de maquinado en una pieza de metal, se le da a dicho material cierto tratamiento en función de las características químicas y mecánicas que presente.

Lo que se pretende básicamente es lograr la forma de viruta más adecuada en diferentes condiciones de corte y con material en diferente estado microestructural. Existen tres formas de encontrar la estructura adecuada del material para ser cortado, éstas son:

- 1 La presencia de un constituyente que al existir como partículas aisladas en la microestructura tiene el efecto de concentrar las tensiones en la zona donde la punta de corte toca el material produciendo grietas; por lo tanto, una grieta minúscula viajará desde la punta de corte a la partícula en cuestión, provocando la reducción del requerimiento de la potencia de la máquina. Aún más, debido a la discontinuidad introducida por las partículas, la viruta será discontinua en lugar de larga y espiral, obtenida cuando un material dúctil es maquinado. De hecho, algunos de los materiales de corte libre, tales como latones con plomo, etcétera, la viruta tiende a pulverizarse.
- 2 Un tratamiento térmico conveniente antes de llevar el material a la operación de maquinado, por ejemplo, el

normalizado en los aceros de bajo carbón, en donde se producen pequeñas zonas de perlita, la cual rompe la continuidad de la ferrita provocando que sean concentradoras de tensiones en el maquinado.

- 3 Un trabajado en frío antes del maquinado. Esta operación nos lleva a mejorar su maquinabilidad, debido a que su resistencia a ser deformado se incrementa con lo que aumenta su dureza y por lo tanto su fragilidad.

### MECÁNICA DEL MAQUINADO

La herramienta de un solo punto está caracterizada por un ángulo de incidencia ( $\alpha$ ), un ángulo de claro lateral ( $\theta$ ) y un ángulo de corte ( $\omega$ )  $\alpha + \theta + \omega = 90^\circ$ ; la cara de incidencia de la herramienta sobre la cual se aplican las fuerzas impuestas sobre ésta, crean un intenso cizallamiento sobre el metal al ir desprendiendo la viruta y al mismo tiempo ir deformando el metal desde un espesor de viruta no deformada ( $t$ ), a la viruta deformada con espesor ( $tc$ ); de esta forma, el radio de espesor de la viruta o radio de corte está dado por la relación:  $r = \frac{t}{tc}$ . La creación de la viruta somete al metal a grandes deformaciones plásticas por cizallamiento.

A velocidades de deformación arriba de  $10^3$  s<sup>-1</sup>, como se muestra en la figura 3.5, existe una región localizada de intenso cizallamiento en la vecindad OA; pero, por simplificación, esta región es usualmente representada por un plano de corte OA bien definido, el cual se presenta a un ángulo de cizallamiento ( $\phi$ ); la región entre el ángulo de incidencia, el ángulo de corte y el radio de espesor de viruta, puede ser derivado de la figura 3.5 en donde:

$$r = \frac{t}{tc} = \frac{OA \operatorname{sen}(\phi)}{OA \operatorname{cos}(\phi - \alpha)} \quad (\text{III.1})$$

resolviendo para ( $\phi$ )

$$\tan (\phi) = \frac{r \cos (\alpha)}{[1 + \frac{r}{s} \sin (\alpha)]} \quad (III.2)$$

De aquí que el radio de espesor de viruta determinado después del corte puede ser empleado para establecer el ángulo de corte existente durante la operación de maquinado.

Si se asume que la deformación en el corte es un simple cizallamiento de un bloque, podemos estimar la deformación por cizallamiento en maquinado, con ayuda de la figura 3.6. Un elemento originalmente definido por ABCD es deformado a EBCF. La deformación por cizallamiento ( $\gamma$ ) es la cantidad desplazada por el cizallamiento dividida por la distancia perpendicular entre los planos de cizallamiento

$$(\gamma) = \frac{AE}{OB} + \frac{OE}{OB} = \tan (\phi + \alpha) + \cot (\phi) \quad (III.3)$$

Para virutas que no sean espirales, existen tres velocidades que deben ser especificadas en el corte: la velocidad de corte  $V$  es la velocidad de la herramienta relativa a la pieza de trabajo; la velocidad de la viruta  $V_c$ , es la velocidad de la viruta relativa a la cara de la herramienta; la velocidad de cizallamiento  $V_s$  es la velocidad de la viruta relativa a la pieza de trabajo. A partir de la continuidad de la masa:  $Vt = Vc = t$ , de tal forma que:

$$r = \frac{t}{t_c} + \frac{V_c}{V} \quad (III.4)$$

Los tres componentes de la velocidad dan la relación cinemática mostrada en la figura 3.7 a partir de la cual podemos ver, que la suma del vector velocidad de corte y la cizallamiento, de tal forma que puede mostrarse que:

$$V_s = \frac{V \cos (\phi)}{\cos (\phi + \alpha)} \quad (III.5)$$

Conociendo  $V_s$ , podemos establecer la velocidad de deformación por cizallamiento en el corte:

$$\dot{\gamma} = \frac{d(\gamma)}{dt} = \frac{V_s}{(\zeta)} \text{ max.} \quad (\text{III.6})$$

Donde  $(\zeta)$  max. es la estimación del valor máximo del espesor de la zona de cizallamiento  $(\zeta)$  max. =  $10^{-3}$  pulgadas (empleando valores reales de  $(\phi) = 20^\circ$ ,  $(\alpha) = 5^\circ$ ,  $V = 600$  fpm, y  $(\zeta)$  max =  $10^{-3}$  pulgadas), podemos calcular  $(\dot{\gamma})$  que aproximadamente resulta igual a  $1.2 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$

Ahora estamos listos para considerar las fuerzas y tensiones actuantes en el corte de metales. En la figura 3.8,  $P_r$  es la fuerza resultante entre la cara de la herramienta y la viruta, y  $P_r'$  es la resultante de la fuerza entre la pieza de trabajo y la viruta a lo largo del plano de cizallamiento.

Estas fuerzas pueden ser resueltas convenientemente en algunos sistemas de componentes. Una elección obvia es la componente tangencial  $F_t$  y la normal  $F_n$  a la cara de incidencia de la herramienta; sin embargo, la fuerza en el corte de metales frecuentemente es medida por un dinamómetro, el cual mide independientemente la fuerza horizontal de corte  $F_h$  y la vertical  $F_v$ . Puede demostrarse que:

$$\begin{aligned} F_t &= F_h \sin(\alpha) + F_v \cos(\alpha) \\ F_n &= F_h \cos(\alpha) - F_v \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

Si los componentes de las fuerzas de corte son conocidas, entonces el coeficiente de fricción en la cara de la herramienta estará dado por:

$$(\mu) = \tan(\beta) = \frac{F_t}{F_n} = \frac{F_v + F_h \tan(\alpha)}{F_h - F_v \tan(\alpha)} \quad (\text{III.8})$$

Finalmente, la fuerza resultante puede ser resuelta paralelamente  $F_s$ , y normal  $F_{ns}$  al plano de corte. En términos de componentes de fuerzas usualmente medidas:

$$\begin{aligned} F_s &= F_h \cos(\phi) - F_v \sin(\phi) \\ F_{ns} &= F_h \sin(\phi) + F_v \cos(\phi) \end{aligned} \quad (III.9)$$

La tensión de cizallamiento por medio de  $F_s$  es dividida por el área del plano de corte  $A_s = \frac{bt}{\sin(\phi)}$

$$(\delta) = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F_s \sin(\phi)}{bt} \quad (III.10)$$

y la tensión normal es:  $(\sigma)$

$$\frac{(\sigma)}{A_s} F_{ns} = \frac{F_{ns} \sin(\phi)}{bt} \quad (III.11)$$

La tensión de cizallamiento es el primer parámetro que afecta los requerimientos de energía, valores razonables de esta tensión de cizallamiento han sido producidos por un módulo de dislocaciones, el cual correa a altas velocidades y grandes magnitudes de deformación. Cálculos de la tensión de cizallamiento en corte a partir de las mediciones de fuerza, requieren del conocimiento del ángulo de corte  $(\phi)$ . Este ángulo puede ser medido experimentalmente al frenar repentinamente el proceso de corte; sin embargo, sería conveniente tener la capacidad de predecir  $(\phi)$  a partir de otros parámetros más fáciles de determinar.

MERCHANT<sup>(1)</sup> asumió que el plano de corte estará en el ángulo en que se minimiza el trabajo dado para el corte, lo que resulta en la expresión:

$$(\phi) = \frac{\alpha}{4} + \frac{(\alpha)}{2} = \frac{(\beta)}{2} \quad (III.12)$$

Un análisis realizado por LEE y SHAFFER<sup>(2)</sup> empleando la teoría del campo de líneas de deslizamiento dio:

$$(\phi) = \frac{\alpha}{4} + (\alpha) - (\beta) \quad (III.13)$$

Estas relaciones muestran que para el mismo ángulo de incidencia, resulta menor fricción en un plano de cizallamiento mayor. Esto implica una viruta más delgada con una deformación menos severa, ya que la deformación por cizallamiento es menor, ver ecuación III.3. Un aspecto interesante del corte de metales es que la tensión promedio de cizallamiento en el plano de corte es esencialmente constante, independientemente de la velocidad de corte, profundidad del corte, alimentación y ángulo de incidencia, aunque la tensión normal varíe con las condiciones de corte.

Los efectos de cambiar ciertas condiciones de corte pueden ser derivados de las ecuaciones anteriores y de la figura 3.9.

Si se reduce la fricción en la cara de la herramienta de corte aumenta el ángulo de corte ( $\phi$ ) lo cual reduce la fuerza de corte. De aquí que aparentemente al reducir la fricción entre la viruta y la cara de la herramienta y con ello aumenta el ángulo de corte, habrá reducción en espesor de la viruta con acompañamiento en la reducción de la deformación del metal.

La figura 3.10 ilustra el efecto de aumentar el ángulo de inclinación de la herramienta. En 3.10 b, R, F,  $F_s$  son las mismas que en 3.10a; sin embargo, el aumento en el ángulo de incidencia en la figura 3.10b causa que el círculo de fuerzas sea girado en sentido de las manecillas del reloj alrededor de la punta de corte con lo que aumenta el ángulo de corte que resulta benéfico.

Cuando la herramienta utilizada, tiene un ángulo de incidencia muy alto, un borde acumulado se forma sobre la punta de la herramienta y produce que el ángulo de incidencia donde la viruta es formada sea mayor, con lo que se reducirá la compresión de la viruta, y ésta, realmente, no tocará la cara de la herramienta, lo que causará menor generación de calor, y que la viruta sea completamente continua. Una viruta de tipo continuo causa problemas de disposición de las mismas, y al parecer sólo será apropiado para ciertas operaciones de corte.

Empleando un procedimiento similar al de la figura 3.10, puede ser mostrado que utilizando ángulos de incidencia pequeños, se causa que las fuerzas de corte se incrementen. sin embargo, ángulos de incidencia pequeños regularmente son ventajosos debido a la mayor resistencia de la herramienta y como consecuencia cortes más gruesos pueden ser efectuados cuando se usan herramientas de carburo o cerámicas, las cuales soportan mayores temperaturas, aunque la mayor ventaja normalmente no se puede sacar de usar ángulos de incidencia pequeños con estos materiales de herramienta, a menos que en las máquinas en que sean empleados, tengan una resistencia y potencia adecuadas para compensar las grandes fuerzas de corte.

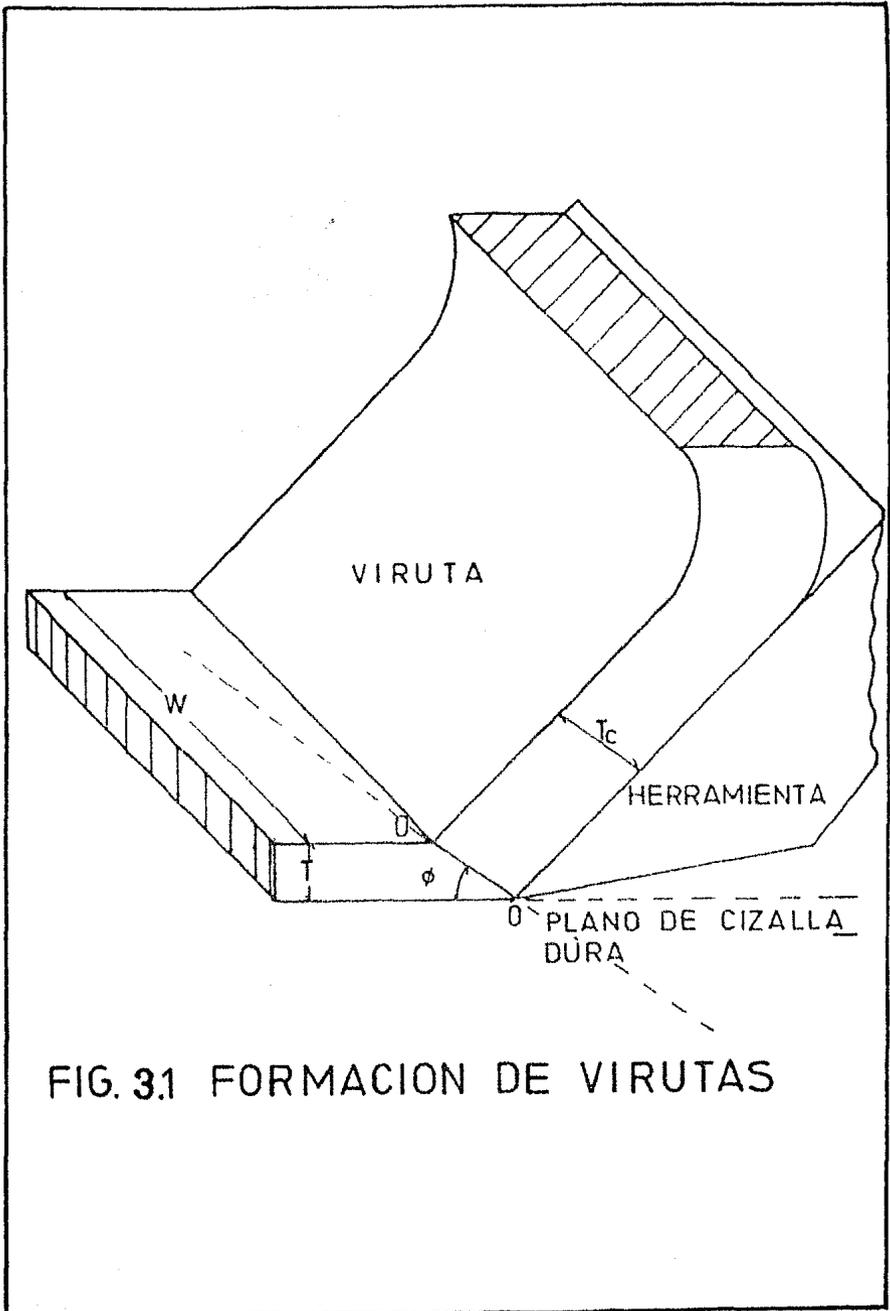


FIG. 3.1 FORMACION DE VIRUTAS

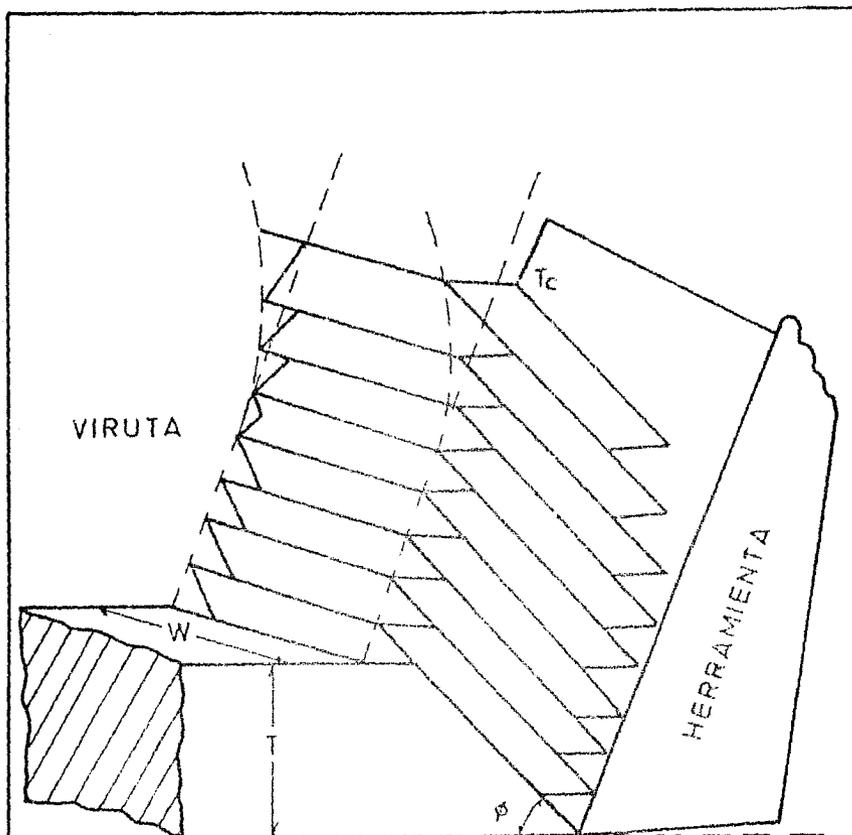
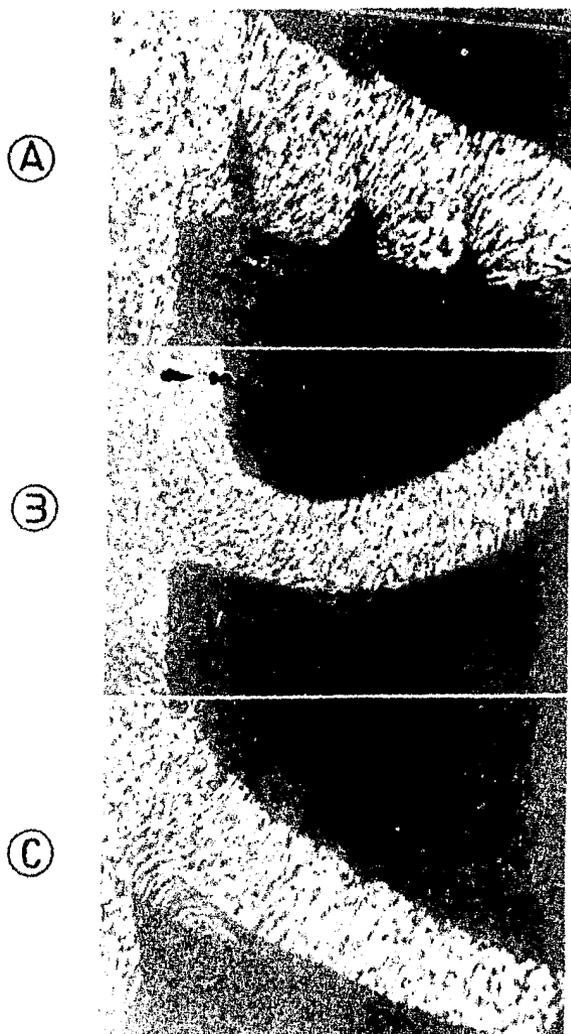
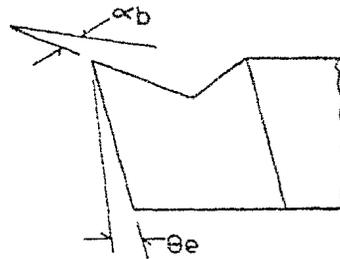
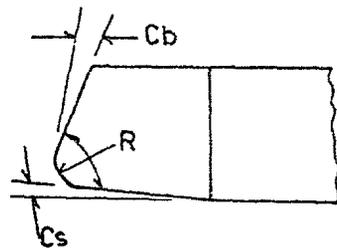
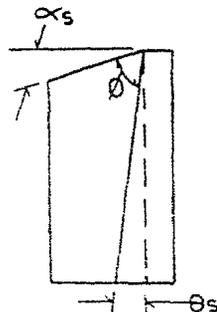
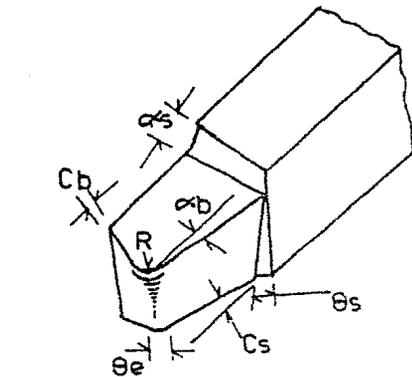


FIG. 3.2 REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL MECANISMO DE FORMACION DE VIRUTAS



**FIG. 3.3 LOS 3 TIPOS DE VIRUTAS CARACTERISTICOS**

- A) SEGMENTADAS O DISCONTINUAS
- B) CONTINUAS O FILAMENTARES
- C) CONTINUAS CON BORDE DE ACUMULACION



- R-RADIO DE LA PUNTA DE CORTE
- $\theta_s$ -ANGULO DE CLARO LATERAL
- $\theta_e$ -ANGULO DE CLARO FRONTAL
- $\alpha_s$ -ANGULO DE INCIDENCIA LATERAL
- $\alpha_b$ -ANGULO DE INCIDENCIA FRONTAL
- $\phi$ -ANGULO DE ATAQUE
- $C_s$ -ANGULO DE VIAJE LATERAL
- $C_b$ -ANGULO DE VIAJE FRONTAL

FIG. 34 TERMINOLOGIA NORMALIZADA PARA HERRAMIENTA DE CORTE

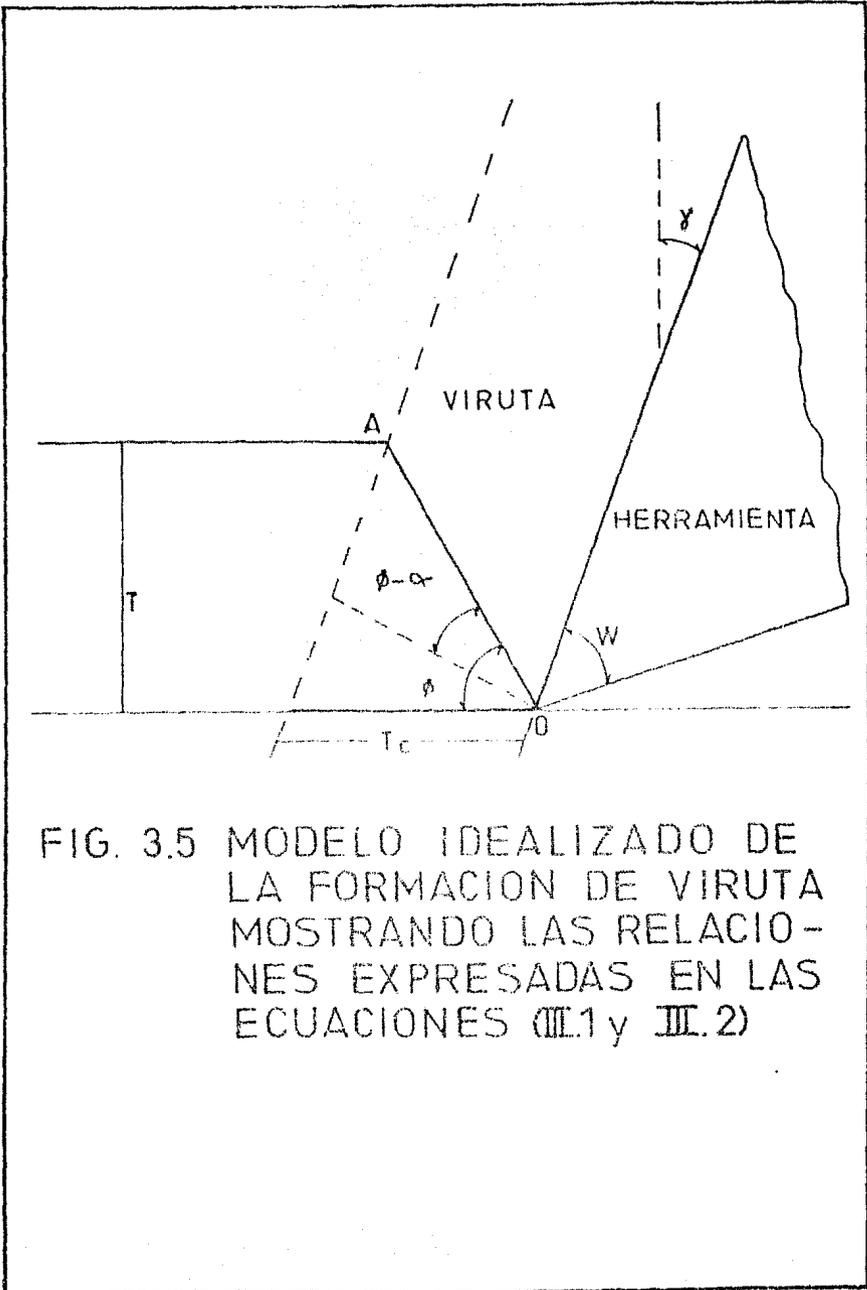


FIG. 3.5 MODELO IDEALIZADO DE LA FORMACION DE VIRUTA MOSTRANDO LAS RELACIONES EXPRESADAS EN LAS ECUACIONES (III.1 y III.2)

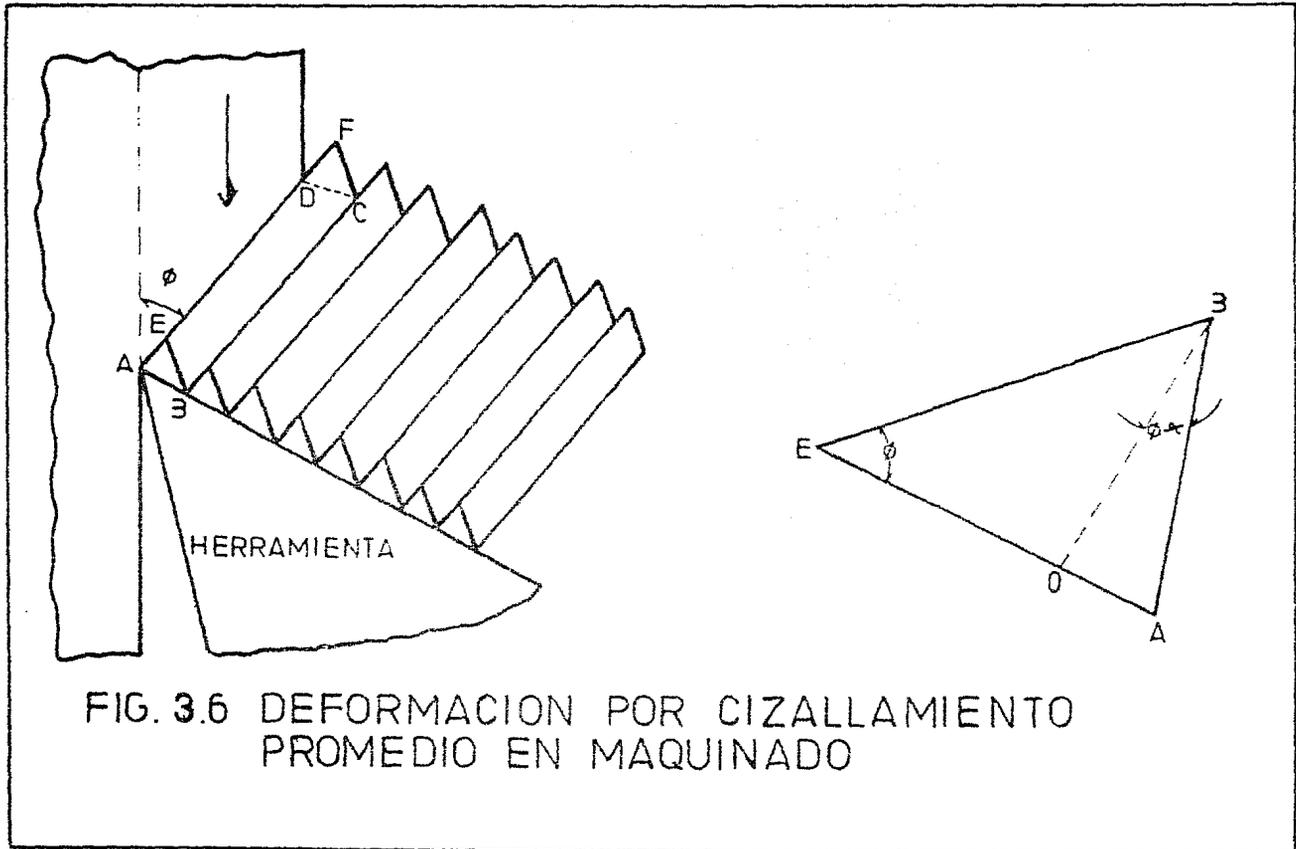


FIG. 3.6 DEFORMACION POR CIZALLAMIENTO PROMEDIO EN MAQUINADO

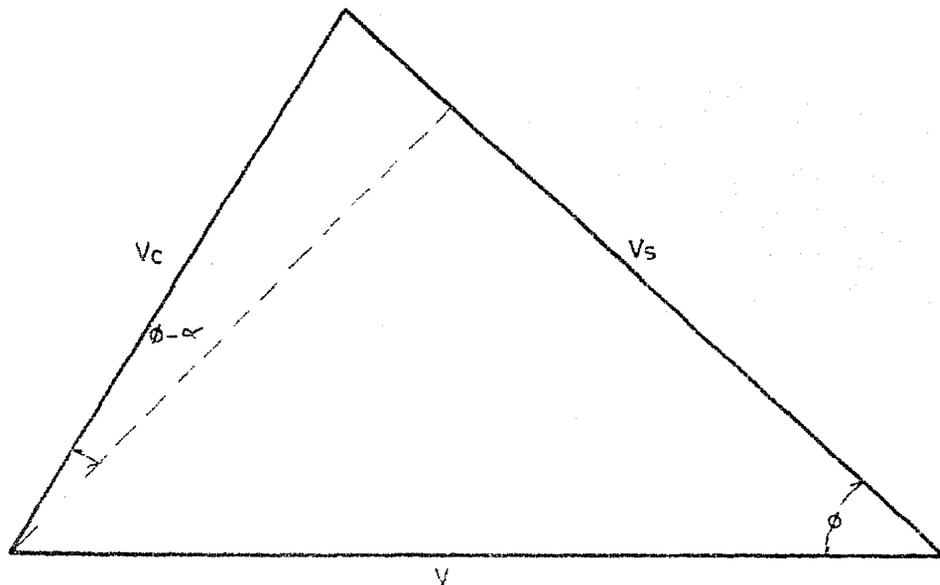


FIG 37 RELACION DE VELOCIDADES EN MAQUINADO ORTOGONAL

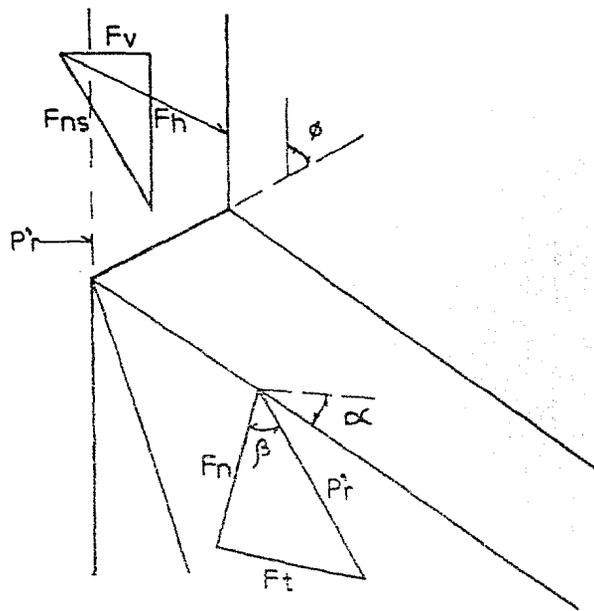
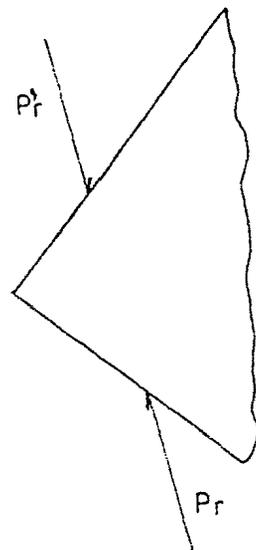


FIG. 3.8 a) FUERZAS SOBRE LA-VIRUTA EN EL PLANO DE CORTE Y LA CARA DE LA HERRAMIENTA



b) DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE UNA VIRUTA

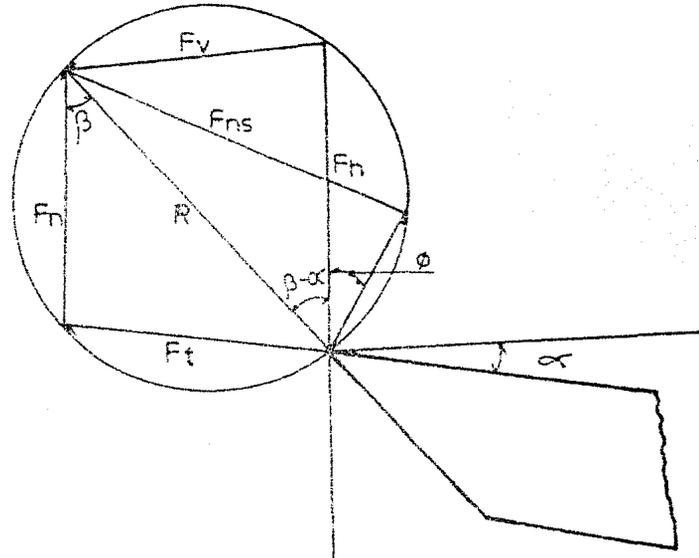


FIG.39 CIRCULO DE FUERZAS EN LA FORMACION DE VIRUTAS

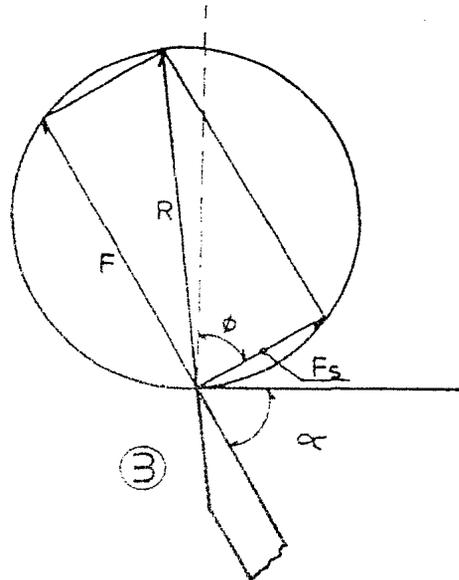
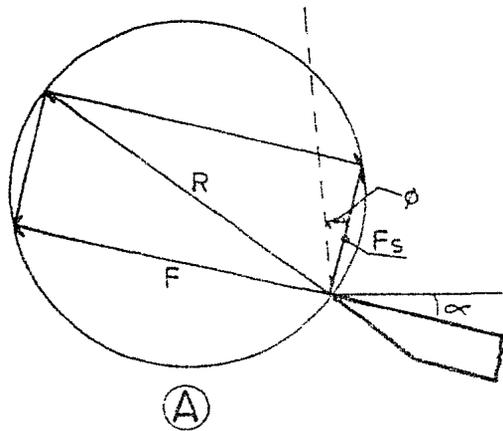


FIG. 3.10 EFECTO DE INCREMENTAR EL ANGULO DE INCIDENCIA SOBRE LAS FUERZAS DE CORTE Y EL PLANO DE CORTE

## IV MATERIALES EXPERIMENTALES

El material de trabajo utilizado fue hierro gris en forma de barra proporcionado por una compañía automotriz, el cual es empleado en la fabricación de monoblock para motores.

La composición química del material se muestra en la siguiente tabla:

TABLA I

## COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL EXPERIMENTAL

<u>ELEMENTO</u>	<u>COMPOSICION*</u>
Carbono -----	3.40%
Silicio -----	2.48%
Manganeso -----	0.67%
Cromo -----	0.27%
Fósforo -----	0.035%
Azufre -----	0.020%

El material presenta una estructura metalográfica de 99% de perlita, 1% de ferrita (el análisis metalográfico se expone en la tabla II) con una dureza de 73 HRB en el centro y de 81 HRB en la orilla Fig. 4.1

TABLA II

## ANÁLISIS METALOGRAFICO (Tipo y tamaño de grafito)

<u>TIPO</u>	<u>%</u>	<u>TAMANO #</u>	<u>%</u>
"A"	90	4	72
"B"	1	5	15
"C"	4	6	8
"D"	0	7	5
"E"	5		

\* Método de análisis (C y S por Leco; Si, Mn, Cr y P por adsorción atómica)

La muestra se encuentra en forma de dos barras de 3.175 cm de diametro y de 30 cm de longitud. A una de las barras se le dio un tratamiento térmico de recocido durante dos horas a 900°C y se dejó enfriar en el horno hasta la temperatura ambiente.

La otra barra se trabajó en condiciones de colada, es decir, en condiciones iniciales.

Para su observación metalográfica ambas muestras se atacaron con una solución saturada de cloruro férrico durante 30 segundos. Después de esto, para revelar la existencia de carburos, se les dio un ataque electrolítico con una solución saturada de picrato sódico durante 24 segundos y con 1.5 volts de corriente<sup>(3)</sup> (se utilizó acero inoxidable como cátodo y la muestra como ánodo).

Al observar la muestra de metal en condiciones de colada, se observa lo siguiente: en el centro hay láminas finas y delgadas en una distribución heterógena, en tanto que en la orilla se encuentra una distribución más uniforme de láminas de grafito pequeñas y láminas de grafito largas y gruesas (ver figuras 4.2a y 4.2b). Por lo tanto, la estructura del metal es más homogénea en tanto más se acerca a la orilla.

En la muestra con tratamiento térmico observamos que las láminas de grafito son largas y finas, lo mismo en el centro que en la orilla, y que las láminas de grafito se encuentran homogéneamente distribuidas en cuanto a tamaño se refiere (figuras 4.3a y 4.3b). La dureza en esta muestra fue de 66 HRB, lo mismo en el centro que en la orilla, es decir, que con el tratamiento térmico, además de uniformizar la microestructura, también se homogeneizó y disminuyó la dureza.



Fig. 4.1 Estructura metalográfica del material en condiciones de colada. Ataque con nital 5 100 X.



a)

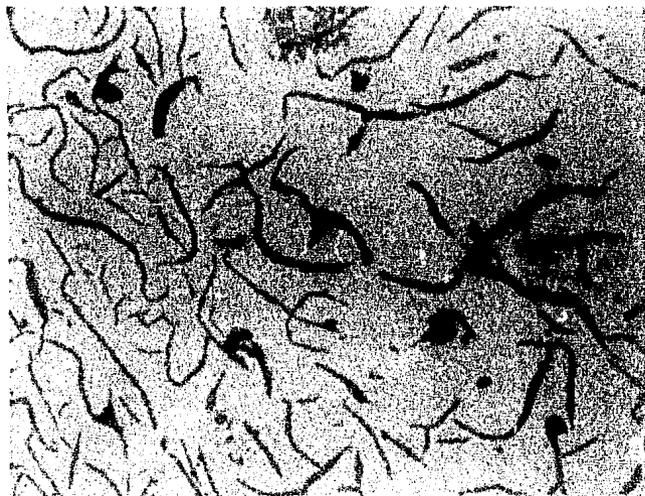


b)

Fig. 4.2 Estructura de la muestra en condiciones de colada a) centro, b) orilla. Sin ataque 200 X.



a)



b)

Fig. 4.3. Estructura de la muestra con tratamiento térmico a) centro, b) orilla. Sin ataque 200 X.

## V PROCEDIMIENTO

Las pruebas de corte realizadas se efectuaron en un torno automático marca FRAVER modelo CE-1200F con velocidad variable.

El corte de las muestras se realizó en tiempos fijos de 30 segundos cada uno para lograr dos fines:

- 1 Dar lugar a que el proceso se estabilizará y
- 2 Para evitar que la herramienta tuviese un desgaste tal, que cambiara su geometría cesando de cortar eficientemente.

Las pruebas fueron efectuadas a velocidades extremas, con el propósito de acelerar la prueba. Estas velocidades se consideran excesivas para maquinar materiales frágiles como es el caso del hierro grís.

Las pruebas se realizaron sin lubricante (en seco). La velocidad de alimentación o avance de la herramienta de corte a lo largo de la barra fue de 0.26 mm (0.01 pulgadas) por revolución y una profundidad de corte de 1.27 mm (0.05 pulgadas). Las características anteriores se utilizaron para todas las pruebas.

Las velocidades de corte empleadas, se muestran en la tabla III tomando en cuenta que se trabajó con diámetro constante de la barra.

TABLA III  
VELOCIDADES DE CORTE EMPLEADAS

RPM	Muestra con T. térmico	Muestra sin T. térmico	Vel. de corte
196	*	*	17.24 m/min.
287	-	-	25.24 m/min.
448	*	-	42.22 m/min.

La velocidad de corte se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$V_c = \frac{PDN}{1000}$$

Donde:

- V<sub>c</sub> = velocidad de corte
- D = diametro de la barra
- N = número de revoluciones por minuto del husillo del torno
- P = constante "Pi" (3.1416)

Durante el corte se utilizó un dispositivo<sup>(4)</sup>, el cual suspende con rapidez el corte, permitiendo que la viruta formada se mantenga adherida a la pieza de trabajo, logrando con esto poder evaluar el proceso de corte.

La herramienta con la cual se efectuó el corte, es una herramienta con pastilla de carburo de tungsteno (designación C 10); este tipo de herramientas permite mecanizar materiales duros con altas velocidades de corte. Entre sus características principales se pueden citar las siguientes:

- dureza en caliente hasta 900°C
- alta resistencia a la compresión
- excelente resistencia al desgaste y a la corrosión
- conductividad térmica igual o superior a la de los aceros
- buena resistencia de choque

La herramienta presenta la siguiente geometría (figura 5.1):

- ángulo de ataque 83 grados
- ángulo frontal lateral 0 grados
- ángulo de viaje lateral 0 grados

ángulo de incidencia frontal 7 grados

ángulo de incidencia lateral 3 grados

ángulo de claro frontal 10 grados

ángulo de claro lateral 5 grados

Para la observación de las virutas generadas después del proceso de corte se utilizó microscopio electrónico de barrido.

Para la observación detallada de la estructura y deformación que presentan las virutas después del corte, se pasaron al microscopio metalográfico.

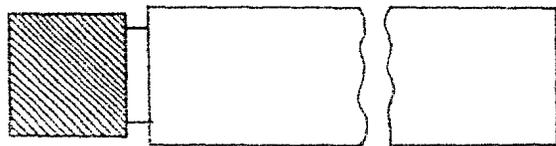
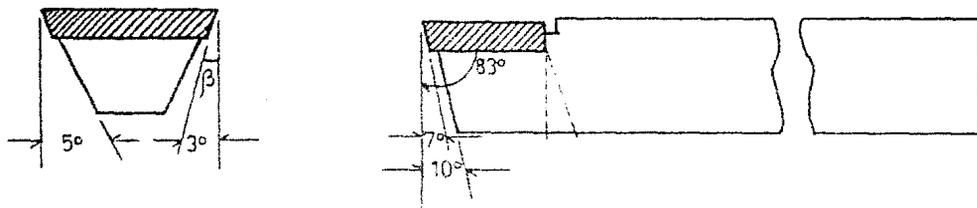
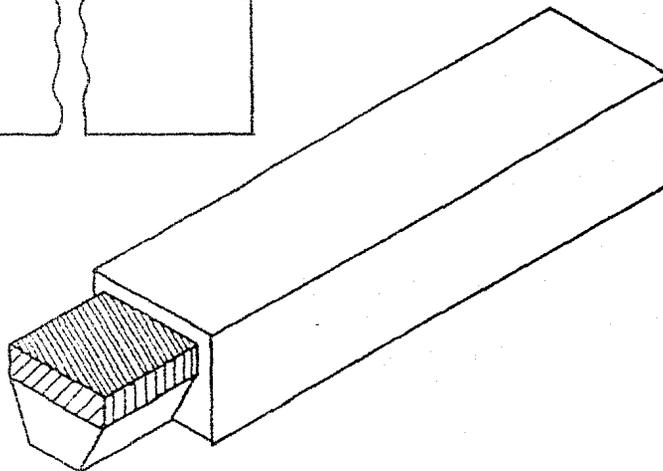


FIG. 5.1 GEOMETRIA DE LA HERRAMIENTA DE CORTE



## VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### RESULTADOS

En las muestras obtenidas durante el proceso de maquinado de la fundición de hierro grís, fue posible después de un examen metalográfico observar la deformación que sufre este material en la operación de corte.

En las diferentes pruebas efectuadas existe la formación de un borde acumulado en la punta de la herramienta de corte.

Se pudieron evaluar solamente tres (dos con tratamiento térmico y una en condiciones de colada)\* de las cuatro muestras obtenidas en el proceso, debido a que una de ellas fue deteriorada en el momento de su observación en el microscopio electrónico de barrido.

A continuación se da una descripción de cada una de las muestras obtenidas:

#### MATERIAL EN CONDICIONES DE COLADA

Esta muestra fue obtenida con una velocidad de corte de 17.24 m/min (196 RPM). En la figura 6.1a, se observa la microestructura deformada de la viruta durante el corte. La figura 6.1b muestra el diagrama esquemático del proceso en el plano de cizallamiento; y la figura 6.1c presenta la viruta obtenida en el momento de la suspensión rápida del corte.

Observando las figuras 6.1a, 6.1b y 6.1c, notamos que la viruta obtenida es pequeña, existe un borde acumulado pequeño en dimen-

\*NOTA: En realidad se trabajó con 6 muestras como se menciona en la tabla III, pero, a causa de la gran fragilidad que presenta el material y la longitud tan pequeña de las virutas obtenidas no fue posible efectuar el estudio completo de todas las muestras.

siones y que el acabado superficial es pobre; esto se debe a que el corte se efectúa desgarrando la superficie, que produce por lo tanto un mal acabado.

### MATERIAL CON TRATAMIENTO TÉRMICO

Muestra obtenida a una velocidad de 17.24 m/min (196 RPM). Las figuras 6.2a, 6.2b y 6.2c ilustran la viruta observada en un microscopio metalográfico, el diagrama esquemático de la misma viruta en el plano de cizallamiento y físicamente la viruta en el momento de la suspensión rápida del corte respectivamente.

En esta muestra se observa una similitud con el caso anterior en lo que se refiere al acabado superficial y al tamaño de viruta; pero existe una diferencia en cuanto al borde acumulado, siendo en este material de mayor magnitud. Esto puede ser a causa del ablandamiento producido por el tratamiento térmico a que se sometió la pieza de trabajo.

Viruta obtenida con una velocidad de corte de 42.22 m/min (448 RPM). Las figuras 6.3a, 6.3b y 6.3c muestran el proceso de maquinado completo producido en estas condiciones.

Observando las tres figuras 6.3a, 6.3b y 6.3c, se nota un borde acumulado muy insignificante, tendiendo a ser una zona de flujo puro. El acabado superficial es bueno y el tamaño de viruta es grande en comparación con las obtenidas con velocidades inferiores.

### DISCUSIÓN

Con base en los resultados obtenidos, es necesario conocer algunas características básicas en lo referente a la formación del borde acumulado con el propósito de lograr un buen entendimiento del proceso de maquinado realizado.

El borde acumulado está formado por fragmentos de material altamente endurecido que se adhieren a la punta de la herramienta de corte a causa de la fricción y consecuente calentamiento generados entre la herramienta y la viruta. Este borde forma un filo recrecido "modificado" en la punta de la herramienta, cambiando su geometría a lo largo de la cara de desprendimiento ocasionando una superficie rugosa en la pieza maquinada.

El primer efecto que produce la presencia del borde acumulado es el desplazamiento de la viruta de un contacto directo con la herramienta y no es un cuerpo separado de metal durante la operación de corte, sino continuo, no separado por superficies libres. En la figura 6.4 se puede observar como la nueva superficie generada y la parte inferior (línea AB) la zona de flujo ha sido transferida de la superficie de la herramienta a la parte alta del borde acumulado.

El borde acumulado es una estructura construida por capas sucesivas de material altamente endurecido bajo condiciones extremas de deformación al soportar esfuerzos de tensión y compresión impuestos por la acción del corte. El tamaño del borde no puede crecer indefinidamente, las tensiones cortantes aumentan hasta que parte de la estructura es cizallada y transportada fuera de la superficie de la pieza de trabajo o por la parte inferior de la viruta.

En las pruebas realizadas se presenta como variable la velocidad de corte y su influencia en la formación del borde acumulado. En la figura 6.5 se puede observar como a baja velocidad, el borde acumulado es corto pero alto, y cuando la velocidad aumenta, la parte más alta se desplaza hacia atrás y resulta un borde más largo tendiendo a desaparecer a medida que la velocidad se incrementa para ser reemplazado finalmente por una zona de flujo en la cara de desprendimiento de la herramienta. Esta tendencia es la que resultó de las pruebas realizadas con los materiales experimentales.

Como el borde acumulado se presenta en varias formas y tamaños, no existe una línea bien definida que indique la separación entre el borde y la zona de flujo. Es difícil predecir cuando estará presente o ausente durante una operación de maquinado.

El borde acumulado durante el corte afecta la vida de la herramienta, aumentándola o reduciéndola, dependiendo de su estabilidad. Cuando se forma un filo recreado inestable, los fragmentos altamente endurecidos por la deformación que se adhieren a la viruta y a la superficie generada, pueden aumentar el desgaste de la herramienta por la abrasión de las superficies de la misma. Por otra parte, cuando se cortan materiales muy duros, la presencia del borde acumulado puede ser benéfica porque protege del desgaste la superficie de la herramienta y él mismo realiza el corte. Sin embargo, la presencia del borde ocasiona un cambio en el plano de corte, debido a que no se puede controlar la geometría de la herramienta, siendo ésta su principal desventaja, además de que, en operaciones con tolerancias dimensionales restringidas, no es aconsejable establecer condiciones de corte que produzcan el borde acumulado.

#### CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN

El cálculo de la deformación sufrida por el material de trabajo al cruzar el plano de corte, se hace de acuerdo a la ecuación (III.2), mencionada en el capítulo III.

El ángulo del plano de corte fue medido por medios geométricos, aunque se puede llegar a evaluar éste a partir de la medición de las fuerzas de corte<sup>(4)</sup> (corte y alimentación).

A continuación se presenta la tabla que nos indica la deformación sufrida por cada uno de los materiales experimentales durante el proceso de corte:

TABLA IV

Muestra	$r \frac{t_2}{t_1}$	$\theta$	Deformación (%)
Material en condiciones de colada (196 RPM)	0.45	28°	247
Material con tratamiento térmico (196 RPM)	0.54	33°	218
Material con tratamiento térmico (448 RPM)	0.66	39°	197

Como podemos observar en la tabla anterior a velocidades de corte bajas el espesor de viruta y el ángulo de corte son pequeños y la deformación sufrida por el material es alta. En cambio, conforme aumenta la velocidad, el espesor y el ángulo de corte aumentan; pero la deformación del material es menor.

Por consiguiente, podemos considerar que la velocidad de corte es uno de los parámetros más importantes durante una operación de maquinado.

La facilidad con que se puede maquinar un metal o aleación depende principalmente de dos factores.

- 1 La técnica mecánica empleada, y
- 2 La microestructura del material que se va a maquinar.

El primero incluye características tales como el diseño de las herramientas y las condiciones en las que se efectúa el maquinado. Las características microestructurales del metal por maquinar son determinadas por factores relacionados con la química del material. El proceso de fabricación, su solidificación, características de superficie y solidez de la pieza, tratamientos que afectan la pu-

reza del metal fundido, impurezas presentes (metálicas y no metálicas), es decir, por factores metalúrgicos, por lo que el maquinado de piezas metálicas ha sido erróneamente sólo de interés para los ingenieros mecánicos.

El segundo factor es el que nos interesa, ya que el primero se mantiene constante; por lo tanto, sólo se hará relación al factor microestructural.

El maquinado es realmente una operación de trabajado en frío, en la cual la punta de la herramienta forma virutas del material que está siendo maquinado. El proceso será facilitado si se forman grietas minúsculas justamente delante de la punta de corte.

Las aleaciones muy dúctiles no se maquinan bien, debido a que no presentan fácilmente fracturas locales bajo la presión de la herramienta de corte; en su lugar el material fluiría y esparciría alrededor de la punta de corte, produciendo tal vez, el "atascamiento" de la herramienta. Por otra parte, las aleaciones frágiles serán generalmente inapropiadas en servicio particularmente en condiciones de choque. Sin embargo, podemos llegar a un punto intermedio entre estos dos extremos introduciendo lo que es denominado "fragilidad local" en un material, y al mismo tiempo producir un cambio mínimo o despreciable en las propiedades mecánicas y/o físicas del material.

En nuestro caso, el material experimental -hierro gris- es considerado un material que tiene buena maquinabilidad. Entre las características más importantes es que la fractura sobre el plano de corte ocurre a intervalos muy frecuentes, iniciándose por las hojuelas de grafito (figuras 6.1a, 6.2a y 6.3a), de tal forma que los fragmentos son muy pequeños de unos cuantos mm de longitud, y aún en ocasiones casi en forma de polvo como en los casos ocurridos con las muestras trabajadas a velocidades de corte de 25.24 m/min. De-

bido a que las virutas no son continuas, la longitud de contacto sobre la cara de desprendimiento de la herramienta es muy corta. En nuestro caso se presentó el borde acumulado, las virutas son delgadas y la fuerza de corte y consumo de energía son bajas.

Además, el gráfita actúa como productor de discontinuidades. En el hierro gris tiene también la función de lubricar e inhibir el atascamiento en la interface pieza-herramienta durante las operaciones de maquinado.



FIG 61. VIRUTA FORMADA  
MATERIAL EN CONDICIONES  
DE COLADA  
VELOCIDAD DE CORTE 1324 M/min

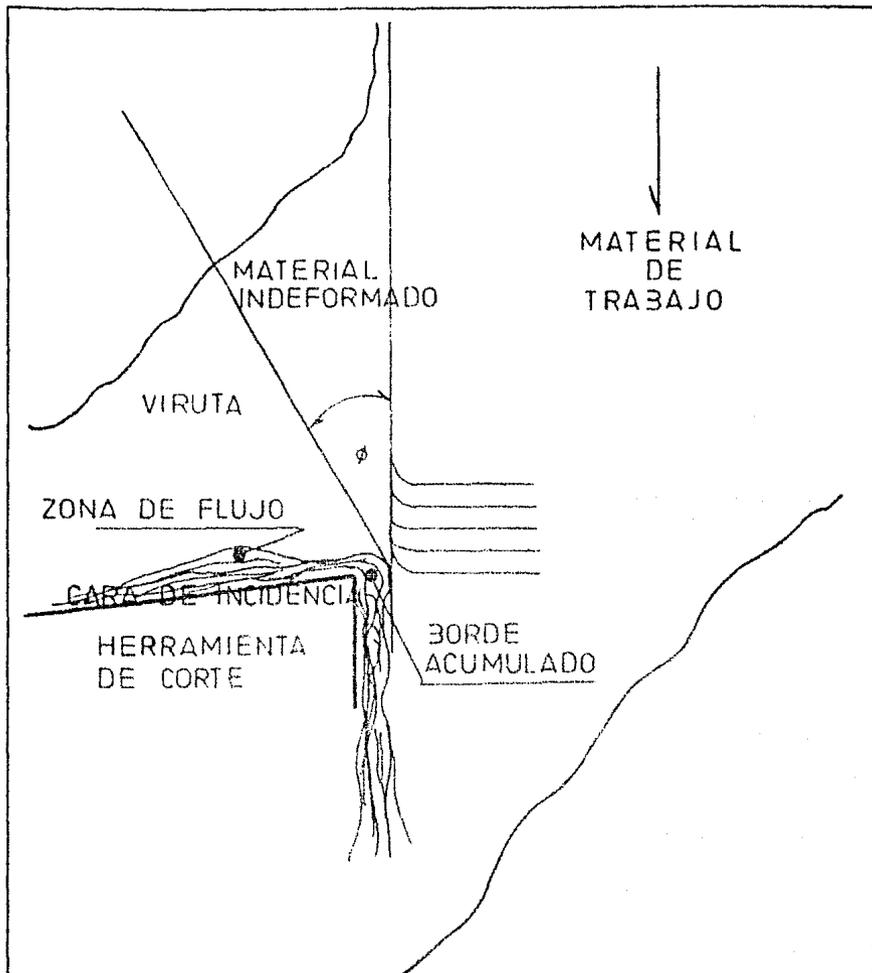


FIG. 6.1b DIAGRAMA ESQUEMATICO MOSTRANDO LAS CARACTERISTICAS DEL PROCESO DE CORTE. OBSERVANDO LA FIG. 6.1a





FIG. 820. VÍRUTA FORMADA  
MATERIAL CON TRATAMIENTO  
TERMILO  
VELOCIDAD DE CORTE 1724 M/Min

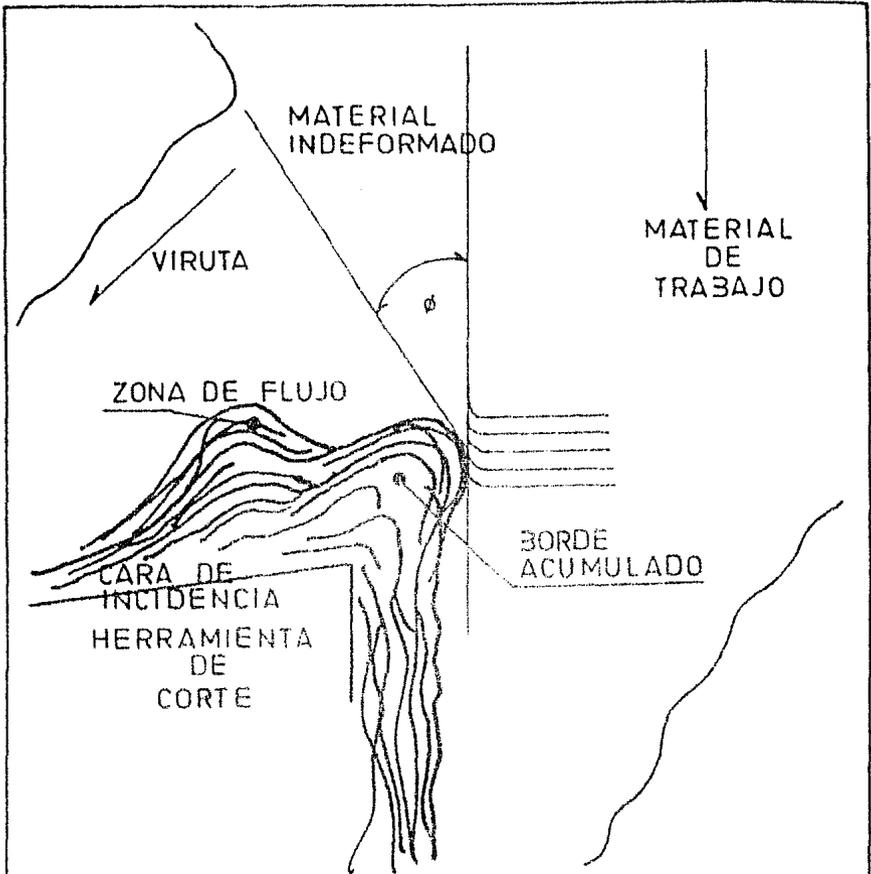


FIG.6.2 b DIAGRAMA ESQUEMATICO MOSTRANDO LAS CARACTERISTICAS DEL PROCESO DE CORTE. OBSERVANDO LA FIG.6.2 a



FIG. 6.2c  
SUPERFICIE DESPUES DEL CORTE  
MATERIAL CON TRATAMIENTO TERMICO  
VELOCIDAD DE CORTE 17.24 M/min

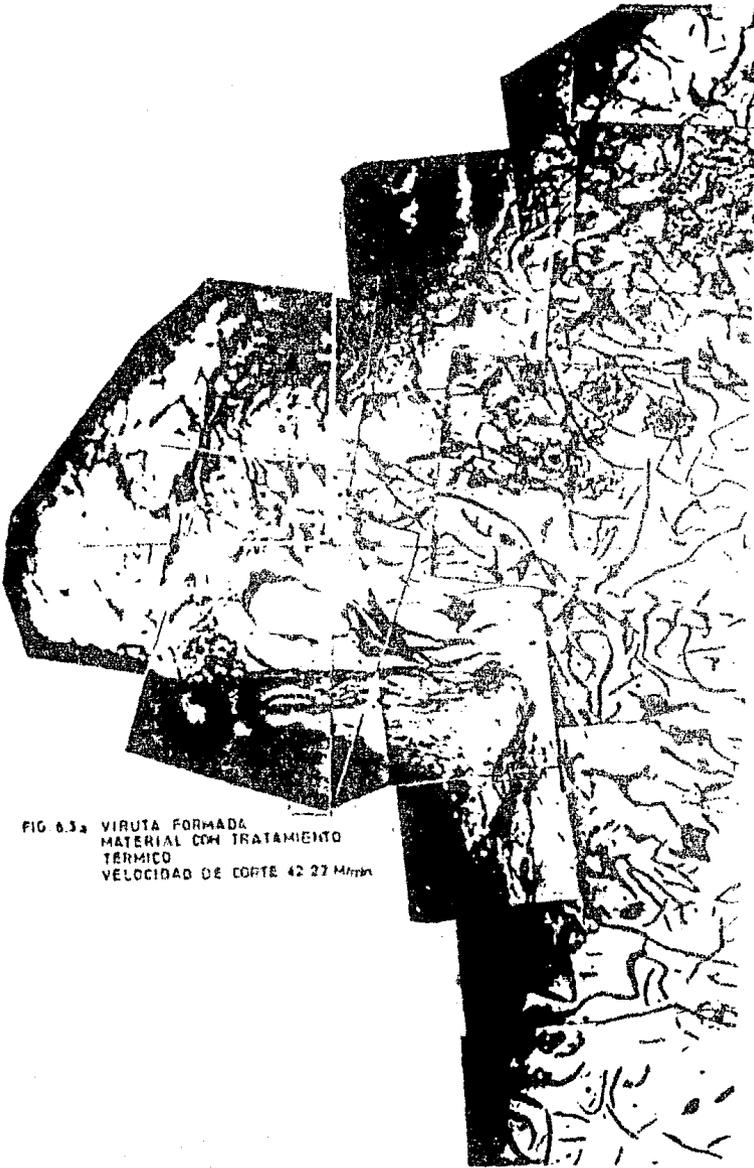


FIG 6.3a VIRUTA FORMADA  
MATERIAL COM TRATAMIENTO  
TERMICO  
VELOCIDAD DE CORTE 42 27  $M/min$

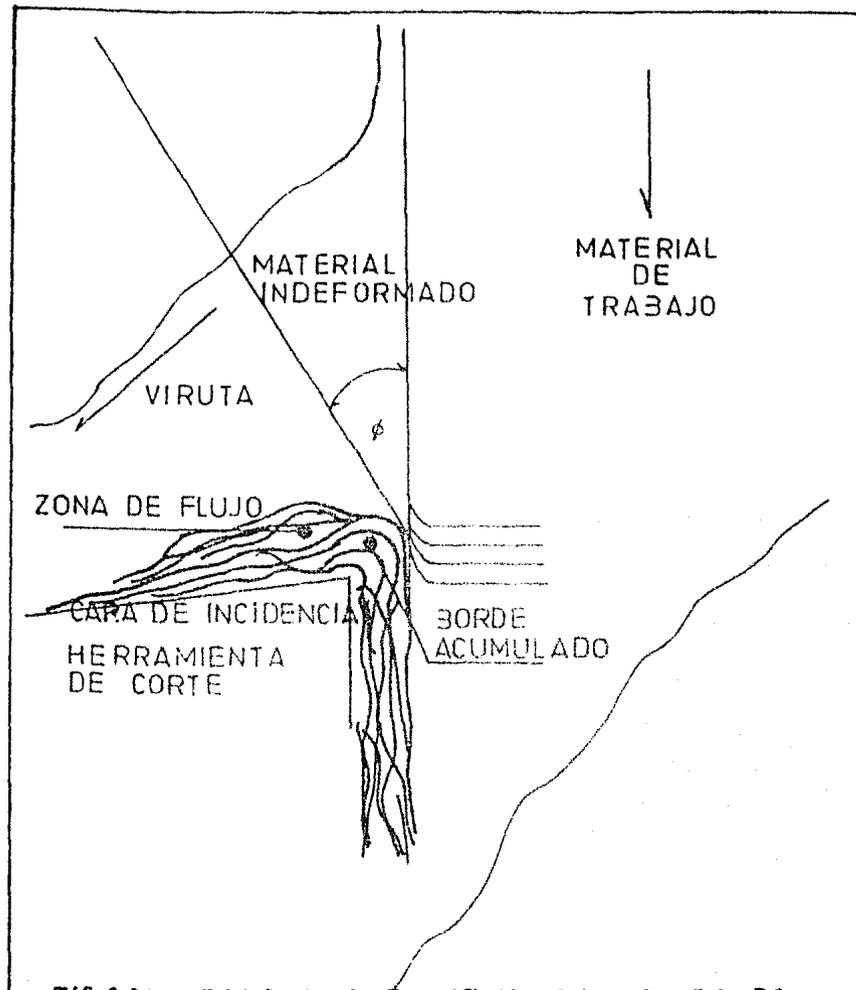


FIG.6.3b DIAGRAMA ESQUEMATICO MOSTRANDO LAS CARACTERISTICAS DEL PROCESO DE CORTE. OBSERVANDO LA FIG.6.3a



FIG. 6.3c  
SUPERFICIE DESPUES DEL CORTE  
MATERIAL CON TRATAMIENTO TERMICO  
VELOCIDAD DE CORTE 42.22 M/min

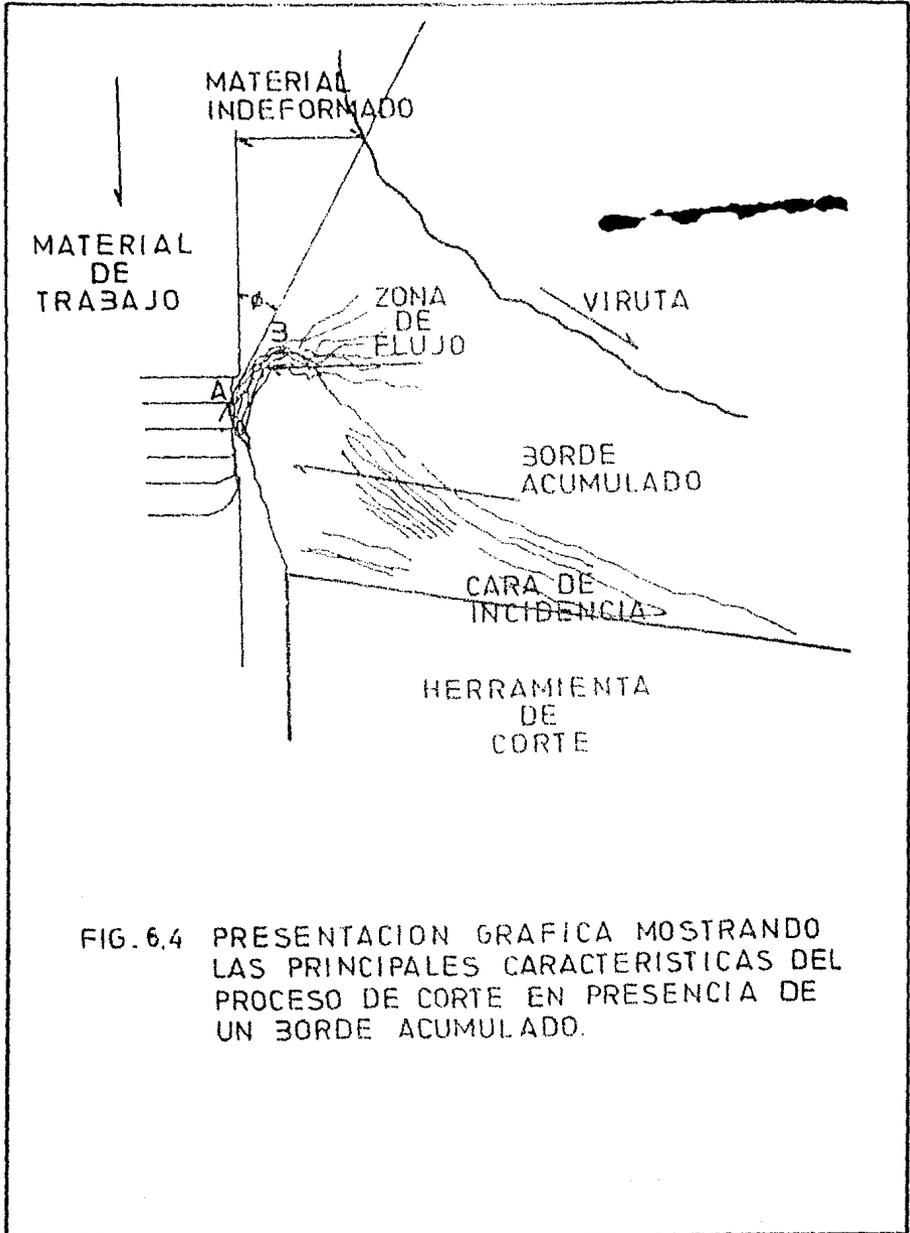


FIG. 6.4 PRESENTACION GRAFICA MOSTRANDO LAS PRINCIPALES CARACTERISTICAS DEL PROCESO DE CORTE EN PRESENCIA DE UN BORDE ACUMULADO.

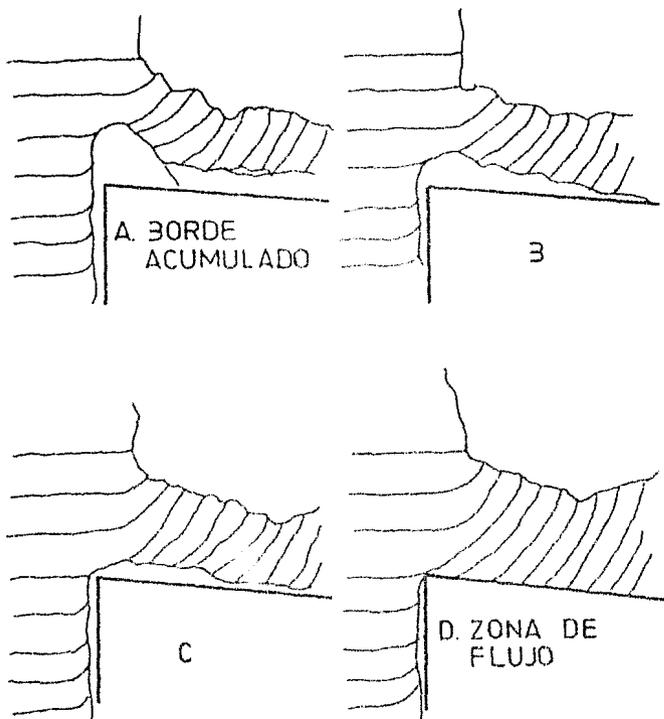


FIG.6.5 TRANSICION DE BORDE ACUMULADO  
A ZONA DE FLUJO AUMENTANDO LA  
VELOCIDAD DE CORTE.

- a) BAJA VELOCIDAD
- b) ALTA VELOCIDAD

## VII CONCLUSIONES

Tomando en consideración los resultados obtenidos, se llegó a las siguientes conclusiones:

En los tres casos observados, existe borde acumulado, el cual varía con la velocidad de corte siendo más pronunciado cuando la velocidad de corte es baja y tiende a desaparecer al aumentar la velocidad, disminuye en altura, pero se agranda en longitud, quedando una zona de flujo puro.

La presencia del borde acumulado ocasiona que la deformación sufrida por la viruta sea mayor que cuando no existe. Con base en esto, se puede determinar cual de las muestras obtenidas presentan una buena maquinabilidad.

El tratamiento término no creó gran diferencia en la microestructura del material. Los precipitados, normalmente carburos o silicatos existentes en pequeñas colonias, fueron distribuidos y reducidos de tamaño con el tratamiento.

El grafito actúa como concentrador de tensiones produciendo discontinuidades en la microestructura del hierro gris, que rompen las virutas y además funciona como un lubricante durante el maquinado.

Con velocidades altas de corte, se obtiene un tamaño de viruta mayor en longitud, menor en espesor y un acabado superficial dimensional en la pieza maquinada bastante aceptable.

## VIII BIBLIOGRAFÍA

- 1 MERCHANT. "Mechanics of the Metal Cutting Process". Journal of Applied Physics, 1945, 16, 5, 267.
- 2 LEE Y SHAFFER. "The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining". J. Appl. Mech. 1951, 18, 405.
- 3 LAWRENCE E. DOYLE. Procesos de manufactura y materiales para ingenieros. Edit. Diana, México, 1980.
- 4 LÓPEZ PEÑA, GERARDO. Diseño y construcción de un dispositivo para medir la maquinabilidad de los metales". TESIS, México, UNAM, Facultad de Química, 1981.
- 5 GEOFFREY BOOTHROYD. Fundamentos del corte de metales y de las máquinas herramienta. Edit. McGraw Hill Latinoamericana, S.A., 1978.
- 6 E.M. TRENT. "Metal Cutting". Butterworths, Great Britain, 1977.
- 7 Dr. M. KRONENBERG. "Machining Science and Application". J.W. Arrowsmith LTD, Bristol, 1966.
- 8 R. GARCÍA CRUZ y Dr. YVAN. Bufete Metalmecánico, 1978.
- 9 "Metals Handbook" Vol. 3 Machining, 8th. edition, 1967, ASM.
- 10 DEGARMO. "Materials and Processes in Manufacturing". Macmillan Pub. Co. 1979.
- 11 PAUL H. BLACK. "Theory of Metal Cutting". McGraw Hill Book Company Inc. 1961.

- 12 MURILLOS REYES, HÉCTOR. Influencia de la estructura del hierro gris en la maquinabilidad de partes de motores automotrices. TESIS, México, UNAM, Facultad de Química, 1969.
- 13 MYRON L. BEGEMAN. Procesos de fabricación. Compañía Editorial Continental, S.A., 1971.
- 14 DIETER. "Mechanical Metallurgy". McGraw-Hill Book Co.
- 15 V. V. LUSKUTOV. Rectificación de metales. Edit. Mir. Moscú, 1982.