

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



OPTIMIZACION DE LAS VARIABLES ENVUELTAS EN EL  
MAQUINADO EN UN TORNO DE CONTROL NUMERICO  
COMPUTARIZADO

POR

ING. INDIRA GARY ESCAMILLA SALAZAR

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE  
LA INGENIERIA DE MANUFACTURA CON  
ESPECIALIDAD EN AUTOMATIZACION

CD. UNIVERSITARIA

FEBRERO 2004

L.G.F.S.

OPTIMIZACION DE LAS VARIABLES ENVUELTAS EN EL

MAQUINADO EN UN TORNO DE CONTROL NUMERICO

COMPUTARIZADO

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2004  
.E82

2004



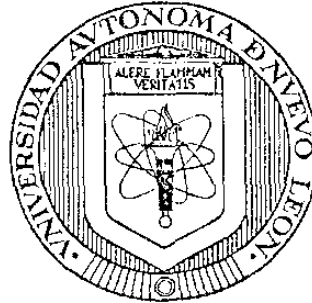
1020149790



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES ENVUELTAS EN EL MAQUINADO  
EN UN TORNO DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO

POR

ING. INDIRA GARY ESCAMILLA SALAZAR

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA DE MANUFACTURA CON ESPECIALIDAD EN  
AUTOMATIZACIÓN

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2004

990'66

T11

35853

.112

F. H.

200'

.L. X2

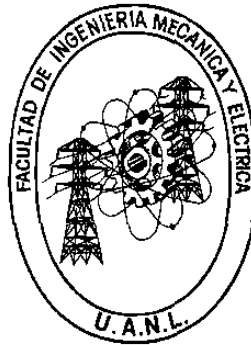


FONDO  
TESIS.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES ENVUELTAS EN EL MAQUINADO  
EN UN TORNO DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO

POR

ING. INDIRA GARY ESCAMILLA SALAZAR

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA DE MANUFACTURA CON ESPECIALIDAD EN  
AUTOMATIZACIÓN

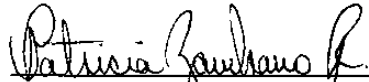
CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2004



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Optimización de las variables envueltas en el maquinado en un Torno de Control Numérico Computarizado”, realizada por la Ing. Indira Gary Escamilla Salazar, matrícula 0720319 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería de Manufactura con especialidad en Automatización.

El Comité de Tesis



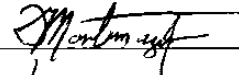
Dra. Patricia del C. Zambrano Robledo

Asesor



M. C. Arturo R. González Escamilla

Coasesor



M. C. Fernando Montemayor Ibarra

Coasesor



Vo. Bø.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez

División de Estudios de Posgrado



La voluntad de hacer esta en nosotros  
así como la voluntad de ser mejores.  
A los líderes nos corresponde facilitar a  
Nuestra gente el logro de estas aspiraciones.  
Anónimo

El talento gana juegos, pero solo el trabajo en  
equipo y la inteligencia ganan campeonatos.  
Paso a paso es el único camino para lograr las  
cosas. No hay atajos  
MICHAEL JORDAN

# DEDICATORIA

A Dios:

Por ser el que a guiado mi vida, porque siempre a estado conmigo, tomándome de su mano y por llenarme de alegría y bendiciones durante toda la vida

A mis Fabulosos Padres:

Rafael Escamilla Alanís y Elsia Salazar de Escamilla por estar siempre conmigo, dándome todo su amor, cariño y apoyo, porque siempre han sabido escucharme y aconsejarme en momentos difíciles y alegres de mi vida

A mi Amado Esposo:

Bernardo González Ortiz por ser el compañero de mi vida, ese hombre noble y tierno, que ha estado conmigo en las buenas y en las malas.

A mis Hermanos:

Kenia, Elsia y Rafael por las grandes aventuras que hemos vivido, por ser la sal y la pimienta de mi vida y porque sin ustedes mi vida no seria la misma.

A mi Abuelita:

Josefa Salazar Cavazos, que siempre ha sido ejemplo de vitalidad, de lucha, de entrega y de amor.

A mis Grandes Amigos:

Raquel, Malena, Paty Zambrano, Cony, Liliana, Claudia, Ángeles, Sofir, Maria José, Roel, Flor, Miguel, Sandra, Mayela, Diana, Jaime, Sara, Juan, Jorge, Liliana, Lorena, Carlos, Sony, Soledad, Rosy, Julio, Isabel, David, Paola, Norma, Sandra, que siempre han compartido alegrías y tristezas y por ser como mis hermanos siempre apoyándome y ayudándome cuando sentía desfallecer.

# AGRADECIMIENTOS

A la Preparatoria Técnica Álvaro Obregón, por facilitarnos el laboratorio de CNC para poder hacer las últimas pruebas, para la realización de esta tesis y gracias por la ayuda que nos prestaron los ingenieros José C. Castillo Sarabia y Francisco Javier Arriaga Hernández.

A los Becarios de Máquinas-Herramientas:

Juan Manuel, Daniel, Gerardo, David y Jesús por su colaboración

A los Maestros:

Que transmitieron todos sus conocimientos y que me hicieron crecer como profesionista y como persona.

Gracias a CONACYT por el apoyo brindado al proyecto para la realización del esta tesis.

Gracias a todos los involucrados para la realización de este trabajo, principalmente a la Dra. Patricia del Carmen Zambrano, al Dr. Moisés Hinojosa, al M. C. Fernando Montemayor Ibarra, al M. C. Arturo González Escamilla.

# ÍNDICE

CAPÍTULO	PÁGINA
Síntesis	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Objetivo	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Límites	3
1.5. Justificación del Trabajo	3
1.6. Metodología	3
2. TEORÍA DEL MAQUINADO DE METALES	4
2.1. Maquinado de alta velocidad	4
2.1.1. Introducción	4
2.1.2. ¿Qué es el maquinado de alta velocidad?	4
2.2. Panorama general de la tecnología del maquinado	7
2.2.1. Tipos de operaciones de maquinado	8
2.2.2. La herramienta de corte y portaherramientas para máquinas de alta velocidad	9
2.2.3. Condiciones de corte	11
2.3. Teoría de la formación de viruta en el maquinado de metales	13
2.3.1. Modelo de corte ortogonal	14
2.3.2. Formación real de viruta	15
2.4. Relaciones entre potencia y energía en el maquinado	17
2.4.1. Temperatura de corte	18
2.4.2. Métodos analíticos	18
2.4.3. Medición de la temperatura de corte	19
3. TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE	
3.1. Vida de las herramientas	20
3.1.1. Desgaste de la herramienta	22
3.1.2. Vida de las herramientas	28
3.2. Materiales para herramientas	31
3.3. Geometría de las herramientas	34
3.4. Fluidos para corte	43
4. OPERACIONES DE MAQUINADO Y MAQUINAS HERRAMIENTA	
4.1. Torneado y operaciones afines	47
4.1.1. Condiciones de corte en el torneado	48
4.1.2. Operaciones relacionadas con el torneado	50
4.1.3. El torno mecánico	59
4.1.4. Otros tornos y máquinas de torrear	63

4.2. Tecnología de fabricación y tecnología de máquinas	66
4.2.1. Control Numérico	66
4.2.2. Estructura de Sistema Control Numérico	67
4.2.3. Clasificación de los Controles Numéricos	68
4.2.4. Sistema de Control	72
4.2.5. Características y tipos de tornos de CNC	73
4.3. Maquinabilidad	76
4.4. Selección de las condiciones de corte	77
4.4.1. Selección del avance y de la profundidad de corte	78
4.4.2. Optimización de la velocidad de corte	79
5. ACABADO SUPERFICIAL. RUGOSIDAD	
5.1. Introducción	82
5.2. Las curvas P Y R	86
5.2.1. Definición de Ra	87
5.2.2. Definición de Rz	89
5.2.3. Definición de Ry	90
5.2.4. Símbolos para la dirección de marcado	90
5.3. Recomendaciones prácticas para medir la rugosidad de una superficie	93
6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	
6.1. Introducción	95
6.2. Equipo utilizado	95
6.3. Material maquinado	97
6.4. Procedimiento de medición	97
7. RESULTADOS	
7.1. Resultados de la medición de temperatura	100
7.1.1. Resultado de temperatura en Aluminio 6061 T6 con una velocidad de giro del husillo de 1900 RPM	101
7.1.2. Resultado de temperatura en Aluminio 6061 T6 con una velocidad de giro del husillo de 2500 RPM	104
7.1.3. Resultado de temperatura en Acero 1018 con una velocidad de giro del husillo de 1400 RPM	108
7.1.4. Resultado de temperatura en Acero 1018 con una velocidad de giro del husillo de 1600 RPM	111
7.1.5. Resultado de temperatura en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de giro del husillo de 720 RPM	115
7.1.6. Resultado de temperatura en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de giro del husillo de 1000 RPM	118
7.2. Discusión de los resultados de temperatura	122
7.3. Resultados de la medición de rugosidad	122
7.3.1. Resultado de rugosidad en Aluminio 6061 T6 con una velocidad de giro del husillo de 1900 RPM	122
7.3.2. Resultado de rugosidad en Aluminio 6061 T6 con una velocidad de giro del husillo de 2500 RPM	126
7.3.3. Resultado de rugosidad en Acero 1018 con una velocidad de giro del husillo de 1400 RPM	129

7.3.4. Resultado de rugosidad en Acero 1018 con una velocidad de giro del husillo de 1600 RPM	133
7.3.5. Resultado de rugosidad en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de giro del husillo de 720 RPM	136
7.3.6. Resultado de rugosidad en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de giro del husillo de 1000 RPM	140
7.4. Discusión de los resultados de la rugosidad	143
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
8.1. Conclusiones	144
8.2. Recomendaciones	149
Referencias	150
Listado de figuras	152
Listado de tablas	157
Listado de ecuaciones	158
Anexo A	159
Glosario	165
Autobiografía	166

## SÍNTESIS

Los estándares de hoy en día exigen que los procesos de maquinado sean cada vez más precisos y de mayor calidad en el acabado. Esto ha llevado a la incursión de nuevas tecnologías en los últimos años, tal como lo es el Control Numérico Computarizado (CNC) y los dispositivos para determinar rápidamente la calidad del maquinado (rugosímetros). La incursión de estas nuevas tecnologías y dispositivos ha hecho posible que el proceso se lleve a cabo de una manera más rápida, segura y con productos de mayor calidad final.

Sin embargo, el proceso del maquinado se ve afectado por diversas variables que pueden llegar a alterar el acabado final del trabajo. Entre estas variables se encuentra la temperatura generada. Esta temperatura puede llegar a ser un problema, dado que puede alterar las condiciones normales del trabajo de maquinado.

En la presente tesis, se propone estudiar el comportamiento de la temperatura durante el proceso de maquinado, para tratar de encontrar una relación con la calidad del acabado o rugosidad.

Para la total comprensión tanto del fenómeno temperatura así como del maquinado y la rugosidad, se tratan primeramente los aspectos teóricos y fundamentos del CNC y la rugosidad para después realizar un análisis de la temperatura concerniente a las máquinas-herramienta. Una vez comprendido esto, se llevará a cabo el trabajo experimental y el análisis de los resultados, para poder llegar a conclusiones que ayuden a tener una visión más clara de la influencia de la temperatura en el proceso del maquinado.

Debido a que las condiciones de este experimento son muy específicas, los resultados arrojados podrán mostrar un comportamiento específico de este tipo de maquinados, pero es posible que estos resultados no sean válidos para todas las condiciones de trabajo, ya que pueden existir variaciones en los demás parámetros.

El desarrollo de esta experimentación se llevó a cabo gracias a las facilidades en el uso de la instrumentación del departamento maquinado de la Preparatoria Técnica Álvaro Obregón y del departamento de Máquinas-Herramientas, así como el uso de sus instalaciones, y al patrocinio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema:

En la División de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León existen máquinas de control numérico (Centro de maquinado EMCO VMC-300 y Torno EMCO turn 342) en las cuales cada vez que se va a trabajar con ellas se incurre en grandes desperdicios de lubricante, material, herramientas, esto debido a que el trabajo es desarrollado a prueba y error.

### 1.2 Objetivo:

Obtención de las variables óptimas que afectan la maquinabilidad en piezas de aleaciones metálicas comerciales con el propósito de obtener los valores mejorados de maquinado, en base a parámetros intrínsecos del material y asociados a la geometría del corte desarrollados en el torno con las que cuenta la División de Ingeniería Mecánica en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Con este conocimiento se tomarán decisiones relacionadas con la velocidad de corte, el avance, para optimizar la calidad superficial de la pieza y la temperatura involucrada en el proceso para una mayor vida de herramienta.

### 1.3 Hipótesis:

Se supone que obteniendo los parámetros óptimos de maquinado tomando en cuenta todas las variables críticas del proceso como son: temperatura generada, velocidad de corte y avance, acabado superficial de la pieza, con lo que se logrará mejorar el proceso de corte en una máquina-herramienta.



## **1.4 Límites:**

Este trabajo pretende obtener las variables óptimas en un torno de control numérico que den como resultado la eficientización de corte en una situación de maquinado en particular

Los maquinados se llevarán a cabo en el torno con el que cuenta la División de Ingeniería Mecánica en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León

## **1.5 Justificación del Trabajo:**

En la mayoría de las plantas industriales de nuestro país y del mundo se realizan procesos productivos e innovativos utilizando máquinas-herramientas. En los procesos llevados a cabo en estas máquinas, la calidad y la optimización del proceso dependen principalmente de las características del proceso. Este proyecto tendrá como beneficios el obtener los valores óptimos de las variables que estén envueltas en situaciones de maquinado con este tipo de máquinas-herramientas, lo cual generará ahorros de lubricante, material, herramientas, utilizando el equipo con el que cuenta la División de Ingeniería Mecánica en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

El objetivo de esta tesis es implementar los conocimientos adquiridos en la maestría en cuanto a lo que se refiere a la utilización de equipos de manufactura, complementado con el conocimiento desarrollado con los equipos de Control Numérico Computarizado en mi experiencia profesional.

## **1.6 Metodología:**

- 1.- Revisión bibliográfica
- 2.- Detalles de características del equipo.
- 3.- Escoger material
- 4.- Caracterización del material de probetas y herramientas
- 5.- Seleccionar tipos de maquinado y trayectorias.
- 6.- Realizar maquinados de probetas y tomar datos en línea
- 7.- Recolección y caracterización de viruta
- 8.- Realizar la evaluación de la rugosidad
- 9.- Hacer inferencia estadística y correlación entre propiedades.

## CAPÍTULO 2

# TEORÍA DEL MAQUINADO DE METALES

### 2.1 Maquinado de alta velocidad

#### 2.1.1 Introducción

Iniciado el siglo XXI es prácticamente inimaginable la revolución experimentada por la tecnología de fabricación en los últimos 10 o 15 años. La evolución de los ordenadores, de las nuevas tecnologías de comunicación, etc, están revolucionado el mundo en general y en particular el mundo empresarial. En el campo que concierne a las máquinas-herramientas, maquinado-fresado, “*el cambio o la revolución*” ya ha llegado y, aunque todavía queda mucho camino por recorrer, el denominado Maquinado a Alta Velocidad (MAV) es ya una realidad que muchas empresas y mucha gente todavía desconocen.

El MAV hoy en día es una tecnología de corte con bases sólidas que abre las puertas del maquinado de materiales y figuras que antes no se podían maquinar mediante el trabajo convencional, como por ejemplo: materiales con una dureza superior a 50 Hrc o paredes delgadas de 0.2 mm, etc.

#### 2.1.2 ¿Qué es el maquinado de alta velocidad?

Es maquinar a altas velocidades de corte ( $V_c$ )? ¿Es maquinar a altas velocidades de husillo ( $n$ )? Es maquinar a altos avances ( $V_f$ )?...

Actualmente, el MAV tiene muchas definiciones. Pero una cosa clara es que no significa obligatoriamente maquinar a altas revoluciones de husillo, ya que muchas de

las aplicaciones se realizan con velocidades de husillo moderadas (3.000 - 6.000 rpm) y herramientas de gran diámetro (25 - 30 mm). Las condiciones del proceso (velocidad de corte, avance, profundidades de corte radial y axial, etc.), dependerán del material a maquinar, así como de las máquinas-herramientas disponibles.

Cada material y aleación que se pretenda maquinar posee sus propias características de maquinabilidad, lo que marcará los límites operativos del proceso. Por ejemplo, no es lo mismo maquinar:

- ✦ Materiales blandos (aluminio, cobre, magnesio, etc.) que duros (aceros templados, titanio, níquel, etc.)
- ✦ Materiales de gran maquinabilidad (aluminio, magnesio,...) que de poca maquinabilidad (titanio, inconel, acero para herramientas, etc.).

Así, el triángulo material-herramienta-máquina limitará los parámetros de corte, estrategias de maquinado, volumen de material extraído por unidad de tiempo, etc. La velocidad de corte y las condiciones de proceso en general dependerán del material a maquinar. La figura 2.1 muestra los rangos de velocidades de corte en función del material maquinado.<sup>1</sup>

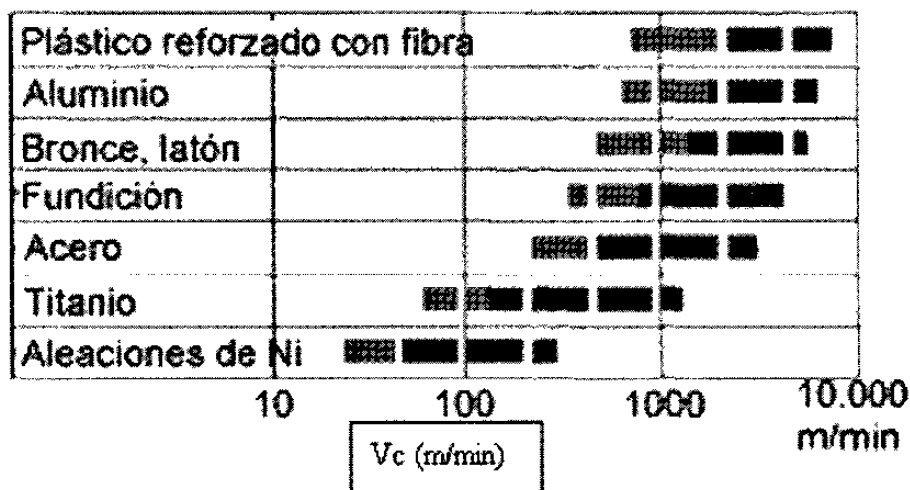


Figura 2.1 Rangos de velocidades de corte en función del material

El Maquinado de Alta Velocidad consiste en la optimización del maquinado con las posibilidades existentes limitado por la pieza/material a maquinar y las máquinas-herramientas (Diseño Asistido por Computadora/ Manufactura Asistida por Computadora (CAD/CAM) y Control Numérico Computarizado (CNC)) disponibles. Esto puede suponer maquinar a velocidades de corte entre 5 y 10 veces superiores a las que se utilizan de manera convencional “para cada material”.

Podemos considerar que con el Maquinado a Alta Velocidad se ha dado un paso importante hacia el maquinado óptimo de cada material. A medida que se vayan desarrollando y mejorando las máquinas-herramientas, los programas de CAD-CAM, los CNC, etc... se irá avanzando hacia la optimización general del maquinado, en el que cada material tendrá sus condiciones propias de corte, sus estrategias, sus herramientas, etc.

El MAV es un nuevo mundo y una nueva forma de trabajar, que supone un cambio de mentalidad y necesidades: es una tecnología que *no tiene nada que ver* con el maquinado convencional. Ver figuras 2.2 y 2.3

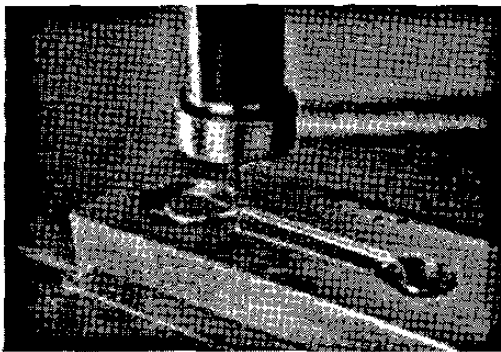


Figura 2.2 Maquinado de contorno CNC

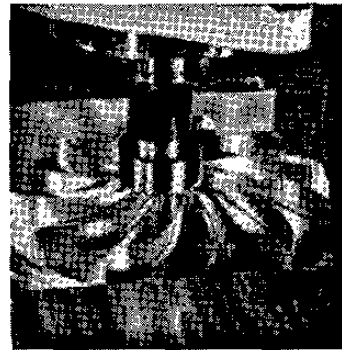


Figura 2.3 Maquinado de cara CNC

El MAV tiende a sustituir las pasadas de gran profundidad a baja velocidad de corte por muchas pasadas rápidas de menor profundidad de corte, obteniendo un considerable aumento de viruta desalojada (volumen de material por unidad de tiempo). Las altas velocidades de corte y los elevados avances disminuyen las fuerzas de corte gracias a espesores de viruta cada vez más pequeños.

### Ventajas que ofrece el MAV

- ✚ Disminución de las fuerzas de corte en los materiales dúctiles, posibilidad de maquinar paredes delgadas (0,2 mm).
- ✚ Mayor precisión de los contornos, mejor calidad superficial y tolerancias dimensionales más precisas.
- ✚ Reducción del tiempo de pulido.
- ✚ Maquinado de una sola pasada para el desbaste y acabado.
- ✚ Maquinado de paredes finas.
- ✚ Reducción del tiempo de maquinado y costo global.
- ✚ Disminución del coeficiente de rozamiento viruta-herramienta.
- ✚ Evacuación casi total del calor por medio de la viruta.
- ✚ Aumento en la vida de la herramienta.
- ✚ Posibilidad de maquinado de aceros duros (>50 Hrc) como si fuera maquinado en caliente.

## 2.2 Panorama general de la tecnología del maquinado

El *maquinado* es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una parte de trabajo, de tal manera que el material remanente sea la forma de la parte deseada. La acción predominante del corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar una viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie. El maquinado se aplica más frecuentemente para formar metales.

El maquinado se puede aplicar a una amplia variedad de materiales de trabajo. Prácticamente todos los metales sólidos se pueden maquinar. Los plásticos y los compuestos plásticos se pueden cortar también por maquinado. Los cerámicos presentan dificultades debido a su alta dureza y fragilidad; sin embargo, la mayoría de los cerámicos se pueden cortar exitosamente mediante procesos de maquinado abrasivo. El maquinado se puede usar para generar cualquier forma geométrica regular, como superficies planas, agujeros redondos y cilindros. Combinando varias operaciones de maquinado en secuencia se pueden producir formas de complejidad y variedad ilimitada.

El maquinado puede producir dimensiones con tolerancias muy estrechas de menos de 0.025 mm. Siendo más preciso que muchos otros procesos.

El maquinado es capaz de crear acabados superficiales muy tersos que pueden llegar a ser mejores que 0.4  $\mu\text{m}$ . Algunos procesos abrasivos pueden lograr mejores acabados aún.

Debido a sus características, el maquinado se realiza generalmente después de otros procesos de manufactura como fundición o deformación volumétrica (por ejemplo, forjado y estirado de barras). Otros procesos crean la forma general de la parte y el maquinado produce la geometría final, las dimensiones y el acabado.

El maquinado no es solamente un proceso, sino una familia de procesos. La característica común es el uso de una herramienta de corte que forma una viruta, la cual se remueve de la parte de trabajo, ver figura 2.4. Para realizar la operación, se requiere movimiento relativo entre la herramienta y el material de trabajo. Este movimiento relativo se logra en la mayoría de las operaciones de maquinado por medio de un movimiento primario, llamado la velocidad, y un movimiento secundario, denominado el avance. La forma de la herramienta y su penetración en la superficie del trabajo, combinada con estos movimientos, produce la forma deseada de la superficie resultante del trabajo.

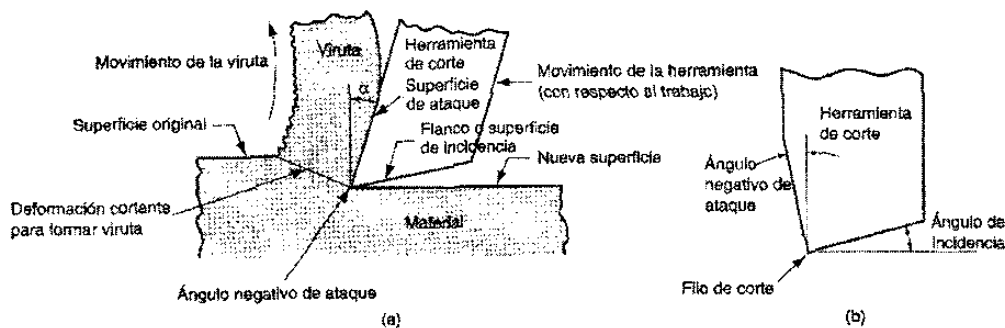


Figura 2.4 (a) Proceso de Torneado, (b) Herramienta de corte

### 2.2.1 Tipos de operaciones de maquinado

Existen muchas clases de operaciones de maquinado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta geometría y textura superficial. Los tres tipos más comunes son: torneado, taladrado, y fresado, los cuales se ilustran en la figura 2.5

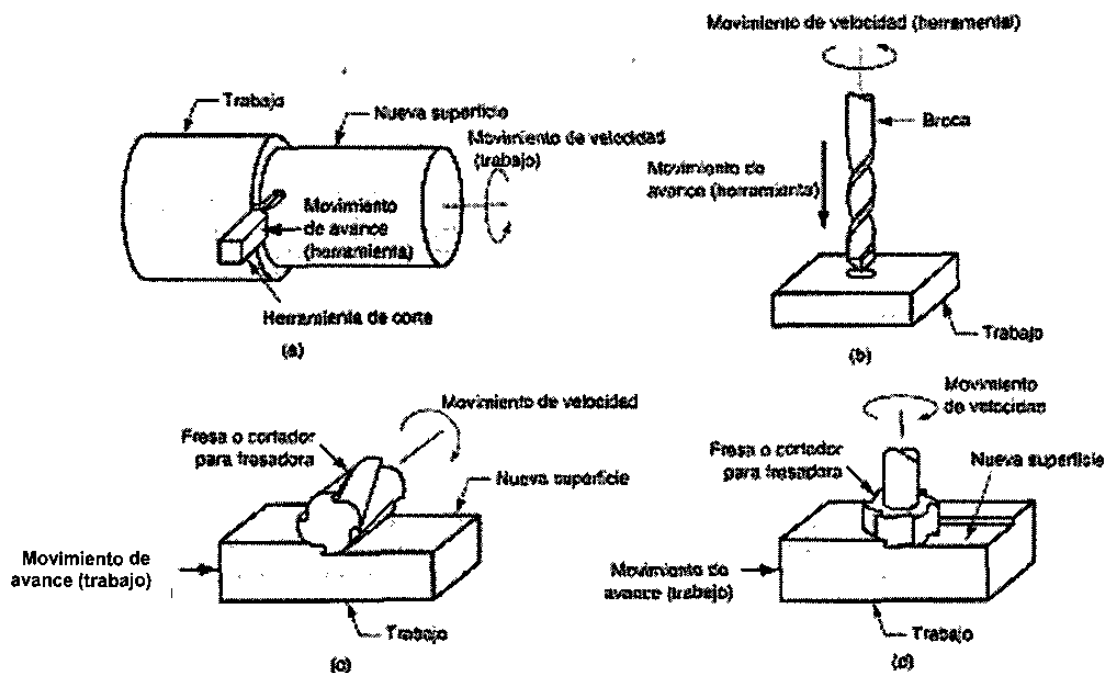


Figura 2.5 Los tres procesos más comunes de maquinado: (a) torneado, (b) taladrado y dos formas de fresado: (c) fresado periférico y (d) fresado de frente.

En el torneado se usa una herramienta de corte con un borde cortante simple destinado a remover material de una pieza de trabajo giratoria para dar forma a un cilindro. El movimiento de velocidad del torneado lo proporciona la parte de trabajo

giratoria y el movimiento de avance lo realiza la herramienta de corte, moviéndose lentamente en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo.

El taladrado se usa para crear un agujero redondo. Esto se realiza generalmente con una herramienta rotatoria que tiene dos filos cortantes. La herramienta avanza en una dirección paralela a su eje de rotación dentro de la parte de trabajo para formar el agujero redondo.

En el fresado, una herramienta rotatoria con múltiples filos cortantes se mueve lentamente sobre el material para generar un plano o superficie recta. La dirección del movimiento de avance es perpendicular al eje de rotación. El movimiento de velocidad lo proporciona la fresa rotatoria. Existen varias formas de fresado, siendo las dos básicas el fresado periférico y el fresado de frente.

Además del torneado, el taladrado y el fresado, existen otras operaciones convencionales que incluyen perfilado, cepillado, escariado y aserrado. Otro grupo de procesos frecuentemente incluidos en la categoría del maquinado, son aquellos que utilizan abrasivos para cortar materiales. Estos procesos incluyen esmerilado, rectificado y operaciones similares que se usan comúnmente para lograr acabados superficiales superiores de la parte de trabajo.

### 2.2.2 La herramienta de corte y portaherramientas para máquinas de alta velocidad

Una herramienta de corte cuenta con uno o más filos cortantes. El filo cortante sirve para separar una viruta del material de trabajo, como se muestra en la figura 2.4. Ligadas al filo cortante existen dos superficies de la herramienta: la superficie de ataque y el flanco o superficie de incidencia. La superficie de ataque que dirige el flujo de la viruta resultante se orienta en cierto ángulo, llamado ángulo de ataque. El ángulo se mide con respecto a un plano perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo. El ángulo de ataque puede ser positivo. El flanco de la herramienta provee un claro entre la herramienta y la superficie de la pieza de trabajo recién generada, de esta forma protege a la superficie de la abrasión que pudiera degradar el acabado. Esta superficie del flanco o de incidencia se orienta en un ángulo llamado ángulo de incidencia o de relieve.

Es muy importante el diseño de la herramienta debido al ambiente rudo en el que opera. Debe contar con la geometría apropiada para cortar efectivamente el material y debe fabricarse de un material más duro que el material de trabajo.

Existen dos tipos básicos cuyos ejemplos se muestran a continuación: (a) herramientas de punta sencilla y (b) herramientas de múltiples filos cortantes. Una herramienta de una sola punta tiene un filo cortante y se usa para operaciones como el torneado. Una geometría típica para una herramienta de punta simple se ilustra en la figura 2.6(a). Durante el maquinado la punta de la herramienta penetra bajo la superficie original del trabajo. La punta está generalmente redondeada en cierto radio llamado el radio de la nariz.

Las herramientas de múltiples filos cortantes tienen más de un borde de corte y generalmente realizan su movimiento con respecto a la pieza de trabajo mediante rotación. El taladrado y el fresado utilizan herramientas rotatorias de múltiples filos cortantes. Existe una gran variedad en herramientas y sus geometrías. La figura 2.6(b) muestra una fresa helicoidal que se usa en fresado periférico. Aunque la forma es bastante diferente a la herramienta de punta simple, muchos de los elementos de la geometría son similares.

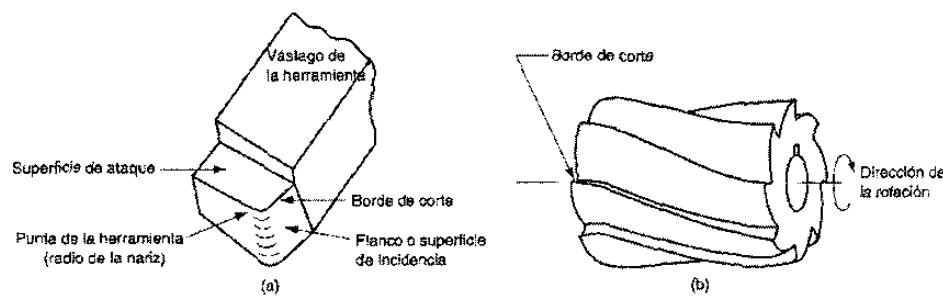


Figura 2.6 (a) Herramienta de punta sencilla, (b) Herramienta de múltiples filos cortantes

**Portaherramientas para máquinas de alta velocidad.** El maquinado de alta velocidad requiere altas precisiones de concentricidad de la herramienta de corte con el fin de evitar errores y aumentar la seguridad del proceso en el maquinado a altas revoluciones de corte. Actualmente los conos portaherramientas más utilizados son los especiales tipo HSK (DIN 69871).

Las ventajas de los sistemas de amarre tipo HSK, frente a los portaherramientas más convencionales, se resumen en los siguientes puntos:

- ✚ Proporcionan mayores exactitudes de cambio y repetitividad.
- ✚ Transmisión segura de un elevado par con un posicionamiento radial definido (ausencia de *cabeceo*).
- ✚ Gran rigidez a la flexión estática y dinámica.
- ✚ Disminución del peso y de la longitud total, con lo que se disminuyen los problemas de tipo inercial.



### 2.2.3 Condiciones de corte

Para realizar una operación de maquinado se requiere el movimiento relativo de la herramienta de trabajo. El movimiento primario se realiza a una cierta velocidad de corte  $v$ . Además, la herramienta debe moverse lateralmente a través del trabajo. Éste es un movimiento mucho más lento, llamado el avance  $f$ . La dimensión restante del corte es la penetración de la herramienta de corte de la superficie original del trabajo, llamada profundidad de corte  $d$ . Al conjunto de velocidad, avance y profundidad de corte se le llama condiciones de corte, las cuales son mostradas en la figura 2.7. Éstas son las tres dimensiones del proceso de maquinado y, en ciertas operaciones (por ejemplo, la mayoría de las operaciones con herramientas de punta simple), se puede usar su producto matemático para obtener la velocidad de remoción de material del proceso:

$$MRR = vfd \quad (1)$$

donde  $MRR$  = velocidad de remoción de material en  $\text{mm}^3/\text{seg}$ .

$v$  = velocidad de corte en  $\text{mm}/\text{seg}$ .

$f$  = avance en  $\text{mm}/\text{rev}$ .

$d$  = profundidad de corte en  $\text{mm}$ .

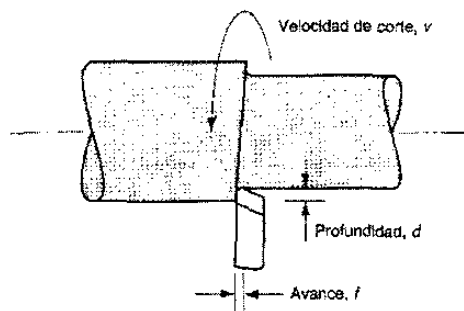


Figura 2.7 Condiciones de corte en el proceso de torneado

Las unidades típicas utilizadas para la velocidad de corte son  $\text{mm}/\text{seg}$ . El avance en torneado se expresa usualmente en  $\text{mm}/\text{rev}$ , y la profundidad de corte se expresa en  $\text{mm}$ . En otras operaciones de maquinado, estas unidades pueden ser diferentes. Por ejemplo, en la operación de taladrado la profundidad se interpreta normalmente como la profundidad del agujero taladrado.

Las operaciones de maquinado se dividen normalmente en dos categorías, distinguidas por el propósito y las condiciones de corte: cortes para desbaste primario (burdo) y cortes de acabado. Los cortes para desbaste primario se usan para remover

grandes cantidades de material de la parte de trabajo inicial tan rápido como sea posible a fin de producir una forma cercana a la requerida, pero dejando algún material en la pieza para una operación posterior de acabado. Los cortes de acabado se utilizan para completar la parte y alcanzar las dimensiones finales, las tolerancias y el acabado de la superficie. En los trabajos de maquinado para producción se realizan uno o más cortes para desbaste, seguidos de uno o más cortes de acabado. Las operaciones para desbaste se realizan a altas velocidades y profundidades, algunos de los avances típicos van de 0.4 a 1.25 mm y profundidades de 2.5 a 2.0 mm. Las operaciones de acabado se realizan a bajas velocidades de avance y a bajas profundidades, como son: avances de 0.125 a 0.4 mm y profundidades de 0.75 a 2.0 mm. Las velocidades de corte son más bajas en el trabajo de desbaste que en el de acabado.

Para enfriar o lubricar la herramienta de corte se aplica frecuentemente un fluido en la operación de maquinado, además de la velocidad, avance y profundidad de corte. La determinación de usar o no un fluido de corte y, en caso afirmativo, la elección del fluido apropiado se incluyen generalmente dentro del panorama de las condiciones de corte. La selección de estas condiciones, junto con el material de trabajo y las herramientas, determina el éxito de una operación de maquinado.

Se utilizan una máquina-herramienta para sostener la parte de trabajo, para poner en posición la herramienta con respecto al trabajo y para proporcionar la potencia para el proceso de maquinado a la velocidad, avance, y profundidad que se han establecido. El control de la herramienta, de las condiciones de corte, del trabajo, y de la máquina-herramienta permite fabricar partes con gran precisión y repetitividad a tolerancias de 0.025 mm o mejores. El término máquina-herramienta se aplica a cualquier máquina accionada por fuerza motriz que realice operaciones de maquinado, incluso el esmerilado. El término se aplica también frecuentemente a máquinas que realizan operaciones de formado de metal y prensado.

Las máquinas-herramientas convencionales son manejadas usualmente por un trabajador aunque las máquinas-herramientas modernas se diseñan frecuentemente para realizar sus procesos con un alto grado de automatización. Estas máquinas automáticas operan generalmente hasta una forma de control llamada control numérico. Ver tabla # 1

Operación	Máquina-herramienta Definiciones de velocidad, avance y profundidad
Torneado	Torno. El trabajo gira a determinada velocidad. La herramienta avanza paralela al eje del trabajo. La profundidad de corte es la penetración de la herramienta en la superficie original del trabajo.
Taladrado	Prensa taladradora El trabajo se mantiene estacionario. La herramienta gira y avanza paralelamente a su eje. El diámetro de la broca determina el diámetro del agujero. La profundidad de corte es la profundidad del agujero.
Fresado	Máquina fresadora. La herramienta gira a determinada velocidad. El trabajo avanza en dirección perpendicular al eje de la herramienta. La profundidad de corte es la penetración de la herramienta debajo de la superficie original.

Tabla # 1 Máquinas-herramientas convencionales usadas para las tres operaciones comunes de maquinado

## 2.3 Teoría de la formación de viruta en el maquinado de metales

La geometría de la mayoría de las operaciones de maquinado práctico son algo complejas, disponen de un modelo simplificado del maquinado que desprecia mucha de la complejidad geométrica y describe la mecánica de los procesos con buena precisión. Se le denomina modelo de corte ortogonal. Aún cuando un proceso real de maquinado es tridimensional, el modelo ortogonal tiene solamente dos dimensiones que juegan un papel activo en el análisis.

### 2.3.1 Modelo de corte ortogonal.

El corte ortogonal usa por definición una herramienta en forma de cuña, en la cual el borde cortante es perpendicular a la dirección de la velocidad de corte. Al presionar la herramienta contra el material se forma una viruta por deformación cortante a lo largo de un plano llamado plano de corte, éste forma un ángulo  $\alpha$  con la superficie de trabajo, ver figura 2.8 (b). Solamente el afilado borde de corte de la herramienta hace que ocurra una falla del material, como resultado, la viruta se separa del material original. El material se deforma plásticamente a lo largo del plano de corte, por consiguiente, durante el maquinado se realiza el grueso del trabajo de corte.

La herramienta para corte ortogonal tiene solamente dos elementos geométricos, el ángulo de ataque y el ángulo del claro o de incidencia. Como se indicó previamente, el ángulo de ataque  $\alpha$  determina la dirección en la que fluye la viruta formada en la parte de trabajo, y el ángulo del claro provee un claro pequeño entre el flanco de la herramienta y la superficie de trabajo recién generada.

Durante el corte, el borde cortante de la herramienta se coloca a cierta distancia por debajo de la superficie original del trabajo. Ésta corresponde al espesor de la viruta antes de su formación  $t_0$ . Al formarse la viruta a lo largo del plano de corte incrementa su espesor a  $t$ , La relación de  $t_0$  a  $t$ , se llama relación del grueso de la viruta (o simplemente relación de viruta)  $r$ .

Como el espesor de la viruta después del corte siempre es mayor que el espesor correspondiente antes del corte, la relación de viruta siempre será menor a 1.0.

Además de  $t_0$ , el corte ortogonal tiene una dimensión de anchura  $w$ , como se muestra en la figura 2.8, aun cuando esta dimensión no contribuye mucho al análisis en el corte ortogonal. La geometría del modelo de corte ortogonal nos permite establecer una relación importante entre el espesor de la viruta, el ángulo de ataque y el ángulo del plano de corte.

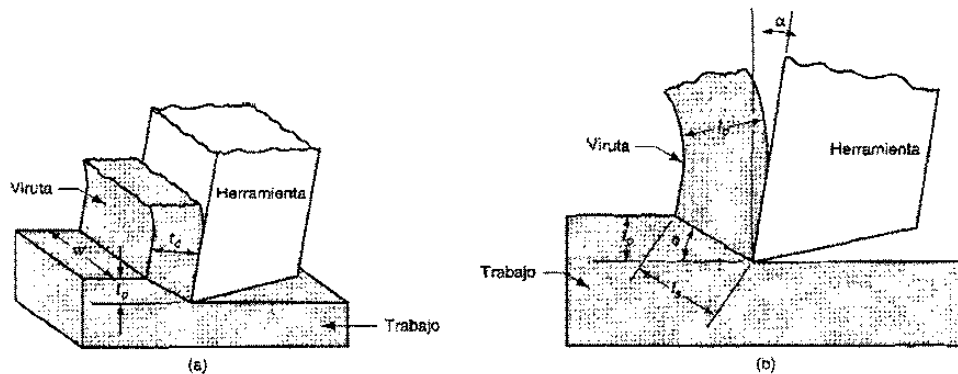


Figura 2.8 Corte Ortogonal: (a) Como un proceso tridimensional y (b) dos dimensiones en una vista lateral

La deformación cortante que ocurre a lo largo del plano de corte puede calcularse. La parte (a) de la figura 2.9 muestra la deformación cortante aproximada, en una serie de placas paralelas que se deslizan una contra otra para formar la viruta. De acuerdo con la definición de deformación cortante, cada placa experimenta la deformación mostrada en la figura 2.9.

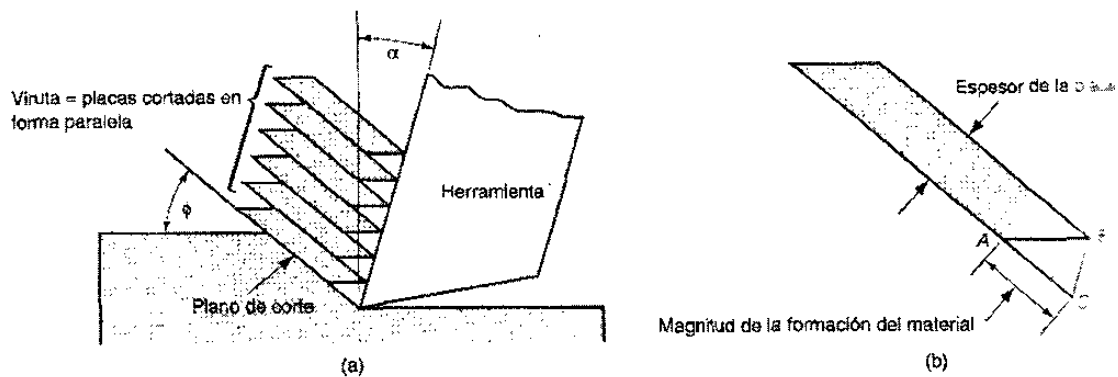


Figura 2.9 Deformación cortante

### 2.3.2 Formación real de viruta

Debemos observar que hay diferencias entre el modelo ortogonal y el proceso de maquinado real. En primer lugar, el proceso de deformación cortante no ocurre sobre un plano. Si el corte tuviera lugar a través de un plano, ello implicaría que la acción de corte debería ocurrir instantáneamente al pasar a través del plano, en lugar de hacerlo en un periodo de tiempo finito (aunque breve). Para el material que se comporta en forma real, la deformación cortante debe ocurrir dentro de una zona delgada de corte, más que en un

plano de espesor cero. Éste es el modelo más realista del proceso de deformación al corte en maquinado. Los experimentos de corte de metal han demostrado que el espesor de la zona de corte es solamente de pocas milésimas de pulgada. Como la zona de corte es tan delgada, en la mayoría de los casos no hay mucha pérdida de precisión si se supone como un plano.<sup>2</sup>

En segundo lugar, además de la deformación al corte que ocurre en la zona de corte, ocurre otra acción de corte en la viruta después de haber sido formada. Se refiere al corte adicional como corte secundario, para distinguirlo del corte primario. El corte secundario resulta de la fricción entre la viruta y la herramienta al deslizarse a lo largo de la cara inclinada de esta última. Su efecto aumenta con incremento de la fricción entre la herramienta y la viruta. Las zonas de corte primario y secundario se pueden observar en la figura 2.10.

En la figura se muestra una visión más realista de la formación de viruta, mostrando la zona de corte más que el plano de corte. También se muestra la zona secundaria de corte como resultado de la fricción herramienta-viruta.

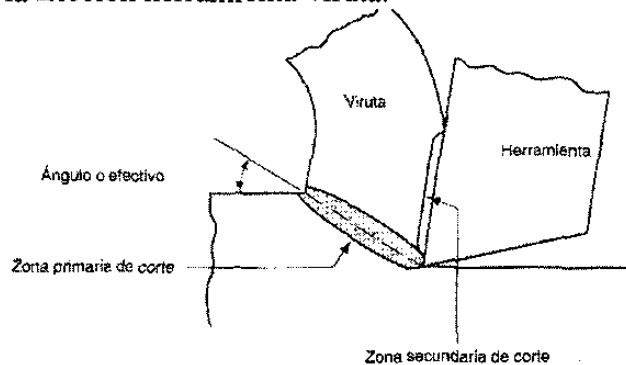


Figura 2.10 Forma de la viruta

En tercer lugar, la formación de la viruta depende del tipo de material que se maquina y de las condiciones de corte de la operación. Se pueden distinguir tres tipos básicos de viruta.

(a) Viruta discontinua. Cuando se maquinan materiales relativamente frágiles (por ejemplo, hierro fundido) a bajas velocidades de corte, la viruta se forma frecuentemente en segmentos separados, ver figura 2.11 (a). Esto tiende a impartir una textura irregular a la superficie maquinada. Una alta fricción herramienta-viruta y los avances y profundidades grandes de corte promueven la formación de este tipo de viruta.

(b) Viruta continua. Cuando se cortan materiales de trabajo dúctiles a velocidades altas con avances y profundidades pequeñas se forman virutas largas y continuas, ver figura 2.11 (b). Cuando se forma este tipo de viruta se obtiene un buen acabado de la

superficie. Un borde cortante bien afilado en la herramienta y una baja fricción herramienta-viruta propician la formación de virutas continuas.

(c) Viruta continua con acumulación en el borde. Cuando se maquinan materiales dúctiles a velocidades bajas o medias, la fricción entre la herramienta y la viruta tiende a causar la adhesión de porciones de material de trabajo en la cara inclinada de la herramienta. Esta formación se llama acumulación en el borde, ver figura 2.11 (c). La formación de esta acumulación es de naturaleza cíclica; se forma y crece, luego se vuelve inestable y se rompe. Gran parte de la acumulación de desecho se la lleva la viruta. Sin embargo, algunas porciones pueden incorporarse a la superficie de trabajo recién formada, ocasionando que la superficie se vuelva rugosa.

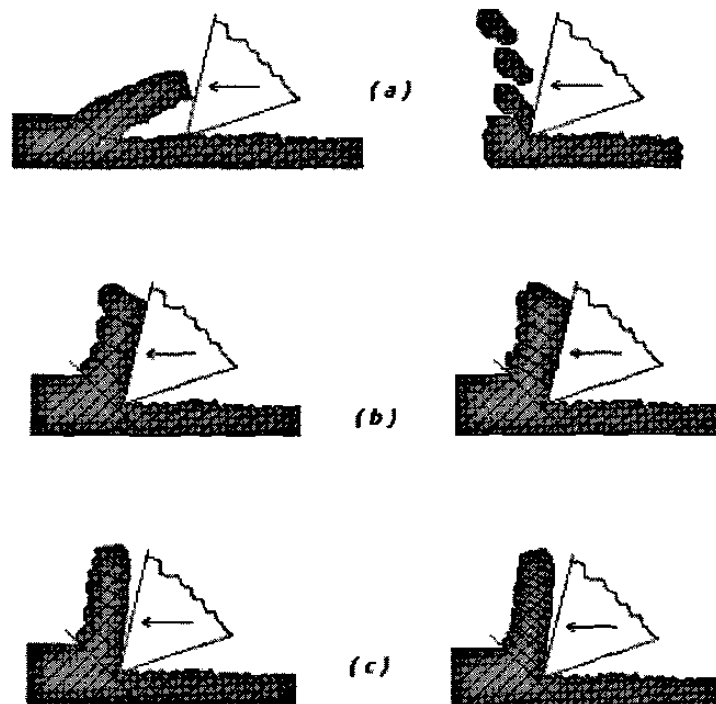


Figura 2.11 Tres tipos de formación de viruta en el corte de metales (a) discontinua, (b) continua y (c) continua con acumulación en el borde

## 2.4 Relaciones entre potencia y energía en el maquinado

Una operación de producción en maquinado requiere potencia. Las fuerzas de corte que se encuentran en la práctica de esta operación pueden ser de varios cientos de Newtons. Las velocidades típicas de corte son de varios cientos de m/s o más. El producto de la fuerza cortante y la velocidad dan la potencia (energía por unidad de tiempo) requerida para ejecutar la operación de maquinado:

$$P = F v \quad (2)$$

donde  $P$  = potencia de corte, N-m/s;  
 $F$ , = fuerza de corte, N;  
 $v$  = velocidad de corte, m/s.

La potencia bruta requerida para operar la máquina-herramienta es más grande que la potencia usada en el proceso de corte, debido a las pérdidas mecánicas en el motor y la transmisión de la máquina. Estas pérdidas se pueden contabilizar por la eficiencia mecánica de la máquina-herramienta, donde  $h_{pg}$  = potencia bruta del motor de la máquina-herramienta en hp y  $E$  = eficiencia mecánica de la máquina-herramienta. El valor típico de  $E$  para máquinas-herramientas es alrededor de 90%.<sup>3</sup>

#### 2.4.1 Temperatura de corte

Casi toda la energía que se consume en el maquinado (aproximadamente el 98%) es convertida en calor. Este calor puede hacer que las temperaturas sean muy altas en la interfase herramienta-viruta; las temperaturas de más de 540° C no son inusuales. La energía restante (cerca del 2%) se retiene como energía elástica en la viruta.<sup>4, 5, 6, 7</sup>

#### 2.4.2 Métodos analíticos

Hay varios métodos analíticos para estimar la temperatura de corte. Las referencias presentan algunas de estas aproximaciones. Este método se derivó de un análisis dimensional, usando datos experimentales para varios materiales de trabajo a fin de establecer los valores de los parámetros de la ecuación resultante. La ecuación se puede usar para predecir la elevación de la temperatura en la interfase herramienta-viruta durante el maquinado,

$$T = 0.4 (U/Qc)(vt_0/K)^{0.33} \quad (3)$$

donde  $T$  = aumento de la temperatura media en la interfase herramienta-viruta,  
 $U$  = energía específica en la operación, N-m/mm<sup>3</sup>;  
 $v$  = velocidad de corte, mm/seg;  
 $t_0$  = espesor de la viruta antes del corte, m;  
 $Qc$  = calor específico volumétrico del material de trabajo;  
 $K$  = difusividad térmica del material de trabajo, mm<sup>2</sup>/seg.



### 2.4.3 Medición de la temperatura de corte

Se han desarrollado métodos experimentales para la medición de temperaturas en maquinado. Las técnicas de medición más frecuentemente utilizadas son los termopares herramienta-viruta. Este termopar toma la herramienta y la viruta como dos metales diferentes que forman una junta de termopar. Conectando apropiadamente las terminales eléctricas a la herramienta y a la parte de trabajo (que está conectada a la viruta), se puede registrar la diferencia de potencial generada por la interfase herramienta-viruta durante el corte mediante un potenciómetro registrador u otro dispositivo colector de datos apropiado. La diferencia de potencial resultante del termopar herramienta-viruta se puede convertir al valor de temperatura correspondiente mediante ecuaciones de calibración para la combinación particular herramienta-trabajo.

El termopar herramienta-viruta se ha utilizado por los investigadores para estudiar la relación entre la temperatura y las condiciones de corte como velocidad y avance. Trigger<sup>8</sup> determinó la relación entre velocidad y temperatura y obtuvo la siguiente forma general:

$$T = Kv \quad (4)$$

donde  $T$  = temperatura medida en la interfase herramienta-viruta y  
 $v$  = velocidad de corte.

Los parámetros  $K$  dependen de las condiciones de corte (diferentes a  $v$ ) y del material de trabajo. En la figura 2.12 se muestran las gráficas de la temperatura contra velocidad de corte para varios materiales de trabajo, con ecuaciones similares a la ecuación determinadas para cada material. Existe una relación similar entre la temperatura de corte y el avance; sin embargo, el efecto del avance sobre la temperatura no es tan fuerte como la velocidad de corte.

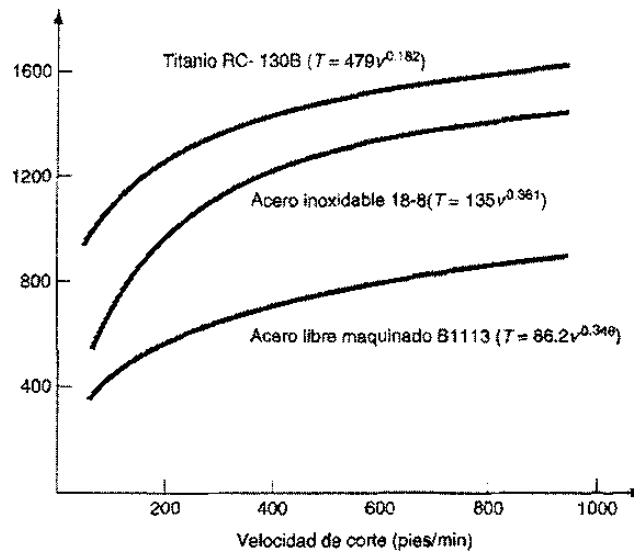


Figura 2.12 Temperatura contra velocidad de corte para varios materiales de trabajo

## CAPÍTULO 3

# TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

### 3.1 Vida de las herramientas

Las operaciones de maquinado se realizan utilizando herramientas de corte. Las altas fuerzas y temperaturas durante el maquinado crean un ambiente muy agresivo para la herramienta. Las fuerzas de corte demasiado grandes fracturan la herramienta. Si la temperatura de corte se eleva demasiado, el material de la herramienta se ablanda y falla. Y si ninguna de estas condiciones ocasionan falla de la herramienta, de cualquier manera existe una acción continua de desgaste de la herramienta de corte que la conduce finalmente a la falla.

La tecnología de las herramientas de corte contiene dos aspectos principales: 1) el *material de la herramienta* y 2) la *geometría de la herramienta*. La primera se refiere al desarrollo de materiales que puedan soportar las fuerzas, las temperaturas y la acción de desgaste en el proceso de maquinado. La segunda se ocupa de optimizar la geometría de la herramienta de corte para el material de la herramienta y para una operación dada.

Hay tres formas posibles de falla en una herramienta de corte en maquinado:

1) Falla por fractura. Este modo ocurre cuando la fuerza de corte se hace excesiva en la punta de la herramienta, causando una falla repentina por fractura. Ver figura 3.1

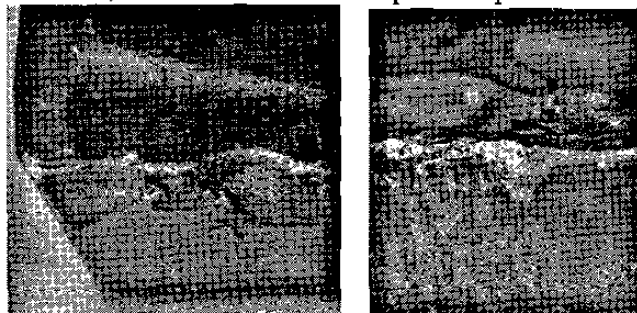


Figura 3.1 Falla por fractura en las herramientas de corte

2) Falla por temperatura. Esta falla ocurre cuando la temperatura de corte es demasiado alta para el material de la herramienta, causando ablandamiento en la punta, deformación plástica y pérdida del filo en el borde. Ver figura 3.2

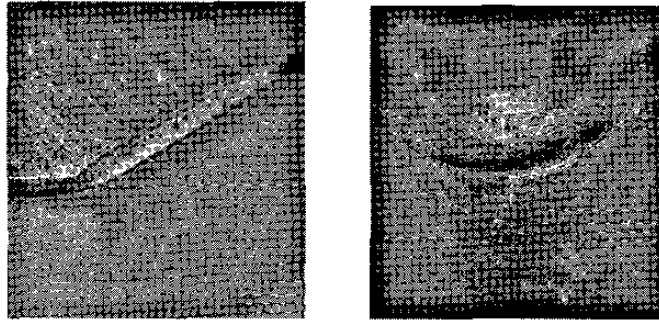


Figura 3.2 Falla por temperatura en una herramienta

3) Desgaste gradual. El desgaste gradual del borde cortante ocasiona pérdida de la forma de la herramienta, reducción en la eficiencia del corte, desgaste acelerado y falla final de la herramienta, a la falla por temperatura. Ver figura 3.3

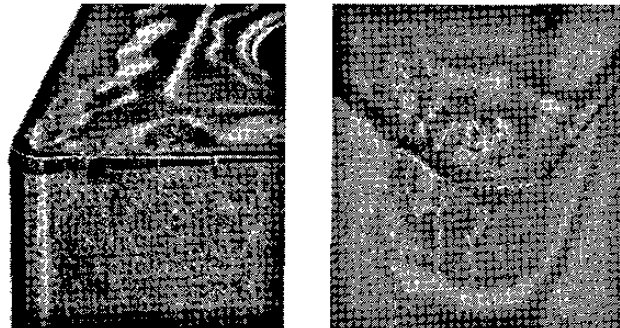


Figura 3.3 Falla por gradual de flanco (izquierdo) y de cráter (derecho)

Las fallas por fractura y temperatura dan como resultado una pérdida prematura de la herramienta de corte. Estas dos formas de falla son por tanto indeseables. De las tres posibles formas de falla es preferible el desgaste gradual, debido a que éste permite una mayor utilización de la herramienta con la ventaja económica asociada a un uso más prolongado.

La calidad del producto también debe considerarse cuando se intenta controlar las formas de falla de la herramienta. La falla repentina de la punta de la herramienta durante un corte causa frecuentemente daños a la superficie del trabajo. Este daño requiere volver a trabajar la superficie o posiblemente desechar la parte. El daño se puede evitar si la selección de las condiciones de corte favorecen el desgaste gradual de

la herramienta y evitan la fractura o la falla por temperatura, o si la herramienta se cambia antes de que ocurra una falla catastrófica del borde o filo cortante.

### 3.1.1 Desgaste de la herramienta

El desgaste gradual ocurre en dos lugares principales de la herramienta de corte: en la parte superior de la superficie de ataque y en el flanco o superficie de incidencia. Por tanto, se pueden distinguir dos tipos principales de desgaste de la herramienta:

- 1) desgaste en cráter y
- 2) desgaste del flanco, ilustrado en la figura 3.4.

Se usará una herramienta de punta sencilla para explicar el desgaste y el mecanismo que lo causa. El desgaste en cráter es una sección cóncava de la superficie de ataque de la herramienta, formada por la acción de la viruta que se desliza contra la superficie. Los altos esfuerzos y temperaturas caracterizan a la interfase de contacto herramienta-viruta y contribuyen a la acción de desgaste. El cráter puede medirse ya sea por su profundidad o por su área. El desgaste del flanco ocurre en el flanco o superficie de incidencia de la herramienta. Resulta del rozamiento entre la recién creada superficie de trabajo y la cara del flanco adyacente al borde de corte. El desgaste del flanco se mide por el ancho de la banda de desgaste (FW). A esta banda se le llama frecuentemente la banda de desgaste.

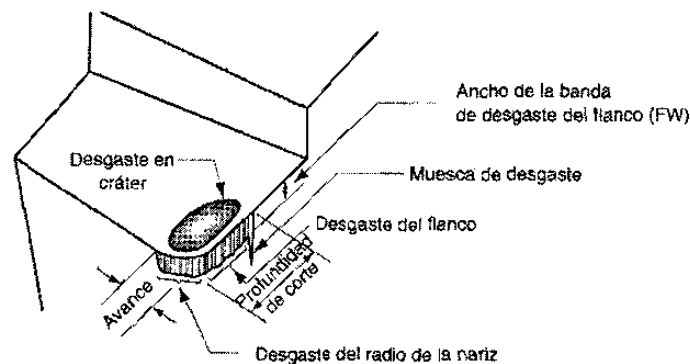


Figura 3.4 Desgaste de la herramienta

Se pueden identificar varias características del desgaste del flanco. En primer lugar, aparece frecuentemente un desgaste extremo en el flanco sobre el filo de corte en el sitio que corresponde a la superficie original de la parte de trabajo. A éste se le llama muesca de desgaste, y ocurre porque la superficie original del trabajo es más dura y más abrasiva que el material interno. El endurecimiento por trabajo es provocado por el estirado en frío o por maquinados previos, así como por partículas de arena en la superficie de la fundición o por otras razones. Como consecuencia de la superficie más dura el desgaste se acelera en esta región. El desgaste del radio de la nariz es la segunda región de desgaste del flanco que puede identificarse y conduce a la terminación del borde de corte.

El mecanismo específico que ocasiona el desgaste de la herramienta se puede resumir como sigue:

Abrasión. Esta es una acción de desgaste mecánico debido a que las partículas duras en el material de trabajo rayan y remueven pequeñas porciones de la herramienta. Esta acción abrasiva ocurre tanto en el desgaste del flanco como en el desgaste en cráter, predominando en el desgaste del flanco. Es decir es el desgaste producido por el contacto entre materiales más duros que la herramienta y la propia herramienta rayándola y desgastándola.

Adhesión. Cuando dos metales entran en contacto a alta presión y temperatura, ocurre la adhesión o soldado entre ellos. Esta condición se encuentra entre la viruta y la superficie de ataque de la herramienta. A medida que la viruta fluye a través de la herramienta, se rompen pequeñas partículas de la herramienta y se separan de la superficie, provocando el desgaste de la superficie. Es cuando en la zona de corte debido a las altas temperaturas, el material de corte y la herramienta se sueldan y, al separarse, parte de la herramienta se desprende.

Difusión. Es un intercambio de átomos a través de un límite de contacto entre dos materiales. En el caso del desgaste de la herramienta, la difusión ocurre en el límite herramienta-viruta y ocasiona que la superficie de la herramienta quede agotada por los átomos que le imparten su dureza. Conforme este proceso continúa, la superficie de la herramienta se vuelve más susceptible a la abrasión y a la adhesión. Se cree que la difusión es el principal mecanismo del desgaste en cráter.

Deformación plástica. Otro mecanismo que contribuye al desgaste de la herramienta es la deformación plástica del borde cortante. Las fuerzas de corte que actúan en el borde de corte a altas temperaturas hacen que éste se deforme plásticamente, haciéndolo más vulnerable a la abrasión de la superficie de la herramienta. La deformación plástica contribuye principalmente al desgaste del flanco.

Fallas mecánicas. Fallas producidas por estrategias, condiciones de corte, herramientas, etc., inadecuadas.

La mayoría de estos mecanismos de desgaste se aceleran a velocidades de corte y temperaturas más altas.

El material de la herramienta debe cumplir con características específicas tales como:

- ✦ Ser suficientemente duro para resistir el desgaste y deformación pero tenaz para resistir los cortes intermitentes e inclusiones.
- ✦ Ser químicamente inerte en relación al material de la pieza de trabajo y estable para resistir la oxidación, para evitar que se genere el filo recrecido y desgaste prematuro.

Estas propiedades permitirán maquinar con altas velocidades de corte, aumentar la vida de las herramientas, permitir obtener la mejor calidad superficial y dimensional posible en la pieza a maquinar.

Pero, ¿cómo se sabrá qué herramientas utilizar, qué papel juega cada una de sus propiedades? ¿Cómo se seleccionará la herramienta adecuada para cada material?. Y, para cada aplicación en concreto, ¿cuáles son los factores que influyen tanto en la vida de la herramienta como en la calidad superficial de la pieza: los recubrimientos, su geometría, el fluido refrigerante, el fluido de corte y la estrategia de maquinado, longitud de la herramienta, etc.?

Para conocer un poco más a fondo estas características se realizará un estudio de las herramientas.

Para realizar el estudio de las herramientas se seleccionarán los tres campos clave en una herramienta: material de la herramienta, geometría y recubrimiento.

- Material de la herramienta

Sustrato

Aceros para trabajos en frío o en caliente - No se utilizan en el MAV

Acero rápido: una aleación de metales que contiene alrededor de un 20% de partículas duras. Apenas se utilizan en el MAV.

Carburo cementado o metal duro: hecho con partículas de carburo unidas por un aglomerante a través de un proceso de sinterizado. Los carburos son muy duros y representan de 60% a 95% del volumen total. Los más comunes son: carburo de tungsteno (WC), carburo de titanio (TiC), carburo de tantalio (TaC), carburo de niobio (NbC). El aglomerante típico es el cobalto (Co). Son muy adecuados para el maquinado de aluminio y silicio.

Carburo cementado recubierto: la base de carburo cementado es recubierta con carburo de titanio (TiC), nitruro de titanio (TiN), óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) y nitruro de titanio carbono (TiCN), nitruro de titanio y aluminio (TiAlN). La adhesión del recubrimiento será mediante deposición química por vapor (CDV), deposición física por vapor (PVD) y deposición química por vapor a temperatura media (MTCVD). Buen equilibrio entre la tenacidad y la resistencia al desgaste.

Cermets (Cerámica/Metal): Aunque el nombre es aplicable incluso a las herramientas de carburo cementado, en este caso las partículas base son de TiC, TiCN, TiN en vez de carburo de tungsteno. El aglomerante es níquel-cobalto. Buena resistencia al desgaste y formación de cráteres, alta estabilidad química y dureza en caliente. Baja tendencia a la oxidación y a la formación del filo recocado. Son de gran dureza y resistencia a la

abrasión en detrimento de su tenacidad. Los cermets se aplican mejor a aquellos materiales que producen una viruta dúctil, aceros y las fundiciones dúctiles. Los modernos aleados TaNbC y MoC añadidos incrementan la resistencia de los cermets ante el choque cíclico propio de la operación de fresado.

Cerámicos: Existen dos tipos básicos de cerámica: Las basadas en óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) y las de nitruro de silicio ( $Si_3N_4$ ). Son duras con alta dureza en caliente, y no reaccionan químicamente con los materiales de la pieza. Sin embargo son muy frágiles. Ideales para el maquinado de piezas en duro y como reemplazo de las operaciones de rectificado.

Nitruro de Boro Cúbico (CBN): Es uno de los materiales más duros. Ocupa el segundo lugar después del diamante. Dureza extrema en caliente, excelente resistencia al desgaste y en general buena estabilidad química durante el maquinado. Es frágil, pero más tenaz que las cerámicas.

Diamante policristalino (PCD): Es casi tan duro como el diamante natural. Este diamante sintético tiene una increíble resistencia al desgaste y una baja conductividad térmica. Sin embargo, son muy frágiles. La vida de la herramienta es hasta cien veces mayor que la del carburo cementado. Desventajas: las temperaturas de corte no deben exceder  $600\text{ }^{\circ}C$ , no puede ser usado para cortar materiales ferrosos porque existe afinidad, y no sirve para cortar para materiales tenaces.

- Geometría

Espiga (cuello) cónica: Con el fin de mejorar la rigidez.

Alma de gran diámetro: Mayor estabilidad a la herramienta, reduce las vibraciones y el riesgo de mellado de los filos. Menor flexión y una mejor tolerancia de la pieza maquinada.

Cuello de la herramienta rebajado: Mayor alcance en cajas profundas. Evita el contacto y los roces. Reduce las vibraciones.

Mango cilíndrico largo: Para una mejor sujeción y equilibrio.

Ángulo de desprendimiento negativo ( $-15^{\circ}$ ): Mayor estabilidad y resistencia del filo. Menor tiempo de contacto con la viruta. El calor se transmite a la viruta. Mínima tolerancia de radio. Mejor acabado superficial. Menor necesidad de pulido. Producto final más próximo a la forma definitiva.

Canales de evacuación de viruta según el tipo de material a maquinar.

Aleaciones ligeras: Arista muy viva para permitir un corte suave evitando la adherencia de material al filo. Herramientas de pocos labios (2) con ángulos de hélice de 25° a 30° y paso largo para facilitar la evacuación de grandes caudales de viruta.

Materiales duros: Pasos y longitudes de corte cortos, mayor rigidez. Mucha hélice para disminuir la resistencia al corte y mejorar el acabado. Herramientas de muchos labios (4-8): Breve contacto con la viruta, menor absorción de calor, viruta corta.

Herramientas enterizas y de insertos:

Enterizas: Mayor precisión, rigidez y equilibrio. Mejor calidad de pieza. Disposición de herramientas de cualquier diámetro. Elevado costo. Distintos tipos de material. Dificultad a la hora del afilado: necesidad de una estrecha relación proveedor-usuario.

De insertos: Menos rígida: Menor precisión superficial y dimensional. Diámetros cercanos a los 8mm. Solo metal duro para MAV. Normalmente para desbaste, necesita mucha potencia. Menor costo. Facilidad de reposición.

- Recubrimientos

Las características principales de los recubrimientos se resumen en los siguientes puntos:

- ✚ Aumentan la dureza en los filos de corte de la herramienta.
- ✚ Facilitan la disipación del calor acumulado en el filo de corte
- ✚ Baja conductividad térmica que favorece la eliminación del calor a través de la viruta.
- ✚ Aumentan la resistencia a la abrasión, disminuyen la afinidad herramienta-pieza
- ✚ El grosor del recubrimiento varía entre 0.00254mm y 0.0127mm.
- ✚ Los recubrimientos se aplican mediante deposición química de vapor o deposición física de vapor

### Recubrimientos de TiAlN

Son los que más se utilizan actualmente, y poco a poco van dejando atrás a los demás. Los recubrimientos TiAlN multicapa están reemplazando los de TiCN, y los monocapa a los de TiN.

TiAlN (multicapa y monocapa) son recubrimientos extraduros (PVD) basados en nitruro de titanio aluminio que destacan por su dureza, estabilidad térmica y resistencia a ataques químicos. Protegen las aristas de corte por abrasión y adhesión así como por carga térmica.



- ✦ Multicapa: combina la elevada tenacidad de la estructura multicapa, con su alta dureza y la buena estabilidad térmica, 800°C, y química de la capa TiAlN. Así protege las herramientas de corte de acero rápido y metal duro contra el desgaste prematuro producido por tensiones severas. Debido a su estabilidad térmica, permite trabajar en maquinados a altas velocidades e incluso en seco o con mínima cantidad de lubricante.
- ✦ Monocapa: desarrollado para su aplicación en fresas de metal duro utilizadas en condiciones de maquinado severas. Su elevada dureza, y notable estabilidad térmica, 800 °C y química hacen que sea óptimo para las fresas que se utilizan en el maquinado de materiales térmicamente tratados empleados, como por ejemplo en moldes, punzones, matrices y herramientas de forja.

### Recubrimiento de diamante

Se utiliza en herramientas para maquinar materiales muy abrasivos como el grafito. Durante el maquinado de estos materiales las herramientas se desgastan rápidamente y la calidad de las superficies maquinadas y la precisión dimensional son pobres. Con las herramientas recubiertas de diamante, un recubrimiento cuya dureza es superior a los 8.000 Vickers, además de obtener una vida útil más larga y poder aumentar las velocidades de corte, disminuyendo así de manera importante el tiempo de maquinado, se consigue un buen acabado de la superficie y una buena precisión dimensional.

### Recubrimiento WC/C:

Realizado por deposición física al vapor a temperaturas alrededor de los 200 °C. Al realizarse el proceso de recubrimiento en alto vacío, las propiedades del recubrimiento son sustancialmente mejores que las logradas a presión atmosférica (proyección térmica), o en gases y baños (nitruración, galvanizado). Los recubrimientos tienen un espesor de capa de solo unas micras y son la última operación dentro de los componentes de precisión. Este recubrimiento presenta una combinación única de características: Bajo coeficiente de fricción, alta resistencia al desgaste, una excelente capacidad de carga.

### Recubrimientos de TiAlN monocapa combinado con WC/C

Este recubrimiento hace frente a todos aquellos mecanismos de desgaste que se dan en la formación y evacuación de viruta. Combina la alta dureza y estabilidad térmica del recubrimiento TiAlN con las buenas propiedades de deslizamiento y lubricación del recubrimiento WC/C. Se utiliza sobre todo en taladrados y roscados.

### 3.1.2 Vida de las herramientas

Al continuar el corte, los diferentes mecanismos de desgaste producen mayores niveles del mismo en la herramienta de corte. La relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte se muestra en la figura 3.5. Aunque la relación que se ilustra es para el desgaste del flanco, existe una relación similar para el desgaste en cráter. Por lo general se pueden identificar tres regiones en la curva típica del crecimiento del desgaste. La primera es el periodo de rompimiento inicial en el cual el borde cortante afilado se desgasta rápidamente al entrar en uso. Esta primera región ocurre en los primeros minutos de corte. A este periodo le sigue un desgaste a una velocidad más o menos uniforme y se le llama la región de desgaste de estado estable. En la figura 3.5 esta región se representa como una función lineal del tiempo, aunque en el maquinado real también hay desviaciones de la línea recta.

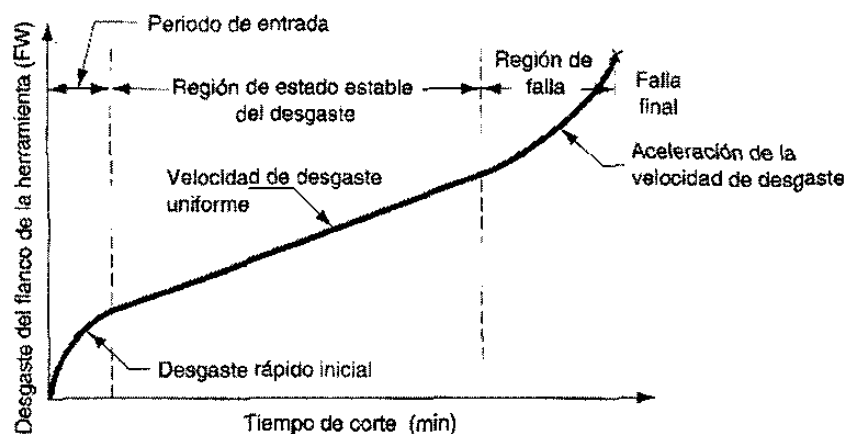


Figura 3.5 Relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte

Finalmente, el desgaste alcanza un nivel donde la velocidad del mismo se empieza a acelerar. Esto marca el principio de la región de falla, en la cual las temperaturas de corte son más altas y la eficiencia general del proceso de maquinado se reduce. Si estas condiciones continúan, la herramienta finalmente fallará por un mal control en la temperatura.

La pendiente de la curva de desgaste de la herramienta en la región de estado estable se ve afectada por el material de trabajo y las condiciones de corte. Los materiales de trabajo más duros ocasionan que se incremente la velocidad de desgaste (la pendiente de la curva). Los incrementos en la velocidad, en el avance y en la profundidad de corte tienen efectos similares, pero la velocidad es el más importante de los tres. Si se trazan curvas de desgaste de la herramienta para varias velocidades de corte, el resultado se muestra en la figura 3.6. Al aumentar las velocidades de corte se incrementa la velocidad de desgaste, alcanzándose el mismo nivel de desgaste en menos tiempo.

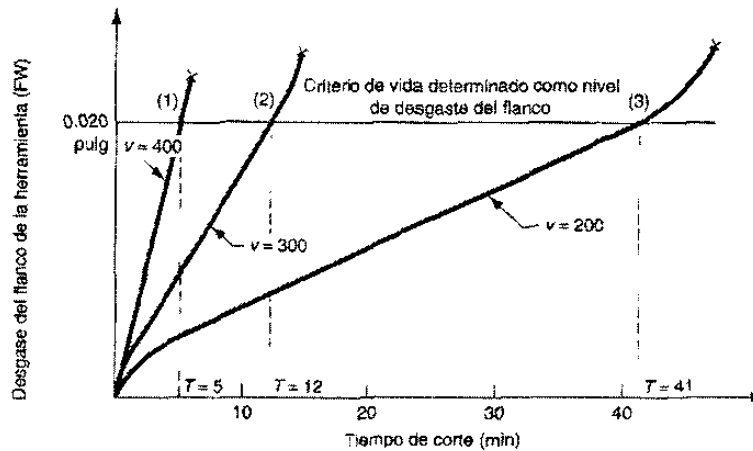


Figura 3.6 Curvas de desgaste de la herramienta para varias velocidades de corte

La vida de la herramienta se define como la longitud de tiempo de corte en el cual se puede utilizar la herramienta. Una forma de definirla consiste en permitir su operación hasta que ocurra una falla catastrófica. Esto se indica en la figura 3.7 por el final de cada curva de desgaste. Sin embargo, en producción frecuentemente es inconveniente usar una herramienta hasta que ocurra una falla, debido a las dificultades que acarrea el reafilado de la herramienta y a los problemas que ocasiona a la calidad de las partes de trabajo. Como una alternativa se puede seleccionar un nivel de desgaste como criterio de la vida de la herramienta y reemplazarla cuando el desgaste alcance este nivel. Un criterio conveniente de la vida de la herramienta es un cierto valor de desgaste del flanco o superficie de incidencia, como 0.05 mm que en la gráfica de la figura 3.7 se ilustra como una línea horizontal. Cuando cada una de las tres curvas de desgaste intersectan la línea, se define que la vida de las herramientas correspondientes ha terminado. Si los puntos de intersección se proyectan sobre el eje del tiempo se pueden identificar los valores de la vida de la herramienta. Las velocidades de corte más altas traen como consecuencia vidas más cortas para la herramienta.

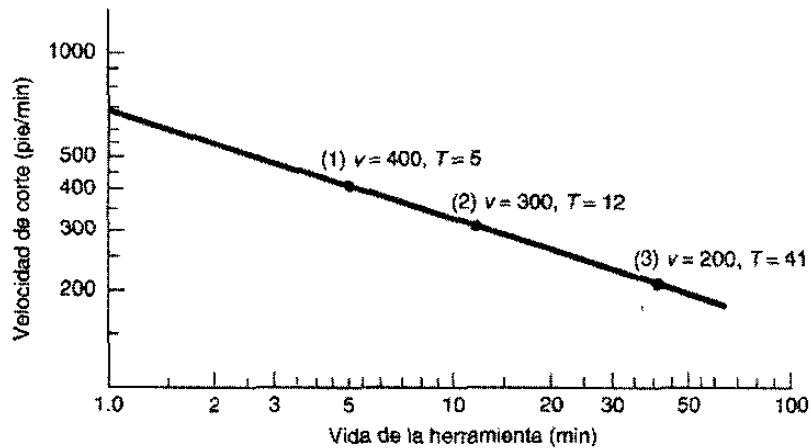


Figura 3.7 Vida de la herramienta

Criterios para la vida de la herramienta en producción:

- 1) La falla completa del borde cortante (por fractura, por temperatura o por desgaste).
- 2) La inspección visual por el operador de la máquina del desgaste del flanco (o desgaste en cráter) sin microscopio. Este criterio se limita al juicio y habilidad del operador para observar el desgaste de la herramienta a simple vista.
- 3) La prueba al tacto del borde o filo cortante (con la uña) por el operador.
- 4) Los cambios en el sonido emitido por la operación, a juicio del operador.
- 5) La viruta se vuelve más larga, enmarañada y más difícil de eliminar.
- 6) Degradación del acabado superficial en el trabajo.
- 7) Mayor consumo de potencia de la máquina-herramienta.
- 8) Conteo de las piezas de trabajo. Se capacita al operador para que cambie la herramienta después de un número específico de partes maquinadas.
- 9) Tiempo acumulado de corte, el cual es similar a la cuenta de partes del punto anterior, excepto que se registra la longitud de tiempo que ha trabajado la herramienta. Esto es posible en las máquinas-herramientas controladas por computadora, la cual se programa para registrar el tiempo total de corte de cada herramienta.

## 3.2 Materiales para herramientas

Las herramientas de corte deben poseer ciertas características específicas. Se pueden usar los tres modos de falla de la herramienta para identificar algunas de las propiedades importantes que deben poseer los materiales para herramientas:<sup>9, 10, 11</sup>

- 1) Tenacidad. Para evitar las fallas por fractura, el material de la herramienta debe tener alta tenacidad. La tenacidad es la capacidad de absorber energía sin que falle el material. Se caracteriza generalmente por una combinación de resistencia y ductilidad del material.
- 2) Dureza en caliente. La dureza en caliente es la capacidad del material para retener su dureza a altas temperaturas. Ésta es necesaria debido al ambiente de altas temperaturas en que opera la herramienta. (porque en un proceso de maquinado con herramientas tradicionales:  

$$\text{Temperatura herramienta} > \text{temperatura pieza} > \text{temperatura viruta}$$
 con herramientas más avanzadas se logra concentrar el aumento de temperatura en la viruta).
- 3) Resistencia al desgaste. La dureza es la propiedad más importante que se necesita para resistir el desgaste abrasivo. Todos los materiales para herramientas de corte deben ser duros. Sin embargo, la resistencia al desgaste en el corte de metales no solamente depende de la dureza de la herramienta, sino también de otros mecanismos de desgaste. El acabado superficial de la herramienta (superficie más lisa significa coeficiente de fricción más bajo), la composición química de la herramienta y de los materiales de trabajo, y el uso de un fluido para corte son otras características que afectan la resistencia al desgaste.

La selección de la herramienta de corte va a depender de la operación de corte a realizar, el material de la pieza, las propiedades de la máquina, la terminación superficial que se desee, etc.

Para cumplir con cada uno de estos requerimientos han surgido herramientas formadas por diferentes aleaciones. Los materiales para las herramientas de corte incluyen aceros al carbono, aceros de mediana aleación, aceros de alta velocidad, aleaciones fundidas, carburos cementados, cerámicas u óxidos y diamantes.

Para conocer las aleaciones de aceros para herramientas hay que comprender las funciones que cumplen cada uno de los elementos que forman la aleación. El resumen de estas características se presenta la tabla # 2. Los elementos se agregan para obtener una mayor dureza y resistencia al desgaste, mayor tenacidad al impacto, mayor dureza en

caliente en el acero, y una reducción en la distorsión y pandeo durante el templado. Aquí se presenta un recuadro con los elementos químicos utilizados para colaborar con las siguientes propiedades mencionadas. En la tabla # 2 se puede observar los elementos químicos utilizados que incrementan las propiedades mecánicas.

Elemento	Cantidad	Propiedades
Carbono, <i>C</i>	0.6 % - 1.4 %	- Forma carburos con el hierro. - Aumenta la dureza. - Aumenta la resistencia mecánica. - Aumenta la resistencia al desgaste.
Cromo, <i>Cr</i>	0.25 % - 4.5 %	- Aumenta la resistencia al desgaste. - Aumenta la tenacidad.
Cobalto, <i>Co</i>	5 % - 12 %	- Se emplea en aceros de alta velocidad. - Aumenta la dureza en caliente. - Permite velocidades y temperaturas de operación más altas manteniendo la dureza y los filos.
Molibdeno, <i>Mo</i>	hasta 10 %	- Elemento fuerte para formar carburos. - Aumenta la resistencia mecánica. - Aumenta la resistencia al desgaste. - Aumenta la dureza en caliente. - Siempre se utiliza junto a otros elementos de aleación
Tungsteno, <i>W</i>	1.25 % - 20 %	- Mejora la dureza en caliente. - Aumenta la resistencia mecánica.
Vanadio, <i>V</i>	Aceros al Carbono 0.20 % - 0.5 % Aceros Alta Veloc. 1 % - 5 %	- Aumenta la dureza en caliente. - Aumenta la resistencia a la abrasión.

Tabla # 2 Elementos de cada aleación con sus propiedades

En las herramientas de corte existen varias familias dependiendo del material que se componen, cada una tiene ciertas características de resistencia y puede realizar mejor alguna operación de corte. Algunos ejemplos son los siguientes materiales de herramientas de corte: 1) aceros al carbono y de baja aleación, 2) aceros de alta velocidad, 3) fundición de aleaciones de cobalto, 4) carburos cementados, cermet y carburos recubiertos, 5) cerámicos, 6) diamantes sintéticos y nitruro de boro cúbico. Ver tabla # 3. La resistencia a la ruptura transversal es una propiedad que se usa para indicar la tenacidad de los materiales duros.

Herramienta	Características	Utilización
Aceros al Carbono y de baja aleación	Son el tipo de acero más antiguo en herramientas de corte. Son muy baratos. Tienen buena resistencia al impacto. Se pueden someter fácilmente a tratamientos térmicos como el templeado, lográndose un amplio rango de durezas. Se forman y rectifican con facilidad. Mantienen su borde filoso cuando no están sometidos a abrasión intensa o a altas temperaturas. Han sido sustituidos por otros materiales.	<input type="checkbox"/> Brocas que trabajan a velocidades relativamente bajas. <input type="checkbox"/> Machuelos. <input type="checkbox"/> Escariadores y brochas.
Aceros de Alta Velocidad	Son el grupo con mayor contenido de aleaciones de los aceros. Conservan la dureza, resistencia mecánica y filo de los aceros. Empleando los equipos adecuados pueden ser templadas por completo con poco riesgo de distorsión o agrietamiento. Se templean en aceite.	<input type="checkbox"/> Taladrar. <input type="checkbox"/> Escariar. <input type="checkbox"/> Fresar. <input type="checkbox"/> Brochar. <input type="checkbox"/> Machuelar. <input type="checkbox"/> Máquinas para fabricar tornillos.
Aleaciones de Fundición de cobalto	Mantienen su elevada dureza a altas temperaturas. Tienen buena resistencia al desgaste. No se necesitan fluidos de corte.	<input type="checkbox"/> Se recomiendan para operaciones de desbaste profundo con velocidades y avances relativamente altos <input type="checkbox"/> Sólo se emplean para obtener un acabado superficial especial.
Carburos Cementados * cerments	Tienen carburos metálicos. Se fabrican con técnicas de metalurgia de polvos. Tienen alta dureza en un amplio rango de temperaturas. Elevado módulo elástico, dos o tres veces el del acero. No representan flujo plástico. Baja expansión térmica. Alta conductividad térmica. Se emplean como insertos o puntas que se sueldan o sujetan a un vástago de acero. Se encuentran en diferentes formas, circulares, triangulares, cuadrados y etc.	
Carburo de Tungsteno Aglutinado con Cobalto Carburo de Tungsteno Aglutinado con Cobalto + Solución Sólida de WC- TiC-TaC-NbC Carburo de Titanio con Aglutinante de Niquel y Molibdeno	W: Tungsteno C: Carbono Ti: Titanio Ta: Tantalio Nb: Niobio Opera a altas temperaturas debido a las altas velocidades de corte. Trabaja piezas de materiales con alta resistencia mecánica.	<input type="checkbox"/> Se emplean para maquinari fierros fundidos y metales abrasivos no ferrosos. Maquinar aceros. Cortar.
Carburos recubiertos	Son insertos normales de carburo revestidos con una capa delgada de carburo de titanio, nitruro de titanio u óxido de aluminio. Con el revestimiento se obtiene una resistencia superior al desgaste, a la vez que se mantiene la resistencia mecánica y la tenacidad. No se necesitan fluidos de corte, si se aplica debe ser en forma continua y en grandes cantidades, para evitar calentamiento y templeado. Los avances suaves, las bajas velocidades y el traqueteo son dañinos.	<input type="checkbox"/> Se utilizan en máquinas de herramientas rígidas, de mayor velocidad y más potentes.
Cerámicas u Óxidos	Se constituyen de granos finos de aluminio ligados entre sí. Con adiciones de otros elementos se logran propiedades óptimas. Resistencia muy alta a la abrasión. Son más duras que los carburos cementados. Tienen menor o nula tendencia a soldarse con los metales durante el corte. Carecen de resistencia al impacto. Puede ocurrir una falla prematura por desportilladura o rotura.	<input type="checkbox"/> Son eficaces para operaciones de torneado ininterrumpido a alta velocidad.
CBN Nitruro Cúbico de Boro Cúbico	Es el material más duro que hay en la actualidad. Se liga a un sustrato de carburo. La capa de CBN produce una gran resistencia al desgaste. Gran resistencia mecánica de los bordes. Es químicamente inerte al hierro y al níquel a altas temperaturas.	<input type="checkbox"/> Es adecuado para trabajar aleaciones de altas temperaturas y diversas aleaciones ferrosas. <input type="checkbox"/> Se emplea como abrasivo en operaciones de rectificado.

Tabla #3. Las herramientas y su utilización

A los carburos cementados se le asigna Grado C-1, Grado C-2, etc. Los grados 1 a 4 se recomiendan para maquinar hierro fundido, materiales no ferrosos y no metálicos; los grados 5 a 8 son para maquinar aceros y sus aleaciones. Los grados 1 y 5 son para desbastar, los 2 y 6 son para uso general, 3 y 7 son para acabado, y 4 y 8 son para acabado de precisión. Existen también otros grados para diversas aplicaciones y según lo riguroso de la operación de maquinado.<sup>12</sup>

Los materiales duros se han utilizado para cortar o deformar otros metales durante miles de años. Si embargo, en los últimos 150 años se han inventado o desarrollado mejores materiales. Por lo general, a medida que se dispuso de mejores materiales, se construyeron máquinas-herramientas más grandes y potentes para producir piezas maquinadas con mayor rapidez y economía.

### 3.3 Geometría de las herramientas

Las herramientas se pueden clasificar de diferentes maneras, las más comunes responden al número de filos, el material del que están fabricadas, al tipo de movimiento que efectúa la herramienta, al tipo de viruta generada o al tipo de máquina en la que se utiliza. La tabla #4 presenta algunas herramientas y como se agrupan para su clasificación.



DE ACUERDO AL NÚMERO DE FILOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. De un filo, como los buriles de corte de los tornos o cepillos.</li> <li>b. De doble filo en hélice, como las brocas utilizadas para los taladros.</li> <li>c. De filos múltiples, como las fresas o las seguetas</li> </ul>
DE ACUERDO AL TIPO DE MATERIAL CON QUE ESTÁN FABRICADAS	<p>WS. Acero de herramientas no aleado. 0.5 a 1.5% de contenido de carbón. Soportan sin deformación o pérdida de filo 250°C. También se les conoce como acero al carbono.</p> <p>SS. Aceros de herramienta aleados con wolframio, cromo, vanadio, molibdeno y otros. Soporta hasta 600°C. También se les conoce como aceros rápidos.</p> <p>HS. Metales duros aleados con cobalto, carburo de carbono, tungsteno, wolframio y molibdeno. Son pequeñas plaquitas que se unen a metales corrientes para que los soporten. Soportan hasta 900°C.</p> <p>Diamante. Material natural que soporta hasta 1800°C. Se utiliza como punta de algunas barrenas o como polvo abrasivo.</p> <p>Materiales cerámicos. Se aplica en herramientas de arcilla que soportan hasta 1500°C. Por lo regular se utilizan para terminados.</p>
POR EL TIPO DE MOVIMIENTO DE CORTE	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Fijo. La herramienta se encuentra fija mientras el material a trabajar se incrusta debido a su movimiento. Por ejemplo los tornos, en los que la pieza gira y la herramienta está relativamente fija desprendiendo viruta.</li> <li>2. Contra el material. La herramienta se mueve en contra del material, mientras este se encuentra relativamente fijo, como en los cepillos.</li> <li>3. En contra dirección. La herramienta y el material se mueven un en contra una del otro, como en el esmerilado sobre torno.</li> </ul>
POR EL TIPO DE VIRUTA QUE GENERA	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Polvo sin forma definida o viruta discontinua. (Fig. 3.8 a)</li> <li>2. Viruta continua, en forma de espiral. (Fig. 3.8 b)</li> <li>3. Viruta continua con borde acumulado. (Fig. 3.8 c)</li> </ul>
POR EL TIPO DE MÁQUINA EN LA QUE SE UTILIZA	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Torno</li> <li>2. Taladro</li> <li>3. Fresa</li> <li>4. Cepillo</li> <li>5. Broca</li> </ul>

Tabla # 4 Algunas herramientas y como se agrupan para su clasificación

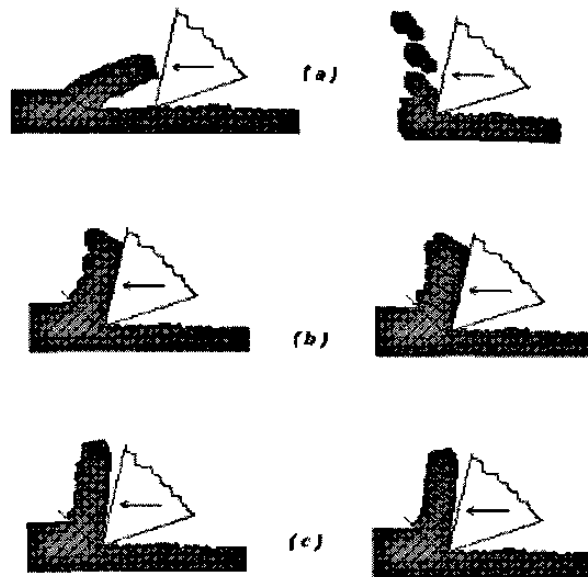


Figura 3.8 Tipos de virutas

La herramienta de corte debe tener una forma apropiada para las aplicaciones de maquinado. Una forma importante de clasificar las herramientas de corte es atendiendo a los procesos de maquinado. De esta forma tenemos herramientas para torneado, herramientas para tronzado, fresas, brocas, escariadores, y muchas otras herramientas de corte, cuyo nombre deriva de la operación en que se usa cada una con su geometría propia y única.

Las herramientas de corte se pueden dividir en dos categorías: de punta sencilla y de bordes o filos de corte múltiples. Las herramientas de torneado representan generalmente el primer tipo, mientras que las brocas y las fresas representan el segundo. Muchos de los principios que se aplican a las herramientas de punta sencilla se aplican a otros tipos de herramientas de corte, simplemente porque el mecanismo de la formación de viruta es básicamente el mismo para todas las operaciones de maquinado.

Geometría de la herramienta de punta sencilla: La forma general de una herramienta de punta sencilla se ilustra en la figura 3.9. En una herramienta de punta sencilla, la orientación de la superficie de ataque se define por dos ángulos, el ángulo de ataque posterior ( $\alpha_s$ ) y el ángulo de ataque lateral ( $\alpha_\sigma$ ). Estos dos ángulos tienen una influencia determinante en la dirección del flujo de la viruta sobre la cara o superficie de ataque. La superficie del flanco o incidencia de la herramienta se define por el ángulo de incidencia frontal, y el ángulo de incidencia lateral. Estos ángulos determinan la magnitud del claro entre la herramienta y la superficie de trabajo recién creada. El borde de corte de una herramienta de punta sencilla se divide en dos secciones, el borde de corte lateral y el borde de corte frontal. Estas secciones están separadas por la punta de la herramienta que tiene un cierto radio, llamado radio de la nariz. El ángulo del filo de corte lateral,

determina la entrada de la herramienta en el material y puede usarse para reducir la fuerza repentina que experimenta la herramienta al entrar en la parte de trabajo. El radio de la nariz, determina en gran parte la textura de la superficie generada en la operación. Una herramienta muy apuntada (pequeño radio de nariz) produce marcas de avance muy pronunciadas en la superficie. El ángulo del filo de corte frontal, proporciona un claro entre el borde de salida de la herramienta y la superficie de trabajo recientemente generada, reduciendo así el roce y la fricción contra la superficie. Ver figura 3.9

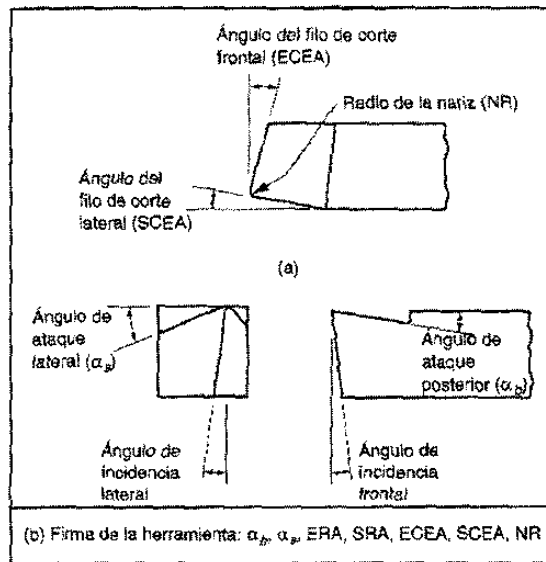


Figura 3.9 Geometría de la herramienta de punta sencilla

Para una herramienta de punta sencilla hay siete elementos que definen su geometría. Cuando se especifican en el siguiente orden se llaman colectivamente la firma de la geometría de la herramienta: ángulo de ataque posterior, ángulo de ataque lateral, ángulo de incidencia frontal, ángulo de incidencia lateral, ángulo del filo de corte frontal, ángulo del filo de corte lateral y radio de la nariz.

**Rompevirutas:** La eliminación de la viruta es un problema que se encuentra frecuentemente en torneado y otras operaciones continuas. Frecuentemente se generan largas tiras de viruta, especialmente cuando se tornean materiales dúctiles a altas velocidades. Estas virutas representan un peligro para el operador de la máquina y para el acabado de la parte de trabajo, e interfieren con la operación automática del proceso de torneado. Con frecuencia se usan rompevirutas junto con las herramientas de punta sencilla, de esta forma se fuerza a la viruta a enrollarse más cerradamente de lo normal, causando su fractura.

Hay dos diseños comunes del rompevirutas para herramientas de torneado de punta sencilla: (a) rompevirutas tipo muesca, diseñado dentro de la misma herramienta de corte; y (b) rompevirutas tipo obstrucción ver figura 3.10, diseñado como un dispositivo

adicional sobre la superficie de ataque de la herramienta. La distancia del rompevirutas se puede ajustar en el dispositivo tipo obstrucción para diferentes condiciones de corte.

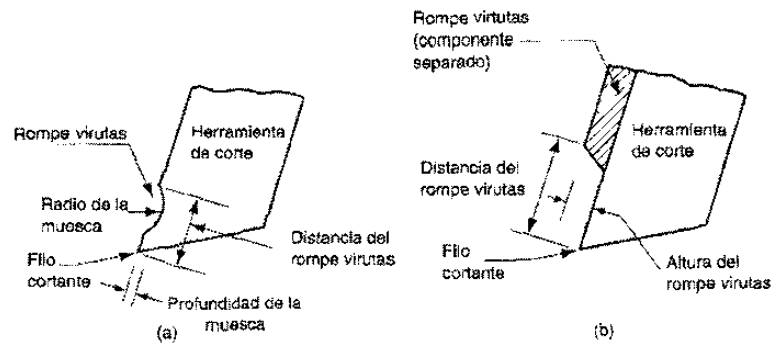


Figura 3.10 Diseños de rompevirutas

Con el desarrollo de materiales muy duros para herramientas (carburos cementados, carburos recubiertos y cerámicos) se requirieron cambios en la geometría de las herramientas. Estos materiales, como grupo, tienen durezas más altas y tenacidades más bajas que los aceros de alta velocidad. Sus resistencias al corte y a la tensión también son bajas con respecto a su resistencia a la compresión y sus propiedades no pueden manipularse mediante tratamiento térmico. Estos factores han afectado el diseño de las herramientas de corte para los materiales de herramientas duras en varias formas.

En primer lugar, los materiales muy duros se deben diseñar con ángulos de ataque negativos o ligeramente positivos. Este cambio tiende a cargar la herramienta más a la compresión y menos al corte, favoreciendo la alta resistencia a la compresión de estos materiales más duros.

Otra diferencia es la forma en que se coloca el ángulo de corte de la herramienta en posición. Las formas alternas para sostener y presentar el filo de corte de una herramienta de punta sencilla. La geometría de una herramienta de acero de alta velocidad se talla sobre un vástago sólido como se muestra en la figura 3.11 (a). El costo más alto, las diferencias en las propiedades y los procesamientos de los materiales más duros para herramienta han dado lugar al uso de insertos soldados o adheridos mecánicamente a un portaherramientas. La parte (b) muestra un inserto de carburo cementado soldado a un vástago de herramienta. El vástago está hecho de acero de herramienta para proveer resistencia y tenacidad. La parte (c) ilustra un posible diseño para sostener mecánicamente un inserto en un portaherramientas. Se usa la sujeción mecánica para carburos cementados, cerámicos y otros materiales duros. La ventaja significativa del inserto fijado mecánicamente es que cada inserto contiene múltiples bordes o filos cortantes. Cuando un borde se desgasta, se afloja el inserto, se le da vuelta al siguiente borde y se fija nuevamente en el porta-herramienta. Cuando todos los filos se han desgastado, se reemplaza el inserto. Hay insertos disponibles en varias formas,

incluyendo la cuadrada que se muestra en la figura 3.11(c), triangular, redonda y de otras formas.

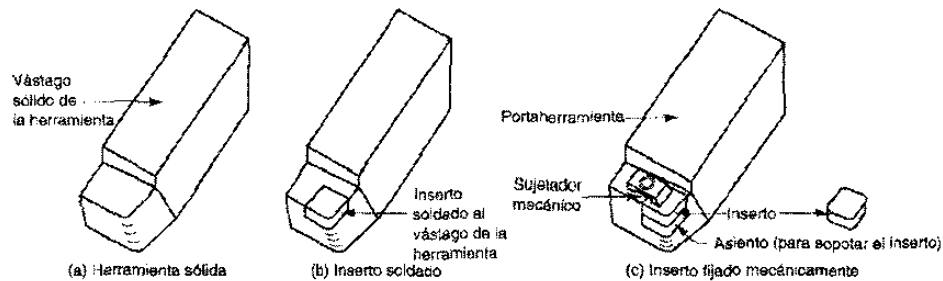


Figura 3.11 Geometría de la herramienta

### Útiles para el torno

Conocidos como buriles o cuchillas de corte, los que pueden estar ubicados en torres, puentes de sujeción o fijadores múltiples. También pueden estar fabricadas de un material barato y tener una pastilla de material de alta calidad. En la figura 3.12 se muestran las pastillas para útiles de corte en un torno

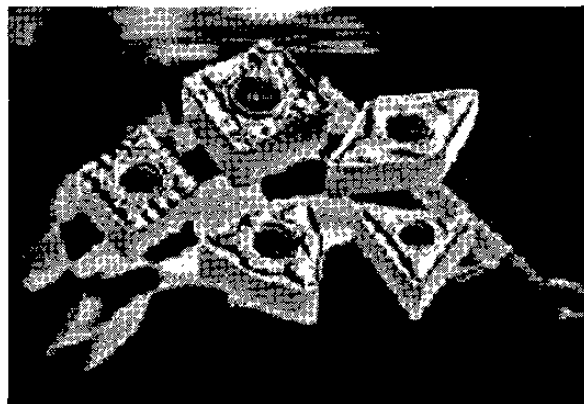


Figura 3.12 Pastillas para buriles de corte en torno

Los útiles se pueden clasificar de acuerdo a su uso, los principales son:

#### Útiles de desbaste:

- rectos: derechos e izquierdos
- curvos: derechos y curvos

Útiles de afinado:

- puntiagudos
- cuadrados

Útiles de corte lateral

- derechos
- izquierdos

Útiles de forma

- corte o tronzado
- forma curva
- roscar
- desbaste interior

### **Ángulos, filos y fuerzas**

El corte de los metales se logra por medio de herramientas con la forma adecuada. Una herramienta sin los filos o ángulos bien seleccionados ocasionará gastos excesivos y pérdida de tiempo.

En casi todas las herramientas de corte existen de manera definida: superficies, ángulos y filos.

Las superficies de los útiles de las herramientas están mostradas en la figura 3.13 y son:

- **Superficie de ataque.** Parte por la que la viruta sale de la herramienta.
- **Superficie de incidencia.** Es la cara del útil que se dirige en contra de la superficie de corte de la pieza.

## Ángulos

Los ángulos de los útiles de las herramientas están mostrados en la figura 3.14 y son:

- **Ángulo de incidencia  $\alpha$  (alfa)**. Es el que se forma con la tangente de la pieza y la superficie de incidencia del útil. Sirve para disminuir la fricción entre la pieza y la herramienta.
- **Ángulo de filo  $\beta$  (beta)**. Es el que se forma con las superficies de incidencia y ataque del útil. Establece qué tan punzante es la herramienta y al mismo tiempo que tan débil es.
- **Ángulo de ataque  $\gamma$  (gama)**. Es el ángulo que se forma entre la línea radial de la pieza y la superficie de ataque del útil. Sirve para el desalojo de la viruta, por lo que también disminuye la fricción de esta con la herramienta.

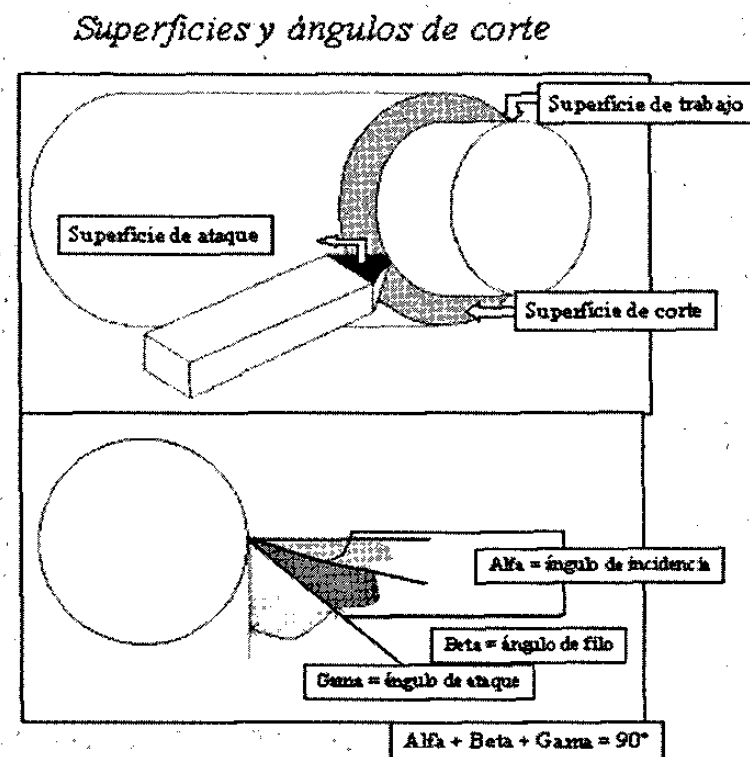


Figura 3.13 Superficies de ataque y ángulos

- **Ángulo de corte  $\delta$  (delta)**. Es el formado por la tangente de la pieza y la superficie de ataque del útil. Define el ángulo de la fuerza resultante que actúa sobre el útil.

- **Ángulo de punta  $\varepsilon$  (epsilon).** Se forma en la punta del útil por lo regular por el filo primario y el secundario. Permite definir el ancho de la viruta obtenida.
- **Ángulo de posición  $\chi$  (xi).** Se obtiene por el filo principal de la herramienta y el eje de simetría de la pieza. Aumenta o disminuye la acción del filo principal de la herramienta.
- **Ángulo de posición  $\lambda$  (lamda).** Es el que se forma con el eje de la herramienta y la radial de la pieza. Permite dar inclinación a la herramienta con respecto de la pieza.

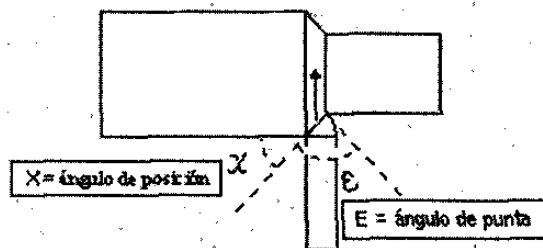


Figura 3.14 Ángulos de una herramienta de corte

### Filos de la herramienta

Los filos de la herramienta se muestran en la figura 3.15 y son los siguientes:

- **Filo principal.** Es el que se encuentra en contacto con la superficie desbastada y trabajada.
- **Filo secundario.** Por lo regular se encuentra junto al filo principal y se utiliza para evitar la fricción de la herramienta con la pieza.

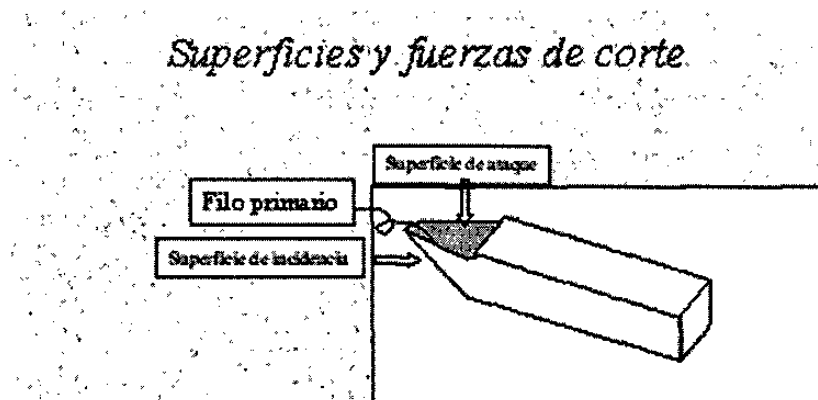


Figura 3.15 Filos de la herramienta



**La suma de los ángulos alfa, beta y gama siempre es igual a 90°**

Para la definición de los valores de los ángulos se han establecido tablas, producto de la experimentación. A continuación se muestra en la tabla # 5 los ángulos alfa, beta y gama.

Aceros rápidos			Materiales trabajar	Metales duros		
Alfa	Beta	Gama	Material	Alfa	Beta	Gama
8	68	14	Acero sin alear hasta 70 kg/mm <sup>2</sup>	5	75	10
8	72	10	Acero moldeado 50 kg/mm <sup>2</sup>	5	79	6
8	68	14	Acero aleado hasta 85 kg/mm <sup>2</sup>	5	75	10
8	72	10	Acero aleado hasta 100 kg/mm <sup>2</sup>	5	77	8
8	72	10	Fundición maleable	5	75	10
8	82	0	Fundición gris	5	85	0
8	64	18	Cobre	6	64	18
8	82	0	Latón ordinario, latón rojo, fundición de bronce	5	79	6
12	48	30	Aluminio puro	12	48	30
12	64	14	Aleaciones de aluminio para fundir y forjar	12	60	18
8	76	6	Aleaciones de magnesio	5	79	6
12	64	14	Materiales prensados aislantes (novotex baquelita)	12	64	14
12	68	10	Goma dura, papel duro	12	68	10
			Porcelana	5	85	0

Tabla # 5 Ángulos óptimos para las herramientas según el material a trabajar

### 3.4 Fluidos para corte

Cuando se usan cortadores de acero de alta velocidad, se genera calor al realizarse el corte entre la herramienta y el material de la pieza de trabajo debido a la gran fricción que existe entre ambas.<sup>13</sup>

Debido a esto se incrementa la temperatura de la pieza y la herramienta de corte, siendo mucho mayor la de la herramienta, ocasionándose un daño tanto la herramienta como la pieza de trabajo. Estos daños en las herramientas ocasionados por las altas temperaturas se presentan cuando la temperatura de trabajo se acerca o excede la

temperatura del tratamiento térmico que se le había dado a la herramienta, por consiguiente el material de la herramienta se ablanda perdiendo así el filo y su dureza.

Un fluido para corte es un líquido o gas que se aplica directamente a la operación de maquinado para mejorar el desempeño del corte. Los dos problemas principales que atienden los fluidos para corte son:

- 1) La generación de calor en las zonas de corte y fricción
- 2) La fricción en las interfases herramienta-viruta y herramienta-trabajo.

Además de la remoción del calor y la reducción de la fricción, los fluidos para corte brindan beneficios adicionales como: remover las virutas, reducir la temperatura de la parte de trabajo para un manejo más fácil, disminuir las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia, mejorar la estabilidad dimensional de la parte de trabajo y optimizar el acabado superficial.

A continuación se presenta la tabla # 6 que nos muestra la composición y la temperatura de trabajo para las cuales están diseñadas los tipos de herramientas de corte que pueden encontrarse tanto en tornos como fresas.

Herramienta	Composición	Temperatura
<b>WS. Acero de herramientas.</b> También se les conoce como acero al carbono.	No aleado. 0.5 a 1.5% de contenido de carbón.	Soportan sin deformación o pérdida de filo 250°C.
<b>SS. Aceros de herramienta aleados.</b> También se les conoce como aceros rápidos.	Con wolframio, cromo, vanadio, molibdeno y otros.	Soporta hasta 600°C.
<b>HS. Metales duros aleados.</b> Son pequeñas plaquitas que se unen a metales corrientes para que los soporten.	Con cobalto, carburo de carbono, tungsteno, wolframio y molibdeno.	Soportan hasta 900°C.
<b>Diamante.</b> Se utiliza como punta de algunas barrenas o como polvo abrasivo.		Material natural que soporta hasta 1800°C.
<b>Materiales cerámicos.</b> Por lo regular se utilizan para terminados.		Se aplica en herramientas de arcilla que soportan hasta 1500°C.

Tabla # 6 Diferentes herramientas y la temperatura de trabajo según diseño.

## **FLUIDOS DE CORTE**

Durante el proceso de maquinado se genera fricción y con ello calor, lo que puede dañar a los materiales de las herramientas de corte por lo que es recomendable utilizar fluidos que disminuyan la temperatura de las herramientas, ver tabla # 7. Con la aplicación adecuada de los fluidos de corte se disminuye la fricción y la temperatura de corte con lo que se logra lo siguiente.

### **Ventajas económicas**

1. Reducción de costos
2. Aumento de velocidad de producción
3. Reducción de costos de mano de obra
4. Reducción de costos de potencia y energía
5. Aumento en la calidad de acabado de las piezas producidas

### **Características de los líquidos para corte**

1. Buena capacidad de enfriamiento
2. Buena capacidad lubricante
3. Estabilidad (larga duración sin descomponerse)
4. No tóxico
5. Transparente (permite al operario ver lo que está haciendo)
6. Viscosidad relativa baja
7. No inflamable

### Fluidos más comunes para corte

Fluido	Características
Aceite Activo para corte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceites minerales sulfurados (0.5 a 0.8% de S)</li> <li>• Aceites minerales sulfoclorinados (3% S y 1% Cl)</li> <li>• Mezclas de aceites grasos sulfoclorinados (más del 8% de S y 1% Cl)</li> </ul>
Aceites de corte inactivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceites minerales simples</li> <li>• Aceites grasos o animales</li> <li>• Mezclas de aceites animales y minerales</li> <li>• Mezclas de aceites animales y minerales sulfurados</li> </ul>
Aceites emulsificantes (solubles)	Aceites minerales solubles al agua. Contienen un material parecido al jabón que permite la dilución en el agua se agregan de los concentrados de 1 a 5 partes de concentrado por cada 100 partes de agua.
Fluidos sintéticos para el corte	Emulsiones estables que contienen un poco de aceite y se mezclan con facilidad con el agua. Existen varios tipos de fluidos sintéticos para corte, los mejores son aquellos conocidos como de alta precisión y funcionan con reacciones químicas de acuerdo con el material que estén enfriando.

Tabla # 7 Fluidos para corte

# CAPÍTULO 4

## OPERACIONES DE MAQUINADO Y MÁQUINAS-HERRAMIENTAS

### 4.1 Torneado y operaciones afines

El *torneado* es un proceso de maquinado en el cual una herramienta de punta sencilla remueve material de la superficie de una pieza de trabajo cilíndrica en rotación. La herramienta avanza linealmente y en una dirección paralela al eje de rotación. El torneado se lleva a cabo tradicionalmente en una máquina-herramienta llamada *torno*, la cual suministra la potencia para tornear la parte a una velocidad de rotación determinada con avance de la herramienta y profundidad de corte especificados.

El torno, la máquina giratoria más común y más antigua, sujeta una pieza de metal o de madera y la hace girar mientras un útil de corte da forma al objeto. El útil puede moverse paralela o perpendicularmente a la dirección de giro, para obtener piezas con partes cilíndricas o cónicas, o para cortar acanaladuras. Empleando útiles especiales un torno puede utilizarse también para obtener superficies lisas, como las producidas por una fresadora, o para taladrar orificios en la pieza.

### ANTECEDENTES

El torno es una de las máquinas-herramientas más antiguas e importantes. Puede dar forma, taladrar, pulir y realizar otras operaciones. Los tornos para madera ya se utilizaban en la edad media. Por lo general, estos tornos se impulsaban mediante un pedal que actuaba como palanca y, al ser accionado, movía un mecanismo que hacía girar el torno. En el siglo XVI, los tornos ya se propulsaban de forma continua mediante manivelas o energía hidráulica, y estaban dotados de un soporte para la herramienta de corte que permitía un torneado más preciso de la pieza. Al comenzar la Revolución Industrial en Inglaterra, durante el siglo XVII, se desarrollaron tornos

capaces de dar forma a una pieza metálica. El desarrollo del torno pesado industrial para metales en el siglo XVIII hizo posible la producción en serie de piezas de precisión.<sup>9</sup>

En la década de 1780 el inventor francés Jacques de Vaucanson construyó un torno industrial con un portaherramientas deslizante que se hacía avanzar mediante un tornillo manual. Hacia 1797 el inventor británico Henry Maudslay y el inventor estadounidense David Wilkinson mejoraron este torno conectando el portaherramientas deslizante con el husillo, que es la parte del torno que hace girar la pieza de trabajo.<sup>14, 15</sup> Esta mejora permitió hacer avanzar la herramienta de corte a una velocidad constante. En 1820, el mecánico estadounidense Thomas Blanchard inventó un torno en el que una rueda palpadora seguía el contorno de un patrón para una caja de fusil y guiaba a la herramienta cortante para torneado una caja idéntica al patrón. El torno revolver, desarrollado durante la década de 1840, incorpora un portaherramientas giratorio que soporta varias herramientas con solo girar el portaherramientas y fijarlo en posición deseada. Hacia finales del siglo XIX se desarrollaron tornos de revólver automáticos para cambiar las herramientas de forma automática. Los tornos pueden programarse para controlarse la secuencia de operaciones, la velocidad del giro del husillo, la profundidad y dimensiones del corte y el tipo de herramienta.

#### 4.1.1 Condiciones de corte en el torneado

La velocidad de rotación en el torneado se relaciona con la velocidad de corte requerida en la superficie cilíndrica de la pieza de trabajo por la ecuación

$$N = (V/\pi D_o) \quad (5)$$

donde  $N$  = velocidad de rotación, rev/min;  
 $V$  = velocidad de corte, mm/min;  
 $D_o$  = *diámetro* original de la parte, m.

La operación de torneado reduce el diámetro del trabajo  $D_o$  al diámetro final  $D_f$ . El cambio de diámetro se determina por la profundidad de corte  $d$ . Ver figura 4.1

$$D_o - D_f = 2d \quad (6)$$

El avance en el torneado se expresa generalmente en mm/rev. Este avance se puede convertir a velocidad de avance lineal en mm/min mediante la fórmula:

$$f_r = Nf \quad (7)$$

donde  $f_r$  = velocidad de avance, mm/min .  
 $f$  = avance, min/rev.  
 $N$  = velocidad de rotación, rev/min.

El tiempo para maquinar una parte de trabajo cilíndrica de un extremo al otro está dado por

$$T_m = (L / fr) \quad (8)$$

donde  $T_m$  = tiempo de maquinado real en min y  
 $L$  = longitud de la parte cilíndrica en mm.  
 $fr$  = velocidad de avance, mm/min.

Generalmente se añade una pequeña distancia a la longitud al principio y al final de la pieza de trabajo para dar margen a la aproximación y al sobre recorrido de la herramienta.

La velocidad volumétrica de remoción del material se puede determinar más convenientemente por la siguiente ecuación.

$$MRR = vfd \quad (9)$$

donde  $MRR$  = velocidad de remoción de material,  $\text{mm}^3/\text{min}$ . En esta ecuación las unidades de  $f$  se expresan simplemente como mm, ignorando el efecto de la rotación del torneado, debe asegurarse que las unidades para la velocidad sean consistentes con las de  $f$  y  $d$

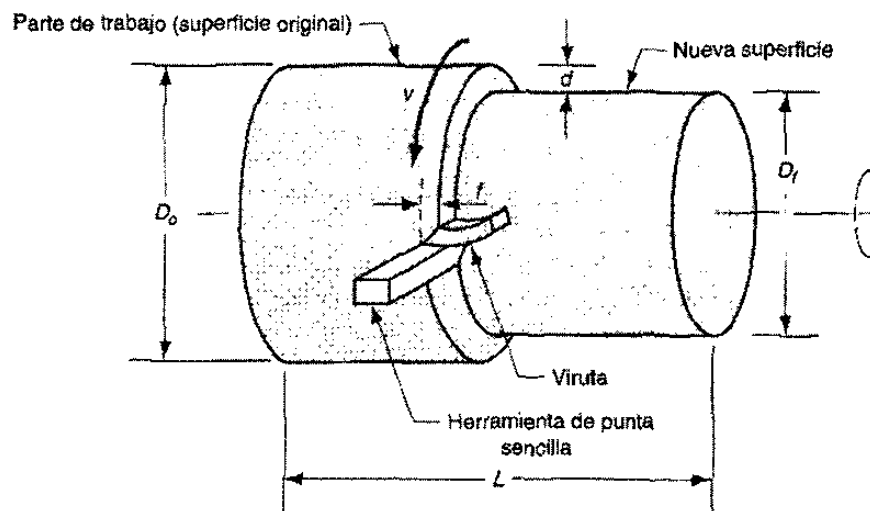


Figura 4.1 Condiciones de corte en una pieza torneada

### 4.1.2 Operaciones relacionadas con el torneado

Además del torneado, se puede realizar una gran variedad de operaciones de maquinado en un torno. Como por ejemplo:

(a) Careado. La herramienta se alimenta radialmente sobre el extremo del trabajo rotatorio para crear una superficie plana. Ver figura 4.2

(b) Torneado ahusado o cónico. En lugar de que la herramienta avance paralelamente al eje de rotación del trabajo, lo hace en cierto ángulo creando una forma cónica. Ver figura 4.2

(c) Torneado de contornos. En lugar de que la herramienta avance a lo largo de una línea recta paralela al eje de rotación como en torneado, sigue un contorno diferente a la línea recta, creando así una forma contorneada en la parte torneada. Ver figura 4.2

(d) Torneado de formas. En esta operación llamada algunas veces formado, la herramienta tiene una forma que se imparte al trabajo y se hunde radialmente dentro del trabajo. Ver figura 4.2

(e) Achaflanado. El borde cortante de la herramienta se usa para cortar un ángulo en la esquina del cilindro y forma lo que se llama un "chaflán". Ver figura 4.2

(f) Tronzado. La herramienta avanza radialmente dentro del trabajo en rotación, en algún punto a lo largo de su longitud, para trozar el extremo de la parte. A esta operación se le llama algunas veces partido. Ver figura 4.2

(g) Roscado. Una herramienta puntiaguda avanza linealmente a través de la superficie externa de la parte de trabajo en rotación y en dirección paralela al eje de rotación, a una velocidad de avance suficiente para crear cuerdas roscadas en el cilindro. Ver figura 4.2

(h) Perforado. Una herramienta de punta sencilla avanza en línea paralela al eje de rotación, sobre el diámetro interno de un agujero existente en la parte. Ver figura 4.2

(i) Taladrado. El taladrado se puede ejecutar en un torno, haciendo avanzar la broca dentro del trabajo rotatorio a lo largo de su eje. El escariado se puede realizar en forma similar. Ver figura 4.2

(J) Moleteado. Ésta no es una operación de maquinado porque no involucra corte de material. Es una operación de formado de metal que se usa para producir un rayado regular o un patrón en la superficie de trabajo. Ver figura 4.2



Las herramientas de punta sencilla se usan en la mayoría de las operaciones ejecutadas en tornos. Las herramientas de corte para el torneado, c areado, ahusado, c ontorneado chaflanado y perforado son herramientas de punta sencilla. Una operación de roscado se ejecuta con una herramienta de punta sencilla, diseñada con la forma de la cuerda a producir. Ciertas operaciones requieren herramientas diferentes a las de punta sencilla. El torneado de formas se ejecuta con una de diseño especial llamada herramienta de forma. El perfil de la forma tallada en la herramienta establece la forma de la parte de trabajo. Una herramienta de tronzado es básicamente una herramienta de forma. El taladrado se realiza mediante una broca.

El moleteado se ejecuta con una herramienta de moleteado que consiste en dos rodillo, formadores endurecidos y montados sobre sus centros. Los rodillos formadores tienen el patrón de moleteado deseado en sus superficies. Para ejecutar el moleteado, se presiona la herramienta la superficie de la parte rotatoria con la presión suficiente para imprimir el patrón sobre la superficie del trabajo.

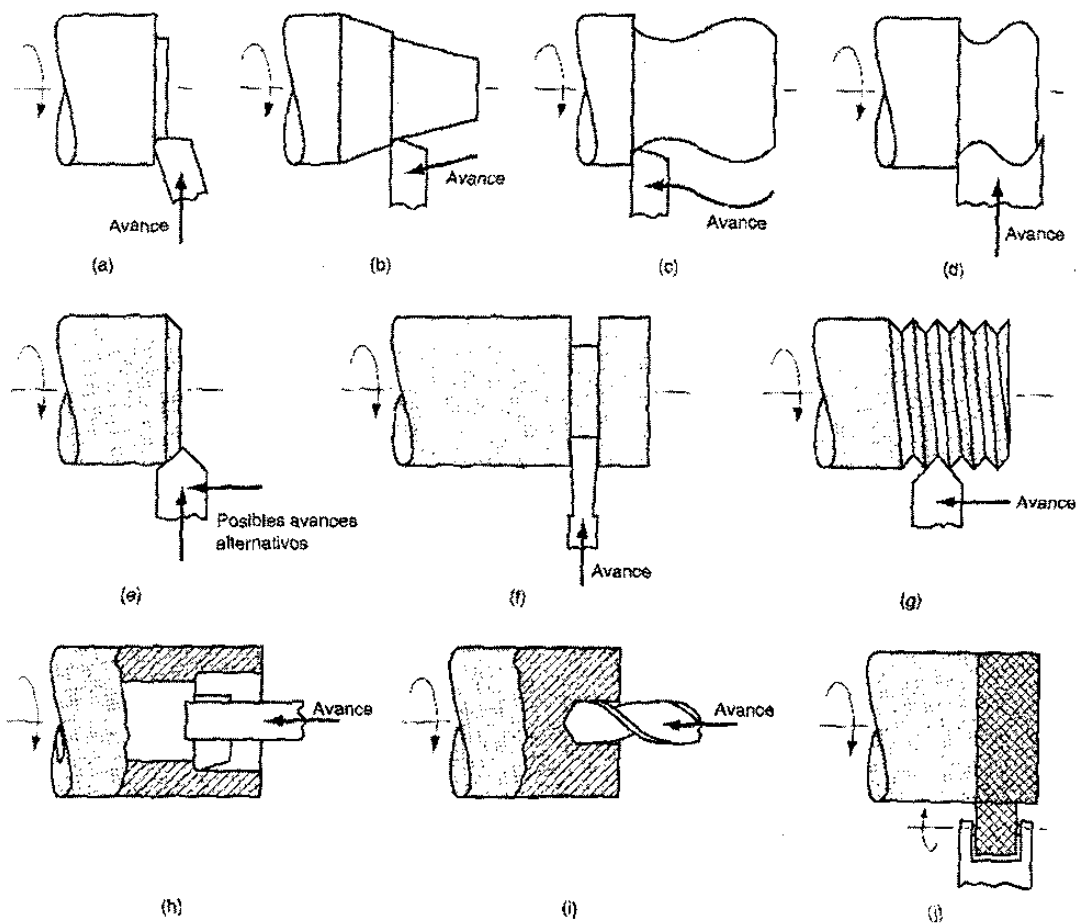


Figura 4.2 Principales operaciones vinculadas con el torneado

### Operaciones en el Torno

Las operaciones de maquinado en un torno se realizan principalmente con las herramientas enumeradas a continuación. En la figura 4.3 se muestran distintas herramientas monofilo, siendo todas del tipo pastilla.

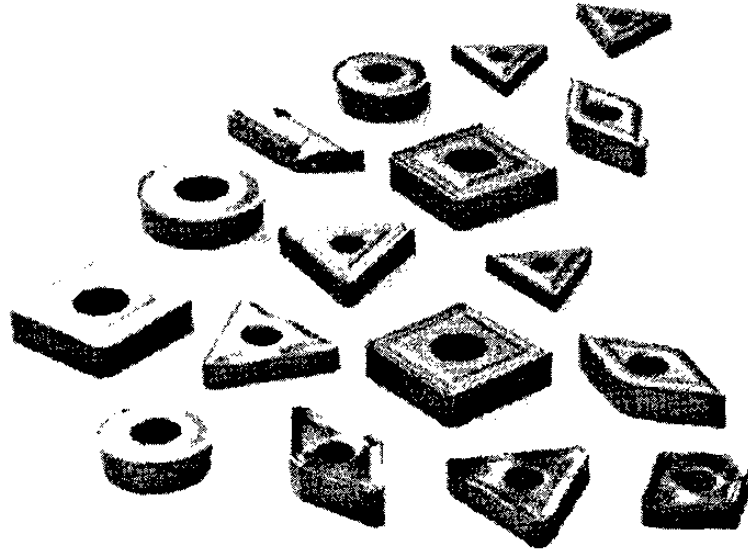
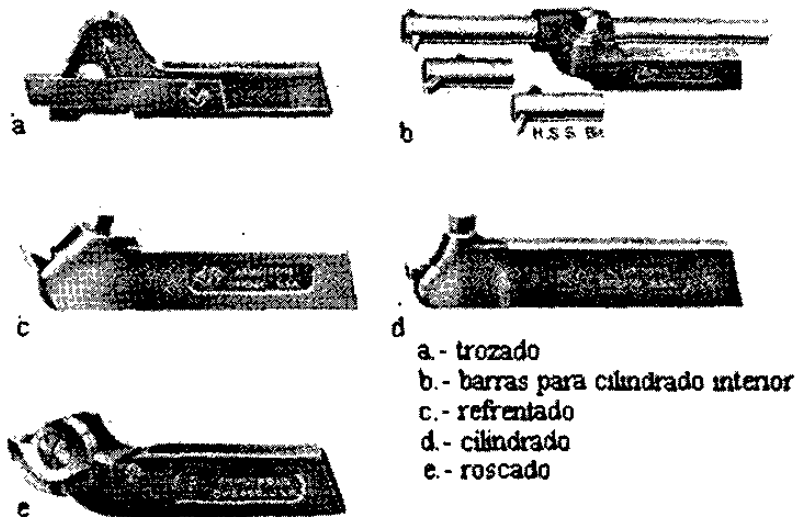


Figura 4.3 Herramientas monofilo utilizadas para el proceso de torneado

Para fijar la herramienta al torno se utiliza un portaherramientas, éste varía según la operación a realizar, pero es común ver portaherramientas que con pequeñas variantes logren distintas operaciones. Distintos portaherramientas se muestran en la figura 4.4.



- a. - trozado
- b. - barras para cilindrado interior
- c. - refrentado
- d. - cilindrado
- e. - roscado

Figura 4.4 Portaherramientas utilizados en el proceso de torneado.

## CILINDRADO

Tal como su nombre lo indica, ésta es una operación de maquinado que produce partes cilíndricas. Tiene por objeto lograr una superficie cilíndrica de menor diámetro que la original. En forma básica, esta operación puede ser definida como el maquinado de una superficie externa, que es realizada:

- con la pieza rotando
- con una herramienta de corte monofil, y
- con la herramienta de corte paralela al eje de la pieza y a una distancia que removerá la superficie externa de la pieza. Ver figura 4.5

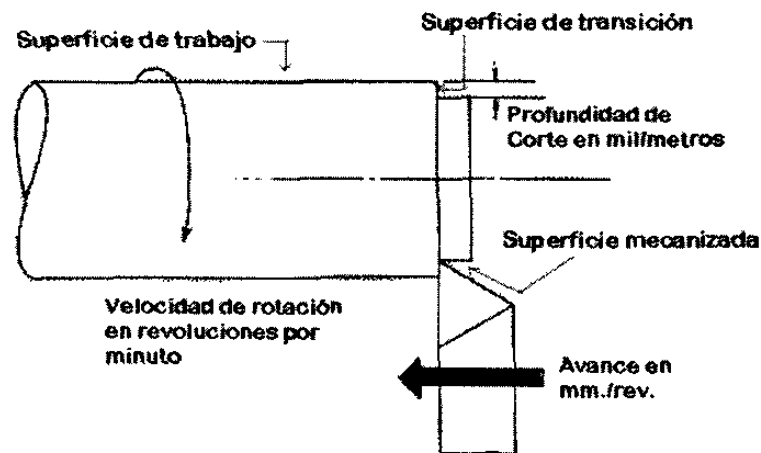


Figura 4.5 Proceso de torneado

Como se muestra en la figura 4.5 en todo proceso de maquinado podemos identificar tres superficies:

- a) Superficie de trabajo: superficie que va a ser removida en el maquinado.
- b) Superficie maquinada: superficie producida por la herramienta.
- c) Superficie de transición: la parte de la superficie formada en la pieza por el filo y que será removida en la siguiente carrera o revolución.

Para el cilindrado exterior, los cálculos teóricos del maquinado son los siguientes:

El encaje axial se define como:

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \quad (10)$$

donde  $d_w$  es el diámetro de trabajo  
 $d_m$  es el diámetro de maquinado.

La velocidad de corte de la punta de la herramienta está dada por:

$$V_{avm} = \pi * n_w * \frac{d_w + d_m}{2} \quad (11)$$

donde  $n_w$  es la velocidad de rotación del husillo.

El material removido por unidad de tiempo es el producto de la velocidad de corte y la sección (área) de la viruta sin cortar,

$$Z_w = A_c * V_{avm} \quad (11)$$

$A_c$  es el área de la superficie sacada, y se calcula como la multiplicación del avance  $f$ , medido en milímetros por revolución, y el encaje axial:

$$A_c = f * a_p \quad (12)$$

Por lo tanto,

$Z_w = \pi * f * a_p * n_w * (d_m + a_p)$ , este cálculo se puede visualizar en la siguiente figura 4.6:

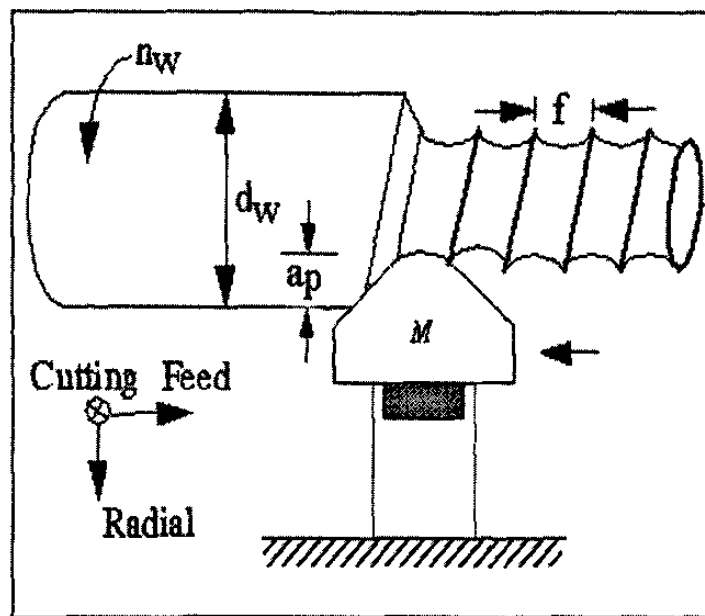


Figura 4.6 Material removido por unidad de tiempo

El tiempo de maquinado es:

$$t_m = \frac{L_w}{f * n_w} \quad (13)$$

donde  $L_w$  es el largo de maquinado. Conociendo esto podemos conocer la cantidad de material total removida en la operación de maquinado, la cual es:

$$Z_{total} = Z_w * t_m \quad (14)$$

Reemplazando en (13)

$$Z_{total} = \frac{L_w * \pi * (d_w^2 - d_m^2)}{4} \quad (15)$$

El espesor de viruta no deformada está definido por la multiplicación del encaje de avance y el seno del ángulo formado por el filo principal y la pieza. En el caso de herramientas monofilo, el encaje de avance es igual al avance,  $f$ :

$$a_c = f * \text{sen} (k_r) \quad (16)$$

Para las condiciones anteriormente descritas se debe calcular la potencia necesaria para realizar la operación de maquinado, cuyo valor está dado por la siguiente ecuación:

$$P_w = p_s * Z_w \quad (17)$$

donde  $p_s$  es la energía requerida para remover un volumen unitario de material, ésta es obtenida del gráfico que se muestra en la figura 4.7<sup>16</sup>, considerando el espesor medio de la viruta no deformada,  $a_c$ , y el material que está siendo maquinado.

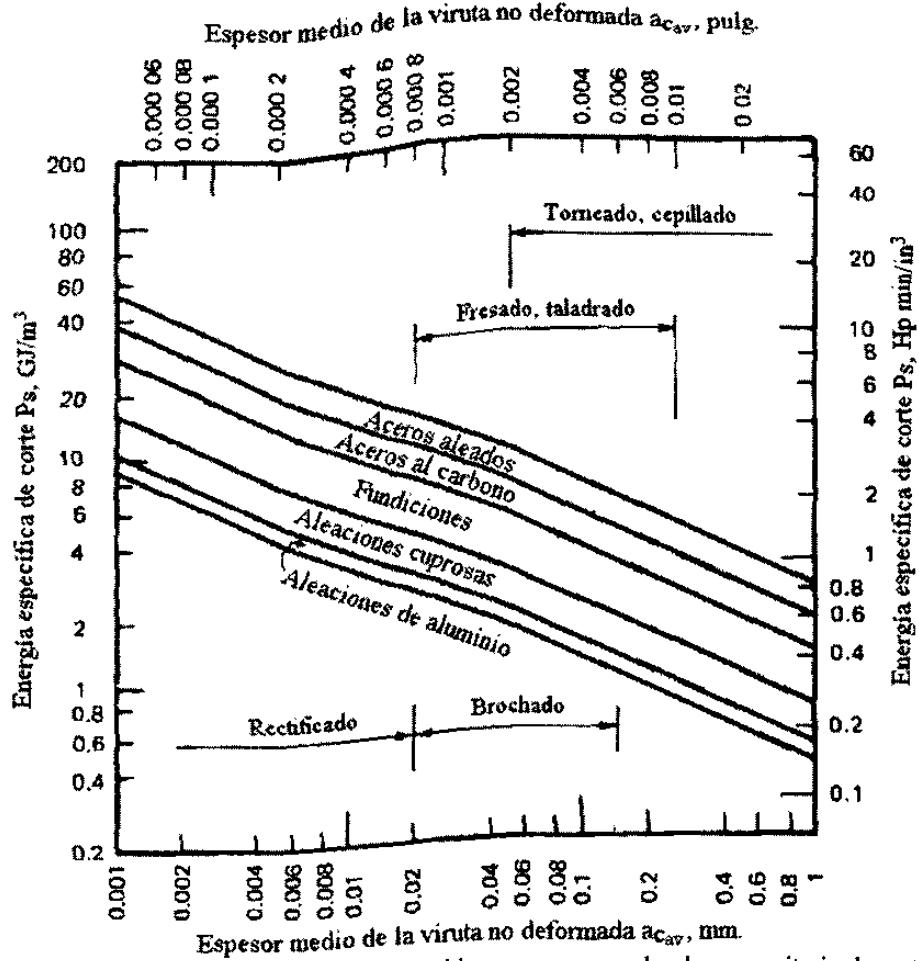


Figura 4.7 Muestra como obtener la energía requerida para remover el volumen unitario de material

Todo lo anteriormente descrito corresponde a un cilindrado exterior, pero se puede extender en forma análoga a cilindrados interiores. Éstos consisten en maquinarse el agujero interior de una pieza cilíndrica mediante procesos similares a los descritos en el cilindrado exterior. Se utiliza, sin embargo, una herramienta y un portaherramientas distinto. Ver figura 4.8

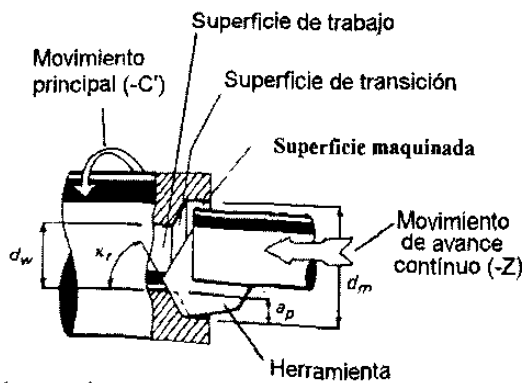


Figura 4.8 Agujero interior de una pieza cilíndrica

Para el cilindrado interior las fórmulas son básicamente las mismas, cambiando solamente la del material removido por unidad de tiempo, la cual queda como sigue:

$$Z_w = f * a_p * n_w * (d_m - a_p) \quad (18)$$

### REFRENTADO

Este proceso consiste en maquinar una de las caras de la pieza cilíndrica para dejarla perfectamente plana. Esto se realiza moviendo la herramienta en dirección normal al eje de rotación de la pieza. Con respecto a la herramienta de corte, cabe hacer mención que en este proceso se coloca con un cierto ángulo con respecto al eje de la pieza, ocupándose la misma herramienta usada para el cilindrado. Debe tenerse precaución para evitar romper la herramienta en caso de pasarse del centro del diámetro del cilindro, puesto que en esa mitad el cilindro gira en sentido contrario y puede agarrar la herramienta por detrás, causándole un daño irreparable. Para el proceso de refrentado, la velocidad de corte con que se realizan los cálculos numéricos se determina respecto al diámetro inicial de la pieza a maquinar, ya que el diámetro de trabajo varía en cada instante.

El tiempo de maquinado en el refrentado es:

$$t_m = \frac{d_m}{2 * f * n_w} \quad (19)$$

La velocidad máxima de corte y la cantidad máxima de material removido por unidad de tiempo son:

$$V_{max} = \pi * n_w * d_m \quad (20)$$

$$Z_{max} = A_c * V_{max} = \pi * f * a_p * n_w * d_m \quad (21)$$

La cantidad total de material removido es:

$$Z_{total} = \frac{a_p * \pi * d_m^2}{4} \quad (22)$$

Finalmente, la potencia máxima necesaria para el refrentado se expresa como:

$$P_{\max} = p_s * Z_{\max} \quad (23)$$

En la figura 4.9 se muestra una operación de refrentado.

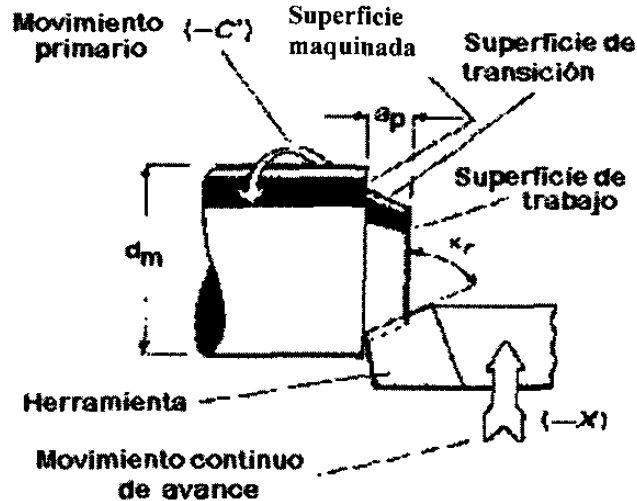


Figura 4.9 Operación de refrentado

## TRONZADO

Este proceso consiste en hacer un canal en un cilindro, el cual puede llegar a cortar la pieza de trabajo en dos partes. Este proceso se realiza con una herramienta más delgada y débil que la que se usa para el cilindrado, por lo que su manipulación requiere de especial cuidado. Ver figura 4.10

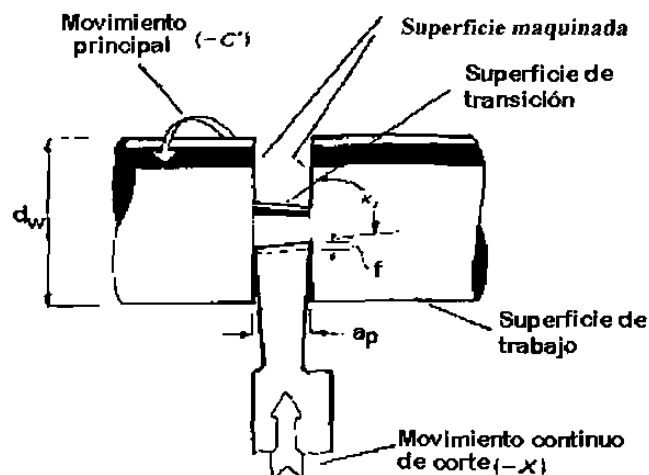


Figura 4.10 Operación de tronzado



### 4.1.3 El torno mecánico

El torno básico utilizado para torneado y operaciones afines es un torno mecánico. Es una herramienta muy versátil que se opera en forma manual y se utiliza ampliamente en producción media. El término "máquina" se originó en el tiempo en que estos mecanismos eran movidos por máquinas de vapor.

En la figura 4.11 se puede observar un diagrama de un torno mecánico con sus componentes principales. *El cabezal* contiene la unidad de transmisión que mueve el husillo que hace girar la pieza de trabajo. Opuesto al cabezal está el *contrapunto*, en el cual se monta un centro para sostener el otro extremo de la pieza.

La herramienta de corte es sostenida por una *torreta* que se encuentra fija al *carro transversal*, que se ensambla al carro principal. El *carro principal* se diseña para deslizarse sobre las *guías* del torno a fin de hacer avanzar la herramienta paralelamente al eje de rotación. Las guías son una especie de rieles a lo largo de los cuales se mueve el carro y están hechas con gran precisión para lograr un alto grado de paralelismo con respecto al eje del husillo. Las guías se construyen sobre la *bancada* del torno que provee una armazón rígida para el torno mecánico.

El carro longitudinal se mueve por medio un tornillo guía sin fin que gira a la velocidad propia para obtener la velocidad de avance deseada. El carro transversal está diseñado para avanzar en una dirección perpendicular al movimiento del carro longitudinal. Por tanto, al mover el carro, la herramienta puede avanzar paralela al eje del trabajo para ejecutar el torneado recto. Y al mover el carro transversal, la herramienta puede avanzar radialmente dentro del trabajo para ejecutar el careado, el torneado de forma o la operación de tronzado.

Existe el torno horizontal, es decir, el eje del husillo es horizontal. Esto es adecuado para la mayoría de los trabajos de torno donde la longitud es mayor que el diámetro. Para trabajos donde el diámetro es mayor que la longitud y el trabajo es pesado, es más conveniente orientar el trabajo de manera que gire alrededor de un eje vertical; éstas son las máquinas de torneado vertical.

El tamaño del torno se designa por:

- 1) el diámetro máximo admisible (el volteo)
- 2) la máxima distancia entre los centros.

El volteo es el diámetro máximo de la parte de trabajo que puede girar en el husillo, se determina como el doble de la distancia que existe entre el eje central del husillo y las guías de la máquina. El máximo tamaño real de la parte de trabajo cilíndrica que puede acomodarse en el torno es algo más pequeña, debido a que el carro y la corredera lateral están sobre las guías. La máxima distancia entre los centros indica la

longitud máxima de la pieza de trabajo que puede ser montada entre el cabezal y el contrapunto.

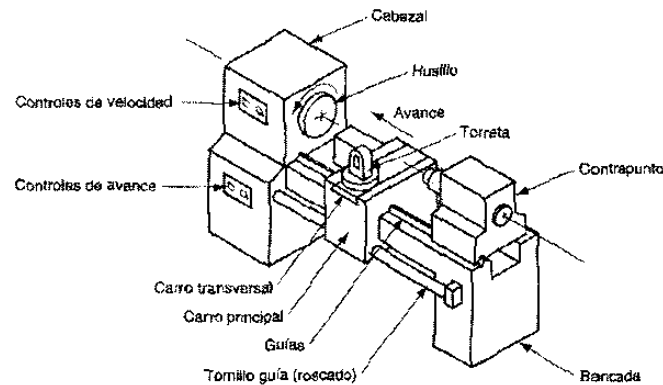


Figura 4.11 Torno y su partes

**Métodos de sujeción de la pieza de trabajo al torno.** Se utilizan cuatro métodos comunes para sujetar las partes de trabajo en el torneado, que a su vez consisten en varios mecanismos para sujetar la pieza, centrarla y mantenerla en posición sobre el eje del husillo y hacerlo girar. Los métodos se ilustran en la figura 4.15 y son:

- (a) montura del trabajo entre los centros
- (b) mandril
- (c) boquilla
- (d) plato de sujeción.

La sujeción del trabajo *entre los centros* se refiere al uso de dos centros, uno en el cabezal y el otro en el contrapunto, como se muestra en la figura 4.15(a). Este método es apropiado para partes que tienen una alta relación entre la longitud y el diámetro. En el centro del cabezal se fija una brida llamada *perro o plato* de arrastre, en la parte exterior del trabajo que se usa para transmitir la rotación del husillo. El centro del contrapunto tiene una punta en forma de cono que se inserta en un agujero practicado en el extremo de la pieza. El centro del contrapunto puede ser un centro vivo o muerto. Un *centro vivo* gira en un rodamiento del contrapunto, de manera que no hay rotación relativa entre la pieza y el centro vivo y por tanto no hay fricción. En contraste, un centro muerto está fijo en el contrapunto y no gira; la pieza de trabajo gira alrededor del punto. Debido a la fricción y a la acumulación del calor que resulta, esta disposición se usa normalmente a menores velocidades de rotación. El centro vivo se puede usar a altas velocidades.

El mandril (chuck en inglés) ver figura 4.15 (b), tiene varios diseños, con tres o cuatro mordazas para sostener la parte cilíndrica sobre su diámetro exterior. Las mordazas se diseñan frecuentemente para sostener también el diámetro interior de una

parte tubular. Un mandril auto-centrante tiene un mecanismo que mueve simultáneamente las mordazas hacia dentro o hacia fuera, y de esta forma centra el trabajo en el eje del husillo. Otros mandriles permiten la operación independiente de cada mordaza. Los mandriles se pueden usar con o sin el centro del contrapunto. Para partes con baja relación entre la longitud y el diámetro, la sujeción de la parte al mandril en forma empotrada (en voladizo) es por lo general suficiente para soportar las fuerzas de corte. Para barras largas de trabajo se necesita el soporte del contrapunto.

Gracias al empleo de diversos aditamentos para sujetar piezas ha aumentado la cantidad y variedad de trabajos que se pueden hacer en un torno, algunos de estos aditamentos más comunes son:

- a) El mandril universal de 3 mordazas es el más sencillo de usar debido a que las mordazas se mueven juntas hacia adentro y hacia fuera. Este tipo de chuck esta equipado con 2 juegos de mordazas. Uno de ellos tiene el extremo mas alto hacia el centro y se le conoce como MORDAZAS PARA INTERIORES, es usado para piezas de diámetro pequeño, también se pueden usar para sujetar el interior de tubos. El otro juego tiene los extremos altos hacia el exterior del chuck y se le denomina MORDAZAS PARA EXTERIORES, se utilizan para sujetar piezas de gran tamaño. Ver figura 4.12

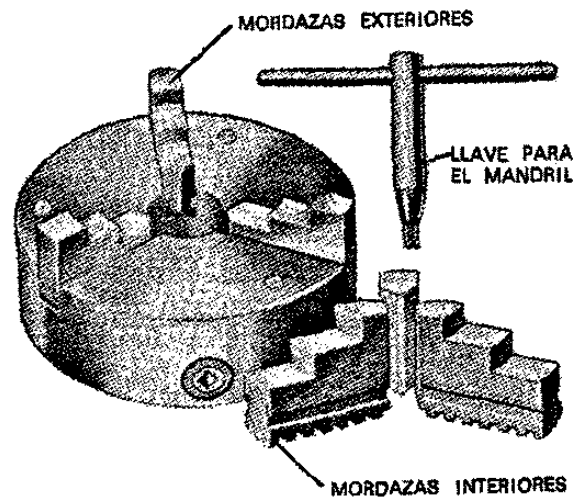


Figura 4.12. Mandril universal de 3 mordazas

- b) El mandril de 4 mordazas independientes es más preciso que el universal de 3 mordazas y sujeta mas formas de piezas de trabajo, incluyendo formas irregulares tales como piezas de fundición o forja. Cada mordaza se mueve en forma independiente y la precisión del mandril no se ve afectada por el uso, las mordazas se pueden invertir ya sea para sujetar el exterior o el interior de la pieza

de trabajo, para ajustar cada una de las mordazas se requiere de mayor habilidad. Ver figura 4.13

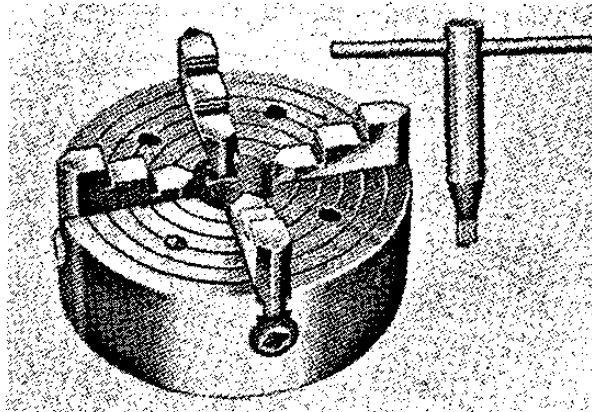


Figura 4.13 Mandril de 4 mordazas

- c) El mandril combinado de 6 mordazas se puede ajustar en forma independiente, como en el de 4 mordazas o se puede ajustar todas juntas como en el de 3 mordazas. Ver figura 4.14

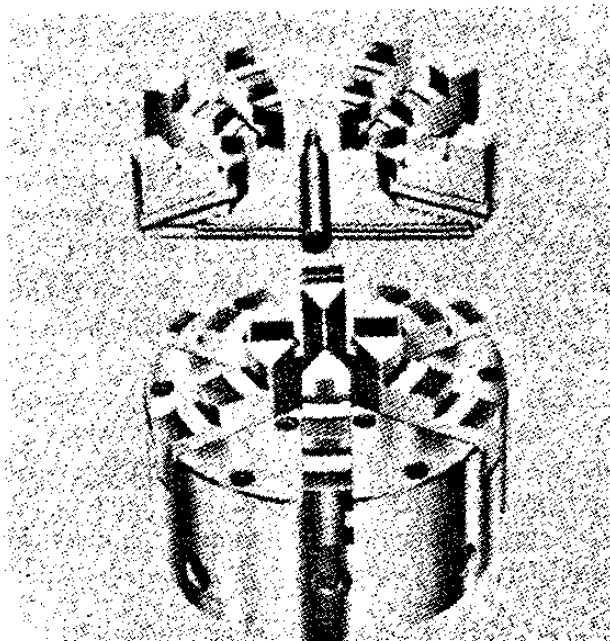


Figura 4.14 Mandril combinado de 6 mordazas

Una boquilla consiste en un buje tubular con hendiduras longitudinales que corren sobre la mitad de su longitud e igualmente espaciadas alrededor de su circunferencia, como se muestra en la figura 4.15 (c). El diámetro interior de la boquilla se usa para

sostener trabajos de forma cilíndrica como barras. Debido a las hendiduras, un extremo de la boquilla puede apretarse para reducir su diámetro y suministrar una presión de agarre segura sobre el trabajo. Como hay un límite en la reducción que se puede obtener en una boquilla de cualquier diámetro dado, estos dispositivos de sujeción del trabajo se deben hacer en varias medidas para igualar el tamaño particular de la pieza de trabajo.

Un plato de sujeción es un dispositivo para sostener la pieza de trabajo que se fija al husillo del torno y se usa para sostener partes con formas irregulares. Ver figura 4.15 Debido a su forma irregular, estas partes no se pueden sostener por otros métodos de sujeción. Por tanto, el plato está equipado con mordazas diseñadas a la medida de la forma particular de la parte.

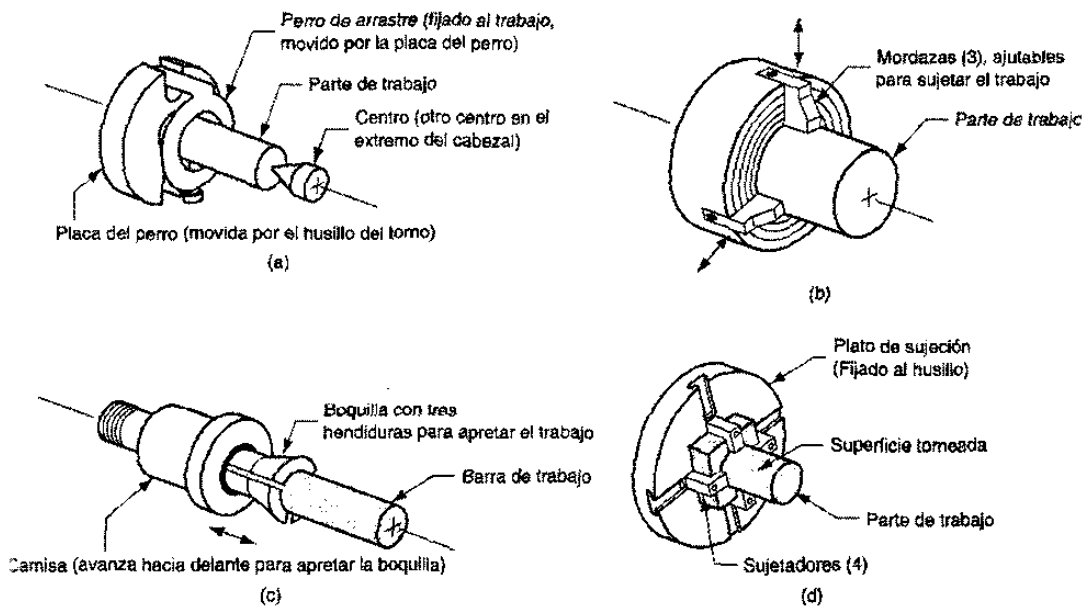


Figura 4.15 Métodos de sujeción de la pieza de trabajo al torno

#### 4.1.4 Otros tornos y máquinas de tornear

Además de los tornos mecánicos, se han desarrollado otras máquinas de tornear para satisfacer funciones particulares o para automatizar el proceso de torneado. Entre estas máquinas están:

- 1) El torno para herramientas.
- 2) El torno de velocidad.
- 3) El torno revólver.
- 4) El torno de mandril.
- 5) La máquina automática de tornillos.
- 6) El torno controlado numéricamente.

*El torno para herramientas y torno de velocidad.* Estos dos tornos están estrechamente relacionados con el torno mecánico. El *torno para herramientas* es más pequeño y tiene más velocidades y avances disponibles. Se construye también para precisiones más altas en concordancia con su propósito de fabricar componentes para herramientas, accesorios y otros dispositivos de alta precisión. El torno de velocidad es más simple en su construcción que el torno mecánico. No tiene carro ni cursor transversal ni tampoco tornillo guía para manejar el carro. El operador sostiene la herramienta de corte usando un sostén fijo en la bancada del torno. Las velocidades son más altas en el torno de velocidad, pero el número de velocidades es limitado. Las aplicaciones de este tipo de máquina incluyen el torneado de madera, el rechazado de metal y operaciones de pulido. Ver figura 4.16

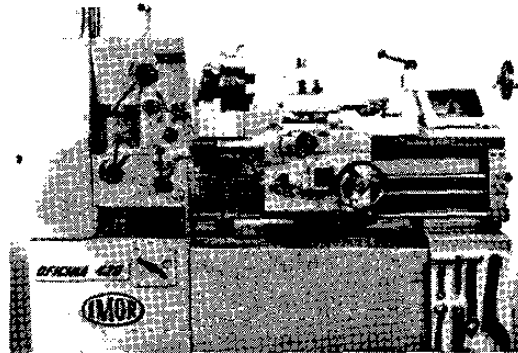


Figura 4.16 Torno para herramientas

*El torno revólver* es un torno operado manualmente en el cual el contrapunto se ha reemplazado por una torreta que sostiene hasta seis herramientas de corte. Estas herramientas se pueden poner rápidamente en acción frente al trabajo, una por una, girando la torreta. Además, el poste convencional de herramientas que se usa en el torno mecánico está reemplazado por una torreta de cuatro lados, que es capaz de poner cuatro herramientas en posición. Dada la capacidad de cambios rápidos de herramientas, el torno revólver se usa para trabajos de alta producción que requieren una secuencia de cortes sobre la pieza. Ver figura 4.17

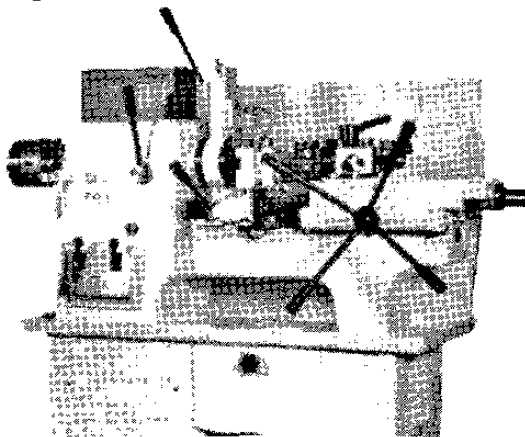


Figura 4.17 Torno revólver

*El torno de mandril* como su nombre lo indica, se utiliza un *mandril* en el husillo para sostener la parte de trabajo. El contrapunto está ausente en esta máquina, de manera que las partes no se pueden montar entre los centros. Esto restringe el uso de un torno de mandril a partes cónica, y ligeras. La disposición de la operación es similar al torno revólver, excepto que las acciones de las herramientas de corte se controlan más en forma automática que mediante un operador, la función del operador es cargar y descargar las partes. Ver figura 4.18

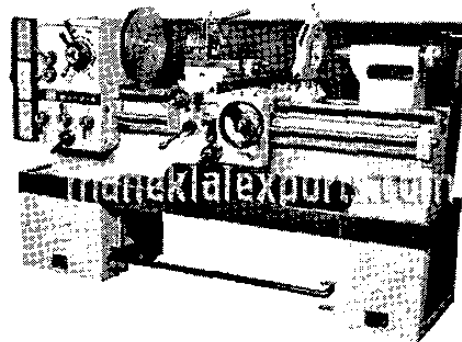


Figura 4.18 Torno Mandril

*La máquina de barra automática* es similar al torno de mandril, excepto que se usa una boquilla en lugar de un mandril, la cual permite alimentar barras largas a través del cabezal en posición de trabajo. Al final de cada ciclo de maquinado, se requiere una operación de corte para la pieza torneada. La barra se corre entonces hacia adelante para presentar nuevo material para próxima pieza. El avance del material, así como los corrimientos y los avances de las herramientas de corte se realizan automáticamente. Debido al alto nivel de operación automática, frecuentemente se le da a esta máquina el nombre de *máquina de barras automática*. Una aplicación importante para este tipo de máquinas es la producción de tornillos y partes similares de artículos de ferretería. A menudo se usa el término *máquina de tornillos automática* para las máquinas que se usan en aplicaciones sencillas. Ver figura 4.19

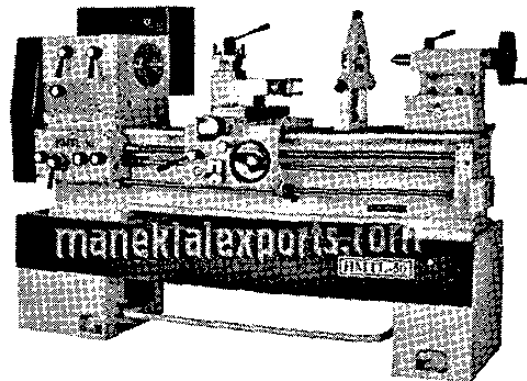


Figura 4.19 Torno de barra automática

Las máquinas de barras pueden clasificarse como de husillo simple y de husillo múltiple. Una máquina de barras de husillo simple tiene un husillo que permite utilizar solamente una herramienta de corte a la vez por cada parte que se maquina. Por tanto, mientras cada herramienta corta el trabajo, las otras herramientas están ociosas (los tornos revólver y los tornos de mandril están también limitados por esta operación secuencial no simultánea). Para incrementar la utilización de las herramientas de corte y la velocidad de producción existen las máquinas de barras de husillo múltiple

Estas máquinas tienen más de un husillo, de manera que muchas partes se pueden maquinar simultáneamente por muchas herramientas.

Al final de cada ciclo de maquinado, los husillos (incluyendo las boquillas y las barras de trabajo) se corren al siguiente juego de herramientas de corte. Esto es, cada parte debe ser cortada en forma secuencial por seis juegos de herramientas de corte que toman seis ciclos de maquinado, pero cada parte se completa al final de cada ciclo. Como resultado, una máquina automática de tornillos con seis husillos tiene la velocidad más alta de producción que cualquier máquina de torneado.

## 4.2 Tecnología de fabricación y tecnología de máquinas

### 4.2.1 Control Numérico

El control numérico es un ejemplo de automatización programable. Se diseñó para adaptar las variaciones en la configuración de los productos. Su principal aplicación se centra en volúmenes de producción bajos y medios. Uno de los ejemplos más importantes de automatización programable es el control numérico en la fabricación de partes metálicas. El control numérico (CN), ver figura 4.20 es una forma de automatización programable en la cual el equipo de procesado se controla a través de números, letras y otros símbolos. Estos números, letras y símbolos están codificados en un formato apropiado para definir un programa de instrucciones para desarrollar una tarea concreta. Cuando la tarea en cuestión cambia, se cambia el programa de instrucciones. La capacidad de cambiar el programa hace que el CN sea apropiado para volúmenes de producción bajos o medios, dado que es más fácil escribir nuevos programas que realizar cambios en los equipos de procesado. El primer desarrollo en el área del control numérico se le atribuye a John Parsons<sup>17</sup>. El concepto de control numérico implicaba el uso de datos en un sistema de referencia para definir las superficies de contorno de las hélices de un helicóptero.





Figura 4.20 Torno de Control Numérico Computarizado

La aplicación del control numérico abarca gran variedad de procesos. Dividiéndose las aplicaciones en dos categorías:

- (1) Aplicaciones con máquina-herramienta, tales como el taladrado, laminado, torneado, etc.
- (2) Aplicaciones sin máquina-herramienta, tales como el ensamblado, trazado e inspección. El principio de operación común de todas las aplicaciones del control numérico es el control de la posición relativa de una herramienta o elemento de procesado con respecto al objeto a procesar.

#### 4.2.2 Estructura de Sistema Control Numérico.

##### Definición de control numérico

Existen diversas definiciones de lo que es un CN entre las que se pueden citar las siguientes:<sup>17</sup>

- 1.- Es todo dispositivo capaz de dirigir posicionamientos de un órgano mecánico móvil, en el que las órdenes relativas a los desplazamientos del móvil son elaboradas a partir de las instrucciones codificadas en un programa.<sup>17</sup>
- 2.- Es todo dispositivo que realiza un mando mediante números, haciendo que las máquinas desarrollen su trabajo automáticamente mediante la introducción en su memoria de un programa en el que se definen las operaciones a realizar por medio de combinaciones de letras y números.<sup>17</sup>

- 3.- Son sistemas que, en base a una serie de instrucciones codificadas (programa), gobierna todas las acciones de una máquina o mecanismo al que le ha sido aplicado haciendo que éste desarrolle una secuencia de operaciones y movimientos en el orden previamente establecido por el programador.<sup>17</sup>
- 4.- Quizá la definición más clara en lo que se refiere al CN aplicado a las máquinas-herramienta sea la siguiente: "Sistema que aplicado a una máquina-herramienta automatiza y controla todas las acciones de la misma, entre las que se encuentran: los movimientos de los carros y del cabezal, el valor y el sentido de las velocidades de avance y de corte, los cambios de herramientas y de piezas a maquinar, las condiciones de funcionamiento de la máquina (bloqueos, refrigerantes, lubricación, etc.), el estado de funcionamiento de la máquina (averías, funcionamiento defectuoso, etc.), la coordinación y el control de las propias acciones del CN (flujos de información, sintaxis de programación, diagnóstico de su funcionamiento, comunicación con otros dispositivos, etc.)." De todo ello se deduce que los elementos básicos de un sistema de control numérico son, con carácter general)<sup>17</sup>.
- 5.- El programa, que contiene la información precisa para que se desarrollen esas tareas. El programa se escribe en un lenguaje especial (código) compuesto por letras y números y se graba en un soporte físico (cinta magnética, disquete, etc.) o se envía directamente al control vía RS-232.<sup>17</sup>
- 6.- El CN, que debe interpretar las instrucciones contenidas en el programa, convertirlas en señales que accionen los dispositivos de las máquinas y comprobar su resultado.<sup>17</sup>

#### Tecnología de fabricación y tecnología de máquinas

El equipo de procesado es el componente que realiza el trabajo útil, y lo forman la mesa de trabajo, las máquinas-herramientas así como los motores y controles para moverlas.

#### 4.2.3 Clasificación de los Controles Numéricos

Debido a las diferencias que existen entre las máquinas que son susceptibles de ser gobernadas por un CN, a las dificultades técnicas en el diseño de los controladores y a condicionantes de tipo económico, han aparecido diversos tipos de CN que pueden clasificarse de varias maneras:

- a) Según el sistema de referencia
- b) Según el control de las trayectorias
- c) Según el tipo de accionamiento
- d) Según el bucle de control
- e) Según la tecnología de control

### **a) Clasificación según el sistema de referencia**

Para programar los sistemas de CN es necesario establecer un sistema de referencia estándar en el que puedan ser especificadas las diferentes posiciones relativas de la máquina-herramienta con respecto al trabajo a realizar. Para facilitar las cosas frente al programador se fija la pieza a ser maquinada a una mesa de trabajo mientras que la máquina-herramienta se mueve en torno a ella. De este modo el sistema de referencia se fija con respecto a la mesa de trabajo. Sistemas de referencia fijos frente a sistemas de referencia flotantes. El propósito de los sistemas de referencia es localizar la herramienta en relación con la pieza a ser maquinada. Dependiendo del tipo de máquina de CN el programador puede tener varias opciones para especificar esta localización. En el caso de sistemas de referencia fijos, el origen siempre se localiza en la misma posición con respecto a la mesa de trabajo. Normalmente, esta posición es la esquina inferior de la izquierda de la mesa de trabajo y todas las posiciones se localizan a lo largo de los ejes XY positivos y relativos a ese punto fijo de referencia. En el caso de sistema de referencia flotantes, más comunes en las modernas máquinas de CN, permiten que el operador fije el origen del sistema en cualquier posición de la mesa de trabajo. A esta característica se le llama origen flotante. El programador es el que decide donde debe estar situado el origen. Esta decisión corresponde a la conveniencia de la parte de la máquina.

### **b) Control de trayectorias**

Avances en la tecnología electrónica e informática, desplazar a los otros dos sistemas siendo el más utilizado en la mayor parte de las máquinas-herramienta. Los sistemas CN de contorneado controlan no sólo la posición final de la herramienta sino el movimiento en cada instante de los ejes y coordinan su movimiento usando técnicas de interpolación lineal, circular y parabólica. La denominación de continuo viene dada por su capacidad de un control continuo de la trayectoria de la herramienta durante el maquinado, y de contorneado por la posibilidad de realizar trayectorias definidas matemáticamente de formas cualesquiera obtenidas por aproximación. Este tipo de control de contorneado se aplica a tornos, fresadoras, centros de maquinado y, en general, a cualquier tipo de máquina que deba realizar maquinados según una trayectoria más o menos compleja.

### **c) Según el tipo de accionamiento**

Según el tipo de accionamiento pueden ser: hidráulicos, eléctricos o neumáticos.

#### d) Según el bucle de control

El control del sistema se puede realizar de dos formas: en bucle cerrado, donde a través de sensores se mide el valor a la salida, y se compara en todo instante con un valor de referencia proporcionando una adecuada señal de control; o en bucle abierto donde no existe tal realimentación.

#### e) Clasificación según la tecnología de control

Si atendemos a la clasificación según la forma física de realizar el control encontramos los siguientes tipos de CN:

- Control Numérico (CN)
- Control Numérico Computerizado (CNC)
- Control Numérico Adaptativo (CNA)

##### Control Numérico (CN):

La denominación de Control Numérico (CN) se utiliza para designar aquellos controles donde cada una de las funciones que realiza el control son implementadas por un circuito electrónico específico únicamente destinado a este fin, realizándose la interconexión entre ellos con lógica cableada. Sus características principales son las de trabajar sin memoria, con una cinta perforada como medio de introducción del programa que se ejecuta de forma secuencial. Los armarios de control son de gran volumen y difícil mantenimiento.

##### Control Numérico Computerizado (CNC)

El tipo de controles basados en circuitos específicos y lógica cableada está fuera de uso con la aparición de los Controles Numéricos Computerizados (CNC), basados en el uso de uno o varios microprocesadores que sustituyen a los circuitos de lógica cableada de los sistemas CN, poco fiables y de gran tamaño. Los CNC incluyen una memoria interna de semiconductores que permite el almacenamiento del programa de la pieza, de los datos de la máquina y de las compensaciones de las herramientas. Por otra parte, incorporan un teclado que facilita la comunicación y el grado de interactividad con el operario y permiten la ruptura de la secuencia de los programas, la incorporación de subrutinas, los saltos condicionales y la programación paramétrica. De esta forma, se facilita una programación más estructurada y fácil de aprender. Por otra parte, se trata de equipos compactos con circuitos integrados, lo que aumenta el grado de fiabilidad del control y permite su instalación en espacios reducidos y con un nivel de ruido elevado. Actualmente, todos los controles que se fabrican son del tipo CNC, quedando reservado

el término CN para una referencia genérica sobre la tecnología, de tal forma que se utiliza la denominación CN para hacer referencia a todas las máquinas de control numérico, tengan o no computador.

### Control Numérico Adaptativo (CNA)

El CNA es la tendencia actual de los controles. En ellos el controlador detecta las características del maquinado que está realizando y en función de ellas optimiza las velocidades de corte y los avances; en otras palabras, adapta las condiciones teóricas o programadas del maquinado a las características reales del mismo. Para ello, hace uso de sistemas sensoriales de fuerza y deformación en la herramienta, temperatura de corte, vibraciones, potencia, etc. Las razones de la introducción del CNA residen en la variación de las condiciones de corte durante el maquinado por varios motivos:

- Geometría variable de la sección de corte (profundidad y anchura) por la complejidad de la superficie a maquinar, típico de las operaciones de contorno.
- Variaciones en la dureza y en la maquinabilidad de los materiales.
- Desgaste de las herramientas, incrementándose el esfuerzo de corte.

### VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL CONTROL NUMÉRICO

El uso de la tecnología del CN aplicada a las máquinas-herramienta presenta una serie de ventajas y desventajas que se pueden resumir como sigue:

#### a) Ventajas

Entre las ventajas podemos enumerar las siguientes:

Reducción de los tiempos de fabricación, ya que los tiempos muertos se reducen al encadenarse de forma automática los movimientos, por la rapidez de los movimientos en vacío y por el control automático de las velocidades del cabezal.

Los tiempos de control y medida disminuyen debido a la elevada precisión de los maquinados y a la reproducción fiel de las cotas a partir de la primera pieza.

Los tiempos de cambio de pieza también se reducen.

Los tiempos de espera entre máquinas bajan, al poder realizar sobre una misma máquina mayor número de operaciones que con las convencionales; esto se relaciona con la disminución de la superficie ocupada de taller.

Se reduce el número de verificaciones entre operaciones.

Reducción del tamaño del lote económico y, por lo tanto, del nivel de almacenes.

Aumento de la flexibilidad de producción expresada en términos de fácil adaptabilidad a la realización de distintos tipos de fabricados, respondiendo ágilmente a las necesidades del mercado.

Disminución de rechazos de piezas, como consecuencia de la precisión de las máquinas.

Mayor duración de las herramientas, debido a su mejor aprovechamiento.

Supresión de ciertas herramientas y disminución del número de herramientas de forma (ahorro de herramientas y herramental); se utilizan herramientas más universales.

Supresión del trazado de piezas antes del maquinado. Ahorro de herramental, al realizar en una misma máquina mayor número de operaciones.

#### b) Desventajas

Entre las desventajas podemos citar:

Costo elevado por la importante inversión de adquisición de una Máquina-Herramienta de Control Numérico (MHCN), debido no sólo al precio de la MHCN sino también al de los elementos auxiliares. Ello obliga a asegurar un alto nivel de ocupación de la máquina y la puesta a varios turnos del equipo para conseguir una amortización razonable.

Necesidad de un personal mayormente calificado en programación y mantenimiento, lo que se traduce en mayores costos en formación y en salarios. Alto costo del servicio postventa y de mantenimiento de los equipos en razón de su mayor complejidad. Se estima que el costo de mantenimiento de una MHCN es un 50% más elevado que en las convencionales.

### 4.2.4 Sistema de Control

La arquitectura del sistema de control de un control numérico comprende los siguientes elementos:

- Unidad de entrada-salida de datos.
- Unidades de memoria fija (ROM) y volátil (RAM).
- Uno o varios microprocesadores.
- Visualizador de datos.
- Unidad de enlace con la máquina.

#### a) Unidad de entrada-salida de datos

La entrada y salida de datos en los equipos de CN se puede realizar de varias formas:

- Por cinta perforada (ya obsoleto).
- Por panel de control.
- Por cintas magnéticas (tipo cassette), ya en desuso y sustituidas por disquetes informáticos.
- Por comunicación con un ordenador externo.

La aparición del CNC ha hecho posible la introducción de datos de una manera más cómoda mediante el uso de otros periféricos conectados al CN. Uno de ellos es el panel de control que han incorporado la mayor parte de los CN modernos. Este panel de control lleva incorporado un teclado y una serie de selectores y pulsadores que abarcan todas las informaciones codificadas necesarias para la programación. Este panel se emplea para realizar modificaciones sobre los programas introducidos previamente en memoria, para programar a pie de máquina y para controlar y verificar el funcionamiento de la máquina-herramienta.

#### 4.2.5 Características y tipos de tornos de CNC

Todos los tornos desprenden viruta de piezas que giran sobre su eje de rotación, por lo que su trabajo se distinguirá por que la superficie generada será circular, teniendo como centro su eje de rotación. En el torno de manera regular se pueden realizar trabajos de desbastado o acabado de las siguientes superficies:

- 1.- *Cilíndricas (exteriores e interiores)*
- 2.- *Cónicas (exteriores e interiores)*
- 3.- *Curvas o semiesféricas*
- 4.- *Irregulares (pero de acuerdo a un centro de rotación)*

Se pueden realizar trabajos especiales como:

- 1.- *Tallado de roscas*
- 2.- *Realización de barrenos*
- 3.- *Realización de escariado*
- 4.- *Moletado de superficies*
- 5.- *Corte o tronzado*
- 6.- *Careado*

Las principales características de los tornos son las siguientes. Ver tabla # 8.

Característica	Descripción
Potencia	Representada por la capacidad del motor en HP.
Distancia entre puntos	Es la longitud que existe entre el husillo principal y la máxima distancia al cabezal móvil.
Peso neto	Peso de toda la máquina
Volteo sobre la bancada	Es el máximo diámetro que una pieza puede tener. Se considera como el doble de la distancia que existe entre el centro del husillo principal y la bancada. (radio máximo de trabajo de una pieza)
Volteo sobre el escote	Distancia del centro del husillo a la parte baja de la bancada, no siempre se especifica porque depende si la bancada se puede desarmar.
Volteo sobre el carro	Distancia del centro del husillo al carro portaherramientas.
Paso de la barra	Diámetro máximo de una barra de trabajo que puede pasar por el husillo principal.
Número de velocidades	Cantidad de velocidades regulares que se pueden obtener con la caja de velocidades.
Rango de velocidades en RPM	El número de revoluciones menor y mayor que se pueden lograr con la transmisión del torno.

Tabla # 8 Características de los tornos