

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 CENTRO DE MAQUINADO  
DE CONTROL NUMERICO COMPUTAREZADO

POR  
ING. BERNARDO GONZALEZ ORTIZ

TESIS

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

CD. UNIVERSITARIA

MARZO DEL 2004

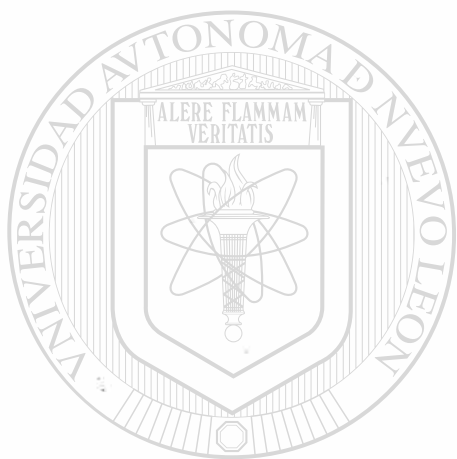
OPTIMIZACION DE LAS VARIABLES ENVUELTELAS  
EN EL MAQUINADO EN UN CENTRO DE MAQUINADO  
DE CONTROL NUMERICO COMPUERAZADO

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2004  
.G669

2004



1020149821



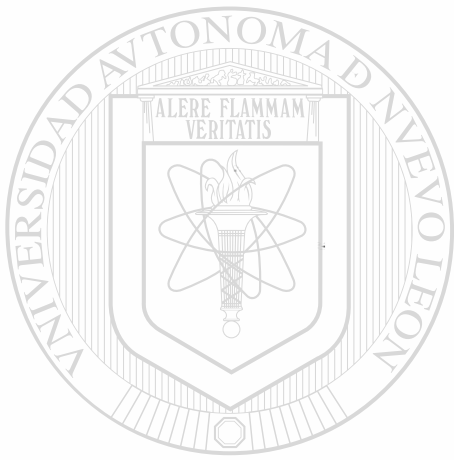
# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

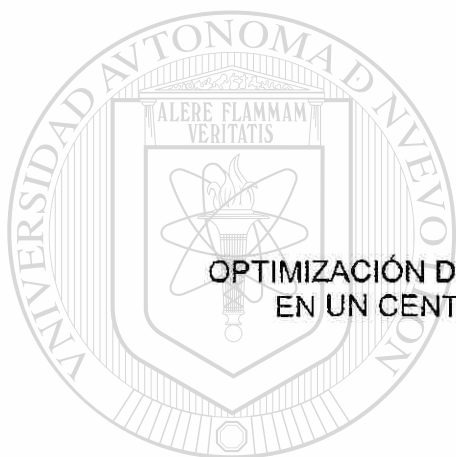
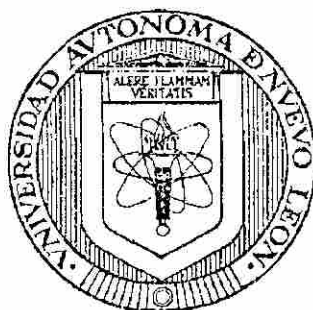
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

*m*

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 CENTRO DE MAQUINADO DE CONTROL NUMÉRICO  
COMPUTARIZADO

POR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

ING. BERNARDO GONZÁLEZ ORTÍZ

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

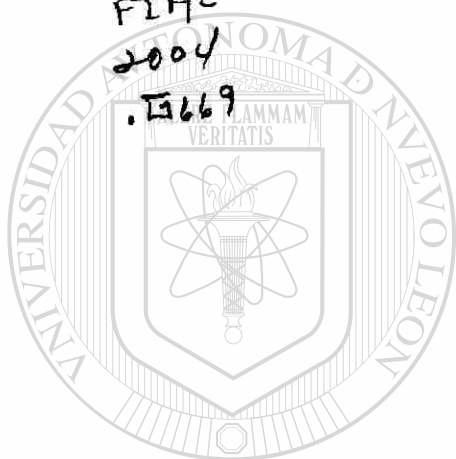
TESIS

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

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2004

981412

TH  
Z 5853  
.H2  
FIHE  
2004



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

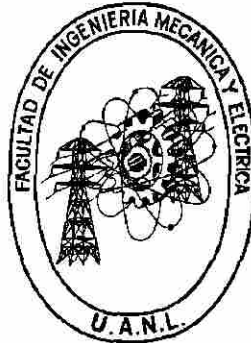


FONDO  
TESIS

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 CENTRO DE MAQUINADO DE CONTROL NUMÉRICO  
COMPUTARIZADO

POR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

ING. BERNARDO GONZÁLEZ ORTÍZ  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TESIS

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

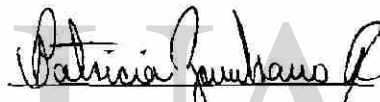
CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2004




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 Centro de Maquinado de Control Numérico Computarizado”, realizada por el Ing. Bernardo González Ortiz, matrícula 0774910 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería de Manufactura con especialidad en Automatización.

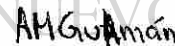
El Comité de Tesis



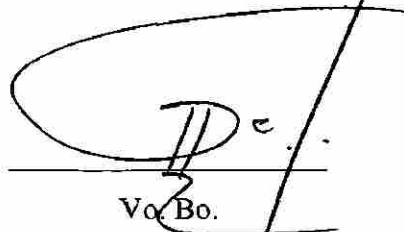
Dra. Patricia del C. Zambrano Robledo  
Asesor



M. C. Roberto A. Mireles Palomares  
Coasesor

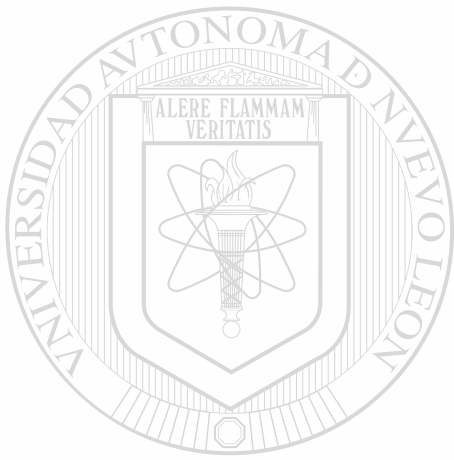


Dra. Ana María Guzmán Hernández  
Coasesor



Vo. Bo.  
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División de Estudios de Posgrado





# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

No hay en todo el mundo un triunfo verdadero  
que pueda separarse de la dignidad de vivir.  
DAVID STARR JORDAN

El modo en que vemos las cosas es  
la fuente del modo en que pensamos y  
del modo en que actuamos.  
STEPHEN R. COVEY

# 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:

Sergio González González y Juliana Ortiz de González 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. Gracia PAPAS.

A mi Amada y Querida Esposa:

Índira Gary por ser mi musa y mi motivación, quien ilumina y llena de alegría todos los días de mi vida, linda, tierna, fuerte y tenaz, por estar siempre a mi lado en los momentos felices y los tristes. Gracias por tu apoyo y paciencia en la elaboración de esta tesis. Por tu confianza y cariño y por ser una GRAN MUJER en mi afán de ser un GRAN HOMBRE, y por llenar con tu amor y confianza todo mi ser. Gracias mi AMOR.

A mis Hermanos:

Gabriela y Sergio Ramón por las grandes aventuras que hemos vivido, por ser la sal y la pimienta de mi vida y porque sin ustedes mi vida no sería la misma.

A mis Grandes Amigos:

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

A mis Amigos de Tampico:

José Antonio, Manuel, Johnny, Erika, Alma, Alfredo, Monica, Mario, con quienes compartó tantas anécdotas e historias desde hace muchos años.

# AGRADECIMIENTOS

A los Maestros:

Que transmitieron todos sus conocimientos y que me hicieron crecer como profesionalista y como persona. Al Ing. Francisco Delgado Corona, al M.C. Fernando Montemayor Ibarra y al M.C. Arturo González Escamilla.

A los Becarios de Máquinas-Herramientas:

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

Gracias a CONACYT por el apoyo brindado al proyecto para la realización de 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. Roberto Alberto Mireles Palomares, a la Dra. Ana María Guzmán Hernández.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# ÍNDICE

CAPÍTULO	PÁGINA
1. INTRODUCCIÓN	1
Hipótesis	2
Objetivo	2
2. TEORÍA DEL MAQUINADO DE METALES	3
2.1. Maquinado de alta velocidad	3
2.1.1. Introducción	3
2.1.2. ¿Qué es el maquinado de alta velocidad?	3
2.2. Panorama general de la tecnología del maquinado	6
2.2.1. Tipos de operaciones de maquinado	7
2.2.2. La herramienta de corte y portaherramientas para máquinas de alta velocidad	8
2.2.3. Condiciones de corte	10
2.3. Teoría de la formación de viruta en el maquinado de metales	12
2.3.1. Modelo de corte ortogonal	12
2.3.2. Formación real de viruta	14
2.4. Relaciones entre potencia y energía en el maquinado	16
2.4.1. Temperatura de corte	17
2.4.2. Métodos analíticos	17
2.4.3. Medición de la temperatura de corte	17
3. TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE	19
3.1. Vida de las herramientas	19
3.1.1. Desgaste de la herramienta	21
3.1.2. Vida de las herramientas	27
3.2. Materiales para herramientas	30
3.3. Geometría de las herramientas	33
3.3.1. Corte	34
3.4. Fluidos para corte	54
4. OPERACIONES DE MAQUINADO Y MÁQUINAS HERRAMIENTA	57
4.1. Fresado	57
4.1.1. Tipos de operación de fresado	62
4.2. Tecnología de fabricación y tecnología de máquinas	70
4.2.1. Control numérico	70
4.2.2. Estructura de sistema control numérico	71
4.2.3. Clasificación de los controles numéricos	72
4.2.4. Sistema de control	76
4.3. Maquinabilidad	81
4.4. Selección de las condiciones de corte	82

4.4.1. Selección del avance y de la profundidad de corte	82
4.4.2. Optimización de la velocidad de corte	83
<b>5. METROLOGIA SUPERFICIAL RUGOSIDAD</b>	<b>87</b>
5.1. Introducción	87
5.2. Las curvas P Y R	91
5.2.1. Definición de Ra	92
5.2.2. Definición de Rz	94
5.2.3. Definición de Ry	95
5.2.4. Símbolos para la dirección de marcado	95
5.3. Recomendaciones prácticas para medir la rugosidad de una superficie	98
<b>6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>100</b>
6.1. Introducción	100
6.2. Equipo utilizado	100
6.3. Material maquinado	101
6.4. Procedimiento de medición	102
<b>7. RESULTADOS</b>	<b>105</b>
7.1. Resultados de la medición de temperatura	105
7.1.1. Resultado de temperatura en Aluminio 6063 T5 con una velocidad de corte de 800 RPM	106
7.1.2. Resultado de temperatura en Aluminio 6063 T5 con una velocidad de corte de 1000 RPM	109
7.1.3. Resultado de temperatura en Acero 1018 con una velocidad de corte de 800 RPM	113
7.1.4. Resultado de temperatura en Acero 1018 con una velocidad de corte de 1000 RPM	116
7.1.5. Resultado de temperatura en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de corte de 800 RPM	120
7.1.6. Resultado de temperatura en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de corte de 1000 RPM	123
7.2. Discusión de los resultados de temperatura	127
7.3. Resultados de la medición de rugosidad	128
7.3.1. Resultado de rugosidad en Aluminio 6063 T5 con una velocidad de corte de 800 RPM	128
7.3.2. Resultado de rugosidad en Aluminio 6063 T5 con una velocidad de corte de 1000 RPM	130
7.3.3. Resultado de rugosidad en Acero 1018 con una velocidad de corte de 800 RPM	131
7.3.4. Resultado de rugosidad en Acero 1018 con una velocidad de corte de 1000 RPM.	132
7.3.5. Resultado de rugosidad en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de corte de 800 RPM.	134
7.3.6. Resultado de rugosidad en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de corte de 1000 RPM.	135
7.4. Discusión de los resultados de la rugosidad	137
7.5. Discusión de los resultados de la correlación de las variables temperatura y rugosidad	141

<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>147</b>
<b>8.1. Conclusiones</b>	<b>147</b>
<b>8.2. Recomendaciones</b>	<b>148</b>
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>149</b>
<b>Listado de figuras</b>	<b>151</b>
<b>Listado de tablas</b>	<b>158</b>
<b>Listado de ecuaciones</b>	<b>159</b>
<b>Anexo A</b>	<b>160</b>
<b>Glosario</b>	<b>166</b>
<b>Autobiografía</b>	<b>168</b>



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN.

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 de trabajo del 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.

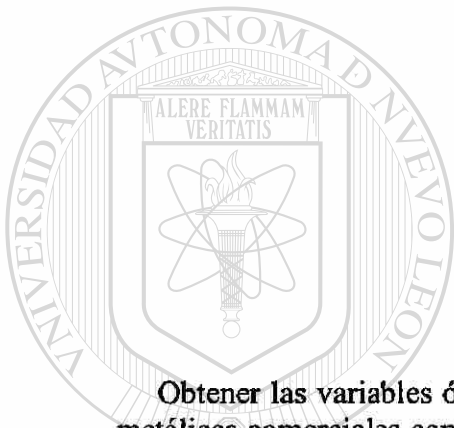
Para la total comprensión tanto del fenómeno temperatura así como del maquinado y la rugosidad, se tratan primeramente los aspectos teóricos y fundamentos del CNC y la rugosidad para después realizar un análisis de la temperatura concerniente a las máquinas-herramienta. Una vez comprendido esto, se llevará 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 de maquinados 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).

# 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, tamaño y morfología de la viruta, acabado de la superficie maquinada y el material de la pieza, se logrará mejorar el proceso de corte en una máquina-herramienta.



# OBJETIVOS

Obtener 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 centro de maquinado EMCO PC MILL 125 con el que cuenta la División de Ingeniería Mecánica en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Este trabajo pretende obtener las variables óptimas de velocidad de corte y el avance que den como resultado la eficientización de corte en una situación de maquinado en particular.

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.



## 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 ó 15 años. La evolución de los ordenadores, de las nuevas tecnologías de comunicación, etc, están revolucionando 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 trabajo 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?

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 y 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, inonel, 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 nos muestra los rangos de velocidades de corte en función del material maquinado.<sup>1</sup>

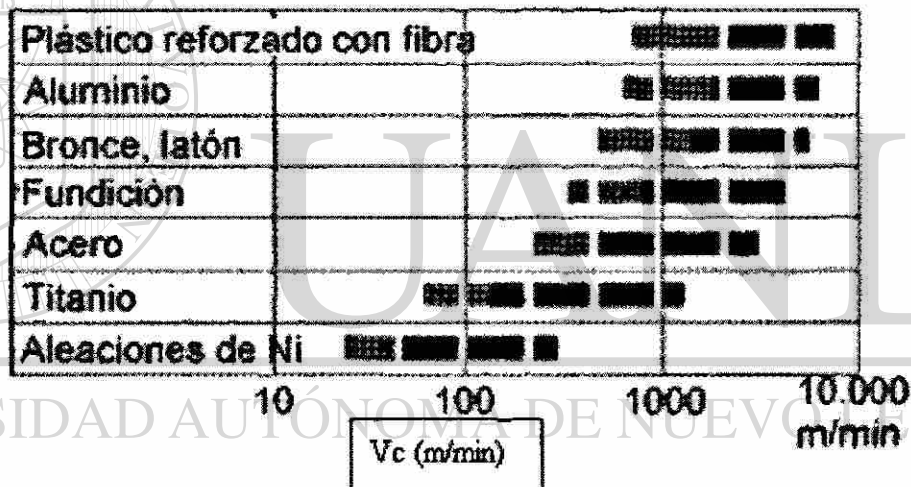


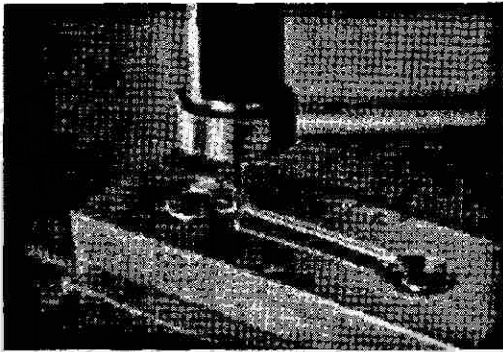
Figura 2.1 Rangos de velocidades de corte en función del material

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”.

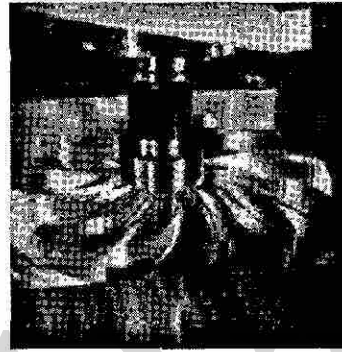
Podemos considerar que con el Maquinado a Alta Velocidad se ha dado un paso importante hacia el maquinado óptimo de cada material. A medida que se vayan desarrollando y mejorando las máquinas, las herramientas, los programas de CAD-

CAM, los CNC, 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. Como se muestra en las 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<sup>2</sup>

- ✦ 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.<sup>3</sup>

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 mm. 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. 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, ver figura 2.4.

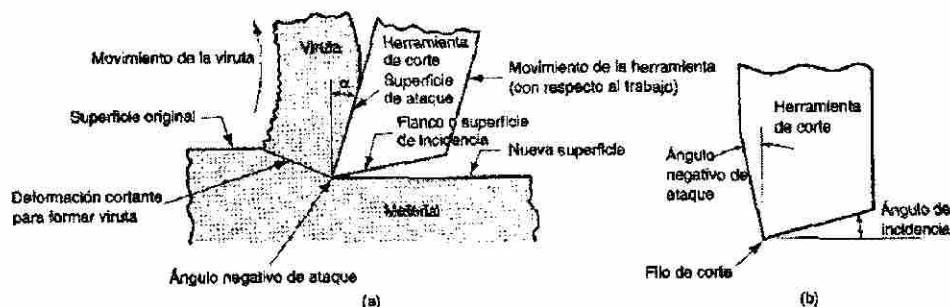


Figura 2.4 (a) Proceso de Torneado, (b) Herramienta de corte

### 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.

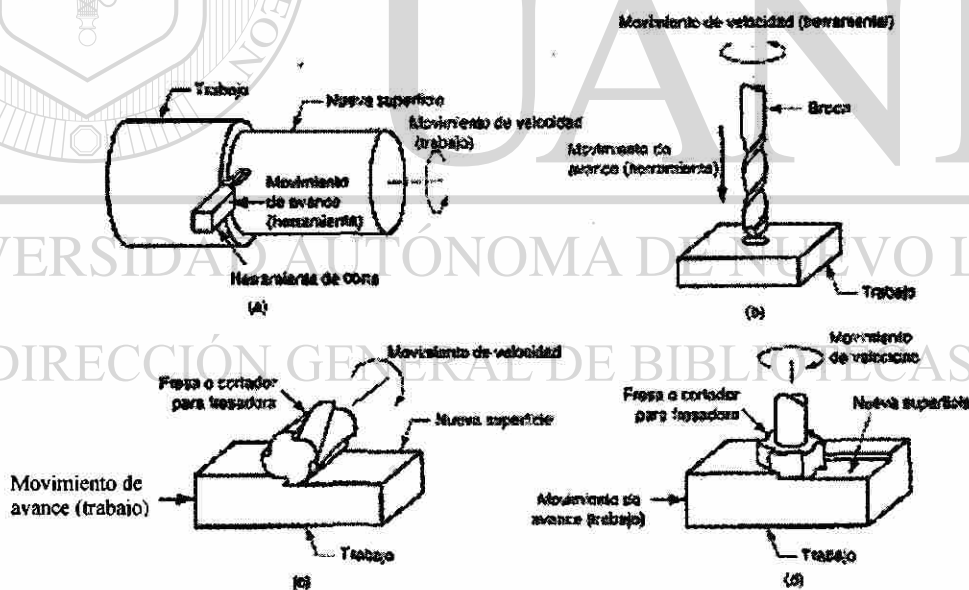


Figura 2.5 Los tres procesos más comunes de maquinado: (a) torneado, (b) taladrado y dos formas de fresado: (c) fresado periférico y (d) fresado de frente.

En el torneado se utiliza 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 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 2.6. 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.

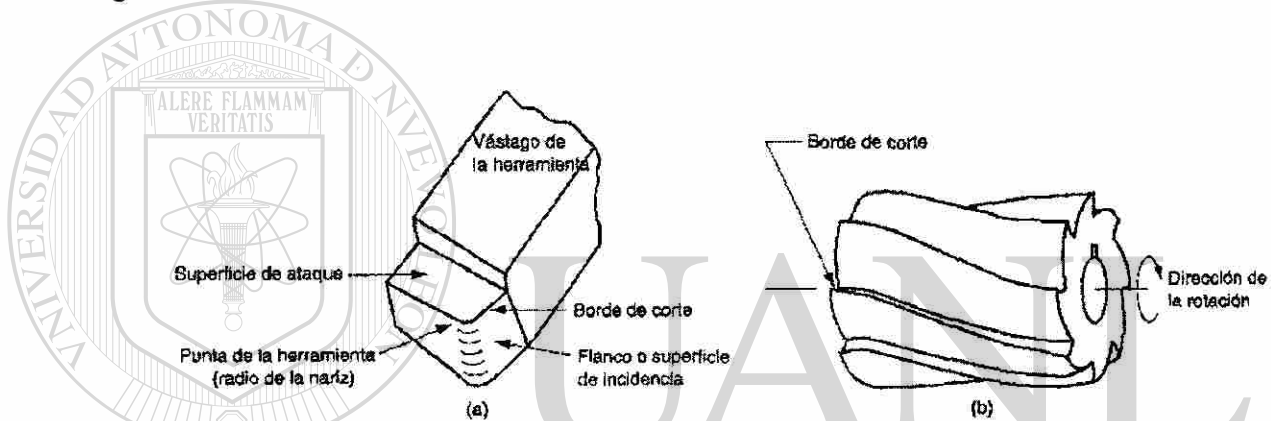


Figura 2.6 (a) Herramienta de punta sencilla, (b) Herramienta de múltiples filos cortantes

**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. También se utilizan los conos SK 40 & 50 (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, ver 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:

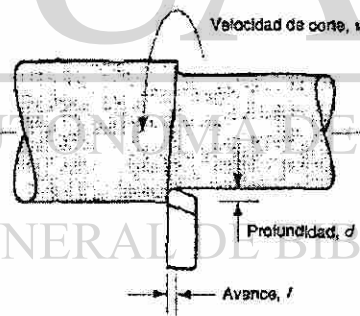
$$MRR = vfd \quad (1)$$

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/rev 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 utiliza 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 realizar operaciones de formado de metal y prensado.

Las máquinas-herramienta convencionales son manejadas usualmente por un trabajador aunque las máquinas-herramienta 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.

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

Operación	Máquina herramienta	Definiciones de velocidad, avance y profundidad
Torneado	Torno	La pieza 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	La pieza se mantiene estacionaria. 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. La pieza avanza en dirección perpendicular al eje de la herramienta. La profundidad de corte es la penetración de la herramienta debajo de la superficie original.

### 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 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.

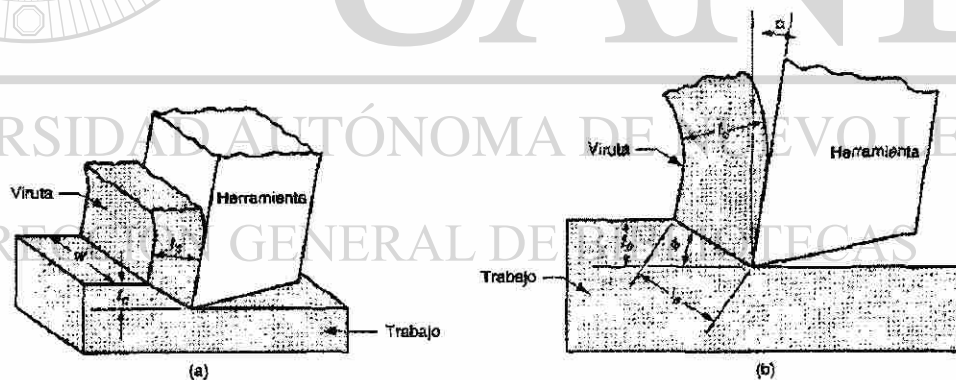
El corte ortogonal usa por definición una herramienta en forma de cuña, en la cual el borde cortante es perpendicular a la dirección de la velocidad de corte. Al presionar la herramienta contra el material se forma una viruta por deformación cortante a lo largo de un plano llamado plano de corte, éste 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 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.

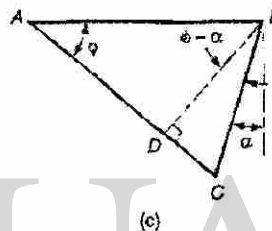
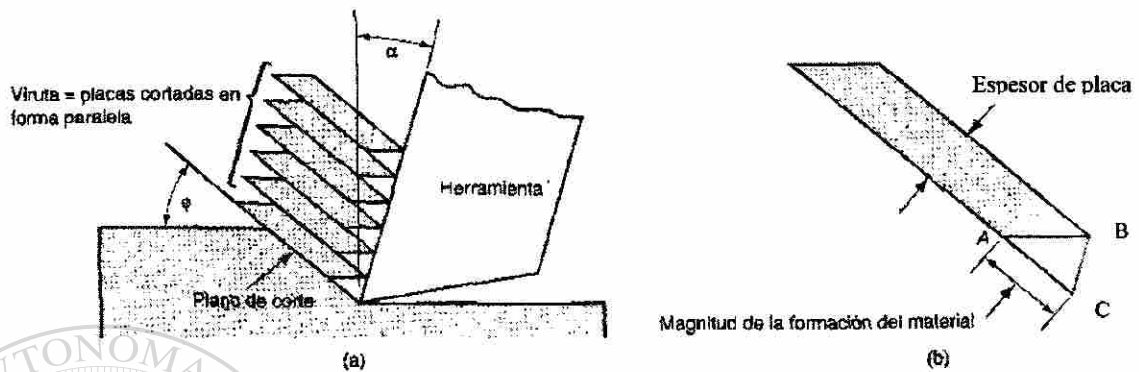


Figura 2.9 Deformación cortante

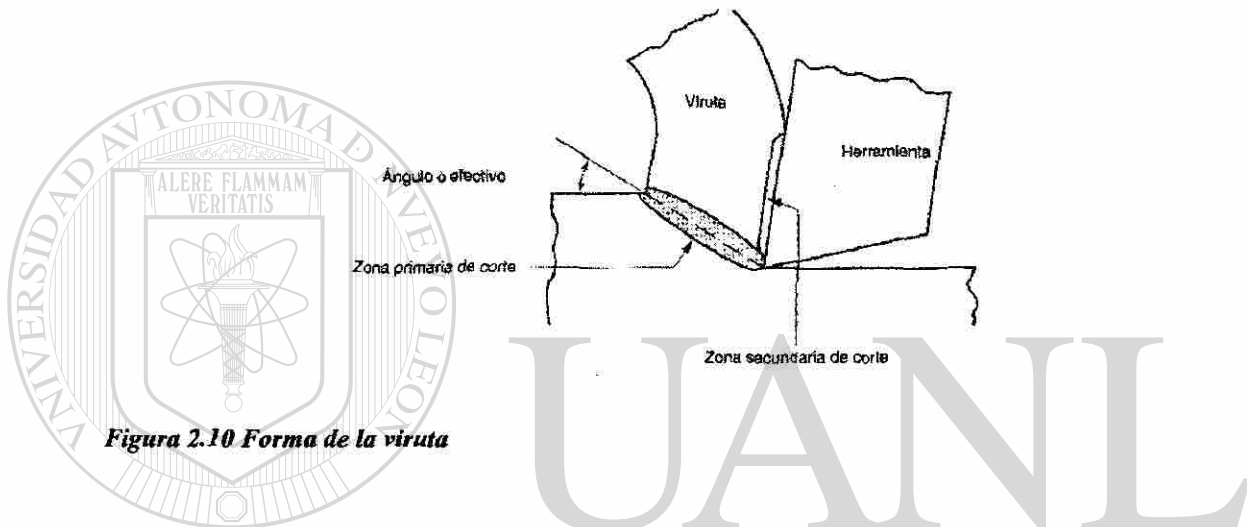
### 2.3.2 Formación real de viruta.

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>4</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.

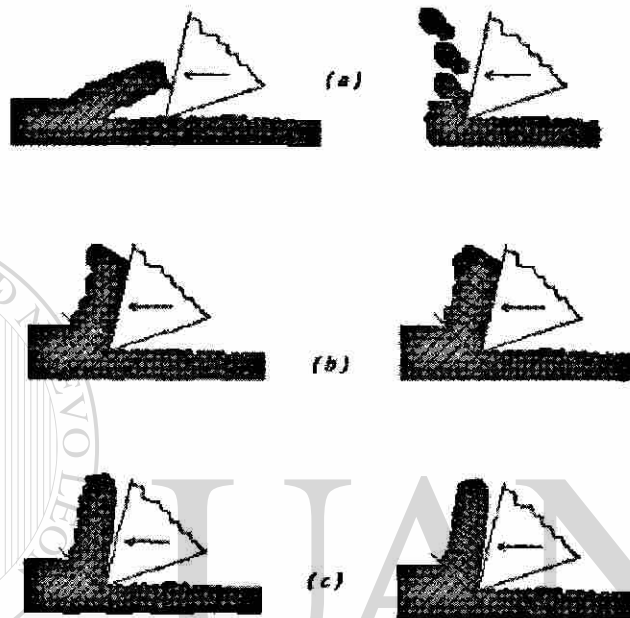


Figura 2.11 Tres tipos de formación de viruta en el corte de metales (a) discontinua, (b) continua y (c) continua con acumulación en el borde

## 2.4 Relaciones entre potencia y energía en el maquinado. ®

### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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-herramienta 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.

$$T = 0.4 (U/Q_c)(v t_o / K)^{0.33} \quad (3)$$

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;  
 $t_o$  = espesor de la viruta antes del corte, m;  
 $Q_c$  = 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.

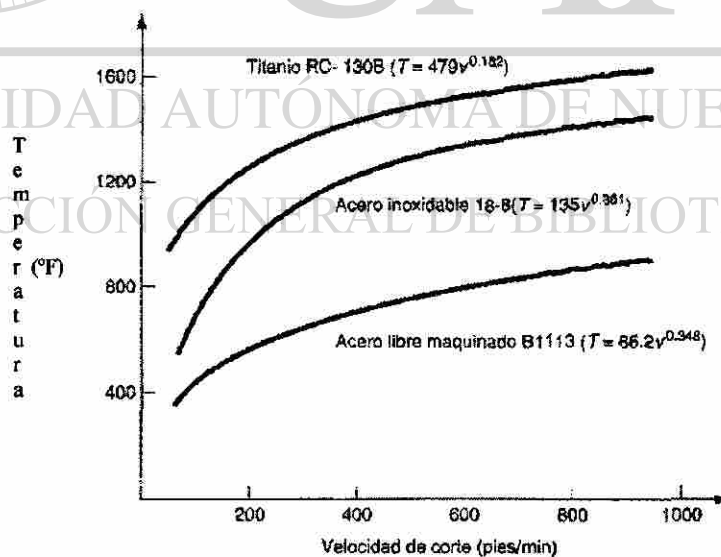


Figura 2.12 Temperatura contra velocidad de corte para varios materiales de trabajo



# CAPÍTULO 3

## TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE.

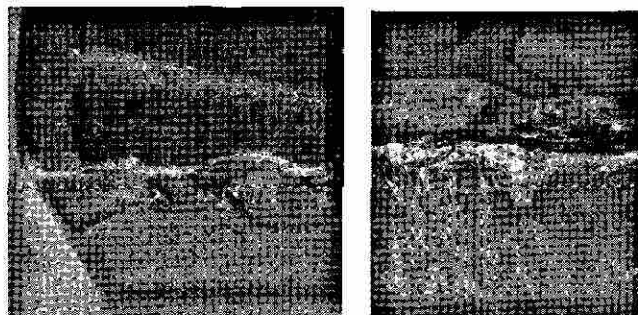
### 3.1 Vida de las herramientas.

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.

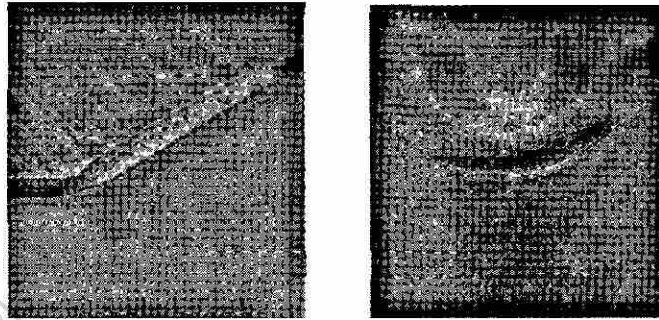
Hay tres formas posibles de falla en una herramienta de corte en maquinado:

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.



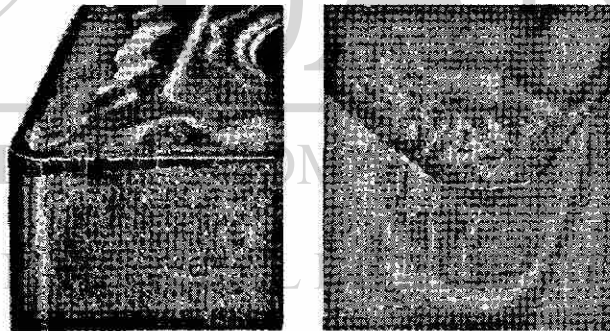
*Figura 3.1 Falla por fractura en una herramienta de corte*

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 de corte*

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) en una herramienta de corte*

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

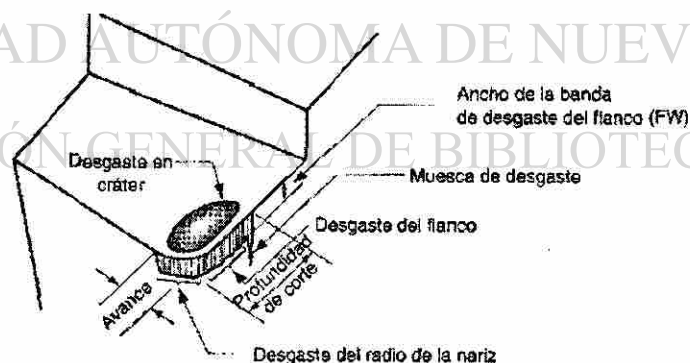
requiere volver a trabajar la superficie o posiblemente desechar la parte. El daño se puede evitar si la selección de las condiciones de corte favorecen el desgaste gradual de la herramienta y evitan la fractura o la falla por temperatura, o si la herramienta se cambia antes de que ocurra una falla catastrófica 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 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 o curre 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 presente 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 recocido 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 ( $Al_2O_3$ ), nitruro de titanio carbono (TiCN), y 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 (Ceramic / 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 TaNbCy 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 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 cajeras profundas. Evita el contacto y los roces. Reduce las vibraciones.

**Mango cilíndrico largo:** Para una mejor sujeción y equilibrio.

Ángulo de desprendimiento negativo (-15°): 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 8 mm. 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: ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

- ✚ 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 0.0001" y 0.0005".
- ✚ 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 remplazando 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 utillajes 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 8000 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

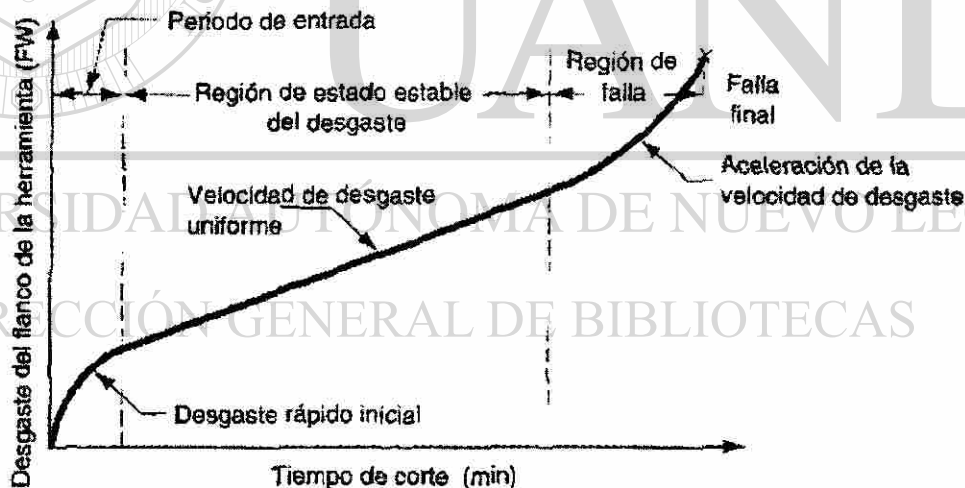
Este recubrimiento hace frente a todos aquellos mecanismos de desgaste que se dan en la formación y evacuación de viruta. Combina la alta dureza y estabilidad térmica del



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 éste 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 ésta 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.

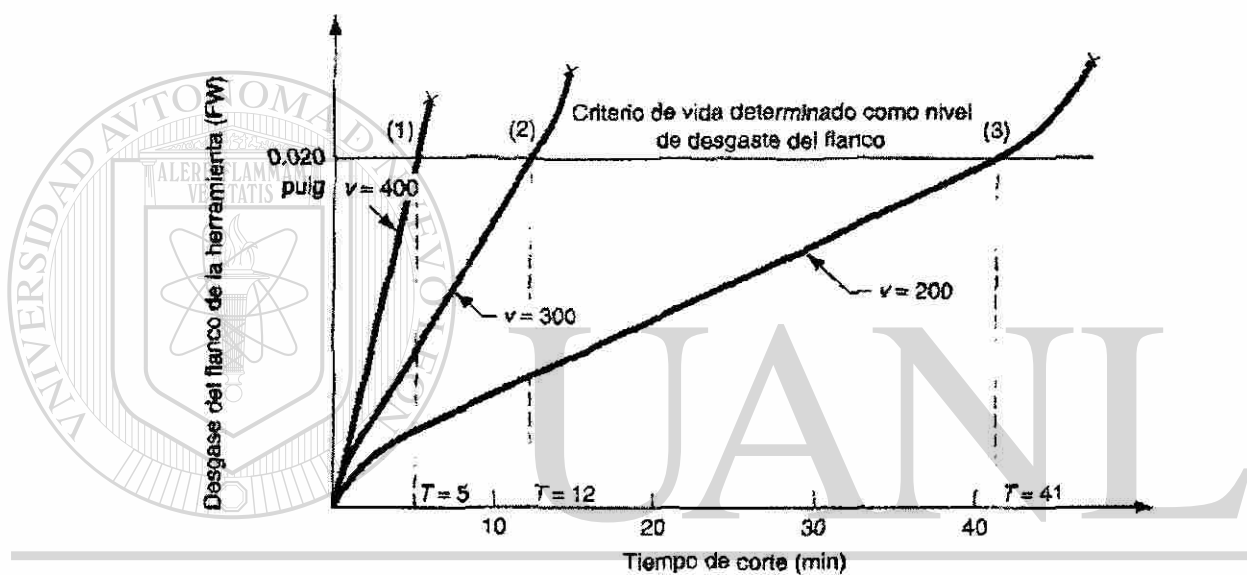


Figura 3.6 Curvas de desgaste de la herramienta para varias velocidades de corte

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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 3.6 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 intersecan 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.

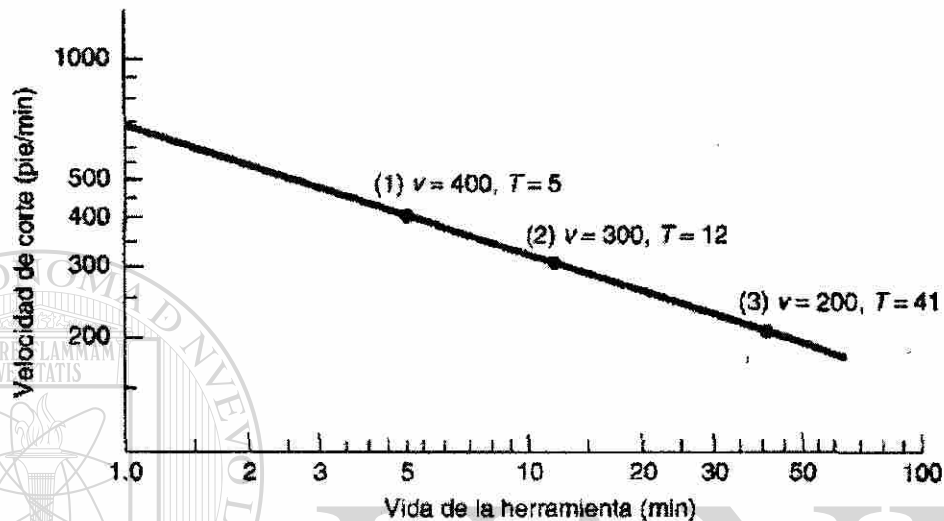


Figura 3.7 Vida de la herramienta

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-herramienta 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>4, 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.

Esta es necesaria debido al ambiente de altas temperaturas en que opera la herramienta. (porque en un proceso de maquinado con herramientas tradicionales temperatura; herramienta > temperatura pieza > 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 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, cermets 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 templado, 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 templan en aceite.	<input type="checkbox"/> Taladrar. <input type="checkbox"/> Escariar. <input type="checkbox"/> Fresar. <input type="checkbox"/> Brochar. <input type="checkbox"/> Machuelear. <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, cements	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 Níquel 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 maquinariar fierros fundidos y metales abrasivos no ferrosos. Maquinariar 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 templado. 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 existe 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>14</sup>

Los materiales duros se han utilizado para cortar o deformar otros metales durante miles de años. Sin 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.

**Tabla 4. Algunas herramientas y como se agrupan para su clasificación**

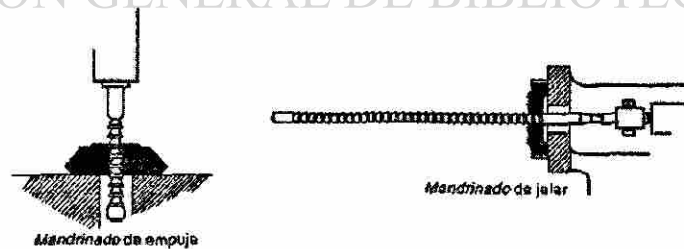
DE ACUERDO AL NÚMERO DE FILOS	a. De un filo, como los buriles de corte de los tomos o cepillos. b. De doble filo en hélice, como las brocas utilizadas para los taladros. c. De filos múltiples, como las fresas o las seguetas
DE ACUERDO AL TIPO DE MATERIAL CON QUE ESTÁN FABRICADAS	WS. Acero de herramientas 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. SS. Aceros de herramienta aleados con wolframio, cromo, vanadio, molibdeno y otros. Soporta hasta 600°C. También se les conoce como aceros rápidos. 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. Diamante. Material natural que soporta hasta 1800°C. Se utiliza como punta de algunas barrenas o como polvo abrasivo. Materiales cerámicos. Se aplica en herramientas de arcilla que soportan hasta 1500°C. Por lo regular se utilizan para terminados.
POR EL TIPO DE MOVIMIENTO DE CORTE	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. 2. Contra el material. La herramienta se mueve en contra del material, mientras este se encuentra relativamente fijo, como en los cepillos. 3. En contra dirección. La herramienta y el material se mueven un en contra una del otro, como en el esmerilado sobre tomo.
POR EL TIPO DE VIRUTA QUE GENERA	1. Polvo sin forma definida o viruta discontinua. 2. Viruta continua, en forma de espiral. 3. Viruta continua con borde acumulado.
POR EL TIPO DE MÁQUINA EN LA QUE SE UTILIZA	1. Torno 2. Taladro 3. Fresa 4. Cepillo 5. Broca

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.

### 3.3.1 Corte.

El siguiente movimiento del uso de una herramienta de un solo punto es el uso de una herramienta de puntos múltiples. Inicialmente esta es una operación en línea recta; los primeros "aserraderos" no eran sierras circulares grandes, como es común ahora, sino que eran grandes sierras oscilantes rectas, impulsadas por un mecanismo hidráulico; estas máquinas aún existen, ya que tiene la capacidad de cortar material muy grueso, cuando una sierra circular necesitaría ser de un diámetro tan grande que sería prohibitiva. El principio todavía se encuentra en la sierra caladora que se utiliza en la industria de la transformación de la madera, así como la limadora y el arco de segueta de ingeniería. Una variante es la mandrinadora (figura 3.8), donde una herramienta de dientes múltiples es jalada o empujada por el material para obtener un orificio (taladro) de forma especial que sería muy difícil obtener por cualquier otro medio (figura 3.9).



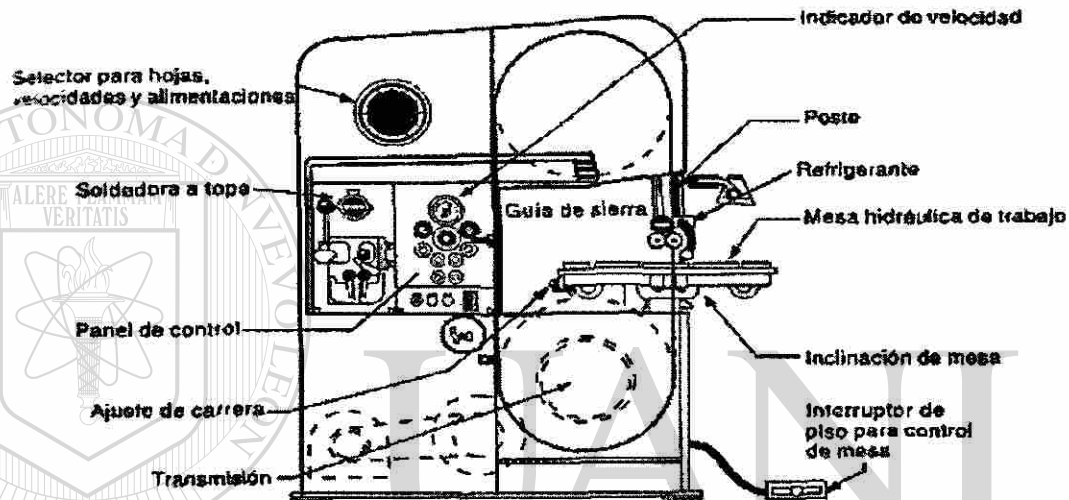
**Figura 3.8 Operaciones de mandrinado**



**Figura 3.9 Partes típicas hechas por mandrinado**

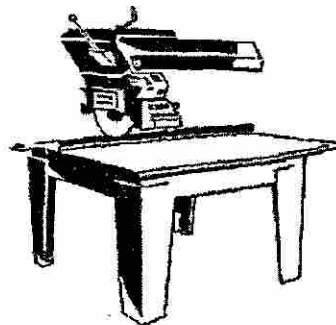


Todas estas máquinas emplean movimiento oscilatorio, y como la herramienta corta sólo en una dirección, el movimiento de regreso no tiene eficiencia y el proceso es relativamente poco satisfactorio. Por esta razón se idearon las hojas flexibles, que permiten que los bordes cortantes sigan una trayectoria recta, luego se curvan despegándose de la pieza de trabajo para retornar al punto inicial, lo cual permiten corte continuo. La sierra cinta (figura 3.10) se puede encontrar, en forma horizontal y vertical, en prácticamente toda industria manufacturera con hojas para adaptarse a todos los materiales.

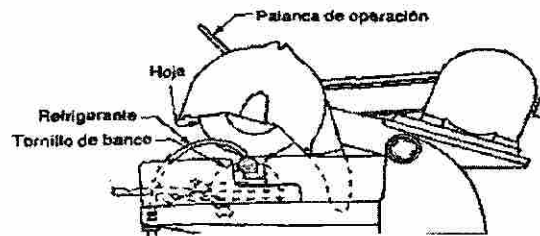


*Figura 3.10 Sierra cinta típica*

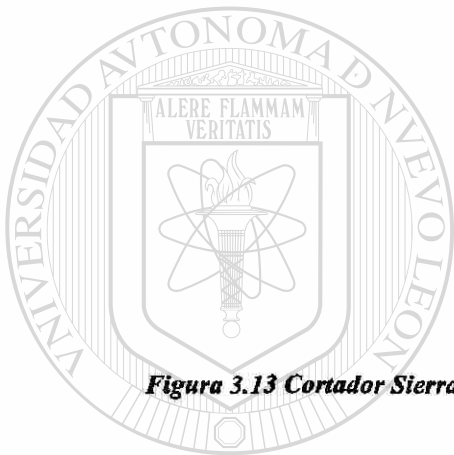
El siguiente avance en corte fue poner los dientes de corte alrededor de la periferia de un eje o disco giratorios, y es así que la mayor parte del maquinado se lleva a cabo. La sierra circular es la forma más elemental y se ilustra en las figuras 3.11 y 3.12, en tanto que la figura 3.13 muestra otra aplicación de una sierra, esta vez para cortar agujeros redondos de madera o metal laminado.



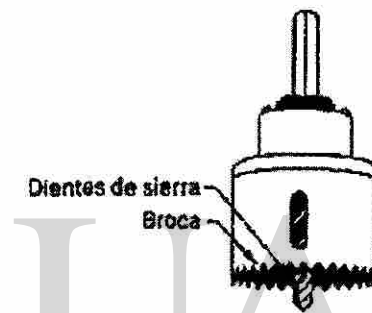
*Figura 3.11 Sierra de brazo superior*



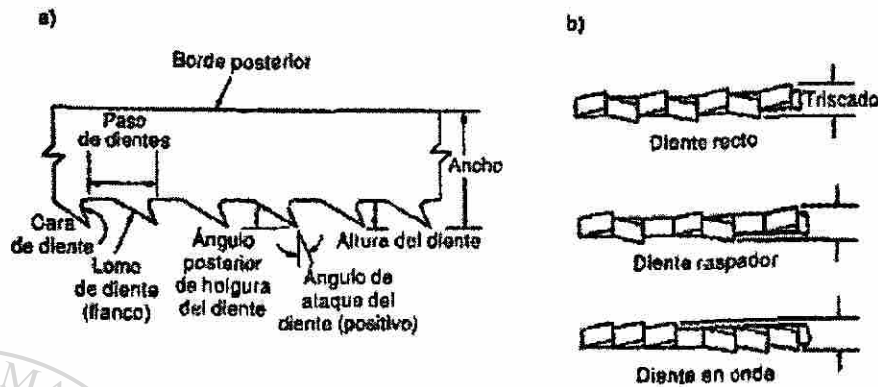
**Figura 3.12 Sierra de corte**



**Figura 3.13 Cortador Sierra**



Es conveniente considerar el diente cortador en sí. Al igual que la herramienta de un torno, debe tener holgura para las virutas o rebaba producida y ángulo de ataque frontal para obtener una cara cortante. También debe haber algún lugar a donde vaya la viruta, para evitar que se traben la herramienta en la pieza de trabajo, y por esta razón los dientes de la sierra no estén en línea, sino que son más angostos que el corte que se producirá, y están en “zigzag” para obtener la holgura necesaria; esto se conoce como “triscado”. La terminología para dientes de sierra, y formas de obtener el triscado, se muestra en la figura 3.14. La forma del diente de sierra varía de acuerdo con la naturaleza del material por cortar: el corte de tela o de pan necesita un cortador que sea en esencia, una hoja de cuchillo de borde ondulado, a veces sin dientes como tales, en tanto que el acero exige un diente duro y pequeño y la madera un diente más grande con un triscado más pronunciado. Los materiales muy duros se pueden moler, lo que es todavía una acción de corte. Cada partícula de la rueda de abrasiva forma un punto de corte pequeño, pero muy duro, que cuando pierde filo tiene la ventaja de desprenderse para dejar expuesto un nuevo punto de corte. Así, las máquinas similares en general, pero que utilizan diferentes hojas de corte, se encuentran en toda industria.



**Figura 3.14 a) Terminología para dientes de sierra, b) tipos de dientes de sierra, en "zig zag" para dar holgura y evitar dobladuras**

El término "sierra" se reserva generalmente para cortadores angostos para cortar o rebanar materiales, es tanto que otras versiones más anchas se llaman cortadores; éstos se pueden diseñar para cortar a lo largo de su periferia, o a lo largo de su cara, o de ambos. Las caras cortantes pueden ser lineales o con formas especiales; pueden estar sujetas por un zanco o caña como en el caso de una broca, o pueden estar montadas en un husillo o mandarin. Sus caras cortantes pueden ser rectas, inclinadas o en espiral para ayudar a la eliminación de la viruta. En la figura 3.15 se muestran varias herramientas cortadoras.

Las máquinas que utilizan estas herramientas corresponden a dos categorías, según el alineamiento de sus husillos de corte.



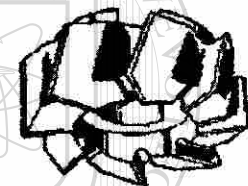
Fresa radial estándar



Fresa radial de bola



Cortador para colas de milano



Cortador para reafrentar



Cortador para desbaste



Broca para chavetas. Las caras de corte excéntricas permiten el avance vertical hacia abajo



Cortador de media luna



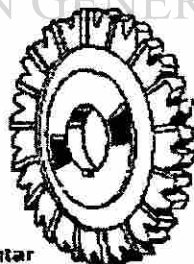
Cortador invertido de cola de milano



Cortador para ensanchar un taladro



Cortador de tres cortes y reafrentar



De tres cortes y reafrentar



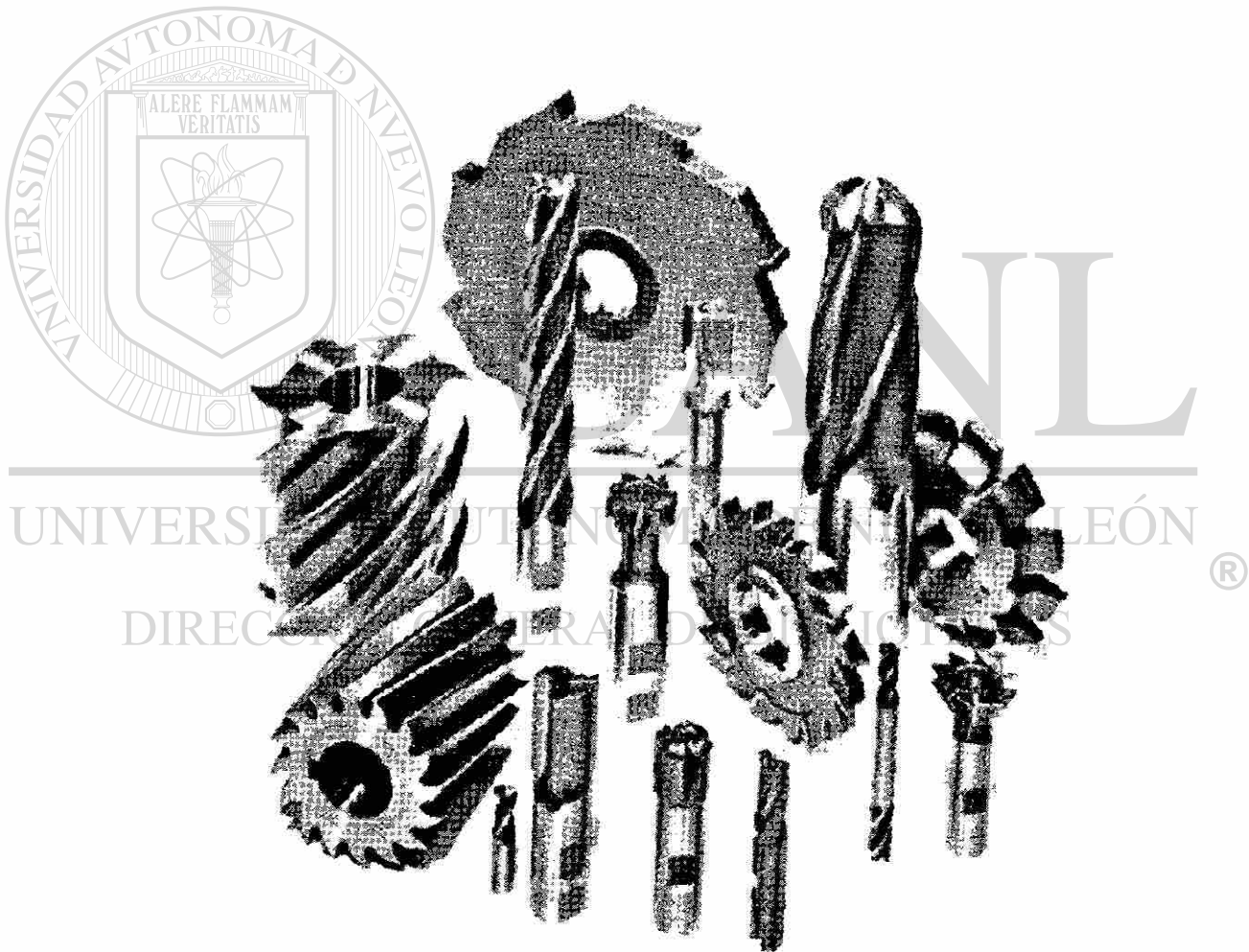
Cortadores cóncavo y convexo

Figura 3.15 Cortadores de fresadora

El proceso de Fresado consiste en arrancar material de una pieza haciéndola pasar por una herramienta multifilo (varios dientes). A diferencia del maquinado en un torno, en la fresa se mueve la pieza a maquinar (en el torno la herramienta) y la herramienta permanece fija rotando.

Toda herramienta para fresado queda definida por tres parámetros, según la nomenclatura  $A * B * C$ , donde A es el diámetro, B es el ancho y C es el número de dientes.

En la figura 3.16 se muestran algunas herramientas para el maquinado en una fresa:



*Figura 3.16 Herramientas de fresado*

El fresado se puede clasificar según la posición de la herramienta respecto del material de trabajo en:

a.- Fresado horizontal: la superficie fresada es generada por los dientes localizados en la periferia del cuerpo cortante (herramienta). El eje de rotación de la herramienta está en un plano paralelo al de la superficie de la pieza de trabajo.

b.- Fresado vertical: la herramienta es montada en un husillo, cuyo eje es perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo. Aquí la herramienta corta solo con una parte de sus dientes.

c.- Fresado superficial: es confundible con el fresado vertical, pero se diferencia en que la superficie de la herramienta en contacto con el material no es plana (fresado vertical), sino que tiene filo con formas diversas.

Todos estos procesos se muestran en la figura 3.17

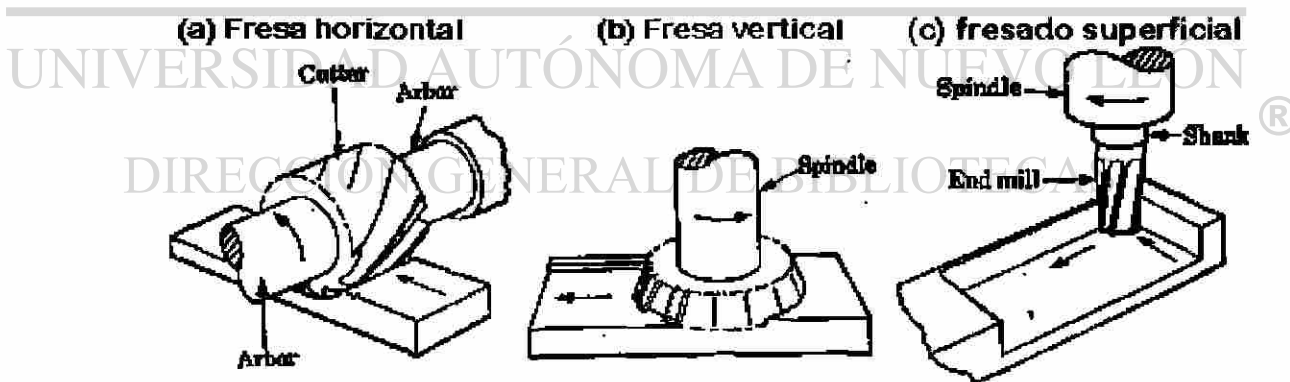


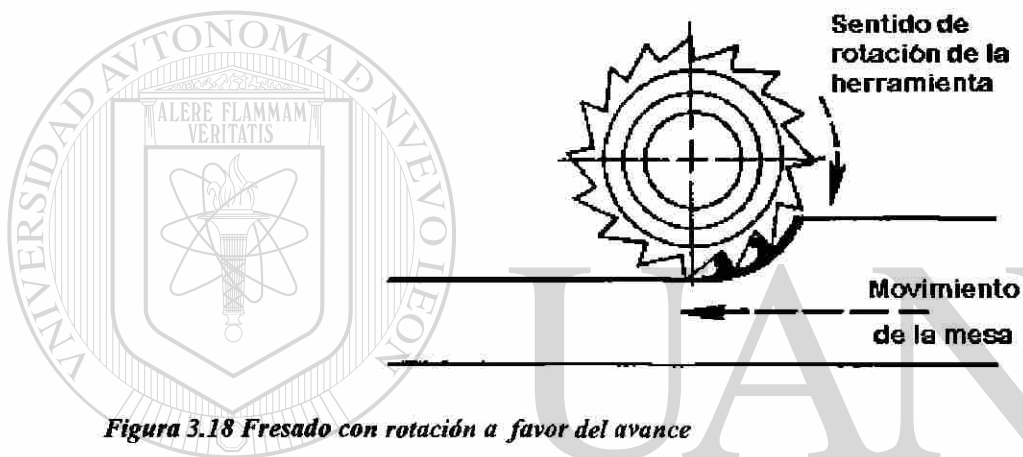
Figura 3.17 Clasificación del fresado según la posición de la herramienta

### Fresado Horizontal

Este proceso será en el que más profundizaremos en fresado, considerando que los otros tipos de fresado se analizan en forma análoga. Así, los resultados obtenidos en el fresado horizontal serán ilustrativos del fresado vertical y superficial.

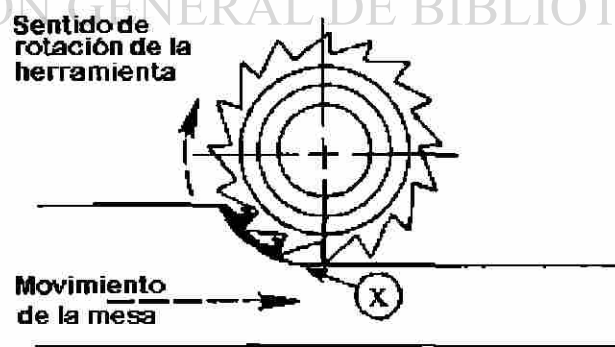
Todo proceso de fresado puede clasificarse según el sentido de rotación de la herramienta respecto del avance de la pieza a maquinar (figuras 3.18 y 3.19).

#### *Rotación a favor del avance*



*Figura 3.18 Fresado con rotación a favor del avance*

#### *Rotación en contra del avance*



*Figura 3.19 Fresado con rotación en contra del avance*

En el caso de rotación a favor del avance se obtiene una mejor calidad superficial, pero la herramienta suele montarse sobre la pieza, con lo que se rompe. Además, se requiere menor potencia y existe mayor rigidez. En la rotación en contra se obtiene una superficie de menor calidad, pero la herramienta asegura una mayor duración.

El sentido de rotación dependerá de las características del material a maquinar. En el caso de un material blando, a favor del avance, y si es un material duro, en contra del avance. En la práctica se usa principalmente el sentido de rotación en contra del avance.

Algunas operaciones de fresado horizontal se muestran a continuación en la figura 3.20

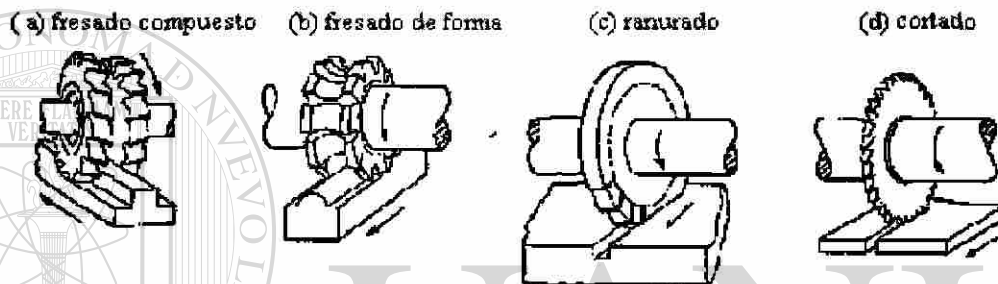


Figura 3.20 Operaciones del fresado horizontal

Para el fresado horizontal, el avance está dado por:

$$f = \frac{V_f}{n_w} \quad (5)$$

, donde  $V_f$  es la velocidad de avance de la pieza.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

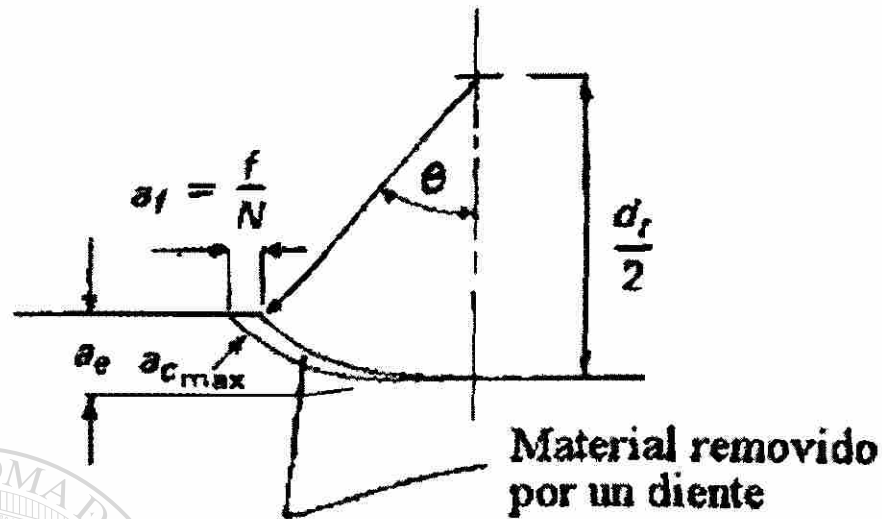
El encaje de avance se define como el avance por diente de la fresa:

$$a_f = \frac{f}{N} \quad (6)$$

, con  $N$  igual al número de dientes de la herramienta.

Para el fresado horizontal tenemos la situación que se ve en la siguiente figura 3.21.





**Figura 3.21 Fresado horizontal**

El espesor máximo de viruta no deformada está dado por:

$$a_{cmax} = \frac{V_f * \text{sen}(\theta)}{N * n_w} = \frac{f}{N} * \text{sen}(\theta) \quad (7)$$

$$, y \quad a_{cav} = \frac{a_{cmax}}{2} \quad (8) \text{®}$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

De la figura 3.21,

$$\cos(\theta) = 1 - \frac{2 * a_e}{d_t} \quad (9)$$

, donde  $a_e$  es el encaje axial y  $d_t$  el diámetro exterior de la fresa.

Entonces,

$$\text{sen}(\theta) = 2 * \sqrt{\frac{a_e}{d_t} - \left(\frac{a_e}{d_t}\right)^2} \quad (10)$$

Y reemplazando (10) en (7),

$$a_{cmax} = \frac{2 * V_f}{N * n_w} * \sqrt{\frac{a_e}{d_t} - \left(\frac{a_e}{d_t}\right)^2} \quad (11)$$

Reordenando (11),

$$a_{cmax} = \frac{2 * V_f}{N * n_w} * \sqrt{\frac{a_e}{d_t} * \left(1 - \frac{a_e}{d_t}\right)}$$

Y, si  $a_e \ll d_t$ ,

$$a_{cmax} = \frac{2 * V_f}{N * n_w} * \sqrt{\frac{a_e}{d_t}} \quad (12)$$

El tiempo de maquinado está dado por:

$$t_m = \frac{L_w + L_o + L_1}{V_f} \quad (13)$$

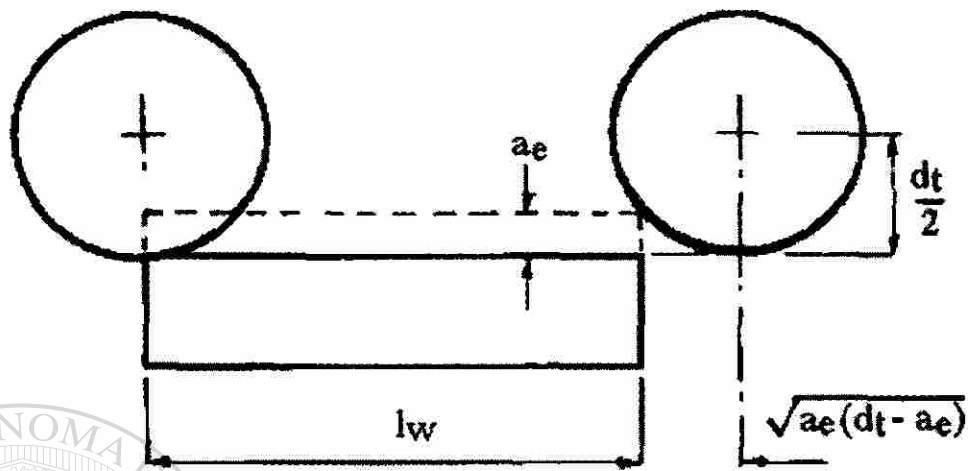
, donde DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$L_o = \sqrt{a_e * (d_t - a_e)}$$

$$\text{y } L_1 \geq \frac{d_t}{2}$$

, esta última es la distancia que debe ser retirada la herramienta para poder sacar la pieza.

Estas dos dimensiones representan el punto en que comienza y termina el contacto entre la herramienta y la pieza, tal como se ilustra en la figura 3.22.



**Figura 3.22 Desplazamiento de la herramienta**

El material removido por unidad de tiempo es:

$$Z_w = a_e * b_w * V_f \quad (14)$$

Siendo  $b_w$  el ancho de maquinado, el cual es el mínimo entre el ancho de la herramienta y el ancho de la pieza.

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

$$P_w = p_s * Z_w \quad (15)$$

### Fresado Vertical

En este caso, el espesor máximo de viruta no deformada será:

$$a_{cmax} = \frac{V_f}{N * n_w} \quad (16)$$

El tiempo de maquinado está dado por:

$$t_m = \frac{L_w + d_t}{V_f} \quad (17)$$

$$\text{o por } t_m = \frac{L_w + 2 * \sqrt{a_e * (d_t - a_e)}}{V_f} \quad (18)$$

Dependiendo de si el eje de rotación de la herramienta pasa (1) o no (2) por sobre la pieza. Esto se ilustra en la figura 3.23, mirado desde arriba.

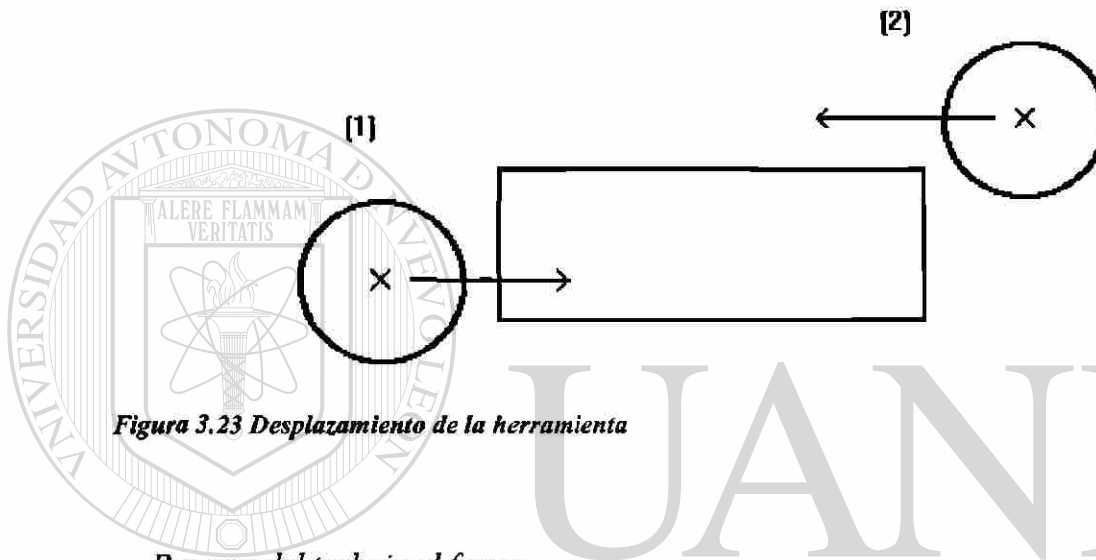
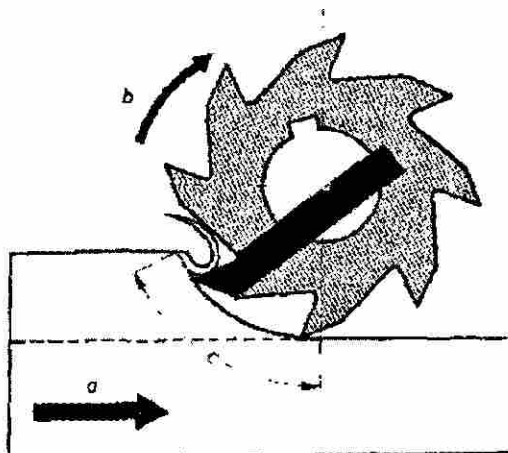


Figura 3.23 Desplazamiento de la herramienta

#### Proceso del trabajo al fresar

Las virutas son arrancadas en el fresado por medio de la rotación de la fresa cuyos filos están dispuestos en forma circular. La fresa es una herramienta de varios filos. Para poderse introducir en el material los filos de la fresa tienen forma de *cuña* (como aparece con el útil del torno). El movimiento de rotación de la fresa se llama *movimiento principal o de corte*. Para conseguir el espesor de viruta la pieza ejecuta un *movimiento de avance*, lineal. Los movimientos principal y de avance son originados por la *máquina fresadora*.

Durante el fresado cada filo no está nada más que durante una parte de la revolución de la fresa, dedicado al arranque de viruta. El resto del tiempo el diente gira en vacío y puede refrigerarse. El trabajo del útil no es, por lo tanto, tan fuerte como en el caso del útil de torno cuyo filo está continuamente cortando. Figura 3.24

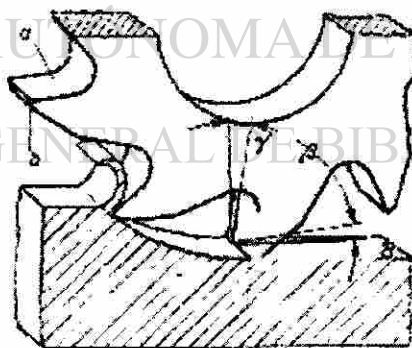


**Figura 3.24** Proceso de la pieza al fresar a) Movimiento de avance; b) movimiento principal; c) camino de la pieza de un diente de fresa

#### Clases de fresas

Según la forma de los dientes se distingue entre fresa de dientes puntiagudos y fresas con despulla.


Fresas de dientes puntiagudos. El rendimiento de corte de la fresa y la calidad superficial de la pieza dependen principalmente de los filos de la fresa. Estos son cuneiformes y se obtienen por fresado (Figura 3.25).



**Figura 3.25** Ángulos de corte en los filos de la fresadora α) Ángulo de incidencia; β) Ángulo de filos; γ) Ángulo de ataque a) superficie de ataque; b) superficie de incidencia

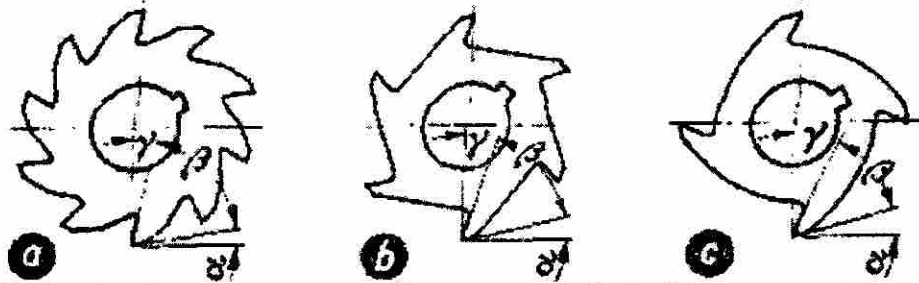
La magnitud de los ángulos de corte está relacionada con el material que se vaya a trabajar (Figura 3.26 y Tabla 5). La distancia o paso entre los dientes queda también determinada por el material (Figura 3.26)

$\alpha$  = ángulo de incidencia  
 $\gamma$  = ángulo de ataque  
 $\lambda$  = ángulo de inclinación del filo respecto al eje.



Tipo de fresa	Aceros normales hasta los 75 kg/mm <sup>2</sup> de resistencia			Materiales tenaces hasta de 100 kg/mm <sup>2</sup> de resistencia			Materiales ligeros		
	Ø	N.º de dientes	Ángulos de corte $\alpha$	Ø	N.º de dientes	Ángulos de corte $\alpha$	Ø	N.º de dientes	Ángulos de corte $\alpha$
	d	z	$\alpha$ $\gamma$ $\lambda$	d	z	$\alpha$ $\gamma$ $\lambda$	d	z	$\alpha$ $\gamma$ $\lambda$
Fresa cilíndrica	40	6	Avance en contra dirección	40	10	Avance en contra dirección	40	4	Avance en contra dirección
	50	6		50	10		50	4	
	60	6		60	10		60	4	
	75	6	7° 10° 38°	75	12	4° 5° 35°	75	5	8° 25° 45°
	90	8		90	14		90	5	
	110	8	Avance paralelo	110	16	Avance paralelo	110	6	Avance paralelo
	130	10		130	16		130	6	
150	10	12° 16° 35°	150	18	8° 12° 30°	150	8	14° 30° 45°	
Fresa frontal cilíndrica	40	8		40	12		40	4	
	50	10		50	14		50	5	
	60	10	Avance en contra dirección	60	14	Avance en contra dirección	60	6	Avance en contra dirección
	75	10		75	16		75	6	
	90	12		90	18		90	6	
	110	12	7° 16° 20°	110	20	4° 5° 20°	110	7	8° 25° 35°
	130	14		130	22		130	8	
150	16		150	24		150	10		
Fresa de disco	50	10	Avance en contra dirección	50	16	Avance en contra dirección	50	4	Avance en contra dirección
	60	10		60	16		60	6	
	75	12		75	18		75	6	
	90	12	7° 12° 15°	90	20	5° 6° 10°	90	8	8° 25° 30°
	110	14		110	22		110	8	
	130	16	Avance paralelo	130	24	Avance paralelo	130	10	Avance paralelo
	150	18		150	26		150	10	
175	18	12° 18° 15°	175	28	8° 14° 12°	175	12	14° 30° 30°	
200	20		200	30		300	12		
Fresa de vástago	10	4		10	6		10	3	
	12	4		12	6		12	3	
	14	5	Avance en contra dirección	14	6	Avance en contra dirección	14	3	Avance en contra dirección
	16	5		16	8		16	3	
	20	6		20	8		20	4	
	24	6	7° 8° 15°	24	8	4° 6° 15°	24	4	8° 20° 25°
	30	6		30	10		30	4	
	36	6		36	10		36	5	
40	6		40	10		40	5		

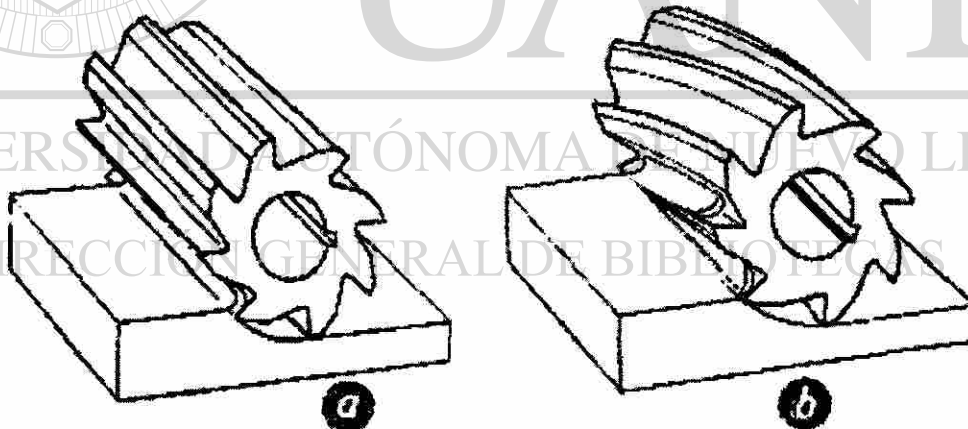
Tabla 5. Ángulos de corte, clase de materiales y tipos de fresas



**Figura 3.26** Angulos de corte y paso entre dientes para trabajo de diferentes materiales. a) El paso pequeño es apropiado para fresado de acero duro; b) un paso medio conviene para fresado de acero blando; c) el paso grande es adecuado para fresar metal ligero

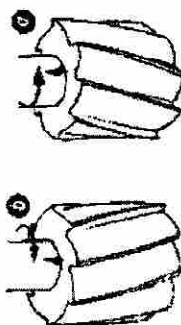
Al fresar materiales blandos se pueden producir, por ejemplo, grandes cantidades de viruta que pueden ser recibidas y separadas gracias a los grandes huecos existentes entre diente y diente.

Los filos pueden estar dispuestos paralelamente al eje o tener forma helicoidal (Figura 3.27).



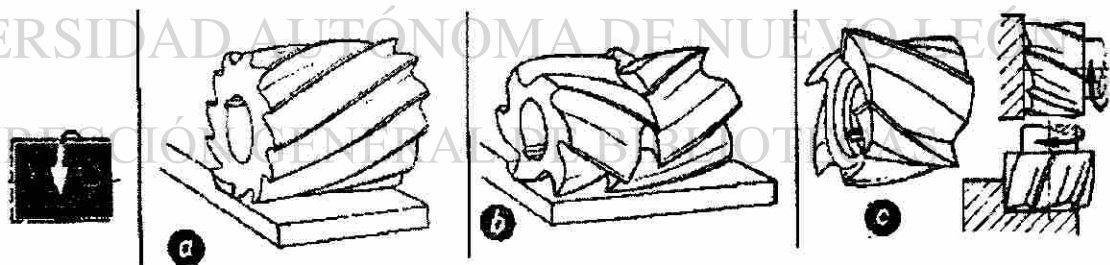
**Figura 3.27** Disposición de los filos. a) Los dientes rectos abarcan la viruta en toda su anchura. En virtud de esto, la fresa trabaja a golpes, el rendimiento del corte es reducido. b) Los dientes helicoidales trabaja de modo más silencioso, mas suave, cuando sale un diente del material, hay otro que esta empezando a cortar, las virutas van separándose a un lado

Los filos helicoidales, que pueden tener inclinación a la derecha o ala izquierda, dan lugar, en el arranque de viruta, a un empuje en dirección axial (figura 3.28). Este empuje (empuje axial) debe estar dirigido contra el cabezal, pues, de lo contrario, se soltaría del husillo el vástago de la fresa.



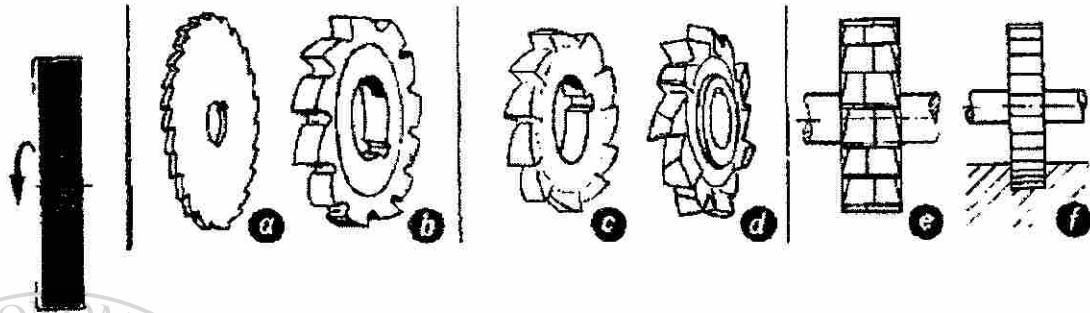
**Figura 3.28** Dirección del corte y dirección del filo. a) Hélice a la derecha - corte a la izquierda; b) hélice a la izquierda - corte a la derecha

Según las Normas DIN, una fresa se dice que es de corte a la izquierda cuando gira en sentido contrario a las manecillas del reloj mirándola desde el lado del accionamiento, y que es de corte a la derecha cuando el giro es en el mismo sentido de las manecillas del reloj.

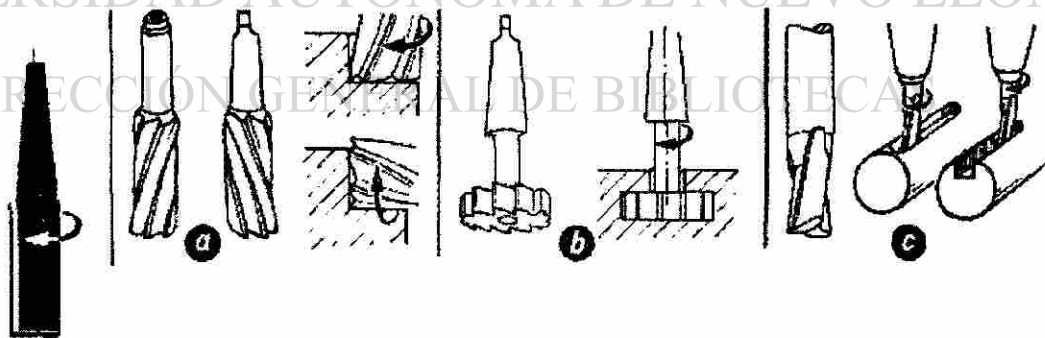


**Figura 3.29** Fresas cilíndricas y fresas frontales cilíndricas. a) Las fresas cilíndricas tienen filos únicamente en su periferia. Se utilizan para desbastar y afinar superficies planas; b) Las fresas cilíndricas acopladas con dientes helicoidales de sentidos opuestos, tienen la ventaja de que el empuje axial queda en ellas parcialmente compensado; c) Las fresas frontales cilíndricas tienen dientes no solamente en la periferia, sino también en una de las caras frontales. Se prestan estas fresas para trabajar superficies planas y rebajos en ángulo recto, tanto con la fresadora horizontal como con la vertical.



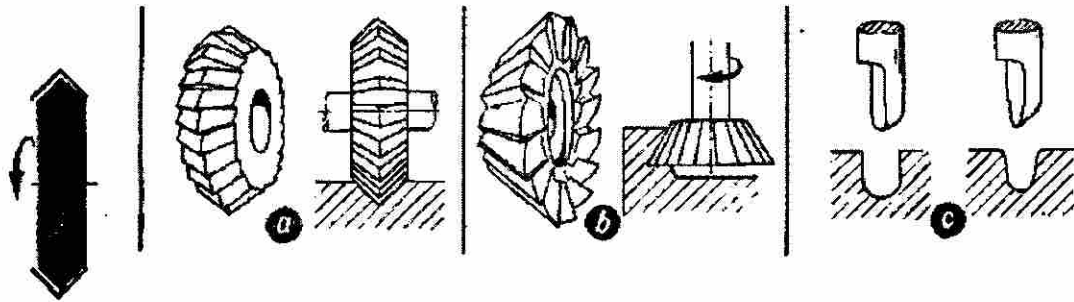


**Figura 3.30.** Las fresas en forma de disco se utilizan para fresar entalladuras estrechas, a) La sierra circular se utiliza para cortar piezas y para hacer en ellas ranuras estrechas, por ejemplo en las cabezas de los tornillos; b) Las fresas para ranurar con dientes rectos sirven para fresar ranuras planas. Con el objeto de evitar el roce lateral, estas van ahuecadas con la muela en ambos lados; c) Las fresas de disco de dientes triangulares son apropiadas para chiveteros más profundos; d) Las fresas de dientes cruzados van provistas de filos dirigidos alternados a la derecha y a la izquierda; e) Las fresas de discos acoplados pueden, después de haber sido afiladas, volver a su primitiva anchura mediante interposición de las convenientes arandelas; f) Fresa de disco en posición de trabajo.



**Figura 3.31.** Fresa con vástago. a) Las fresas de vástago son fresas frontales cilíndricas de pequeño diámetro. El vástago o mango sirve para sujeción. Las fresas de vástago con corte a la derecha y hélice o las de corte a la izquierda con hélice, pueden salirse del husillo como consecuencia del empuje axial. Para evitar esto, el mango de la fresa va provisto de una rosca de apriete que sirve para fijarla en el husillo de fresar. Los mangos de fresa provistos de lengüeta de arrastre no se usan generalmente nada más que para cortes ligeros; b) Las fresas de vástago para ranuras en T; c) Las fresas para agujeros rasgados tienen dos filos y se utilizan para el fresado de chaveteros y de agujeros rasgados.

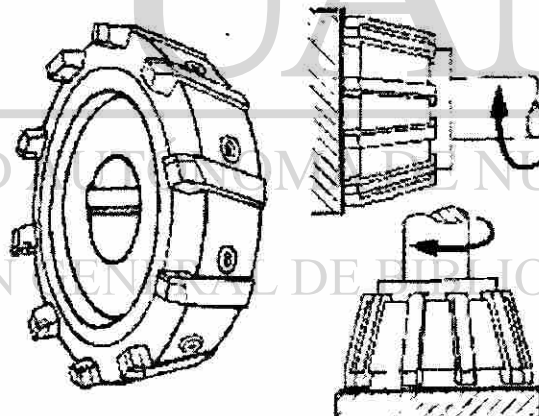
149821



**Figura 3.32. Fresas de forma. a) Las fresas angulares son necesarias para la ejecución de gúas prismáticas; b) La fresa frontal angular se utiliza en el maquinado de gúas en ángulo; c) Las fresas de un solo filo se utilizan para pequeños trabajos de fresado de forma.**

#### Platos de cuchillas

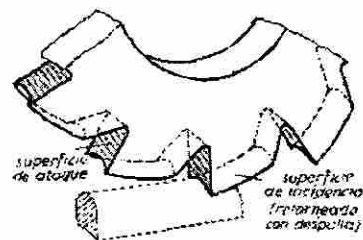
Los cortes van fijados en forma de cuchillas en un cuerpo o cabezal, pudiéndose reponer por separado en caso de deterioro. Se emplean estos platos de cuchillas para el fresado frontal de grandes superficies. Ver figura 3.33



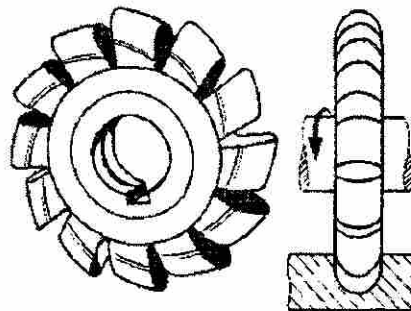
**Figura 3.33 Plato de cuchillas**

#### Fresas con despulla

Para fresar superficies curvas no se pueden emplear las fresas de dientes en punta, ya que al afilar la fresa se cambiaría su perfil. Para curvas, arcos circulares y toda clase de perfiles, así como, con frecuencia, también para fresado de ranuras, se emplean estas fresas de forma retorneadas. El retorneado resulta necesario para mantener el ángulo de incidencia. El ángulo de ataque vale, generalmente,  $0^\circ$ . Ver figura 3.34 y 3.35



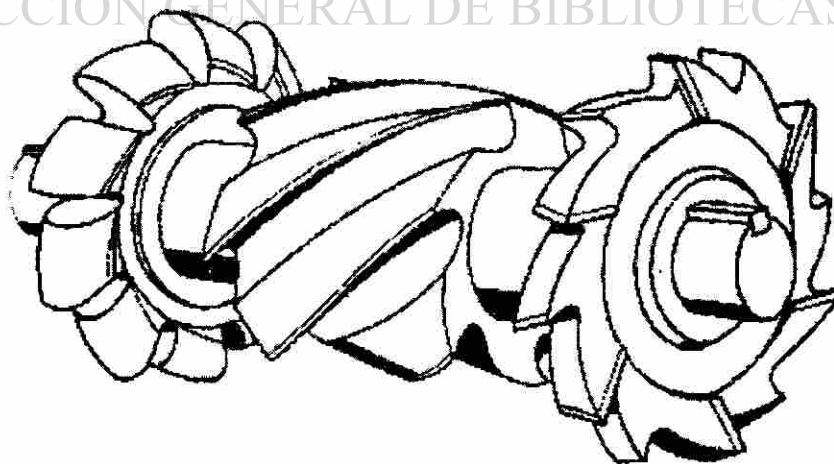
**Figura 3.34** Forma de los filos en una fresa con despulla



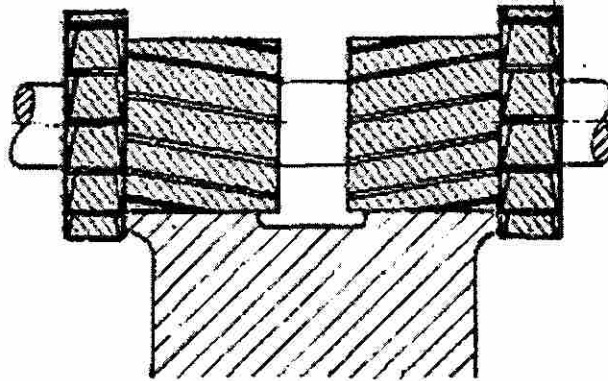
**Figura 3.35** Fresa de forma con despulla

### Fresa compuesta

Se designan con el nombre de compuestos aquellos útiles de fresar que están constituidos a base de la reunión de varias fresas de dientes puntiagudos o de fresas con despulla de diámetros diversos. Se pueden fresar así, de una vez, perfiles de más variadas formas. El empleo de fresas compuestas brinda multitud de posibilidades en el trabajo y ahorra el uso de fresas de forma, más caras. Ver figuras 3.36 y 3.37



**Figura 3.36** Fresa compuesta, formada a base de una fresa de disco de dientes cruzados, de una fresa cilíndrica y de una fresa de forma de despulla.



*Figura 3.37 Fresa compuesta formada por dos fresas de disco, una fresa cilíndrica con hélice a la izquierda y otra con hélice a la derecha, para neutralizar el empuje axial*

### 3.4 Fluidos para corte.

Cuando se utilizan herramientas 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>3, 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 a la herramienta como a 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 aplicado 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 las temperaturas de trabajo para las cuales están diseñadas para las herramientas de corte que pueden encontrarse tanto en tornos como fresas.

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

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.

### 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. 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 relativamente baja
7. No inflamable

En la tabla 7 se muestran los fluidos más comunes para corte:

**Tabla 7 Fluidos 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.

## CAPÍTULO 4

# OPERACIONES DE MAQUINADO Y MÁQUINAS-HERRAMIENTA.

### 4.1 Fresado.

Es una de las máquinas-herramienta más versátiles y útiles en los sistemas de manufactura. Las fresas son máquinas de gran precisión, se utilizan para la realización de desbastes, afinados y superacabados.

De entre sus características destaca que su movimiento principal lo tiene la herramienta y que la mesa de trabajo proporciona el avance y algunas veces la profundidad de los cortes.

Los trabajos que se pueden realizar con una fresadora son diversos; por ejemplo se pueden fabricar los dientes de un engrane, un cordón en una placa, un cuñero o formas determinadas sobre una superficie.

En la tabla 8 se puede observar la clasificación de las máquinas fresadoras

Máquina	Característica	Limitaciones
Fresadora horizontal	La fresa se coloca sobre un eje horizontal, que se ubica en el husillo principal. Realiza trabajos de desbaste o acabado en línea recta, generando listones o escalones. La herramienta trabaja con su periferia como se muestra en la figura 3.17 a).	La limitación de esta máquina es la profundidad a la que puede trabajar, ya que ésta dependerá de la distancia de la periferia de la herramienta, al eje de la máquina.
Fresadora vertical	La fresa se coloca en un husillo vertical, éste al girar produce el movimiento principal. La herramienta trabaja con su periferia y con la parte frontal como se muestra en la figura 3.17 b).	La limitación de esta máquina es la fuerza perpendicular a la que se puede someter la fresa por la mesa de trabajo, para lograr el avance.
Fresadora Universal	Es la combinación de una fresa horizontal y una vertical. Tiene un brazo que puede utilizarse para ubicar fresas en un eje horizontal y un cabezal que permite las fresas verticales.	Su limitación es el costo y el tamaño de las piezas que se pueden trabajar.

Tabla 8 Clasificación, características y limitaciones de las máquinas fresadoras

Como se menciona en el cuadro anterior, los cortadores de las fresas pueden trabajar con su superficie periférica o con su superficie frontal. En el primer caso el trabajo puede ser en paralelo o en contra dirección. Con el trabajo en contra dirección la pieza tiende a levantarse, por lo que hay que fijar fuertemente a la misma con una prensa. Cuando el trabajo es en paralelo la fresa golpea cada vez que los dientes de la herramienta se entierran en la pieza.

Durante cada revolución los dientes de las fresas sólo trabajan una parte de la revolución, el resto del tiempo giran en vacío, lo que baja la temperatura de la herramienta. Ver figura 3.18, 3.19 y 3.24.

#### Producción de las máquinas fresadoras.

Como en todas las máquinas-herramienta, en las fresas es necesario calcular el número de revoluciones a las que deben operar.

$$n = (v \times 1000) / (\pi \times d) \quad (19)$$

donde:  $n$  = revoluciones por minuto  
 $v$  = velocidad de corte (m/min)  
 $d$  = diámetro de la fresa (mm/min)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



La velocidad ( $v$ ) se obtiene de la tabla 9:

**Tabla 9** Tabla para obtener la velocidad optima de maquinado para cada material

Material de trabajo		Fresa cilíndrica b=100 mm		Fresa frontal b=70 mm		Fresa de disco b= 20 mm		Fresa de vástago b=25 mm		Platos de cuchillas b=180 mm		Sierras b= 2.5 mm
		desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste
Acabado Profundidad		a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=10
Acero sin alea hasta 65 kg/mm <sup>2</sup>	V <sub>c</sub>	17	22	17	22	18	22	17	22	20	30	45
	S'	100	60	100	70	100	40	50	120	20	50	50
Acero aleado kg/mm <sup>2</sup>	V <sub>c</sub>	14	18	14	18	14	18	15	19	16	23	35
	S'	80	50	90	55	80	30	40	100	65	40	40
Acero aleado hasta 100 kg/mm <sup>2</sup>	V <sub>c</sub>	10	14	10	14	12	14	13	17	14	18	25
	S'	50	36	55	42	50	25	20	65	36	30	30
Fundición gris	V <sub>c</sub>	12	18	12	18	14	18	15	19	16	24	35
	S'	120	60	140	70	120	40	60	120	100	90	50
Latón	V <sub>c</sub>	35	35	36	55	36	55	35	55	50	60	350
	S'	70	50	190	150	150	75	80	120	200	120	200
Materiales ligeros	V <sub>c</sub>	200	250	200	250	200	250	160	180	250	300	320
	S'	200	100	250	110	200	100	90	120	250	90	180

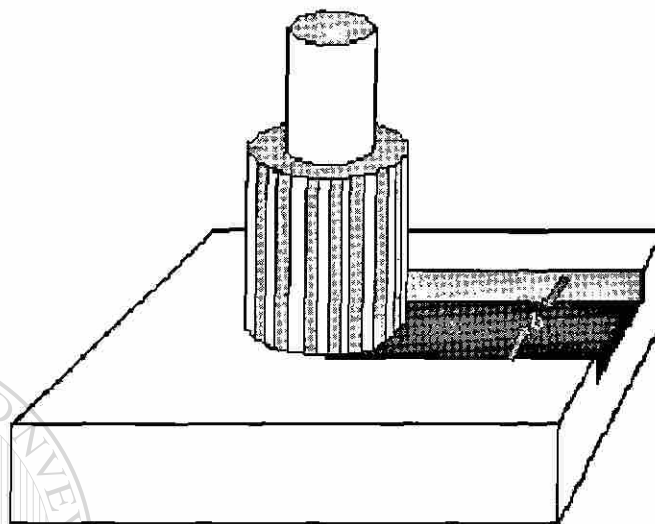
a = 5 mm equivale a desbaste

a = 0.5 mm equivale a afinado

b = ancho de la fresa en mm (Ver Figura # 4.1 )

V<sub>c</sub> = Velocidad de corte en m/min

S' = Velocidad de avance en mm/min



b = ancho de la fresa

**Figura 4.1 Fresado vertical indicando el ancho de la herramienta**

Para calcular la capacidad de producción de una máquina fresadora, es necesario conocer la cantidad máxima de viruta que esta puede desprender, esto es el producto de una constante para las diferentes máquinas fresadoras que se denomina como "cantidad de viruta admisible" por la potencia de la máquina. A continuación se presentan las fórmulas para calcular la cantidad máxima de viruta que puede desprender una fresa y la velocidad de avance.

Cantidad máxima de viruta posible de una máquina fresadora

$$V = V' \times N \quad (20)$$

En donde:

V= cantidad máxima de viruta posible en  $\text{cm}^3/\text{min}$ .

V'= cantidad admisible en  $\text{cm}^3/\text{kwhmin}$  (tabla de viruta admisible)

N= potencia de la máquina en kw. (1 hp = 0.746 kw)

En tabla 10 se muestra la viruta admisible en una fresadora ( $\text{cm}^3/\text{kw min}$ )

**Tabla 10 Viruta admisible en una fresadora**

Tipo de fresa	Acero 35-60 $\text{kg}/\text{mm}^2$	Acero 60-80 $\text{kg}/\text{mm}^2$	Acero >80 $\text{kg}/\text{mm}^2$	Fundición gris	Latón y bronce rojo	Metales ligeros
Fresa cilíndrica	12	10	8	22	30	60
Fresa frontal	15	12	10	28	40	75

Conocer la cantidad máxima de viruta que en una fresa se puede desprender, nos permitirá calcular la velocidad de avance de la misma despejando  $s'$  de la siguiente fórmula.

$$V = (a \times b \times s')/1000 \quad (21)$$

En donde:

a = profundidad del fresado

b = ancho del fresado

$s'$  = velocidad de avance de la fresa

V = cantidad máxima posible de viruta

Despejando la velocidad de avance  $s'$ , tenemos:

$$s' = (V \times 1000) / a \times b \quad (22)$$

Con la velocidad de avance se puede calcular el tiempo principal utilizado para realizar un trabajo con una fresa, esto se puede observar a continuación.

$$T_p = L / s' \quad (23)$$

En donde:

L = Longitud total de recorrido sobre la pieza

$s'$  = Velocidad de avance de la fresa

$$L = l + l_a + l_u \quad (24)$$

Donde:

L = Longitud total de recorrido sobre la pieza

l = Longitud efectiva sobre la pieza

$l_a$  = Distancia de posicionamiento antes de la pieza (longitud anterior)

$l_u$  = Distancia de posicionamiento después de la pieza (longitud ulterior)

Se debe recordar que el tiempo principal es el 60% del tiempo total de fabricación.

El fresado es una operación de maquinado en la cual se hace pasar una pieza de trabajo frente de una herramienta cilíndrica rotatoria con múltiples bordes o filos cortantes (en algunos casos raros se usa una herramienta con un solo filo cortante llamado cortador volante).<sup>4</sup> El eje de rotación de la herramienta cortante es perpendicular a la dirección del avance. La orientación entre el eje de la herramienta y la dirección del avance es la característica que distingue al fresado del taladrado. En el taladrado, la herramienta de corte avanza en dirección paralela a su eje de rotación. La herramienta de corte en el fresado se llama fresa o cortador para fresadora y los bordes cortantes se llaman dientes. La máquina herramienta que ejecuta tradicionalmente esta operación es una fresadora.

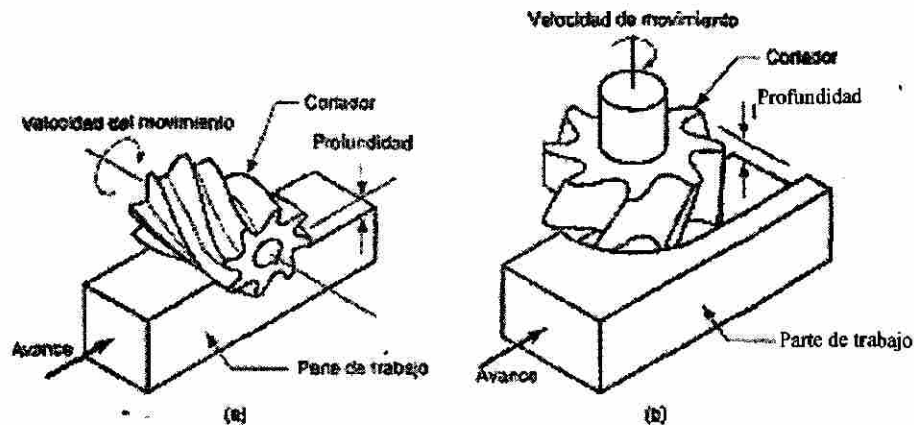
La forma geométrica creada por el fresado es una superficie plana. Se pueden crear otras formas mediante la trayectoria de la herramienta de corte o la forma de dicha herramienta. Debido a la variedad de formas posibles y sus altas velocidades de producción el fresado es una de las operaciones de maquinado más versátiles y ampliamente usadas.

El fresado es una operación de corte interrumpido; los dientes de la fresa entran y salen de la pieza de trabajo durante cada revolución. Esto interrumpe la acción de corte y sujeta los dientes a un ciclo de fuerzas de impacto y choque térmico en cada rotación. El material de la herramienta y la geometría del cortador deben diseñarse para soportar estas condiciones.

#### 4.1.1 Tipos de operaciones de fresado.

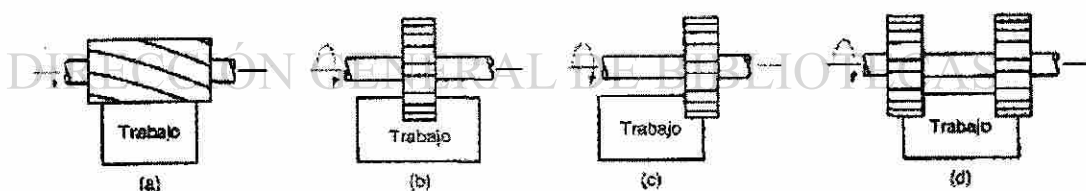
Hay dos tipos básicos de operaciones de fresado como se muestran en la figura 4.2

- a) Fresado periférico o plano y
- b) Fresado de caras o frontal



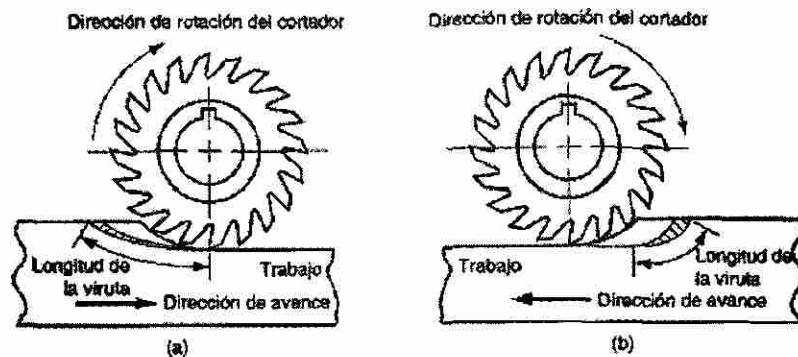
**Figura 4.2** Dos tipos básicos de la operación de fresado a) fresado periférico o plano y b) fresado frontal

**Fresado periférico.** En el fresado periférico, también llamado fresado plano, el eje de la herramienta es paralelo a la superficie que se está maquinando y la operación se realiza por los bordes de corte en la periferia exterior del cortador. En la figura 4.3 se muestran varios tipos de fresado periférico: (a) fresado de placa, la forma básica de fresado periférico en la cual el ancho de la fresa se extiende más allá de la pieza de trabajo en ambos lados; (b) ranurado, también llamado fresado de ranuras, en el cual el ancho de la fresa es menor que el ancho de la pieza de trabajo, creando una ranura en el trabajo ( cuando la fresa es muy delgada se puede usar esta operación para tallar ranuras angostas o para cortar una parte de trabajo en dos, llamado fresado aserrado); (c) fresado lateral, en el cual la fresa maquina el lado de una pieza de trabajo; y (d) fresado paralelo simultáneo, el cual es el mismo que en el fresado natural, excepto que el corte tiene lugar en ambos lados del trabajo.



**Figura 4.3** Fresado periférico: a) Fresado de placa, b) ranurado, c) fresado lateral y d) fresado paralelo simultáneo

En el fresado periférico existen dos direcciones opuestas de rotación que puede tener la fresa con respecto al trabajo. Estas direcciones distinguen dos formas de fresado, fresado ascendente y fresado descendente que se ilustran en la figura 4.4. En el fresado ascendente, también llamado fresado convencional, la dirección del movimiento de los dientes de la fresa es opuesto a la dirección de avance cuando cortan el trabajo. Es decir, cortan “contra el avance”. En el fresado descendente, también llamado fresado tipo escalamiento, la dirección del movimiento de la fresa es la misma que la dirección de avance cuando los dientes cortan el trabajo. Es un fresado “con el avance”.



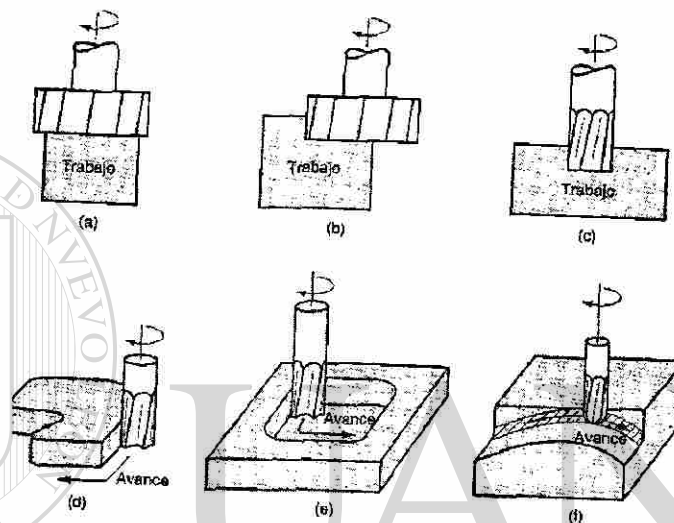
**Figura 4.4** Dos formas de fresado con una fresa de 20 dientes: a) fresado ascendente y b) fresado descendente

La geometría relativa de estas dos formas de fresado tiene sus diferencias en las acciones de corte. En el fresado ascendente, la viruta formada por cada diente del cortador comienza muy delgada y aumenta su espesor durante el paso del diente. En el fresado descendente, cada viruta empieza gruesa y se reduce a través del corte. La longitud de una viruta en el fresado descendente es menor que en el fresado ascendente (en nuestra figura la diferencia está exagerada para mayor comprensión). Esto significa una reducción en el tiempo de trabajo por volumen de material cortado, lo cual tiende a incrementar la vida de la herramienta en el fresado descendente.

La dirección de las fuerzas cortantes difieren en el fresado ascendente y descendente. La dirección de la fuerza de corte es tangencial a la periferia de la fresa para los dientes que están enganchados en el trabajo. En el fresado ascendente hay una tendencia a levantar la parte de trabajo al salir los dientes del cortador del material. En el fresado descendente la dirección de la fuerza de corte es hacia abajo, y por esa causa el trabajo se mantiene contra la mesa de la máquina de fresado.

Fresado en las caras o fresado frontal. En el fresado frontal, el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta por los bordes o filos cortantes del extremo y la periferia de la fresa. Cuando el diámetro de la fresa es más grande que el ancho de la parte de trabajo, de tal manera que la fresa sobrepasa al trabajo en ambos lados, se denomina fresado frontal convencional, el cual se ilustra en la figura 4.5(a). De igual manera que en el fresado periférico, también en el fresado frontal existen diversas formas, varias de ellas se ilustran en la figura 4.5(b): fresado parcial de caras o parcial frontal, en el cual la fresa sobrepasa al trabajo solamente en un lado; (c) fresado terminal, en el cual el diámetro de la fresa es menor que el ancho del trabajo, de manera que se corta una ranura dentro de la parte; (d) el fresado de perfiles es una forma de fresado terminal en el cual se corta una parte plana de la periferia; (e) fresado de cavidades, otra forma de fresado terminal usada para fresar cavidades poco profundas en

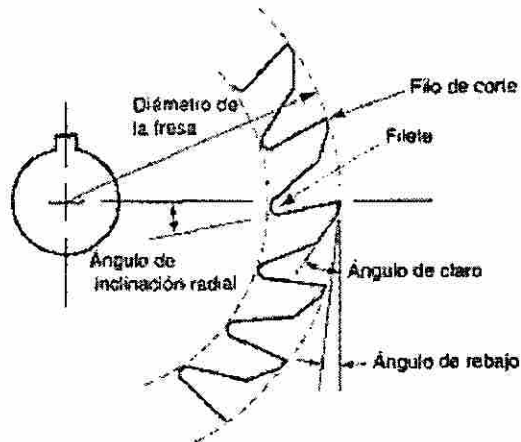
partes planas; (f) fresado de contorno superficial, en el cual una fresa con punto de bola (en lugar de una fresa cuadrada) se hace avanzar hacia delante y hacia atrás y hacia un lado y otro del trabajo, a lo largo de una trayectoria curvilínea a pequeños intervalos para crear una superficie tridimensional. Se requiere el mismo control básico para maquinarse los contornos de los moldes y dados en cuyo caso esta operación se llama tallado o contorneado de dados.



**Figura 4.5 Operaciones de fresado**

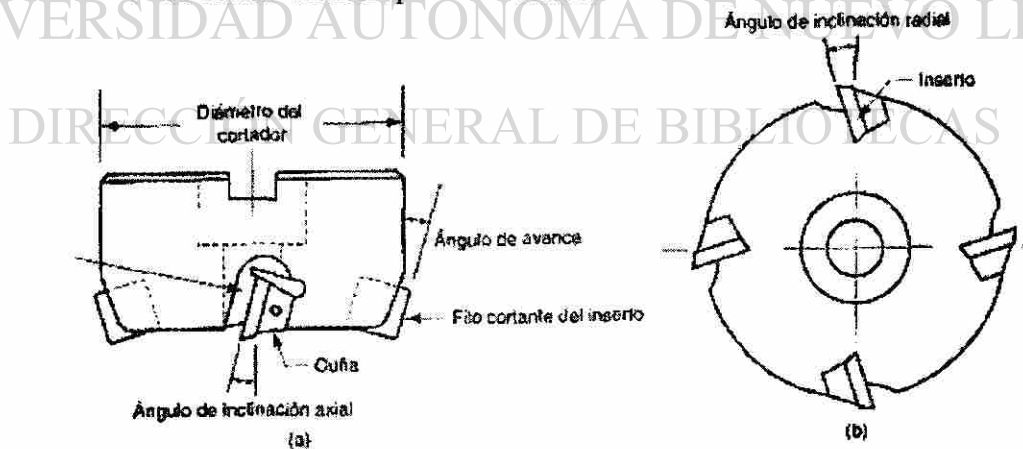
La clasificación de los cortadores para fresadores o fresas como se les conoce comúnmente, está muy asociada con las operaciones de fresado que se acaba de describir. Los tipos de fresas incluyen los siguientes:

- Cortadores cilíndricos o fresas planas. Estos se usan en el fresado periférico de planchas. Como se indica en la Figura.4.2(a), son fresas cilíndricas con varias filas de dientes. Los bordes cortantes se orientan por lo general en un ángulo de hélice (como en la figura 4.2a) para reducir el impacto de la entrada en el trabajo; estas fresas se llaman cortadores helicoidales. Los elementos de la geometría de una fresa plana se muestra en la Figura 4.6.



**Figura 4.6 Elementos de la geometría de una fresa plana de 18 dientes**

- Cortadores formadores o fresas formadoras. En estos cortadores periféricos, los bordes cortantes tienen un perfil especial que imparten el trabajo. Una aplicación importante está en la fabricación de engranes, en el cual la fresa formadora tiene una forma que corta las ranuras entre los dientes adyacentes de los engranes, formando de esta manera la geometría del diente del engrane.
- Cortadores frontales o fresas frontales. Estos se diseñan con dientes que cortan tanto lateralmente como en la periferia de la fresa. Las fresas frontales se pueden hacer de acero de alta velocidad como se muestra en la Figura 4.2(b), o se pueden diseñar para usar insertos de carburo cementado. La Figura 4.7 muestra una fresa frontal de cuatro dientes que usa insertos.



**Figura 4.7 Elementos de la geometría de una fresa frontal de 4 dientes a) vista lateral y b) vista inferior**



- Cortadores para acabados o fresa terminal. Como se muestra en la Figura 4.8, una fresa terminal se parece a una broca, pero si se observa con más atención está diseñada para un corte primario con los dientes periféricos más que con su extremo, una broca corta solamente en su extremo al penetrar en el trabajo. Las fresas terminales se diseñan con extremos cuadrados, extremos con radio y extremos de bola. Los extremos pueden usarse para fresado frontal, fresado de perfiles y cavidades, cortar ranuras, grabar, fresar contornos de superficie y tallar dados.

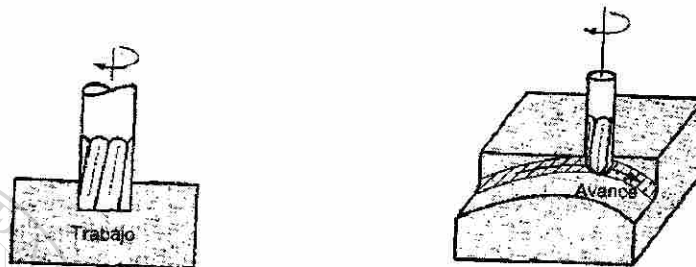


Figura 4.8 Cortador para acabado o fresa terminal

#### CONDICIONES DE CORTE EN FRESADO

La velocidad de corte se determina con el diámetro exterior de la fresa. Esta puede convertirse a la velocidad de rotación del husillo usando una fórmula que por ahora debe ser familiar:

$$N = \frac{v}{\pi D} \quad (25)$$

El avance  $f$  en fresado se determina por lo general como el avance por diente cortante, llamado carga de viruta, y representa el tamaño de la viruta formada por cada filo de corte. Esto se puede convertir a velocidad de avance tomando en cuenta la velocidad del husillo y el número de dientes en la fresa como sigue:

$$f_r = N n_t f \quad (26)$$

donde  $f_r$  = velocidad de avance en mm/min;  $N$  = velocidad del husillo en rev/min;  $n_t$  = número de dientes en la fresa; y  $f$  = carga de viruta en mm/diente.

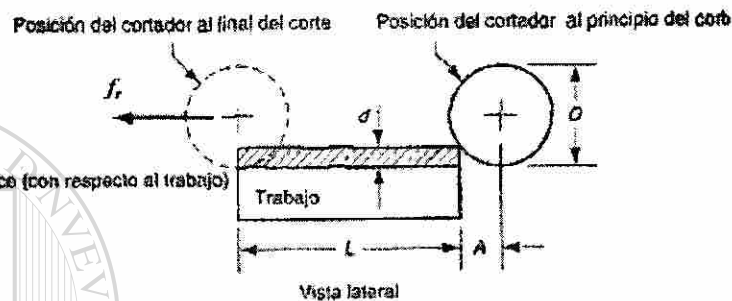
La remoción de material en el fresado se determina usando el producto del área de la sección transversal del corte por la velocidad de avance. Por consiguiente, si una operación de fresado de una plancha corta una pieza de trabajo con ancho  $w$  a una profundidad  $d$ , la velocidad de remoción de material es:

$$MRR = w d f_r \quad (27)$$

Esto ignora la entrada inicial de la fresa antes de su enganche completo. La ecuación (26) se puede aplicar al fresado de acabado, fresado lateral, fresado frontal y otras

operaciones de fresado, haciendo los ajustes apropiados en el cálculo del área de la sección recta del corte.

El tiempo requerido para fresar una pieza de trabajo de longitud  $L$  debe tomar en cuenta la distancia de aproximación requerida para enganchar completamente la fresa. Se considera primero el caso del fresado de una plancha (Figura 4.9). Para determinar el tiempo de ejecución de una operación de fresado de la plancha, la distancia de aproximación  $A$  para alcanzar la velocidad de corte completo se determina mediante:



**Figura 4.9** Fresado de una plancha, para determinar el tiempo de ejecución de la operación, distancia de aproximación para alcanzar la velocidad de corte completo

$$A = \sqrt{d(D-d)} \quad (28)$$

Donde:

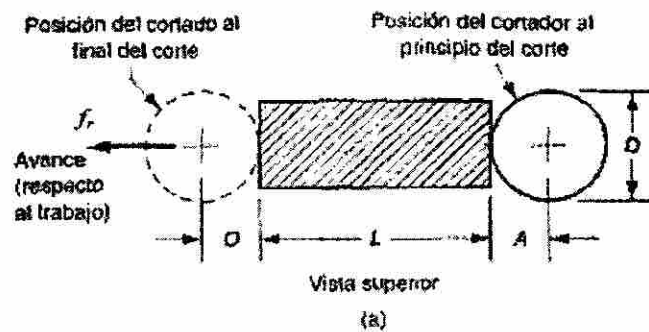
$d$  = profundidad de corte, (mm)

$D$  = diámetro de la fresa, (mm)

El tiempo para fresar la pieza de trabajo  $T_m$  es por tanto:

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \quad (29)$$

Para el fresado frontal es costumbre dejar para la aproximación la distancia  $A$  más una distancia  $O$ , que representa la profundidad de desbaste inicial. Hay dos casos posibles, como se muestra en la Figura 4.10 y 4.11. En ambos casos  $A = O$ . El primer caso es cuando la fresa se centra sobre la pieza de trabajo rectangular. En la Figura 4.10 es evidente que  $A$  y  $O$  son iguales a la mitad del diámetro del cortador. Esto es:



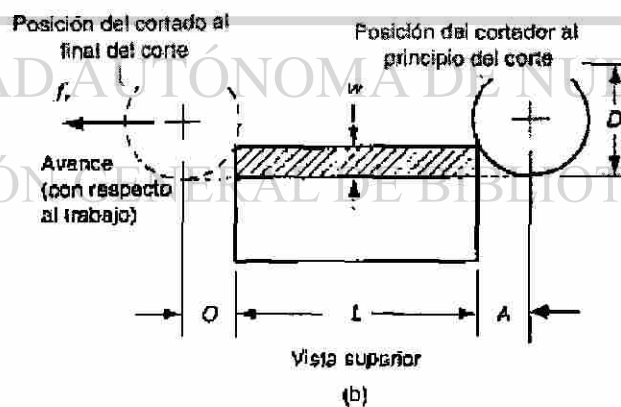
**Figura 4.10 Fresa centrada sobre la pieza de trabajo**

$$A = O = \frac{D}{2} \quad (30)$$

Donde:

$D$  = diámetro de la fresa, (mm).

El segundo caso es cuando la fresa sobresale a uno de los lados del trabajo, como se muestra en la Figura 4.11. En este caso, las distancias de aproximación y la distancia adicional están dadas por:



**Figura 4.11 Fresadora sobresaliente a uno de los lados de la pieza de trabajo**

$$A = O = \sqrt{w(D - w)} \quad (31)$$

Donde:

$w$  = ancho del corte, (mm).

Por tanto, el tiempo de maquinado en cada caso está dado por:

$$T_m = \frac{L + 2 A}{f_r} \quad (32)$$

## 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) 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. (Ver figura 4.12). 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.

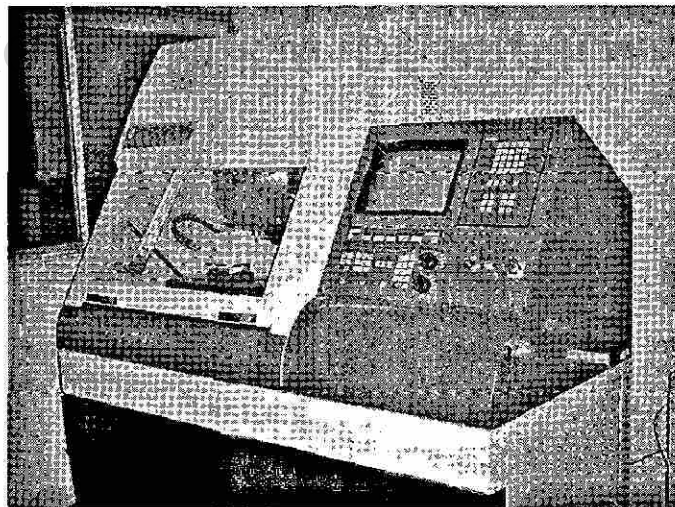


Figura 4.12 Centro de maquinado de control numérico EMCO PC MILL 125

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:

- 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 (bloques, 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, de 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 procesamiento es el componente que realiza el trabajo útil, y lo forman la mesa de trabajo, las máquinas-herramienta 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 flotante, más común 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, desplazan 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 se atiende a la clasificación según la forma física de realizar el control se encuentran los siguientes tipos de CN:

- Control Numérico (CN)
- Control Numérico Computarizado (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 Computarizado (CNC):**

El tipo de controles basados en circuitos específicos y lógica cableada esta fuera de uso con la aparición de los Controles Numéricos Computarizados (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, par torsional, 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 mencionar 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 utillaje); se utilizan herramientas más universales.
  - Supresión del trazado de piezas antes del maquinado. Ahorro de utillaje, 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.

#### Clasificación de tipos de máquinas CNC.

La observación de la geometría de componentes producidos por máquinas-herramienta CNC (Véase figura 4.13) muestra que los requisitos básicos en el control del carro son para capacidad posicional, lineal y de contornos. En la figura 4.14 se muestran ejemplos de tipos de máquinas y equipos que corresponden a estas categorías. Obsérvese que algunos procesos, por ejemplo, la soldadura, entran en más de un grupo.

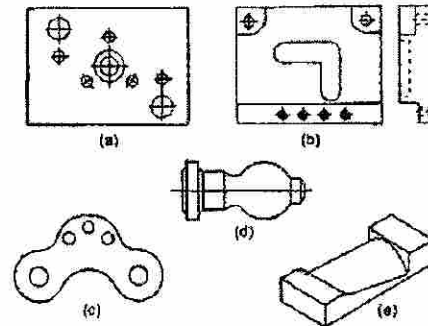


Figura 4.13 Ejemplos de piezas de trabajo en máquinas-herramientas CNC a) Posicional; b) Control de movimientos en línea; c) contorneado (2D); e) contorneado (3D)

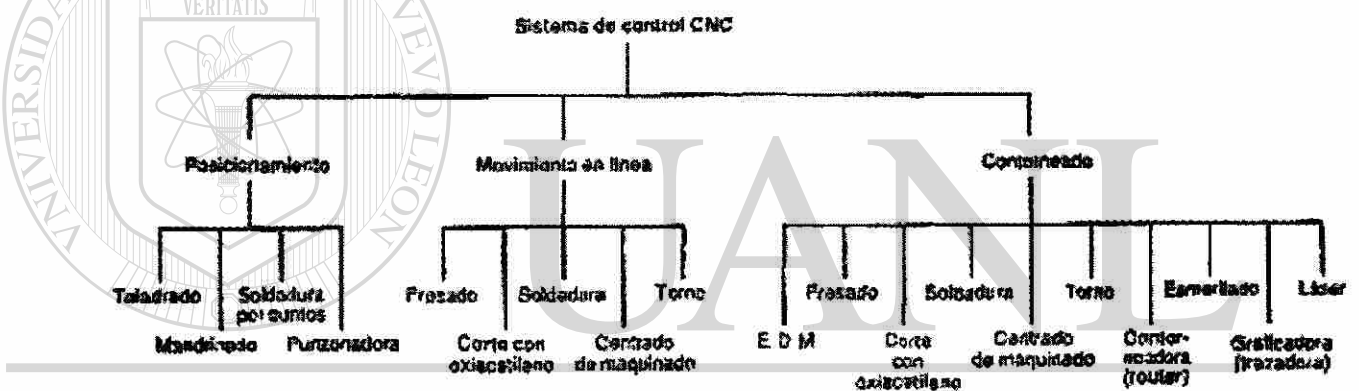


Figura 4.14 Clasificación de tipos de control para desplazamientos de carro en una variedad de máquinas-herramienta y equipo CNC

1. *Control posicional.* Dos carros ortogonales se mueven rápidamente a una posición fija en la que se realiza un maquinado, por ejemplo, taladrado, mandrinado o perforación de un agujero. La trayectoria seguida por los carros para llegar a la posición deseada debe ser la ruta más rápida posible, ya que de otra manera no tiene importancia a menos que haya obstrucciones (Por ejemplo, una abrazadera) que deban eliminarse. Esta clase de control de carros se conoce como 2D.
2. *Control de movimiento lineal.* Los carros se pueden desplazar con rapidez para afines de posicionamiento, como ejemplo en (1), pero también son capaces de ser controlados para moverse a la velocidad de avance, ya sea de manera individual o simultánea, para que se puedan hacer cortes rectos. La designación es 2L o 3L para control lineal en dos o tres ejes respectivamente, y se puede extender a 4L, etc.

3. *Control de contorno.* El maquinado de algunos componentes exige que los carros se desplacen de manera simultánea en una relación no lineal, y necesita sistemas de control capaces de aceptar y procesar información detallada y compleja. Esta información es necesaria para definir la trayectoria del cortador requerida para obtener la forma geométrica deseada. Este proceso incluye el control de velocidades, aceleraciones y desaceleraciones de los carros a lo largo de sus ejes respectivos. En la figura 4.15 se ilustra un ejemplo sencillo de velocidades de carro que cambian constantemente cuando se máquina un arco. El ejemplo más común de este tipo de control se designa como 2 ½D; es decir, el husillo en el eje Z tiene un sistema lineal de control (L), pero los otros dos ejes, X e Y, tiene un sistema de control tipo continuo (2D) capaz de manejar información no lineal. El control continuo de movimiento para procesos de contorno se amplía 3 ejes (3D) o más para máquinas y equipos complejos.

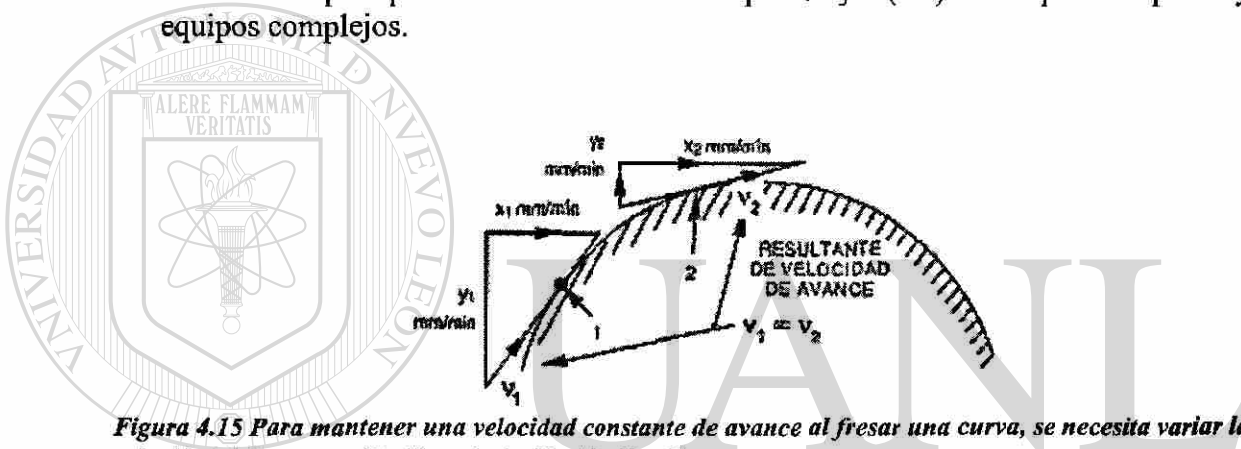


Figura 4.15 Para mantener una velocidad constante de avance al fresar una curva, se necesita variar la velocidad del carro en X y Y, es decir, X a  $X_2$ ; Y a  $Y_2$

### Interpolación para generación de contornos.

Para producir curvas suaves, sin puntos angulares, cuando se maquinan contornos con máquinas CNC, se siguen puntos en las superficies en una secuencia de movimientos de carros que son posibles por un sistema de interpolación. El sistema de control de una máquina CNC asegura movimientos de carros relacionados entre sí a las velocidades necesarias para alcanzar la forma geométrica deseada del componente. Pendientes y arcos de círculos están entre las figuras más comunes que necesitan de este sistema, y los dos sistemas de interpolación comunes que se utilizan son el lineal y el circular, definidos en la norma BS3635 <sup>21</sup>:

1. **Interpolación lineal.** Modo de control de contornos que producen una operación en pendiente o línea recta, que utiliza datos de un solo bloque para producir velocidades proporcionales a las distancias por desplazar en dos o más ejes simultáneamente.

2. Interpolación circular. Modo de control de contornos que utilizan los datos de un solo bloque para producir un arco de círculo; las velocidades de los movimientos en dos ejes empleados para generar este arco se pueden variar mediante el sistema de control.

### Desplazamiento de carros de máquinas-herramientas.

Para desplazar un carro de una máquina-herramienta mediante un sistema de control, es esencial una rápida respuesta de carros y elementos giratorios de impulsión a las señales de entrada (véase figura 4.16) y, aún así, para resistir cargas pesadas y fuerzas en el corte de metal, es necesaria una robusta construcción de la máquina.

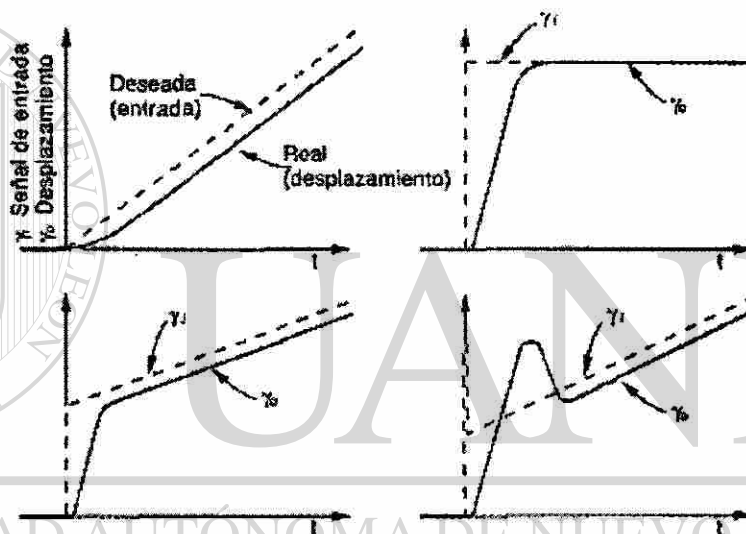


Figura 4.16 Ejemplos de señales de entrada y condiciones reales de respuesta

Para satisfacer estas necesidades antagónicas se ha modificado y perfeccionado el tradicional diseño de máquinas-herramienta; por ejemplo, las fuerzas de fricción se reducen por la sustitución de rodamientos en lugar de cojinetes de deslizamiento en correderas y tuercas de tornillos de avance, con lo que se reducen cargas y es posible que algunos componentes del sistema de impulsión, como son embragues, engranajes y ejes se reduzcan en sus dimensiones.

Por estos medios se reduce la inercia del sistema, se emplean sistemas de impulsión de menor potencia y se reduce al mínimo el costo de componentes de diseño avanzado.

En el control de elementos de carros portaherramientas debe hacerse una distinción entre sistemas de impulsión para desplazar físicamente el carro, y sistemas de alimentación para supervisar la posición del carro (sistemas de lazo cerrado). Esta distinción se ilustra en la figura 4.17, y ejemplos de control de lazo abierto y cerrado se muestran en la figura 4.18, un transductor se necesita para supervisar el desplazamiento

de carros. Puede recibir su entrada desde un elemento giratorio del sistema de impulsión, por ejemplo, el tornillo de avance, en cuyo caso la precisión puede ser afectada por errores del tornillo de avance, enrollado, deslizamiento axial, etc.; o de un transductor lineal, por ejemplo, retículas ópticas o interferómetros de láser, y puede vigilar desplazamientos directamente desde el carro mismo. En todos los casos, el sistema debe ser capaz de vigilar desplazamientos de carros (y velocidad en el caso de máquinas para contornear) sobre largas distancias de carrera y a un alto grado de precisión.

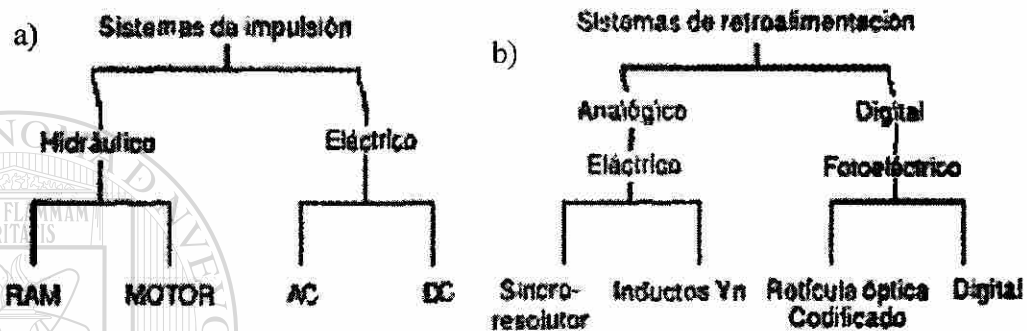


Figura 4.17 a) Tipos de sistemas de impulsión para desplazar carros de máquinas-herramientas, b) Ejemplos de métodos analógicos y digitales para obtener alimentación en la Posición del carro

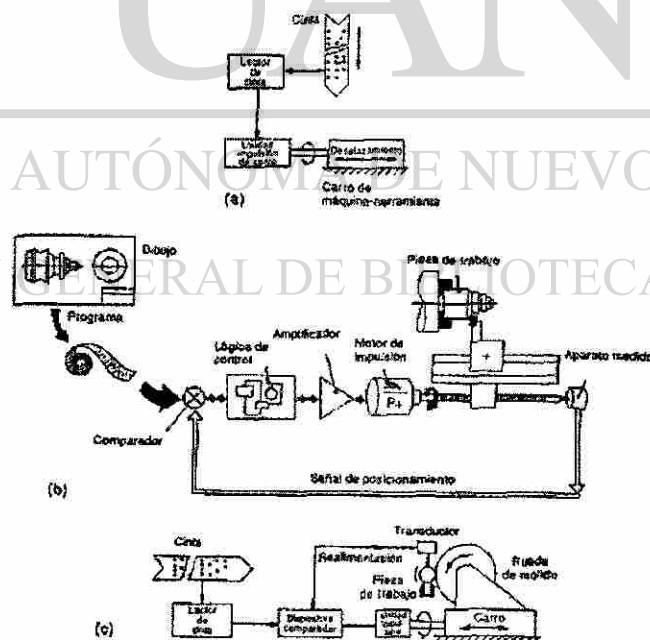


Figura 4.18 Secciones de lazo abierto y cerrado para controles de carro de máquina-herramienta. a) Lazo abierto; b) sistema de control de lazo cerrado; c) lazo cerrado basado en medición de la pieza de trabajo en proceso

### 4.3 Maquinabilidad.

Las propiedades del material de trabajo tienen una influencia significativa sobre el éxito de la operación de maquinado. Estas propiedades y otras características del trabajo se resumen frecuentemente en el término maquinabilidad, que denota la facilidad relativa con la cual se puede maquinar un material (por lo general metal) usando las herramientas y las condiciones de corte apropiadas.

Para evaluar la maquinabilidad se utilizan varios criterios y los más importantes son los siguientes:

- 1) Vida de la herramienta,
- 2) Fuerzas y potencia,
- 3) Acabado superficial,
- 4) Facilidad de eliminación de la viruta.

Aunque la maquinabilidad se refiere generalmente al material de trabajo, debe reconocerse que el buen desempeño del maquinado no depende solamente del material. El tipo de operación de maquinado, la herramienta y las condiciones de corte son también factores importantes, así como las propiedades del material. Además, el criterio de maquinabilidad es también una fuente de variación. Un material puede prolongar la vida de la herramienta, mientras que otro suministra un mejor acabado superficial. Todos estos factores hacen difícil la evaluación de la maquinabilidad.

El ensayo de la maquinabilidad implica generalmente una comparación de materiales de trabajo. El desempeño del maquinado de un material de prueba se mide en relación con el material base (estándar). Las medidas posibles de desempeño en el ensayo de la maquinabilidad incluyen:

- 1) La vida de la herramienta,
- 2) El desgaste de la herramienta,
- 3) La fuerza de corte,
- 4) La potencia en la operación,
- 5) La temperatura de corte,
- 6) La velocidad de remoción del material bajo las condiciones estándar de la prueba.

El desempeño relativo se expresa como un número índice llamado índice de maquinabilidad (IM). Al material base que se utiliza como estándar se le da un índice de maquinabilidad de 1.00. El acero B 1112 se usa frecuentemente como material base en las comparaciones de maquinabilidad. Los materiales más fáciles de maquinar que la base tienen índices mayores de 1.00. Los índices de maquinabilidad se expresan frecuentemente como porcentajes en lugar de números índices.<sup>20</sup>

Muchos materiales de trabajo y sus factores afectan el desempeño del maquinado. Las propiedades mecánicas de un material de trabajo que afectan la maquinabilidad incluyen la dureza y la resistencia. Al incrementarse la dureza, aumenta el desgaste

abrasivo y la vida de la herramienta se reduce. La resistencia se indica por lo general como resistencia a la tensión, aún cuando el maquinado implica esfuerzos cortantes. Al aumentar la resistencia del material, se incrementan las fuerzas de corte, la energía específica y la temperatura de corte, haciendo que el material sea más difícil de maquinar. Por otro lado, una dureza muy baja puede ir en detrimento del desempeño del maquinado. Por ejemplo, el acero al bajo carbono, cuya dureza es relativamente baja, con frecuencia es demasiado dúctil para poder maquinarlo bien. La alta ductilidad causa desgarramientos del metal al formarse la viruta y produce un pobre acabado y problemas con la eliminación de la viruta. Frecuentemente se usa el estirado en frío de las barras de bajo carbono para incrementar su dureza superficial y propiciar el rompimiento de la viruta durante el corte.

La composición química de un metal tiene un efecto importante sobre las propiedades, y en algunos casos afecta los mecanismos de desgaste que actúan sobre el material de la herramienta. La composición química afecta la maquinabilidad a través de estas relaciones. El contenido de carbón tiene un efecto significativo sobre las propiedades del acero. Al incrementarse el carbón, aumentan la resistencia y la dureza del acero; esto reduce el desempeño del maquinado. Muchos elementos de aleación que se añaden al acero para mejorar sus propiedades van en detrimento de la maquinabilidad. El cromo, el molibdeno y el tungsteno forman carburos en el acero, lo cual incrementa el desgaste de la herramienta y reduce la maquinabilidad. Se pueden añadir ciertos elementos al acero para mejorar su desempeño en el maquinado, como son plomo, azufre y fósforo. Estos aditivos tienen el efecto de disminuir el coeficiente de fricción entre la herramienta y la viruta, por tanto reducen las fuerzas, la temperatura y la formación de acumulación en el borde. Estos efectos proporcionan una mejor vida de la herramienta y un mejor acabado superficial. Las aleaciones de acero formuladas para mejorar la maquinabilidad se conocen como *aceros de maquinado libre*.<sup>21</sup>

#### **4.4 Selección de las condiciones de corte.**

Un problema práctico en maquinado es seleccionar las condiciones de corte apropiadas para una operación dada. Ésta es una de las tareas de planeación de procesos. Para cada operación se deben tomar decisiones acerca de la máquina-herramienta, de la herramienta de corte y de las condiciones de corte. Estas decisiones deben considerar la maquinabilidad de la parte de trabajo, la geometría de la parte, el acabado superficial y así sucesivamente.

##### **4.4.1 Selección del avance y de la profundidad de corte.**

Las condiciones de corte en una operación de maquinado consisten en la velocidad, el avance, la profundidad de corte y el fluido para corte (si se usa o no, y qué tipo de fluido). El factor dominante en la elección sobre los fluidos para corte son generalmente



las consideraciones sobre las herramientas). La profundidad de corte se predetermina frecuentemente por la geometría de la pieza de trabajo y la secuencia de operación. Muchos trabajos requieren una serie de operaciones de desbaste seguidas de una operación final de acabado. En las operaciones de desbaste, la profundidad se hace tan grande como sea posible dentro de las limitaciones de la potencia disponible, la máquina-herramienta, la rigidez de la instalación, la resistencia de la herramienta de corte y otros factores. En el corte de acabado, se fija la profundidad para alcanzar las dimensiones finales de la parte.

El problema se reduce entonces a la selección del avance y de la velocidad. En general, los valores de estos parámetros deben decidirse en orden, primero el avance y segundo la velocidad. La determinación de la velocidad de avance apropiada para una operación de maquinado depende de los siguientes factores:

**Herramienta.** ¿Qué tipo de herramienta se usará? Los materiales más duros de herramienta (carburos cementados, cerámicos y similares) tienden a fracturarse más fácilmente que los, aceros de alta velocidad. Estas herramientas se usan normalmente a velocidades de avance lentas. Los aceros de alta velocidad pueden tolerar velocidades de avance más altas debido a su mayor tenacidad.

**Desbaste o acabado.** Las operaciones de desbaste implican altas velocidades; las operaciones de acabado implican avances lentos

**Restricciones del avance en desbaste.** Si la operación es desbaste, ¿a qué altura se puede fijar la velocidad de avance para maximizar la velocidad de remoción de metal?, el avance se debe fijar tan alto como sea posible. Los límites más altos en el avance son impuestos por las fuerzas de corte, la rigidez de la instalación y algunas veces la potencia.

**Requerimientos del acabado superficial.** Si la operación es el acabado ¿cuál es el acabado superficial que se desea?, el avance es un factor importante en el acabado superficial, se pueden usar cálculos para estimar el avance que producirá un acabado superficial deseado.

#### 4.4.2 Optimización de la velocidad de corte.

La selección de la velocidad de corte se basa en aprovechar mejor la herramienta de corte particular, lo cual significa normalmente escoger una velocidad que rinda una alta velocidad de remoción de material y que sea conveniente para una vida larga de la herramienta.

Se han derivado fórmulas matemáticas para determinar la velocidad óptima de corte para una operación de maquinado, dado que se conocen los tiempos y los componentes

de costo de la operación. Las fórmulas permiten calcular las velocidades óptimas de corte para alcanzar dos objetivos:

- 1) Máxima velocidad de producción,
- 2) Mínimo costo por unidad.

Ambos objetivos buscan lograr un balance entre la velocidad de remoción de material y la vida de la herramienta. En consecuencia, se ha establecido el avance, la profundidad de corte y el material de trabajo.

**Maximización de la velocidad de producción.** Para maximizar la velocidad de producción, se determina la velocidad que *minimiza el tiempo de maquinado por unidad de producción*. Minimizar el tiempo de corte por unidad es equivalente a maximizar la velocidad de producción. Este objetivo es importante en casos donde las órdenes de producción se deben terminar tan rápido como sea posible.

En el torneado existen tres etapas que contribuyen a la duración del ciclo de producción de una parte:

**1)Tiempo de manejo de la parte  $T_h$ .** Éste es el tiempo que toma el operador para cargar la parte en la máquina-herramienta al principio del ciclo de producción y descargar la parte después de completar el maquinado.

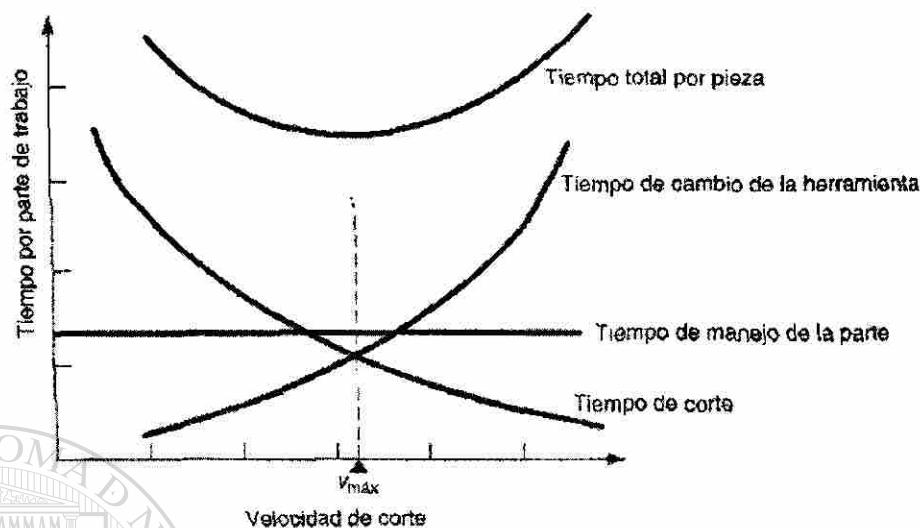
**2)Tiempo de maquinado  $T_m$ .** Es el tiempo real en que la herramienta desempeña el maquinado durante el ciclo.

**3)Tiempo de cambio de la herramienta  $T_t$ .** Al final de la vida de la herramienta, ésta debe cambiarse, lo cual toma tiempo. Este tiempo debe dividirse entre el número de partes que se produjeron durante la vida de la herramienta. Sea  $np$  = número de piezas cortadas durante la vida de la herramienta (número de piezas que se cortan con un borde de corte hasta que la herramienta se cambia). Entonces, el tiempo de cambio de la herramienta por parte =  $T_t/np$ . Con la suma de estos tres elementos de tiempo se obtiene el tiempo total por unidad de producto para el ciclo de operación:

$$T_c = T_h + T_m + T_t/np \quad (33)$$

donde  $T_c$  = tiempo del ciclo de producción por pieza, min.

El tiempo del ciclo  $T_c$  está en función de la velocidad de corte. Al incrementarse la velocidad de corte,  $T_m$  disminuye y  $T_t/np$  aumenta;  $T_h$  no es afectada por la velocidad. Ver figura 4.19.



**Figura 4.19** Tiempo de ciclo de la pieza en relación con la velocidad de corte

El tiempo total por cada parte se minimiza a un cierto valor de velocidad de corte. Esta velocidad óptima se puede identificar con un rearrreglo matemático de la ecuación como una función de la velocidad. Se puede demostrar que el tiempo de maquinado en la operación de torneado recto está determinada por:

$$T_m = (\pi DL / vf) \quad (34)$$

Donde:  $T_m$  = tiempo de maquinado, min;  
 $D$  = diámetro de la parte de trabajo, mm;  
 $L$  = longitud de la parte de trabajo, mm;  
 $f$  = avance, mm/rev; y  
 $v$  = velocidad de corte mm/min.

**Minimización del costo por unidad.** Para el mínimo costo por unidad se determina la velocidad que minimiza el costo de producción por unidad de producto. Cuando se derivan las ecuaciones para este caso, empezamos con los cuatro componentes de costo que determinan el costo total por unidad durante una operación de torneado. Ver figura 4.20:

**1) Costo del tiempo de manejo de la parte.** Es el costo del tiempo que ocupa el operador cargando y descargando la parte. Sea  $C_o$  = tasa de costo (por ejemplo \$/min) para el operador y la máquina. Entonces el costo de tiempo de manejo de la parte =  $C_o T_h$ .

**2) Costo del tiempo de maquinado.** Es el costo del tiempo que toma la herramienta para hacer el maquinado. Usando otra vez  $C_o$  para representar el costo por minuto del operador y de la máquina-herramienta, el costo de tiempo de corte =  $C_o T_m$ .

3) **Costo del tiempo de cambio de herramienta.** Es el costo del tiempo de cambio de herramienta =  $C_o T_t / np$ .

4) **Costo de la herramienta.** Además del tiempo de cambio de la herramienta, la herramienta en sí tiene un costo que debe añadirse al costo total de operación. Éste es el costo por borde de corte  $C_t$ , dividido por el número de piezas maquinadas con ese borde de corte  $np$ . Entonces el costo de la herramienta por unidad de producto está dado por  $C_t/np$ .

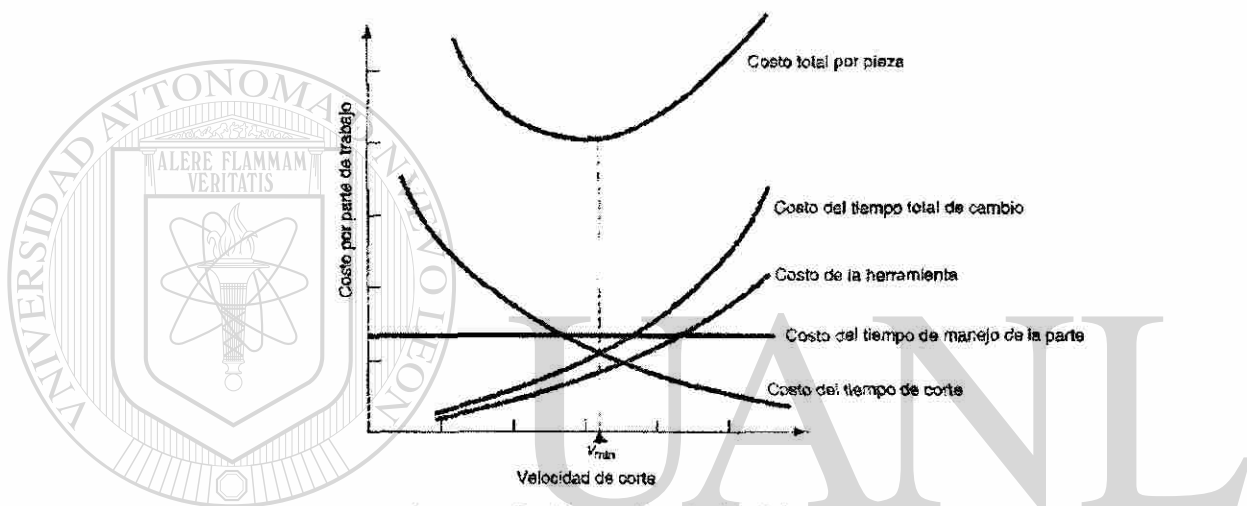


Figura 4.20 Costo de la pieza en relación con la velocidad de corte

## CAPÍTULO 5

# METROLOGÍA SUPERFICIAL RUGOSIDAD.

### 5.1 Introducción.

Una superficie perfecta solo existe en la mente, ya que cualquier superficie real, por perfecta que parezca, presentará irregularidades que se originan durante el proceso de fabricación.

Las irregularidades mayores (macrogeométricas) son errores de forma asociados con la variación en tamaño de una pieza, paralelismo entre superficies y planitud de una superficie o conicidad, redondez y cilindricidad y que pueden medirse con instrumentos convencionales.

Las irregularidades menores (microgeométricas) son la ondulación y la rugosidad. La primera pueden ocasionarla la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad del material, liberación de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico, vibraciones, etc. La segunda la provoca el elemento utilizado para realizar el maquinado, por ejemplo, la herramienta de corte o la piedra de rectificado.

La figura 5.1 tomada de la norma ANSI/ASME 46.1-1995 <sup>22</sup> muestra los rangos típicos de valores de rugosidad superficial que pueden obtenerse mediante métodos comunes de producción.

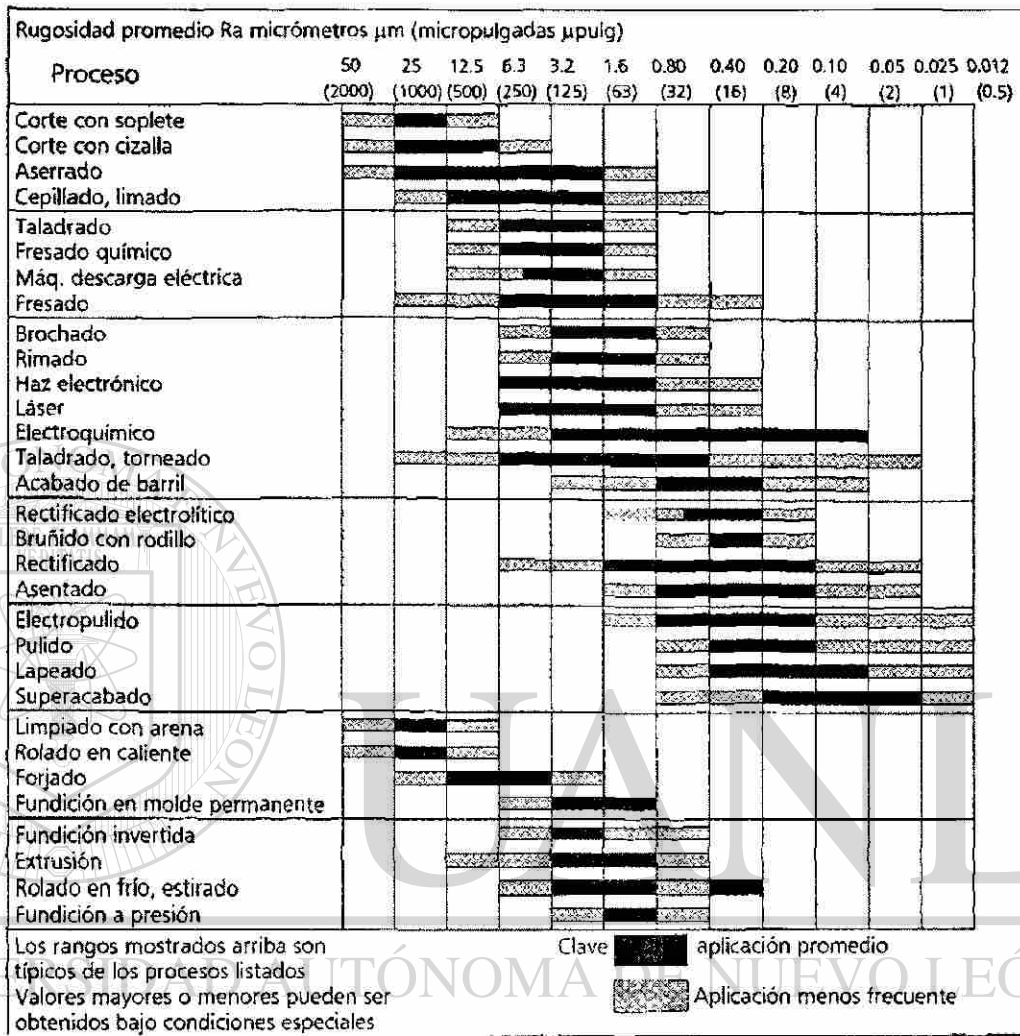


Figura 5.1 Rangos de rugosidad superficial que pueden obtenerse mediante métodos comunes de producción

En el pasado, el mejor método práctico para decidir si un acabado superficial cumplía con los requerimientos era compararlo visualmente y mediante el tacto contra muestras con diferentes acabados superficiales (figura 5.2). Este método no debe confundirse con los patrones de rugosidad que actualmente se usan en la calibración de rugosímetros.

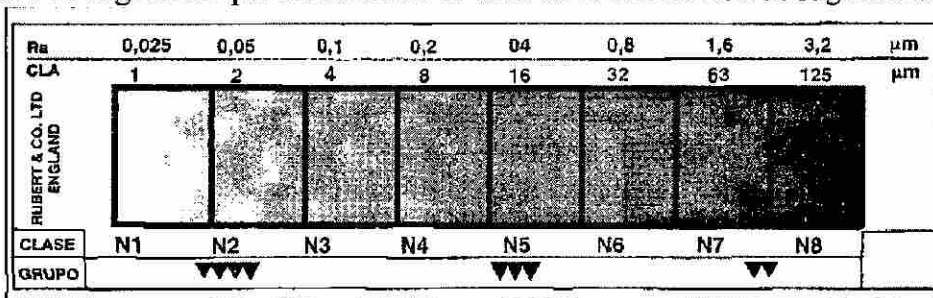


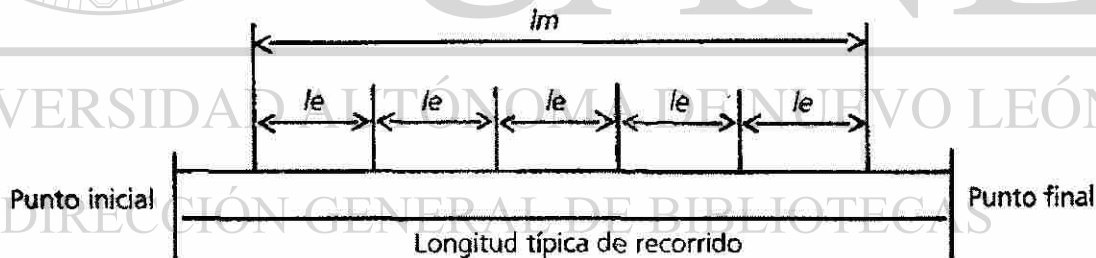
Figura 5.2 Lámina con diferentes acabados superficiales

La desventaja de la comparación visual táctica es que la decisión es subjetiva y difícilmente dos personas estarán de acuerdo en que superficies son aceptables y cuales no, sobre todo si uno es comprador y otro proveedor.

Afortunadamente, el avance de la industria electrónica durante el último cuarto de siglo ha hecho posible contar con los rugosímetros. Estos instrumentos son fáciles de operar, portátiles, económicos, inmunes a las condiciones ambientales adversas del taller y proporcionan con rapidez los datos, incluso el registro e impresión de estos.

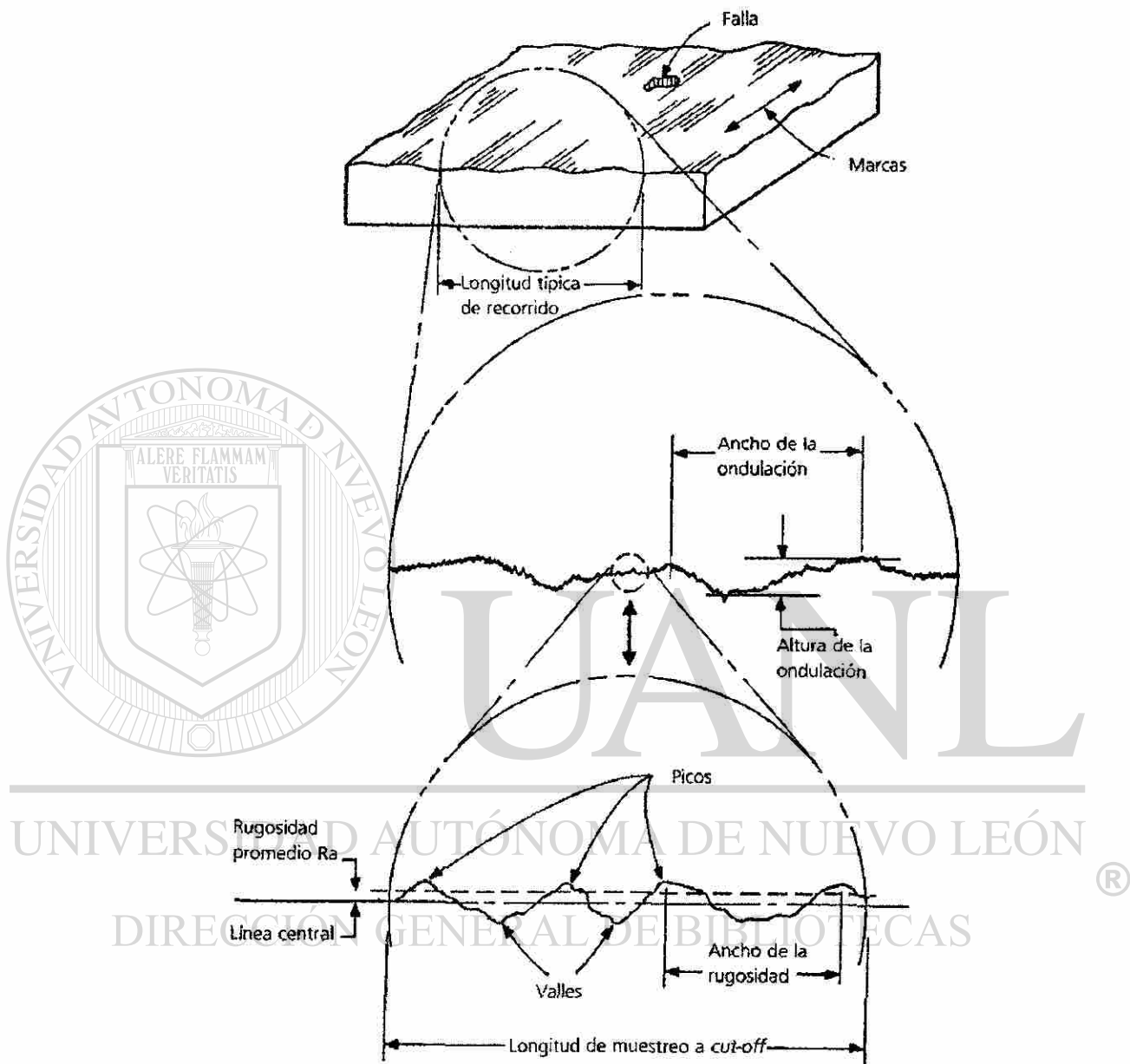
El método de medición de la rugosidad más popular en la actualidad es el que se basa en el palpador de diamante con un radio en la punta de  $2.5$  o  $10\mu\text{m}$  que recorre una pequeña longitud, denominada longitud de muestreo ( $le$ ), sobre la superficie localizada. Los valores normalizados para esta longitud de muestreo son,  $0.08$ ,  $0.25$ ,  $2.5$ ,  $8$  y  $25\text{mm}$ .

En la práctica se utiliza la longitud de evaluación, la cual puede ser una, tres o cinco veces la longitud de muestreo; este último valor es el más común. La longitud de recorrido será un poco mayor que la de evaluación, ya que si el palpador está en reposo se requiere recorrer una pequeña longitud antes de alcanzar la velocidad normal de recorrido y después realizar un recorrido adicional para que el palpador alcance nuevamente el reposo. (Figura 5.3). Una vez realizada la evaluación, el palpador regresa con una velocidad mayor al punto de origen, preparándose así para una nueva medición.



**Figura 5.3** Longitud que recorre el palpador durante la medición

La figura 5.4 tomada de la norma ANSI/ASME B46.1 - 1985<sup>23</sup> ilustra la superficie de una pieza en la que se observan marcas unidireccionales originadas por el proceso de maquinado utilizado y cierta ondulación de la superficie, al amplificar esta superficie se observara con mayor claridad la ondulación, pero se verán otras irregularidades más pequeñas superimpuestas. Con otra amplificación se obtiene la rugosidad; a las partes altas se les denomina picos y a las bajas valles. Esta forma de examinar el acabado superficial se denomina método de perfil.

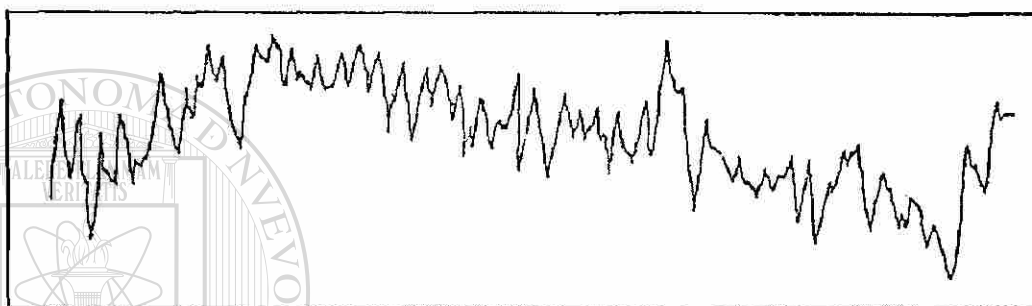


**Figura 5.4** Ilustra la superficie de una pieza en la que se observan marcas originadas por el maquinado, también se muestra la amplificación de la superficie donde se observan las irregularidades más claramente.



## 5.2 Las curvas P Y R.

Existen dos tipos de curvas importantes cuando se evalúa la rugosidad por el método de perfil: la P y la R. La curva P (perfil sin filtrar) es un perfil resultante de la intersección de una superficie con un plano perpendicular. A menos que se especifique otra circunstancia, la intersección debe de ser en la dirección en la cual el perfil representa el máximo valor de la rugosidad de la superficie; por lo general es en la dirección perpendicular a las marcas del maquinado sobre la superficie (figura 5.5).



*Figura 5.5 Curva P (perfil de rugosidad sin filtrar)*

La curva R (perfil de rugosidad) es un perfil que se obtiene de la curva P removiendo los componentes de ondulación de baja frecuencia, cuyas longitudes de onda son mayores que un límite especificado de la longitud de onda llamado valor *cut-off* ( $\lambda C$ ) (figura 5.6).



*Figura 5.6 Curva R (perfil de rugosidad)*

En los rugosímetros la longitud de muestreo se varía por medio de filtros que modifican la frecuencia de respuesta del amplificador y, por lo tanto, la forma de onda del perfil para dar lo que se denomina valor de *cut-off*.

El *cut-off* es el medio a través del cual el perfil resultante de la forma de onda simula la restricción de la evaluación de la longitud de muestreo. Por conveniencia el *cut-off* es citado como la longitud de muestreo equivalente.

Una línea de referencia con la forma del perfil geométrico y que divide al perfil de modo que, dentro de la longitud de muestreo, la suma de los cuadrados de los alejamientos del perfil desde esta línea es un mínimo, se denomina línea media.

Las medidas de la rugosidad por el método de perfil están basadas en una línea central que es paralela a la línea medida del perfil a través de la longitud de evaluación, de modo que dentro de esta longitud la suma de las áreas limitadas por la línea central y el perfil es igual en ambos lados (figura 5.7).

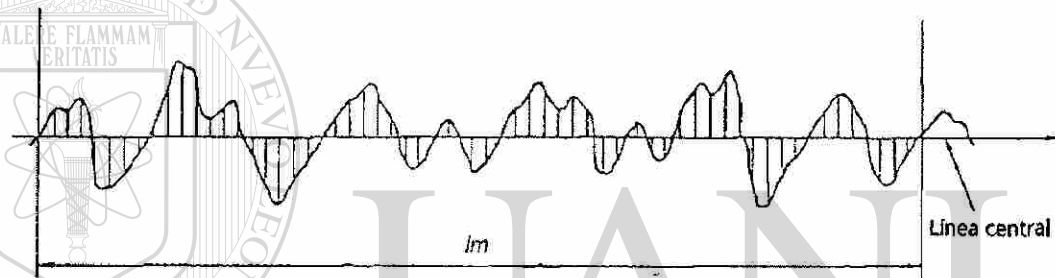


Figura 5.7 Muestra la línea media

### 5.2.1 Definición de $R_a$ .

La definición de  $R_a$  equivale, en términos prácticos, a la altura de un rectángulo de longitud ( $l_m$ ) cuya área es igual, dentro de la longitud de evaluación, a la suma de las áreas delimitadas por el perfil de rugosidad y la línea central. Esto se representa mediante el procedimiento mostrado en la figura 5.8; así  $R_a$  es la rugosidad promedio (también denominada CLA por promedio de línea central en sus siglas en inglés, aunque en el pasado también se utilizó el término AA por promedio aritmético.).

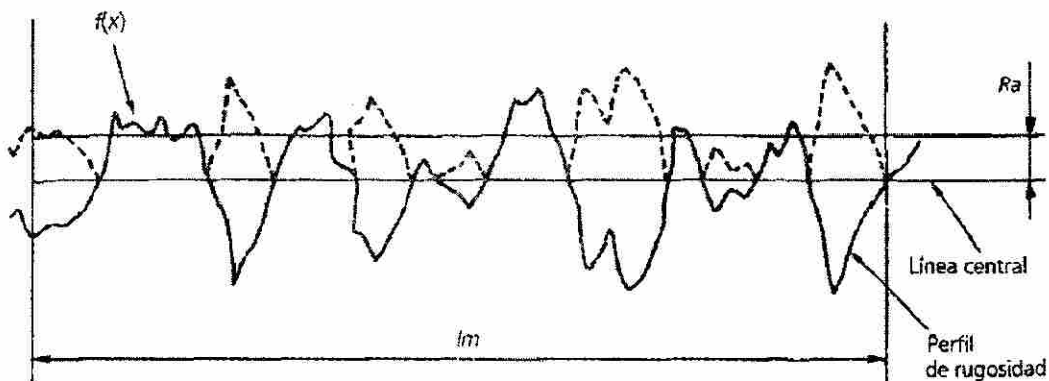


Figura 5.8 Forma en la que se mide la rugosidad  $R_a$

$R_a$  es el único parámetro de este tipo definido en la Norma de Estados Unidos, Canadá, Países Bajos y Suiza. También está bien definido en las normas de todos los países industrializados y en las normas internacionales ISO, por lo tanto es el más ampliamente utilizado; sin embargo, todas estas normas definen algún o algunos parámetros adicionales (Ver Tabla 11).

parámetro	1	2	3	4	5	6	7	8	Norma
Países	División media aritmética del perfil	Máxima altura del perfil	Diez puntos de altura de las irregularidades	Raíz cuadrada media de la desviación del perfil	Máxima altura del pico del perfil	Proporción del cumplimiento de la longitud del perfil	Espaciamiento medio de los picos locales del perfil	Espaciamiento medio de las irregularidades del perfil	
Japón	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$						JIS B 0601-1982
U.S.A.	$R_a$		$R_z$						ANSI B 46.1-1985
Reino Unido	$R_a$		$R_z$						BS 1134-1972
Italia	$R_a$	$R_{max}$ ( $R_{lim}$ )	$R_z$	RMS		t	$S_m$		UNI 3963 Part 2-1978
India	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$	$R_a$					IS 3073-1967
Australia	$R_a$								AS 1965-1977
Noruega	$R_a$								NEN 3631-1977, 3632-1974
Canadá	$R_a$								CSA B 95-1962
Suecia	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$			$L_p$	S		SMS 671-1975, 673-1975
Rusia	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$			$L_p$	S	$S_m$	GOST 2789-73-1974
Alemania	$R_a$	$R_i$ ( $R_{max}$ )	$R_z$	$R_p$		$L_p$	$A_p$		DIN 4762 Blatt 1-1960, 4767-1970, 4768 Teil 1-1978, 4768 Blatt 1-1978
Francia	$R_a$	$R_i$ ( $R_{max}$ )		$R_p$		$(L_p)_t$	$A_{pt}$		NF 05-15-1972
Finlandia	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$						SFS 2038-1969
Polonia	$R_a$	$R_{max}$	$R_z$			$N_i$			PN-73/M-04250-1974, /M-04251-1974
ISO	$R_a$	$R_z$	$R_z$			$L_p$	S	$S_m$	R 468-1966

Tabla 11 Parámetros de rugosidad utilizados en diferentes países

### 5.2.2 Definición de Rz.

El promedio de las alturas de pico a valle se denomina Rz, y las normas JIS e ISO lo definen como la diferencia entre el promedio de las alturas de los cinco picos más altos y la altura promedio de los cinco valles más profundos. Los picos y valles se miden en la dirección de la amplificación vertical, dentro de la longitud de evaluación ( $l_m$ ), desde una línea paralela a la línea media y que no intercepta al perfil, como se muestra en la figura 5.9, y queda expresada con la siguiente fórmula:

$$Rz \text{ (JIS-ISO)} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) - (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5)}{5} \quad (35)$$

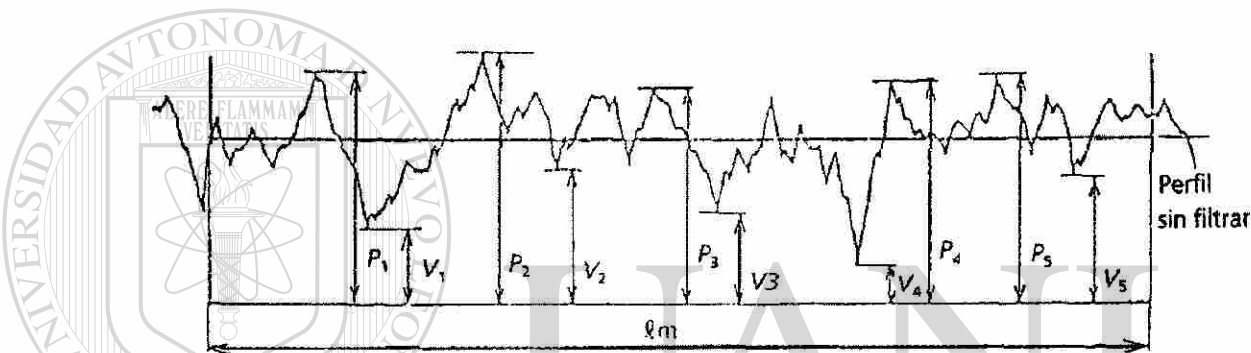


Figura 5.9 Picos y valles medidos de acuerdo a las normas JIS e ISO

El promedio de alturas de pico a valle denominado Rz, la norma DIN lo define como el valor promedio de la diferencia ( $Z_i$ ) entre el pico mas alto y el valle mas bajo de cinco sucesivas longitudes de muestreo ( $l_e$ ) dentro de la longitud de evaluación ( $l_m$ ), medida en la dirección de la línea media, mostrado en la figura 5.10 y queda expresada con la siguiente fórmula:

$$Rz \text{ (DIN)} = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (36)$$

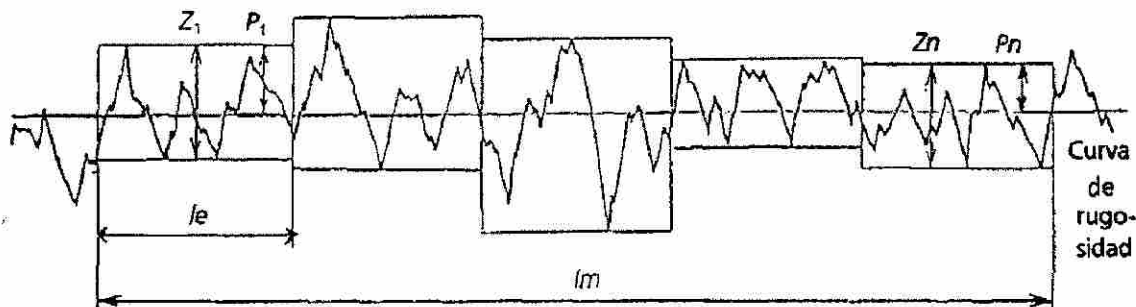


Figura 5.10 Muestra la manera de calcular Rz de acuerdo con la norma DIN

### 5.2.3 Definición de $R_y$ .

La máxima altura del perfil, denominado  $R_y$ , las normas JIS/ISO la definen como la máxima distancia entre las líneas de perfil de picos y valles. La máxima altura del perfil, medida en la dirección de la amplificación vertical dentro de la longitud de evaluación ( $l_m$ ) figura 5.11, la norma DIN la define como el máximo valor de  $Z_i$ , determinado para  $R_z$  DIN. En otros países  $R_y$  se denomina  $R_{max}$ ; este método de evaluación ocupa el segundo lugar en cuanto a su adopción por diferentes países industriales, mientras que el tercer lugar lo ocupa  $R_z$ .

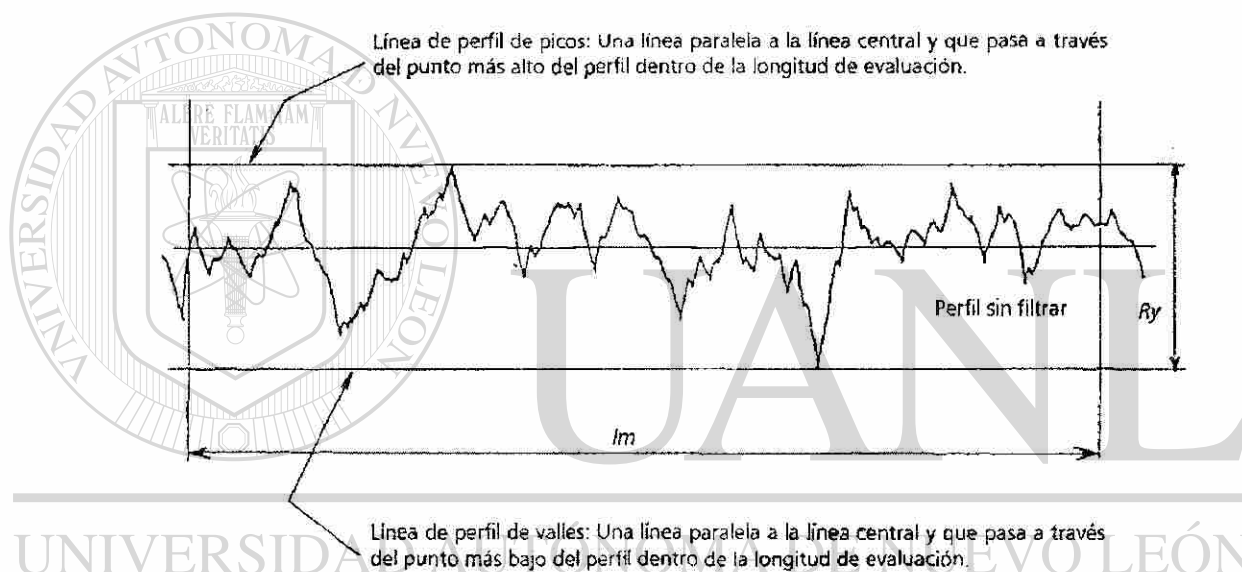


Figura 5.11 Muestra la manera de calcular  $R_y$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 5.2.4 Símbolos para la dirección de marcado.

La tabla 12 muestra los símbolos de la norma ISO que se utilizan para indicar en los dibujos las direcciones de las marcas producidas por el proceso de maquinado.



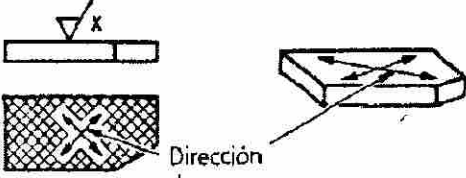
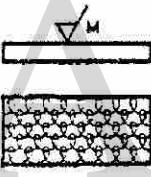
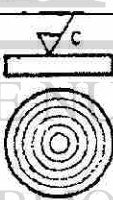
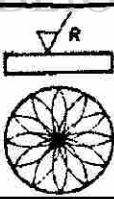
Símbolo	Interpretación
=	Paralelo al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo. 
⊥	Perpendicular al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo. 
X	Cruzado en dos direcciones inclinadas con relación al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo. 
M	Multidireccional 
C	Aproximadamente circular en relación con el centro de la superficie en la cual se aplica el símbolo. 
R	Aproximadamente radial en relación con el centro de la superficie en la cual se aplica el símbolo. 

Tabla 12 Muestra las direcciones de marca producidas por el proceso de maquinado

Las tablas 13, 14 y 15 muestran, sinópticamente, el método de indicar el acabado superficial con dibujos tomados de la misma norma.




Símbolo	Significado
	Símbolo básico. Puede usarse sólo cuando su significado se aplica en una nota.
	Una superficie maquinada sin indicación de cualquier otro detalle.
	Una superficie en la cual está prohibida la eliminación de material. Este símbolo también puede utilizarse en un dibujo relacionado con un proceso de producción para indicar que una superficie quedará tal como quedó después de un proceso de manufactura precedente, sin importar si tal estado se logró eliminando material o de otra forma.

Tabla 13 Símbolos de rugosidad sin indicación adicional


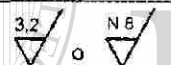


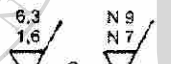

Símbolo			Significado
La eliminación de material por maquinado es			
Opcional	Obligatoria	Prohibida	
			Una superficie con valor máximo de rugosidad superficial $R_a$ de $3.2 \mu\text{m}$
			Una superficie con valor máximo de rugosidad superficial $R_a$ de $63 \mu\text{m}$ y un mínimo de $1.6 \mu\text{m}$ .

Tabla 14 Símbolos de rugosidad con indicación del principal criterio de rugosidad  $R_a$


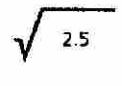

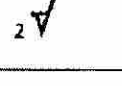
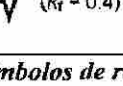
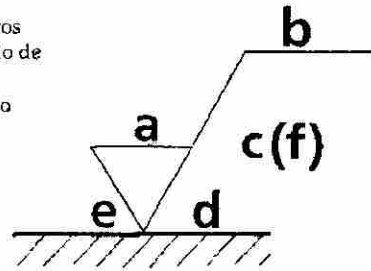
Símbolo	Significado
	Método de producción: fresado
	Longitud de muestreo: 2.5 mm
	Dirección de marcado: perpendicular al plano de proyección de la vista.
	Tolerancia de maquinado: 2 mm
	Indicación (en paréntesis) de un criterio de rugosidad diferente de $R_a$ ; por ejemplo, $R_t = 0.4 \mu\text{m}$

Tabla 15 Símbolos de rugosidad con indicación adicional

### 5.3 Recomendaciones prácticas para medir la rugosidad de una superficie.

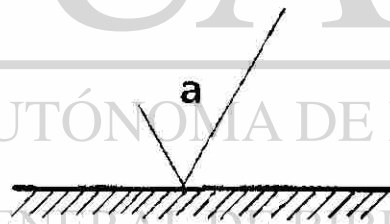
De acuerdo con la norma ISO, las especificaciones del acabado superficial deberán colocarse en relación con el símbolo básico como se muestra a continuación en la figura 5.12.

- a = valor  $R_a$  de rugosidad en micrómetros o micropulgadas o números de grado de rugosidad NI a NI2.
- b = método de producción, tratamiento o recubrimiento.
- c = longitud de muestreo
- d = dirección del marcado
- e = cantidad que se removerá mediante maquinado
- f = otros parámetros de rugosidad (entre paréntesis)



**Figura 5.12** Muestra el símbolo básico de rugosidad con las definiciones de cada parámetro

Sin embargo, es muy común encontrar solo una indicación como la siguiente mostrada en la figura 5.13.



**Figura 5.13** Símbolo de rugosidad mas comúnmente utilizado

Por lo que a continuación se dan algunas recomendaciones prácticas como proceder en estos casos.

1. Si no se menciona ningún parámetro en especial se entenderá que la medición será con el parámetro  $R_a$ .
2. El valor numérico mostrado indicara el valor máximo admisible y cualquier valor menor será aceptable.
3. La longitud de muestreo (o valor de cut-off) que deberá utilizarse, si no se especifica ninguna, será 0.8 mm.
4. La longitud de evaluación deberá fijarse igual a 5 veces la longitud de muestreo.



5. La medición se hará perpendicular a las marcas del maquinado o, si no hay una dirección preferencial, será necesario realizar tres mediciones en posiciones angulares diferentes y reportar el mayor valor.
6. Los parámetros más utilizados son Ra, Rz y Ry, por lo que pueden encontrarse en cualquier rugosímetro; sin embargo, los dos últimos están definidos de forma diferente en las normas DIN y en las normas JIS e ISO, por tanto, habrá de seleccionarse de acuerdo con los valores que se requieran.
7. Cuando este indicado un parámetro de rugosidad diferente a los anteriores, debe contarse con un rugosímetro capaz de medirlo. No existen factores para realizar conversiones de un parámetro a otro.

El principal criterio de rugosidad (Ra), puede indicarse con el correspondiente número de grado de rugosidad (ver la tabla 16), para evitar la mala interpretación de valor numéricos, los cuales pueden denotarse con diferentes unidades (micrómetros o micropulgadas).

Valores de rugosidad Ra		Números de grados de rugosidad
$\mu\text{m}$	$\mu\text{pulg}$	
50	2000	N 12
25	1000	N 11
12.5	500	N 10
6.3	250	N 9
3.2	125	N 8
1.6	63	N 7
0.8	32	N 6
0.4	16	N 5
0.2	8	N 4
0.1	4	N 3
0.05	2	N 2
0.025	1	N 1

*Tabla 16 Grado de rugosidad contra valor numérico*

# CAPÍTULO 6

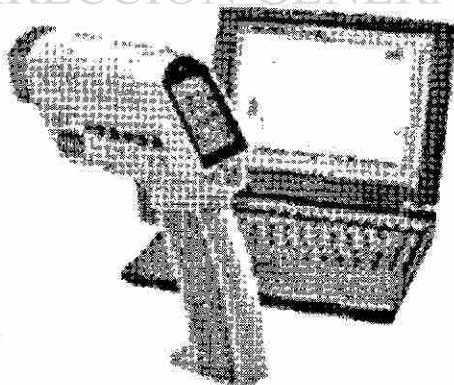
## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

### 6.1 Introducción.

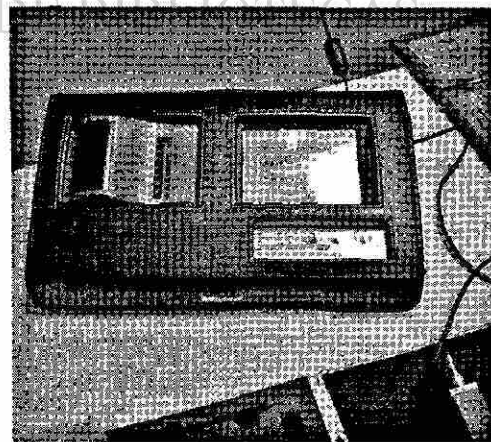
En este capítulo se especifica el equipo utilizado durante la experimentación. Así como la metodología seguida previa al experimento, también la preparación de los aditamentos para la colocación del pirómetro, la programación de la máquina y el maquinado de las piezas, así como la medición de la temperatura de la herramienta durante el maquinado, y la medición de la rugosidad en las piezas ya maquinadas.

### 6.2 Equipo utilizado.

Para llevar a cabo las mediciones se utilizó un termómetro infrarrojo RAYMX4PE mostrado en la figura 6.1 y un rugosímetro Mitutoyo SJ-301, ver figura 6.2. Las características técnicas detalladas de estos equipos se pueden consultar en el Anexo I.

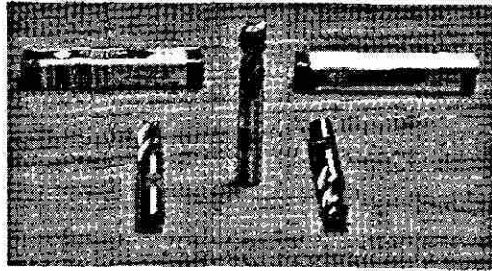


*Figura 6.1 Termómetro infrarrojo RAYMX4PE*

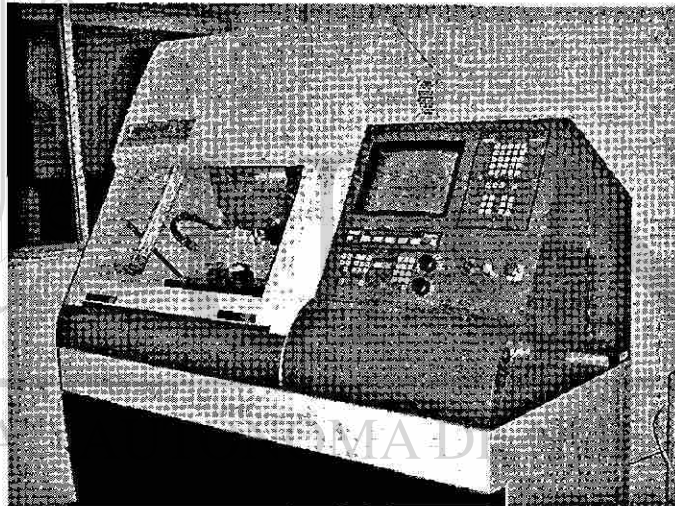


*Figura 6.2 Rugosímetro Mitutoyo SJ-301*

El maquinado de las piezas se realizó en un centro de maquinado vertical modelo EMCO PC MILL 125 (figura 6.4) usando una herramienta para fresado de acero rápido 9.6 x 9.6 mm (figura 6.3).



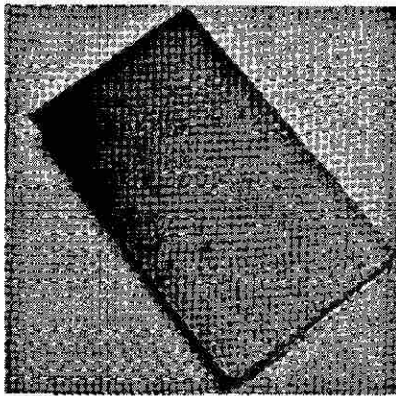
*Figura 6.3 Herramientas usadas para el maquinado*



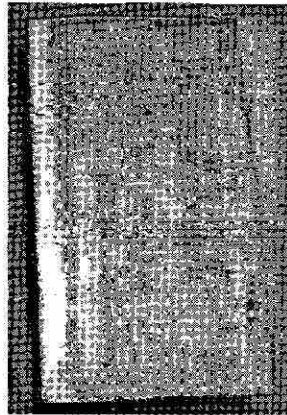
*Figura 6.4 Centro de maquinado EMCO PC MILL 125*

### **6.3 Material maquinado.**

Las piezas utilizadas para el proceso de maquinado fueron Aluminio 6063, Acero 1018 y Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío, en forma de placas de 130 x 75 x 25 mm. como se muestra en la figura 6.5, 6.6 y 6.7.



*Figura 6.5 Acero 1018*



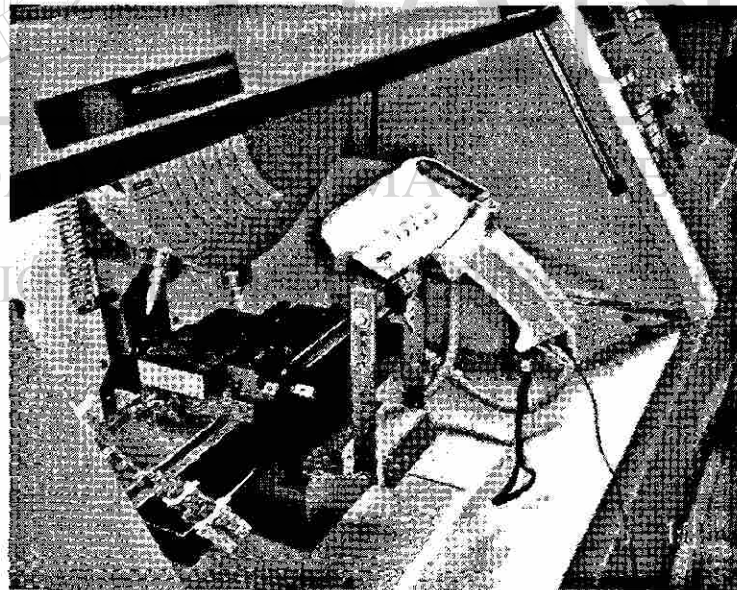
*Figura 6.6 Aluminio 6063*



*Figura 6.7 Acero 4041 Recocido y Estirado en Frío*

#### **6.4 Procedimiento de medición.**

Para la medición de la temperatura se montó un termómetro infrarrojo en la máquina apuntando sobre la herramienta por medio de un aditamento sujetado en la mesa de trabajo de la fresadora con el objetivo de seguir el desplazamiento de la herramienta y tener más puntos de medición, como se muestra en la figura 6.8.



*Figura 6.8 Ensamble del pirómetro en la máquina*

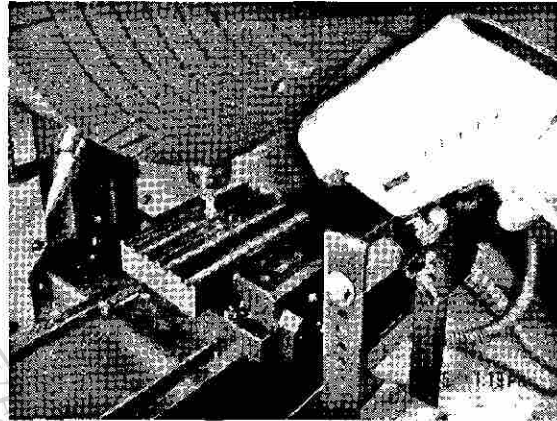
Después de haber montado el termómetro infrarrojo se procedió a colocar la pieza en la fresadora por medio de unas mordazas aseguradas a presión por una rosca manual, se colocó la herramienta en la torreta en la posición 5 y posteriormente se ajustó el cero de pieza (trasladando el centro del sistema de coordenadas a un punto conocido sobre la

pieza para que facilite la programación) y el cero de herramienta (trasladando el origen de la herramienta a la punta de ella). A continuación se realizó el programa de maquinado para las pruebas el cual incluyó paros en cada ranura para ajustar el termómetro infrarrojo y que el láser apunte directamente en la herramienta. Dicho programa se reproduce a continuación:

```
%195
G71 G90 G54 G94 LF,
S800 (800/1000RPM) M03 LF,
T5 D5 M06 LF,
G00 X150.0 Y-7.5 Z20.0 LF,
G00 Z-3.0 F100 (50 a 110 mm/min)LF,
M00 LF,
G01 X-15.0 LF,
M00 LF,
Y-20.0 LF,
M00 LF,
X140.0 LF,
M00 LF,
Y-32.5 LF,
M00 LF,
X-15.0 LF,
M00 LF,
Y-45.0 LF,
M00 LF,
X140.0 LF,
M00 LF,
Y-57.5 LF,
M00 LF,
X-15.0 LF,
M00 LF,
Z20.0 LF,
M00 LF,
T5 D0 LF,
G53 G00 X287.448 Y109.936 Z141.261 LF,
M30 LF,
```

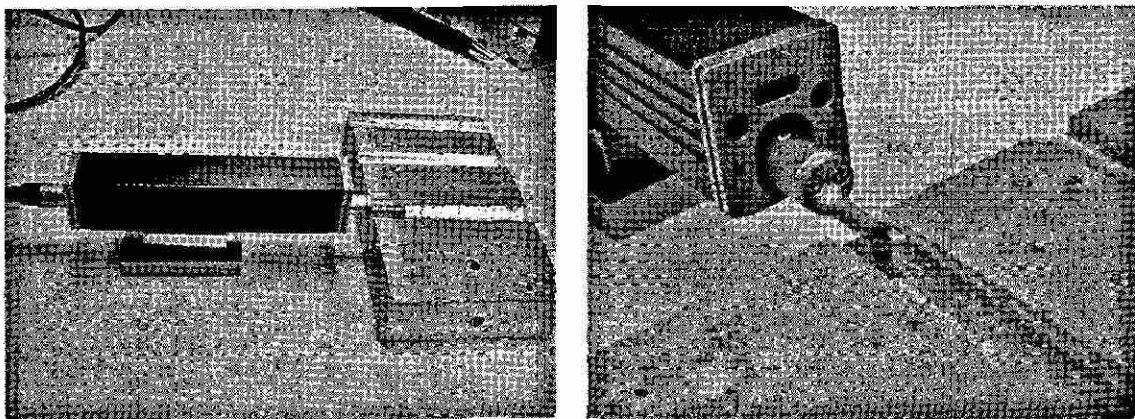
El maquinado de los 3 tipos de materiales consistió en retirar 3 milímetros de material en una recorrido de la herramienta haciendo 10 ranuras por pieza, 5 de cada lado, y en cada ranura se varía el avance comenzando con 50 mm/min y teniendo incrementos de 10 mm/min hasta llegar a 110mm/min, esto para 2 velocidades de corte diferentes: 800 y 1000 RPM. La medición de la temperatura la realiza el pirómetro sacando un promedio de las tomas detectadas por un rayo láser con un diámetro de 25mm emitido

por él, la medición inició desde que la herramienta tocó el material haciendo tomas cada 250 milisegundos hasta llegar al final del recorrido como se muestra en la figura 6.9.



*Figura 6.9 Rayo láser emitido por el pirómetro*

Una vez terminadas de maquinarse, las piezas se identificaron con la velocidad y el avance con los que se trabajaron y se recolectó la viruta generada por el proceso para analizarla, posteriormente se midió la rugosidad de las piezas. Estas mediciones se realizaron colocando el palpador del rugosímetro en cada ranura maquinada, nivelando la unidad conductora con ayuda de bloques patrón y un nivel de burbuja como lo muestra la figura 6.10. Las mediciones fueron tomadas en micrones para los parámetros  $R_a$  (los cuales fueron descritos en el capítulo 5).



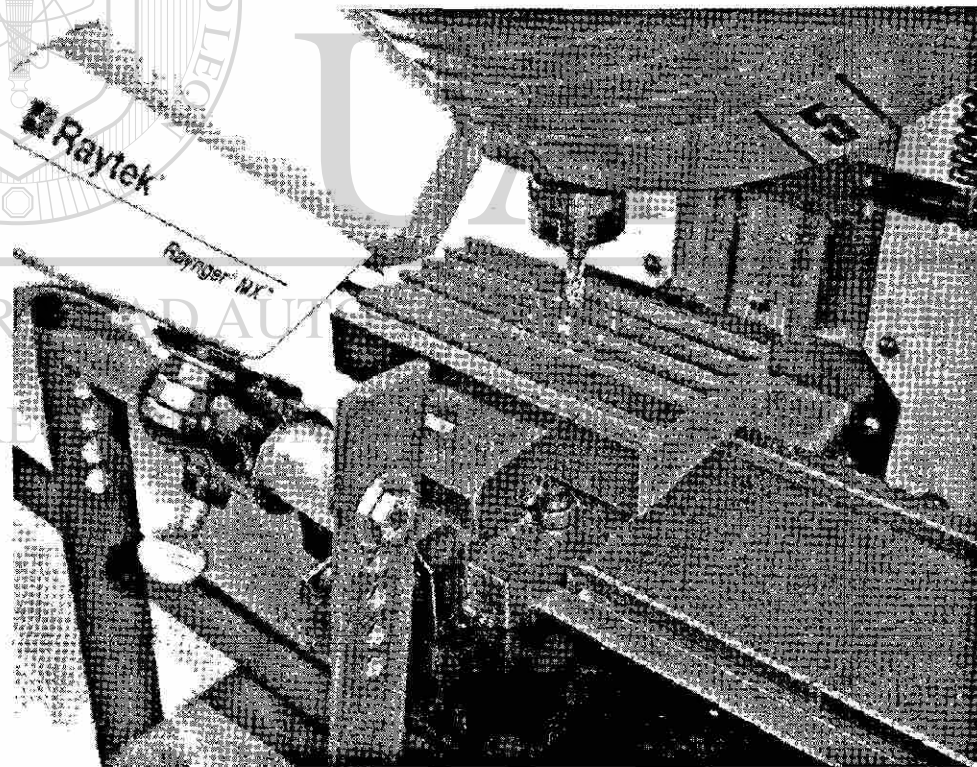
*Figura 6.10 Medición de la rugosidad en las piezas terminadas*

## CAPÍTULO 7

### RESULTADOS.

#### 7.1 Resultados de la medición de temperatura.

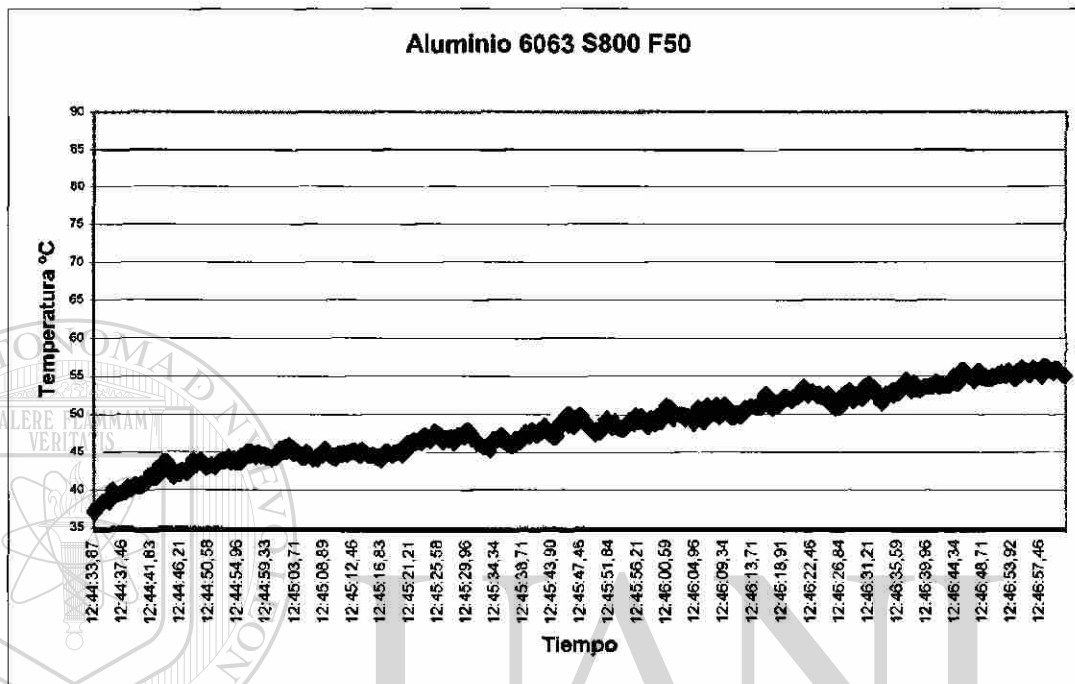
Para cada tipo de material en cada combinación de velocidad y avance de la herramienta de trabajo se midió el promedio de la temperatura durante el recorrido de la herramienta, como se muestra en la figura 7.1 (Obtención de las temperaturas).



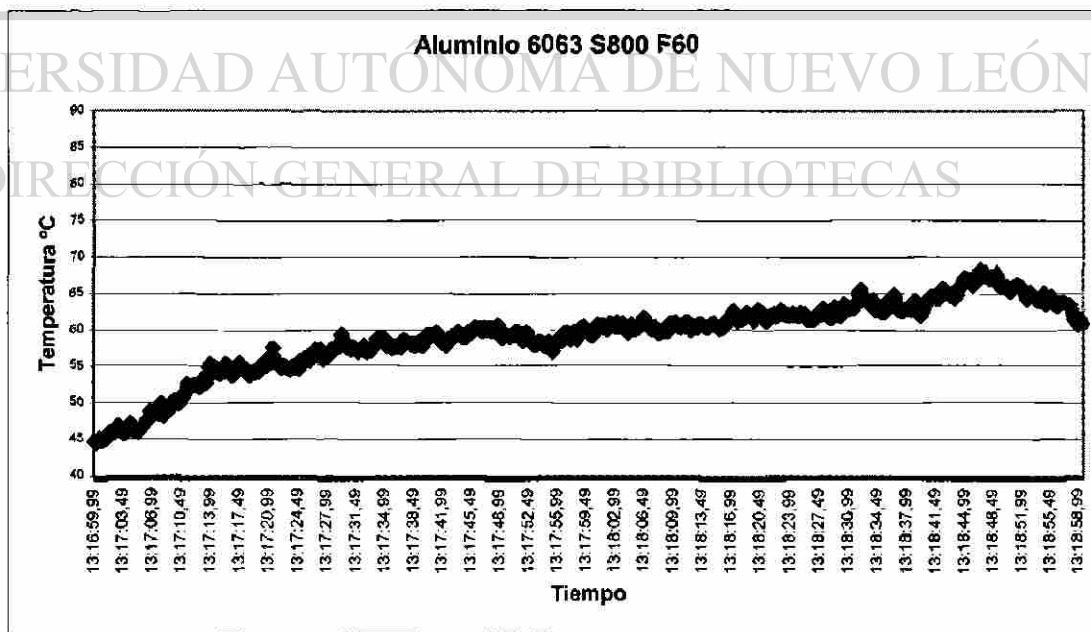
*Figura 7.1 Medición de la temperatura*

A continuación se muestran los resultados obtenidos durante la medición:

**7.1.1 Resultado de temperatura en Aluminio 6063 T5 con una velocidad de corte de 800 RPM.**

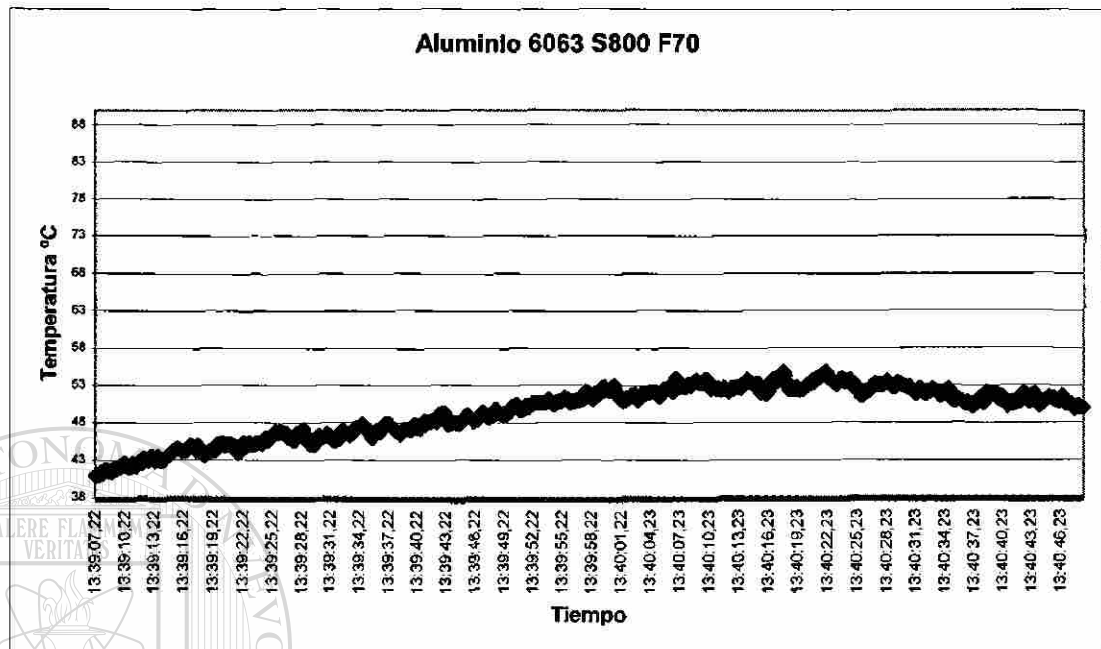


*Figura 7.2 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min*

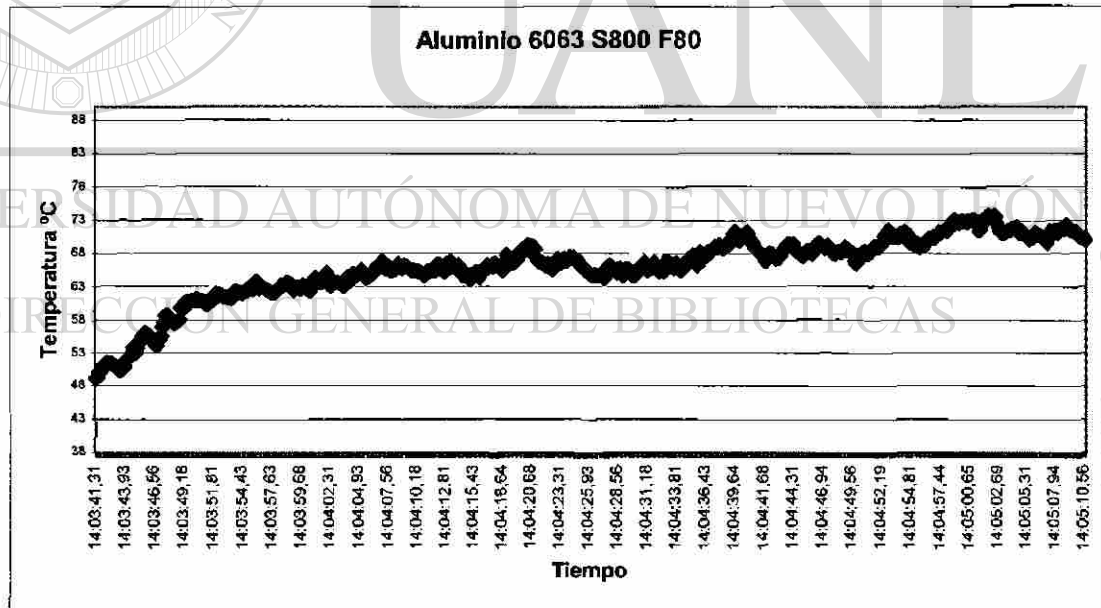


*Figura 7.3 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min*





*Figura 7.4 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min*



*Figura 7.5 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min*

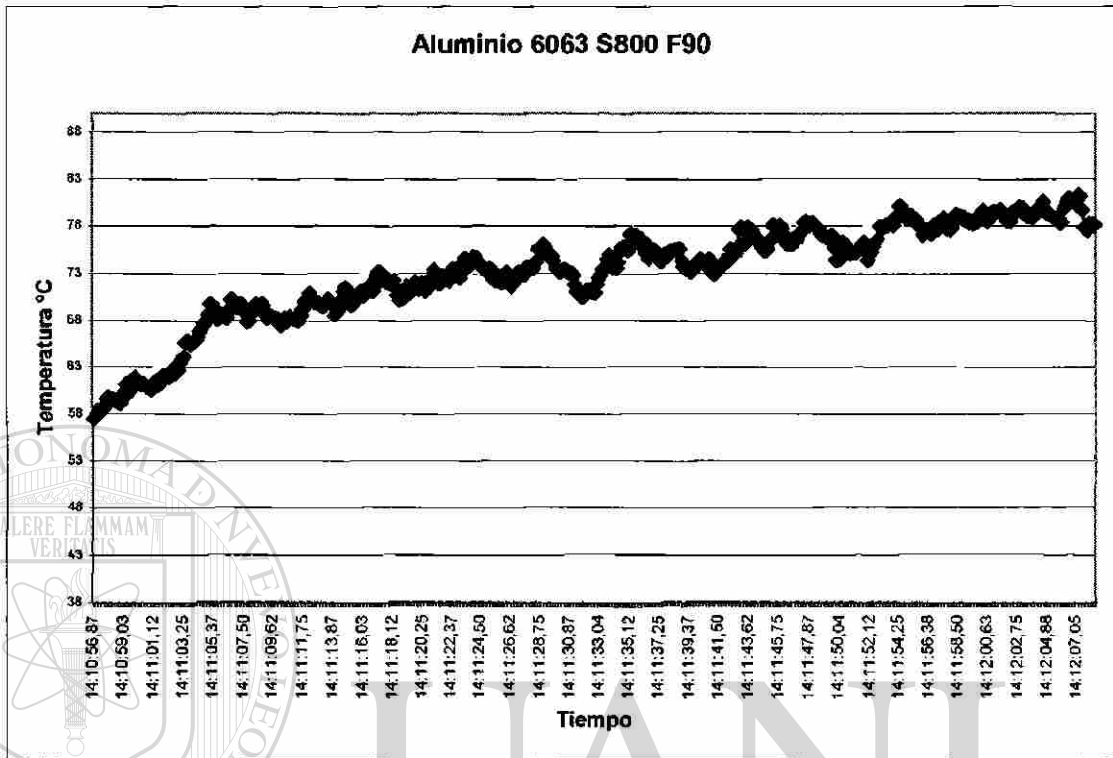


Figura 7.6 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min

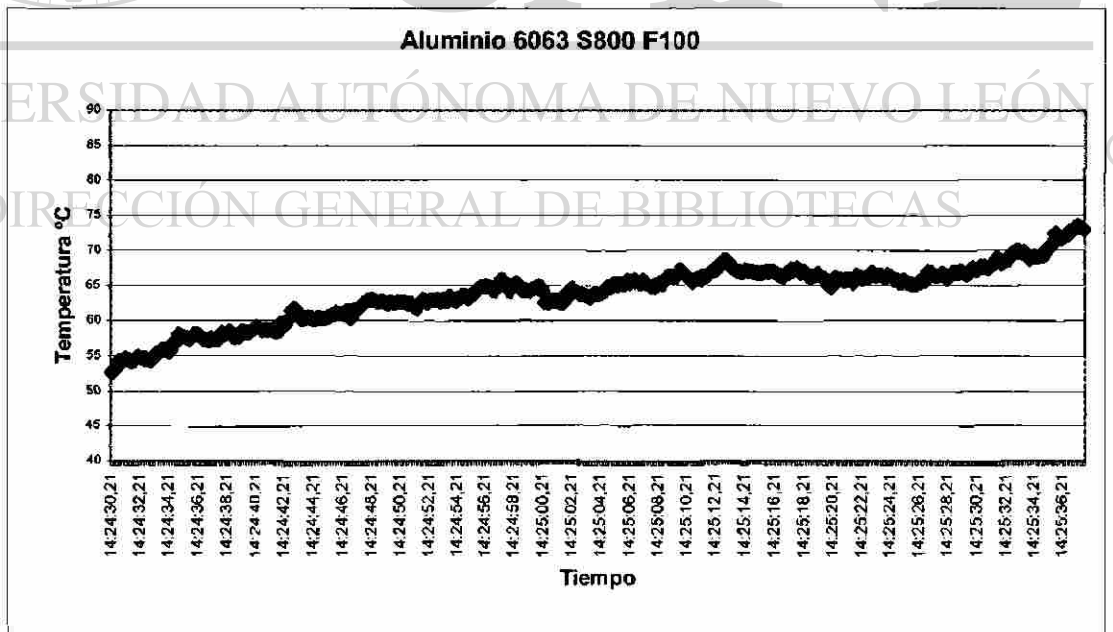


Figura 7.7 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min

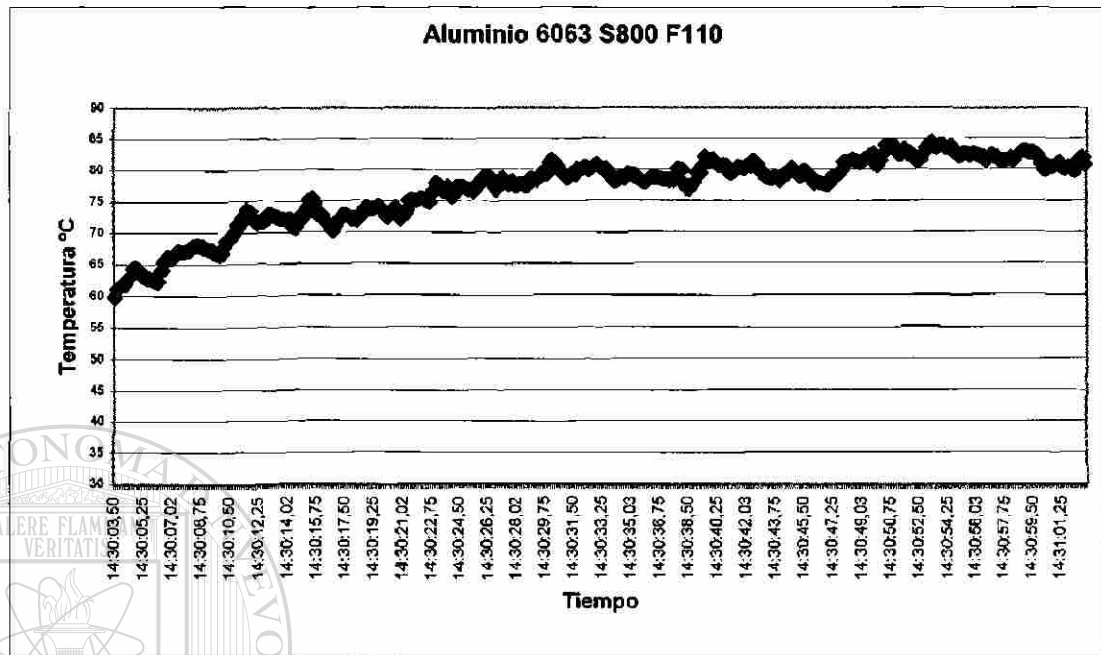


Figura 7.8 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min

**7.1.2 Resultado de temperatura en Aluminio 6063 T5 con una velocidad de corte de 1000 RPM.**

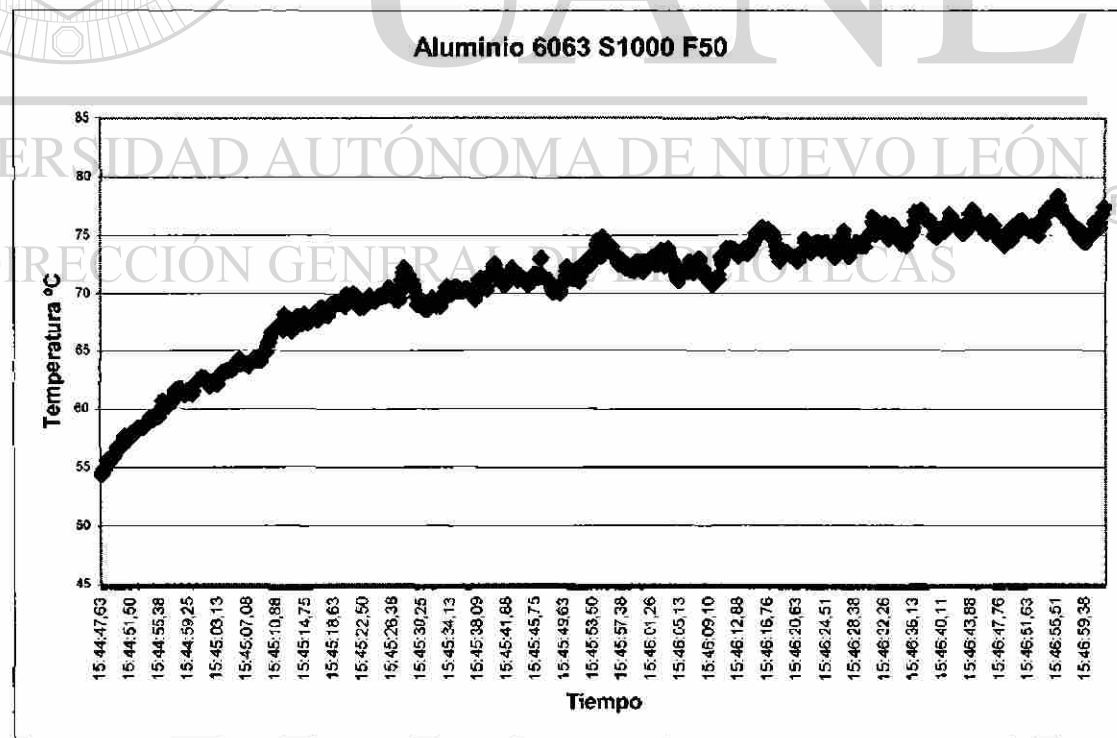


Figura 7.9 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min

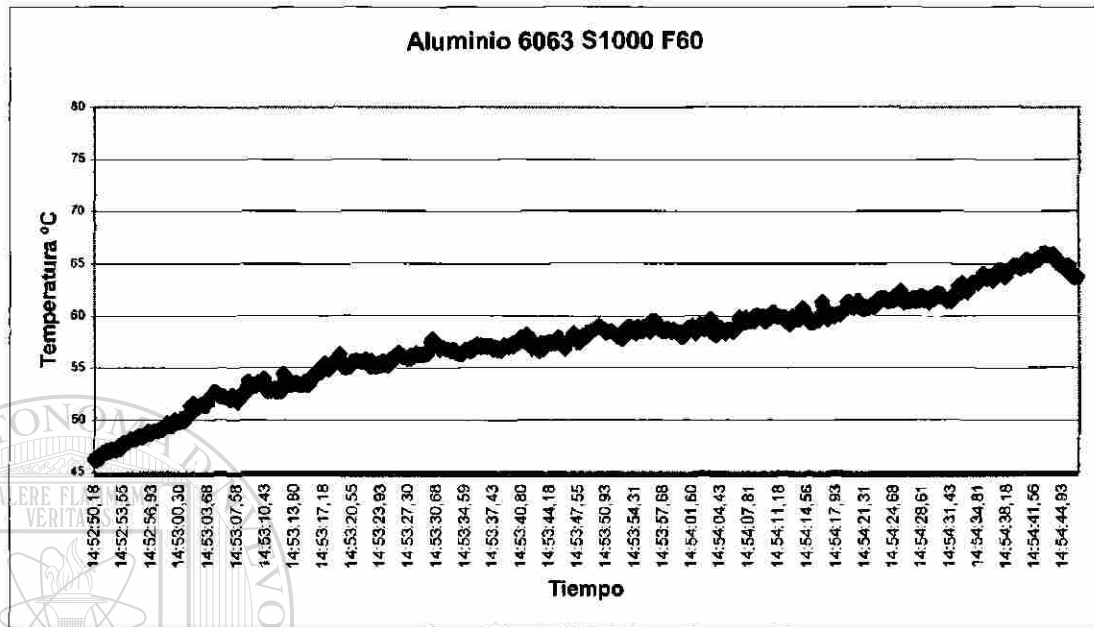


Figura 7.10 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min

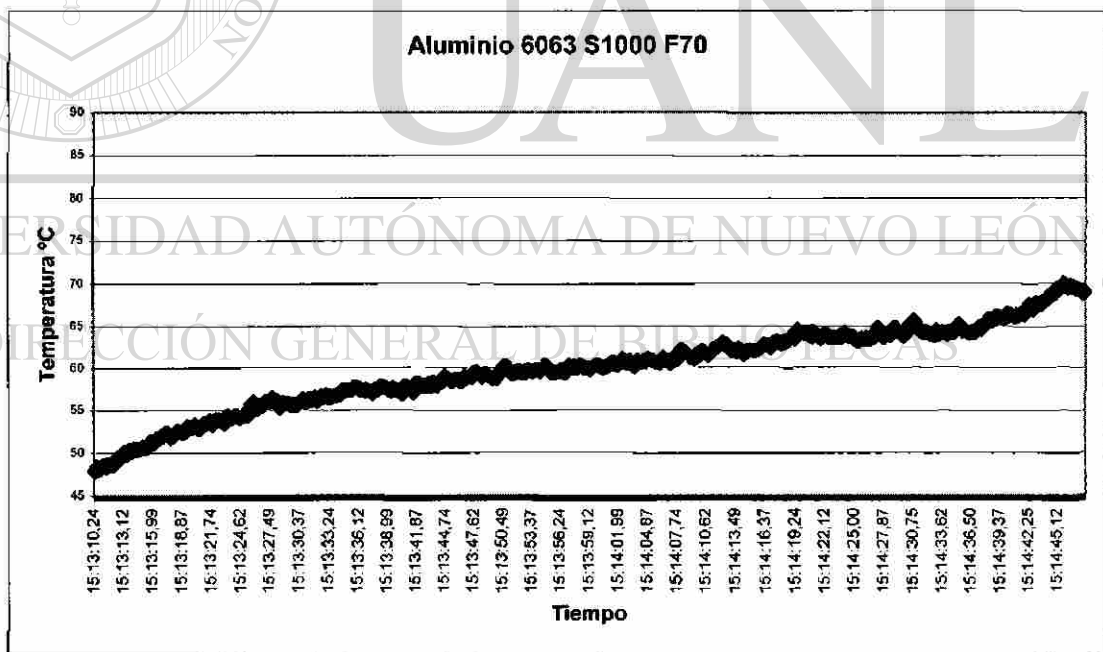


Figura 7.11 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min

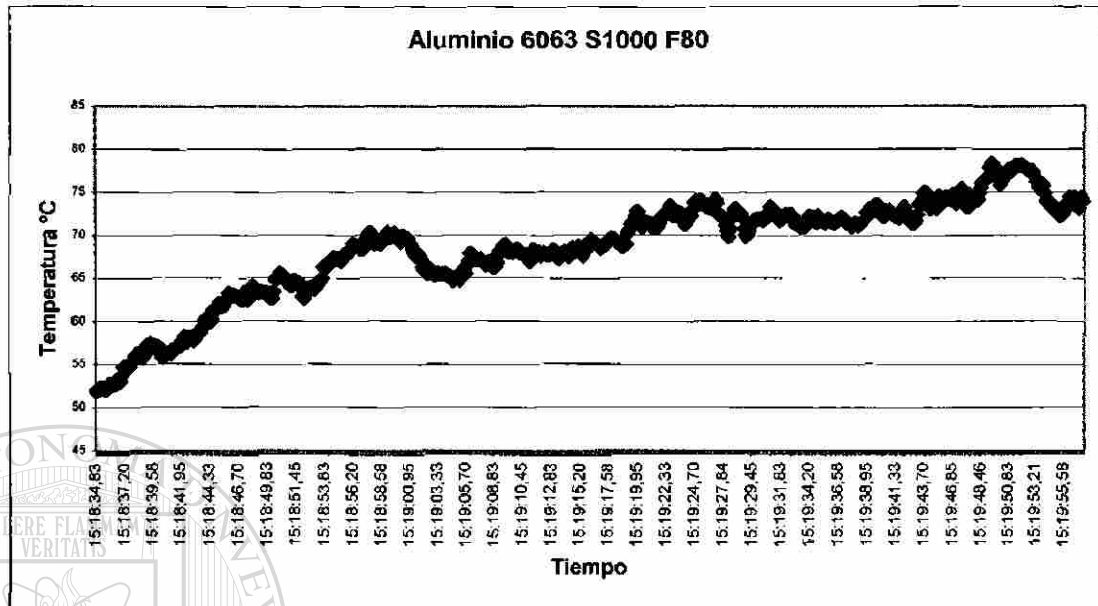


Figura 7.12 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min

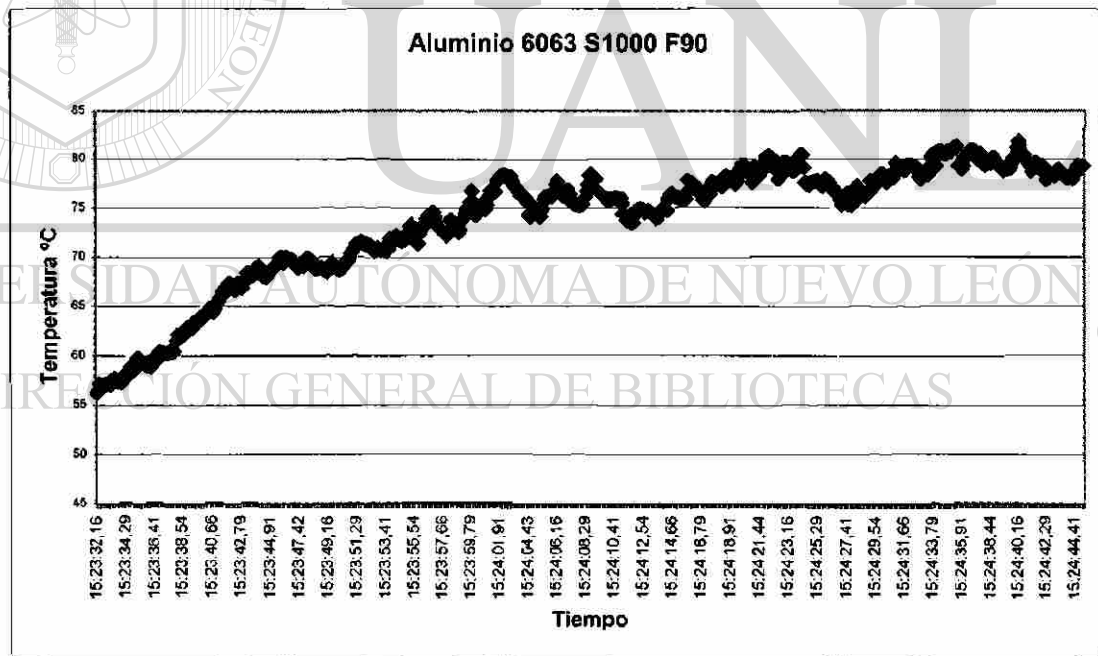


Figura 7.13 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min

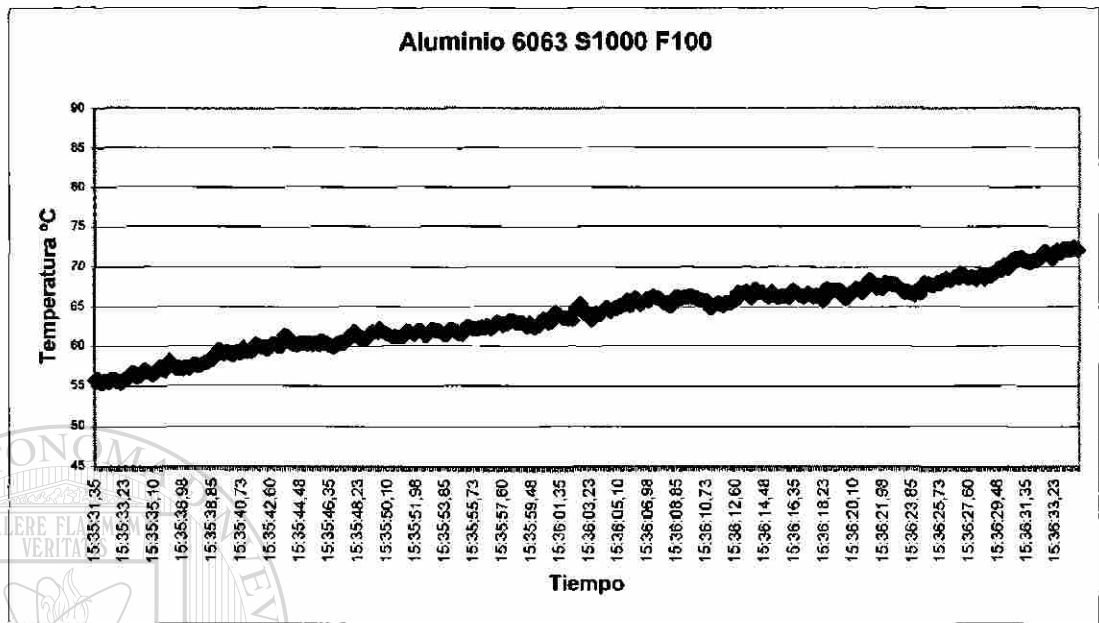


Figura 7.14 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min

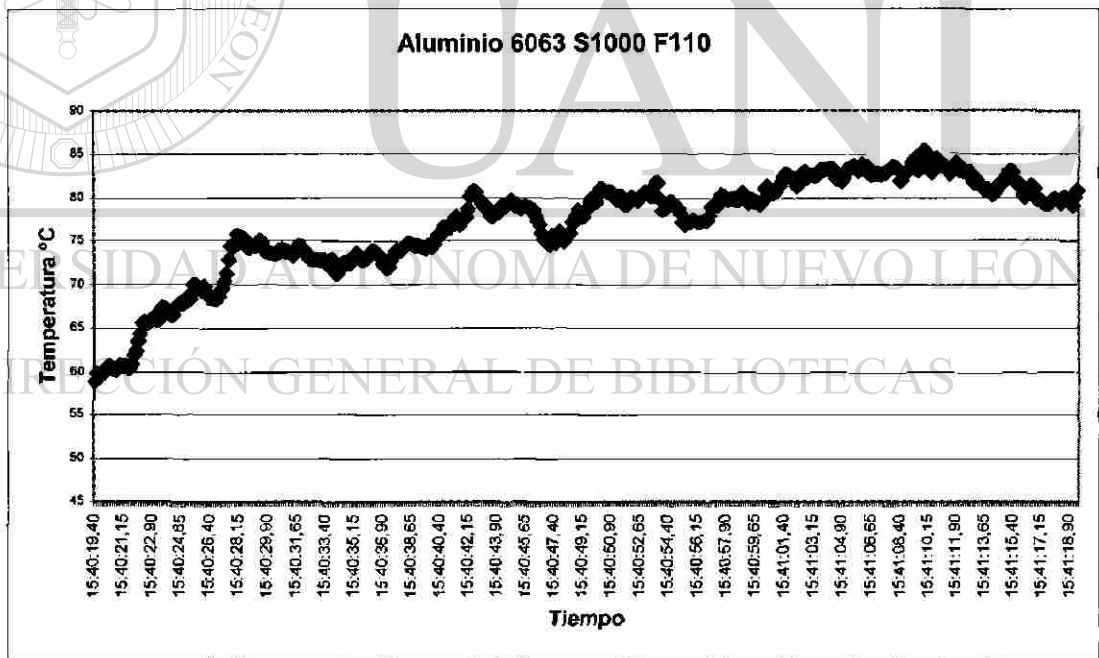
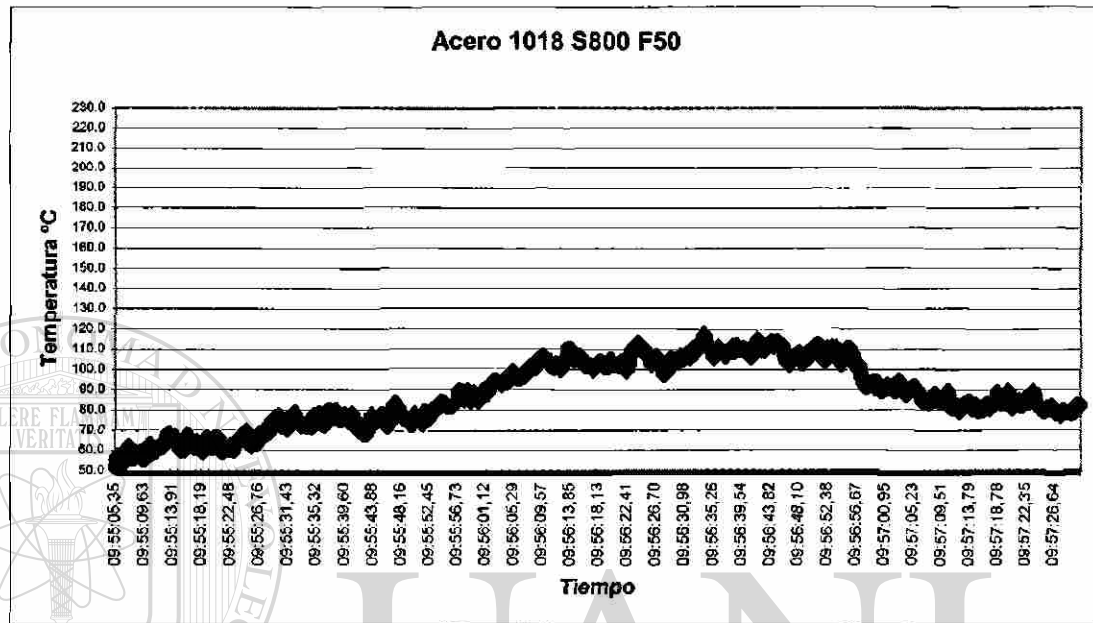
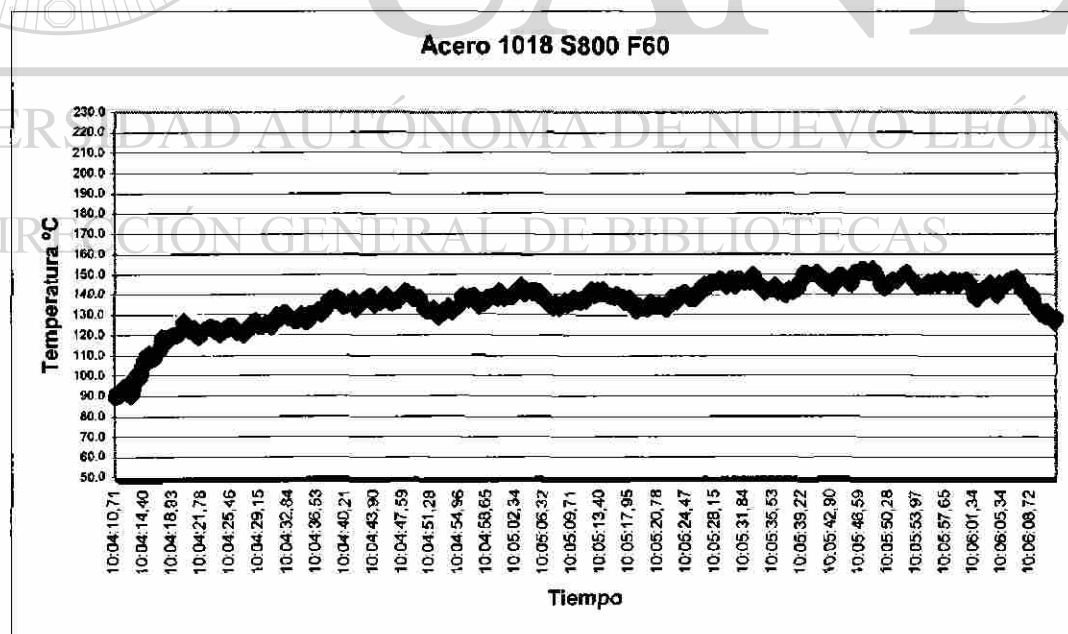


Figura 7.15 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min

**7.1.3 Resultado de temperatura en Acero 1018 con una velocidad de corte de 800 RPM.**



*Figura 7.16 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min*



*Figura 7.17 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min*

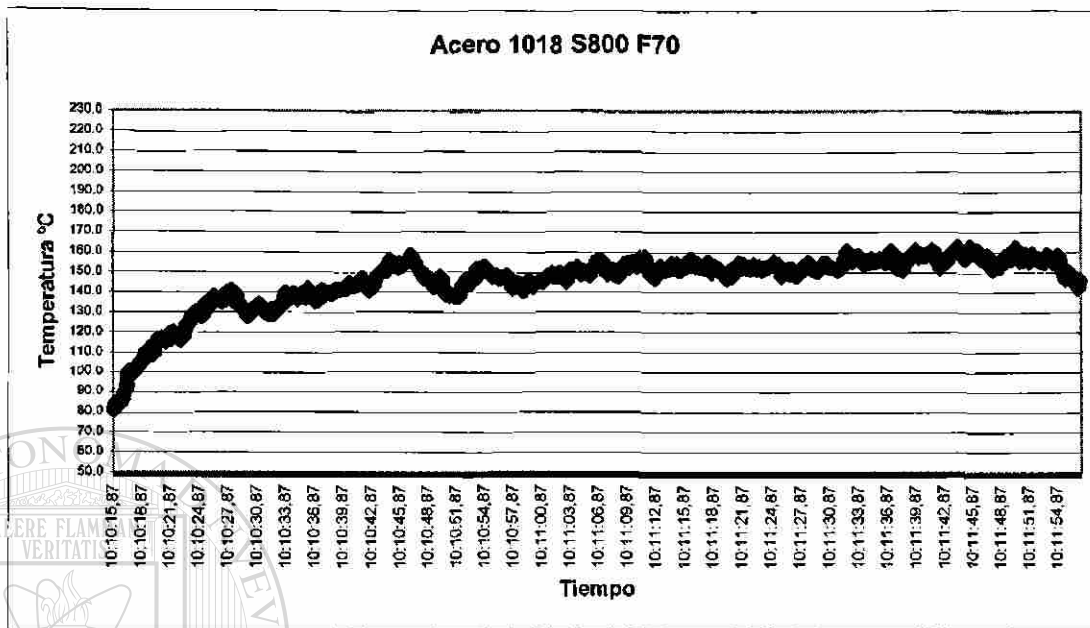


Figura 7.18 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min

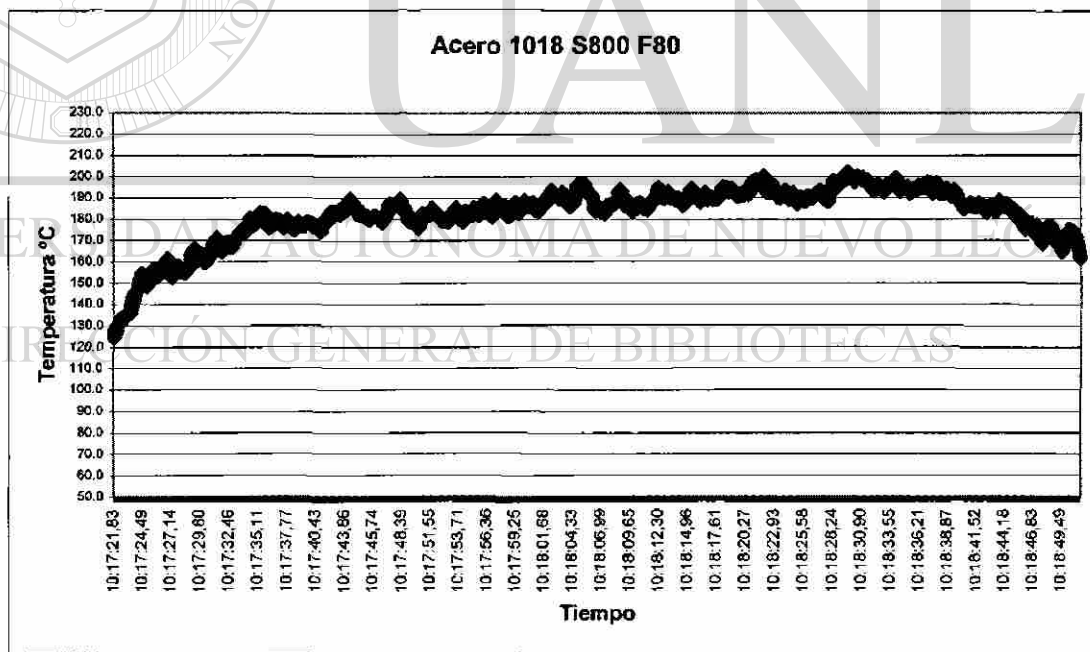


Figura 7.19 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min



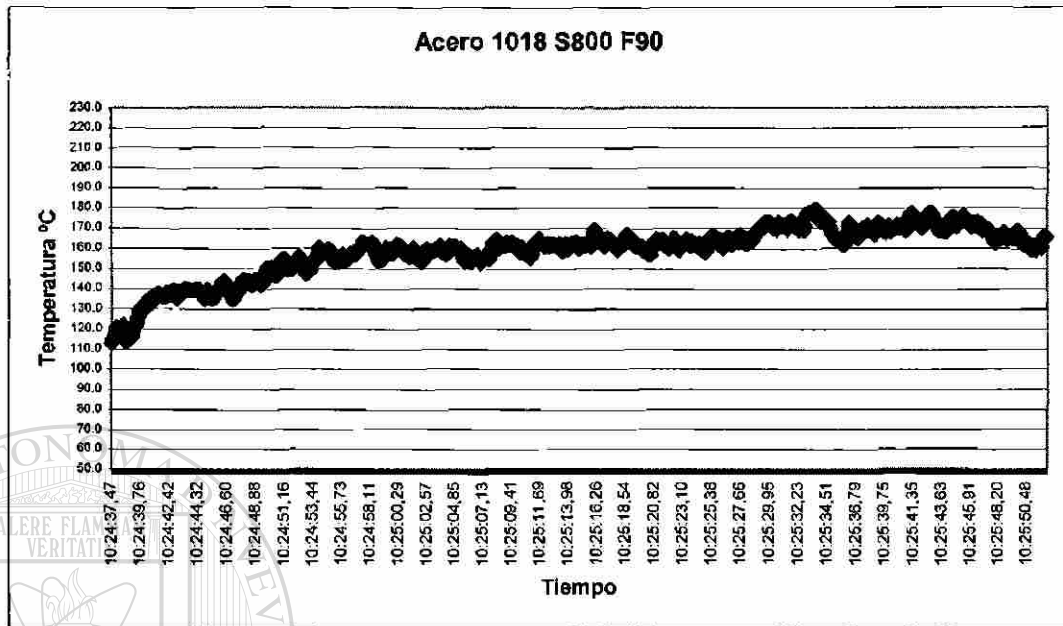


Figura 7.20 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min

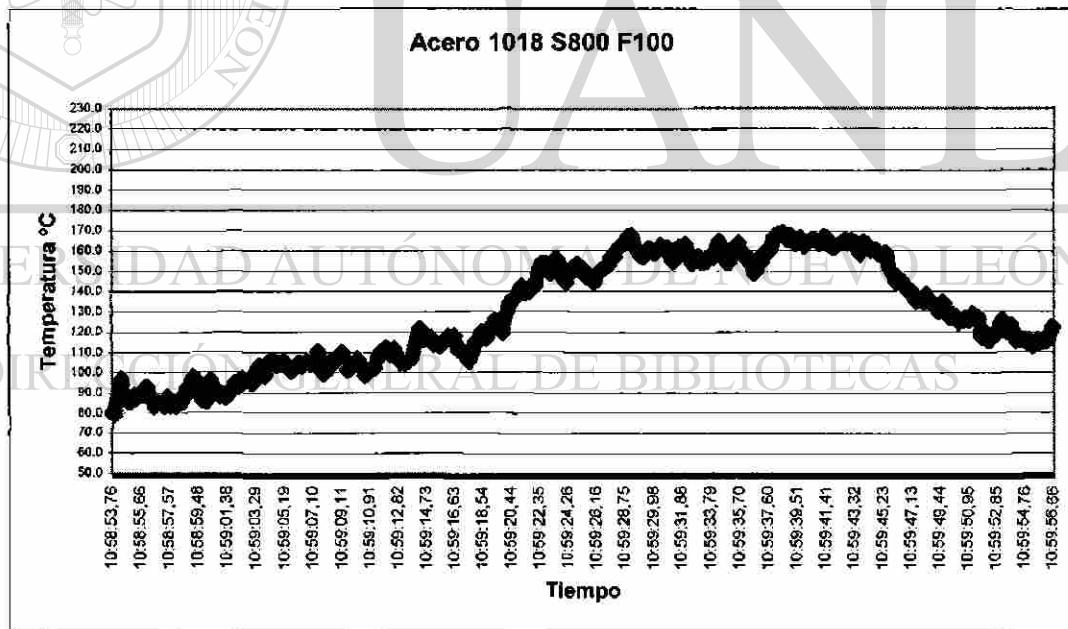


Figura 7.21 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min

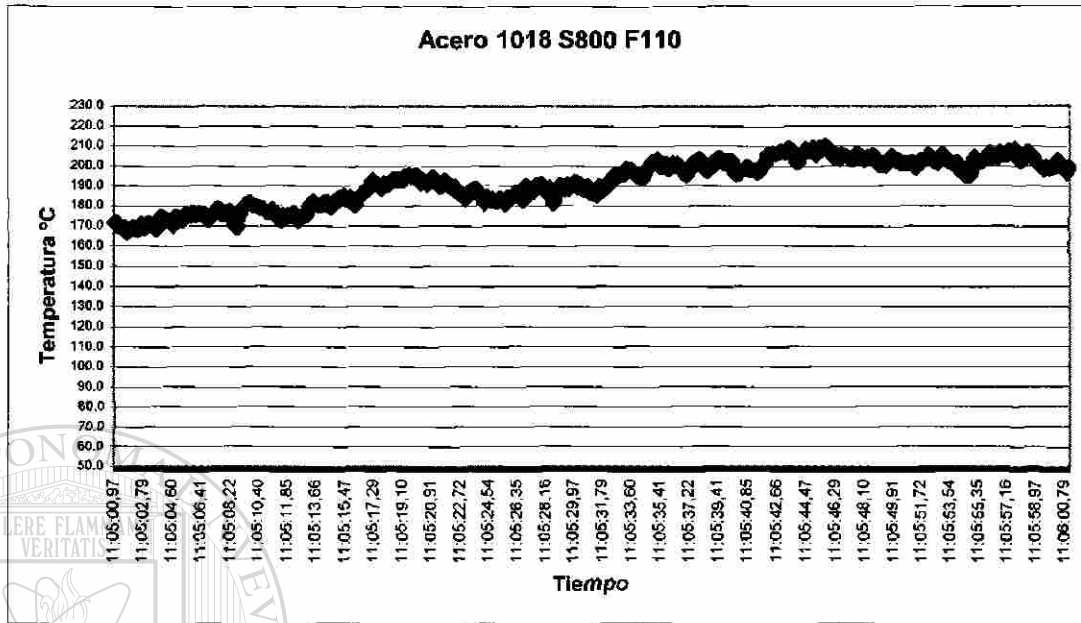


Figura 7.22 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min

**7.1.4 Resultado de temperatura en Acero 1018 con una velocidad de corte de 1000 RPM.**

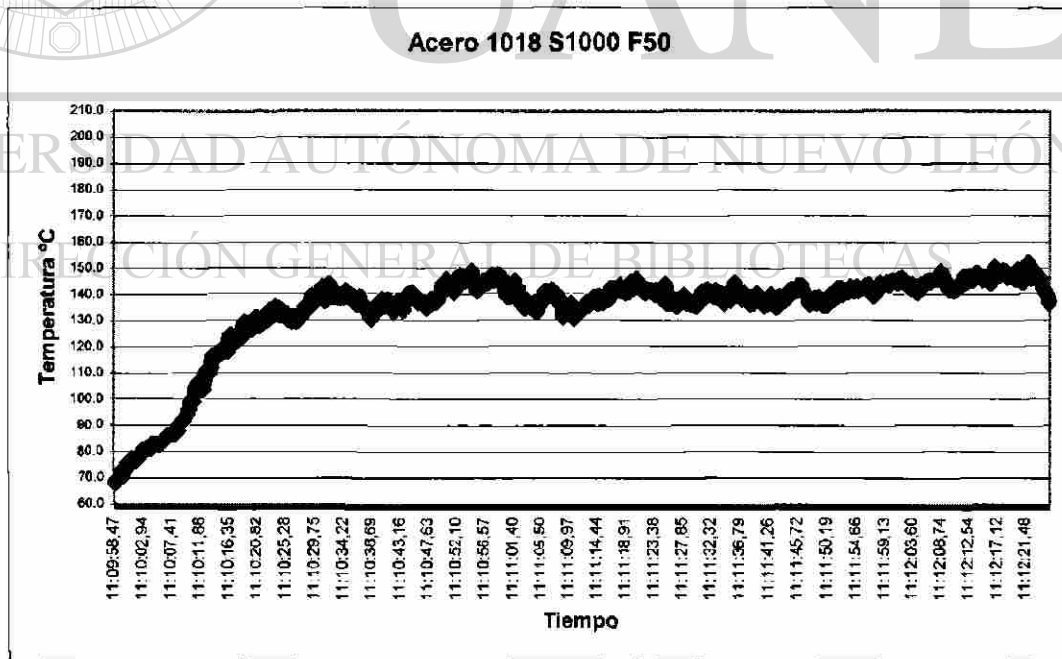


Figura 7.23 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min

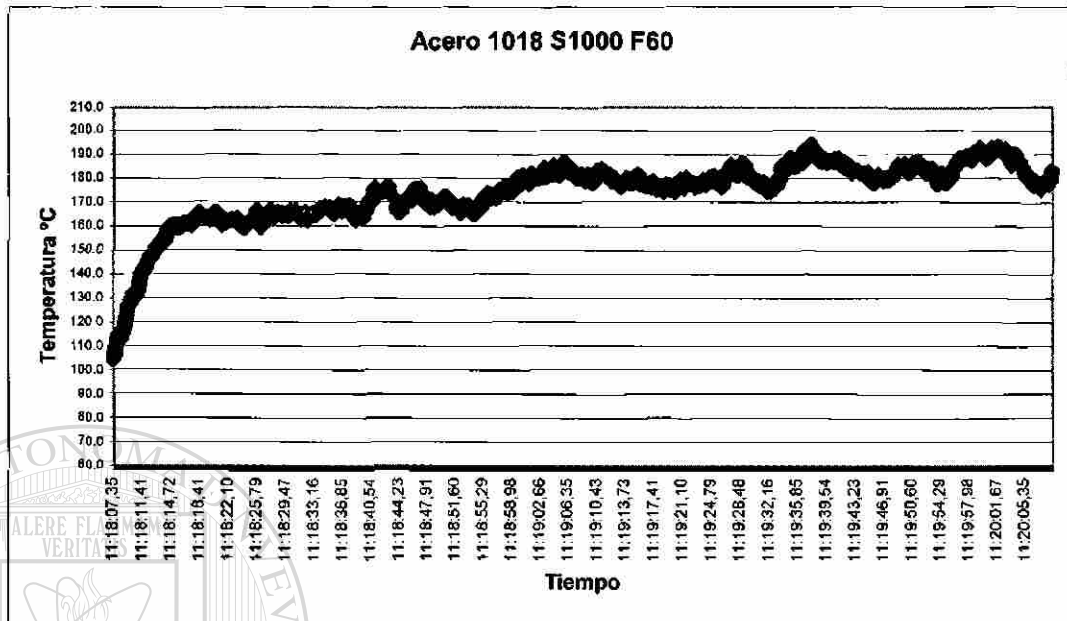


Figura 7.24 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min

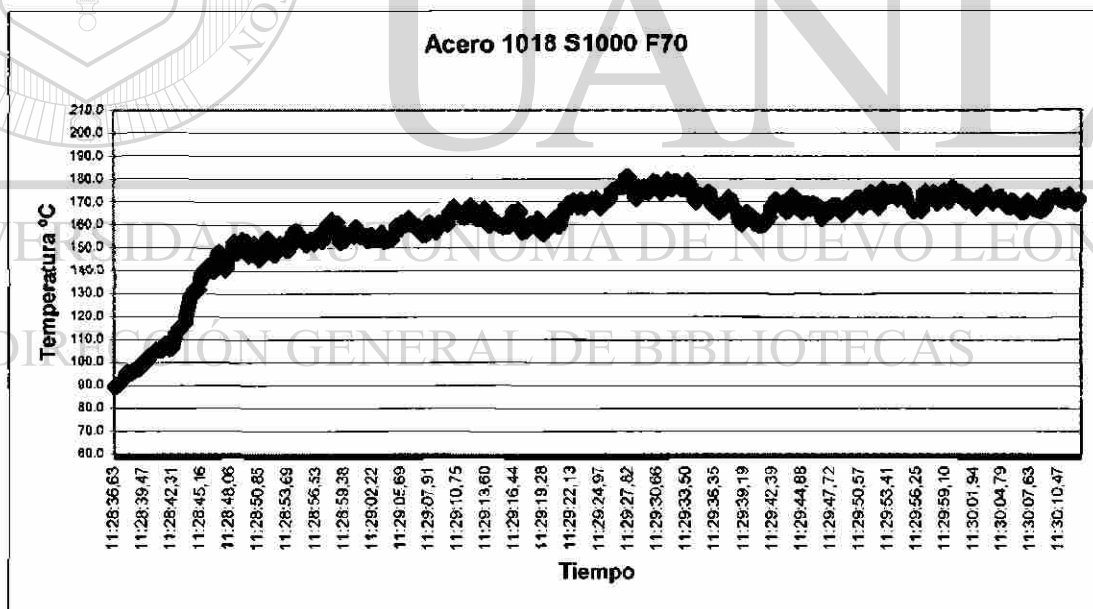


Figura 7.25 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min

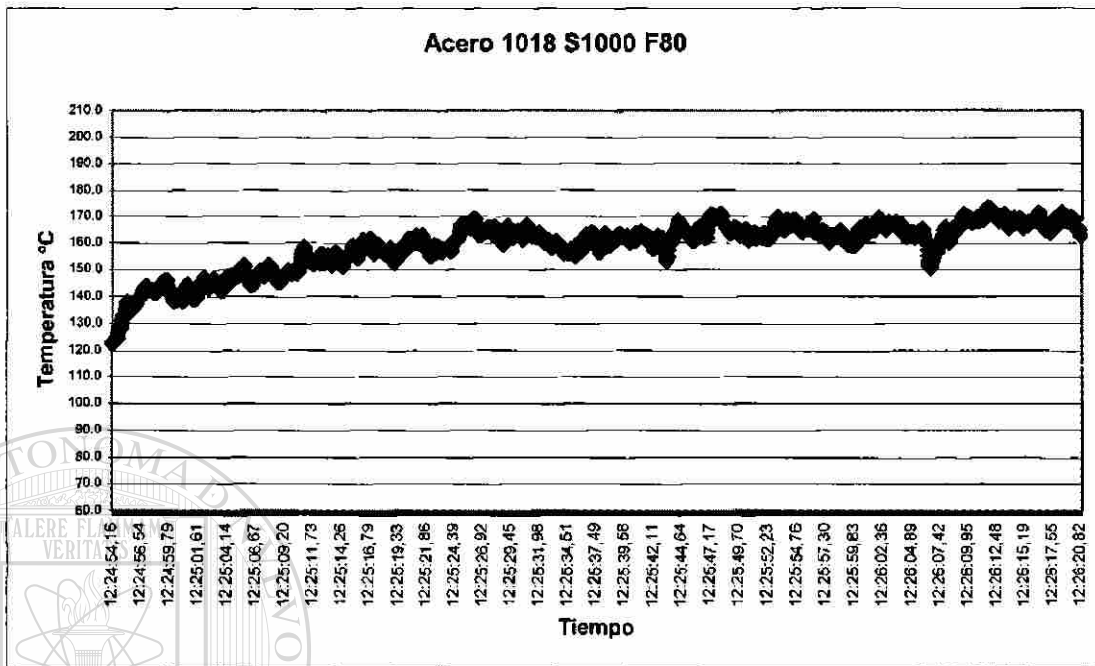


Figura 7.26 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min

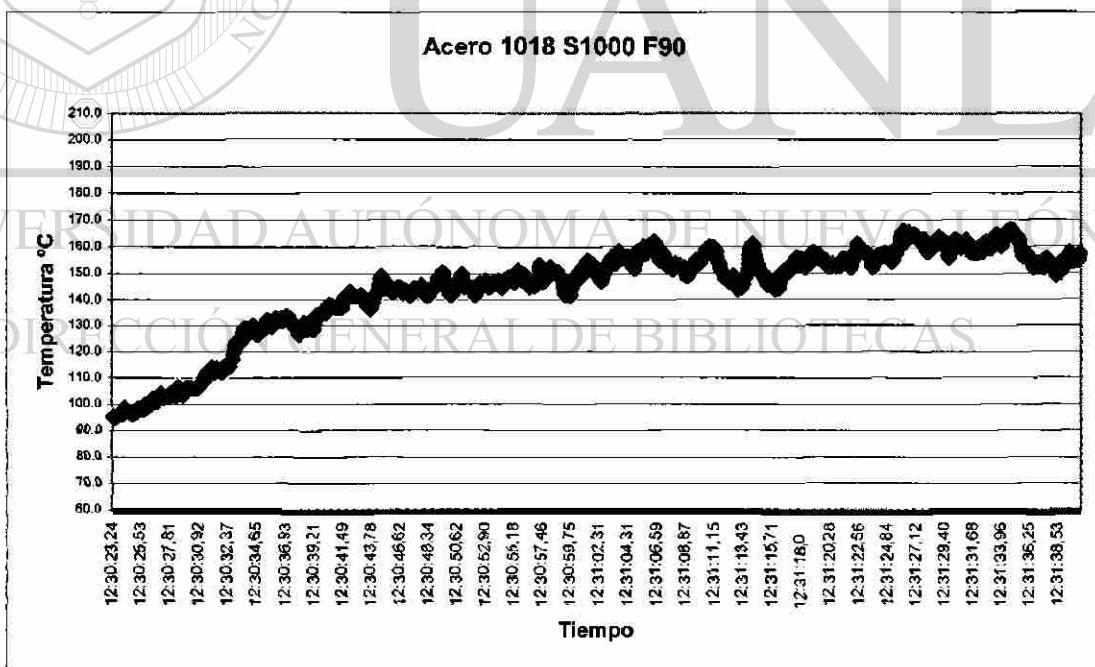


Figura 7.27 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min

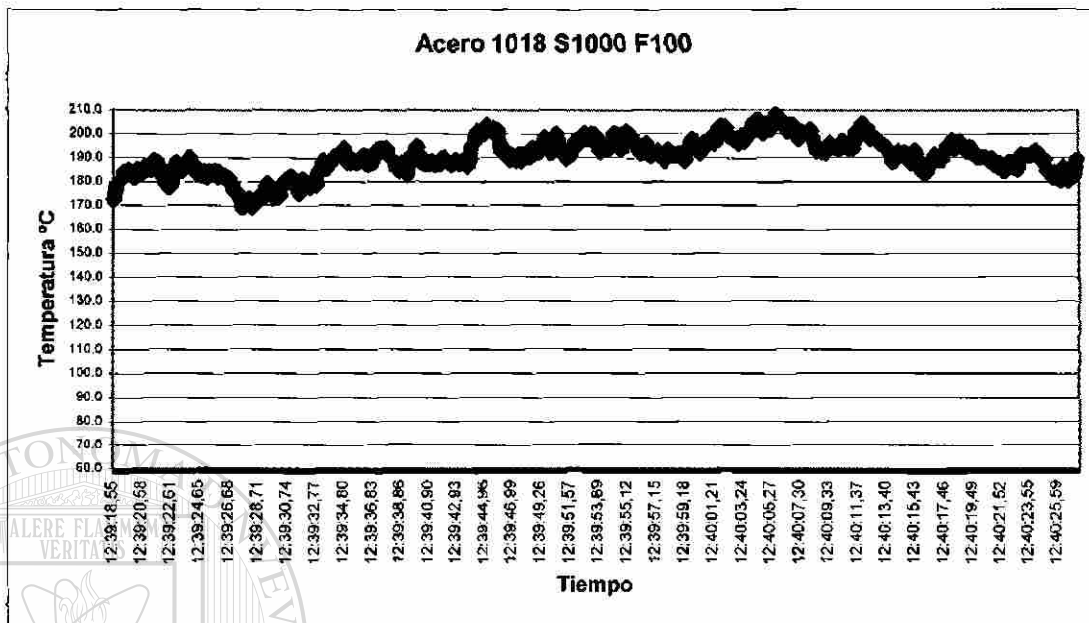


Figura 7.28 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min

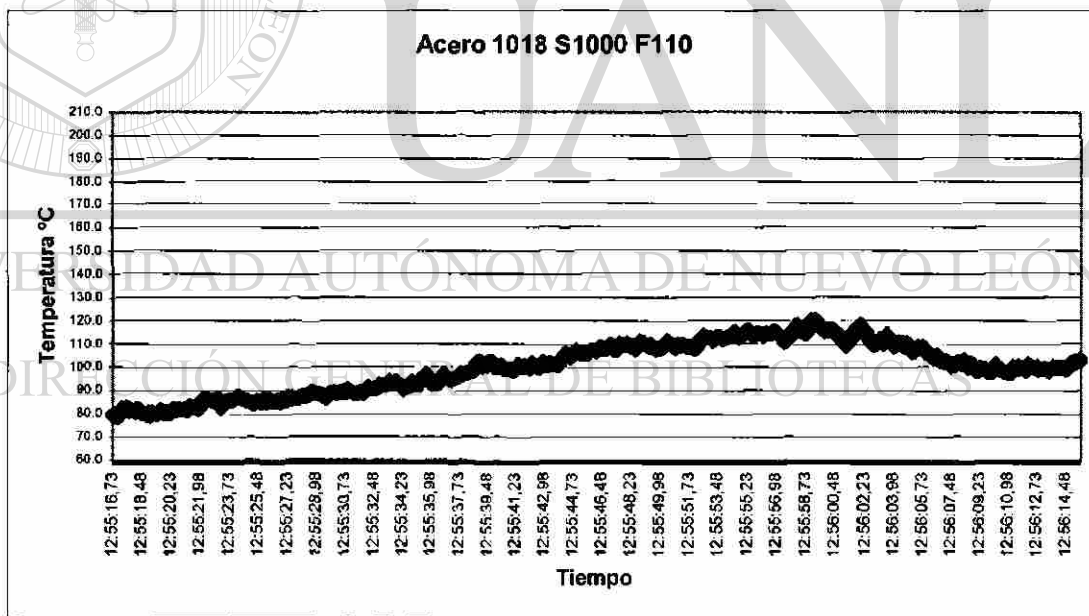
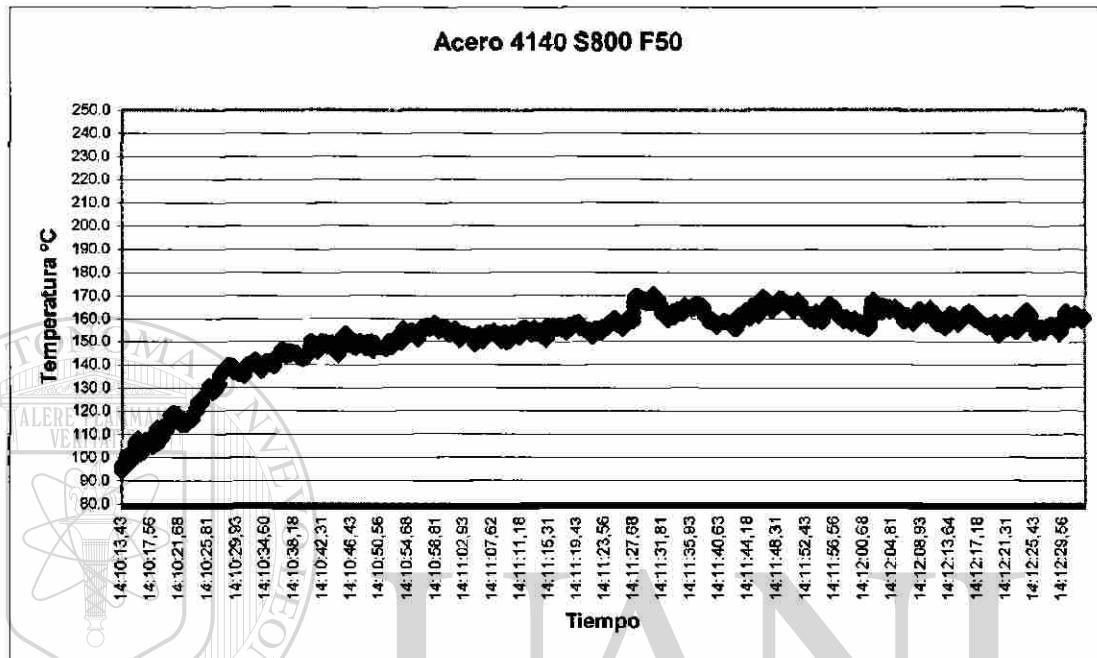
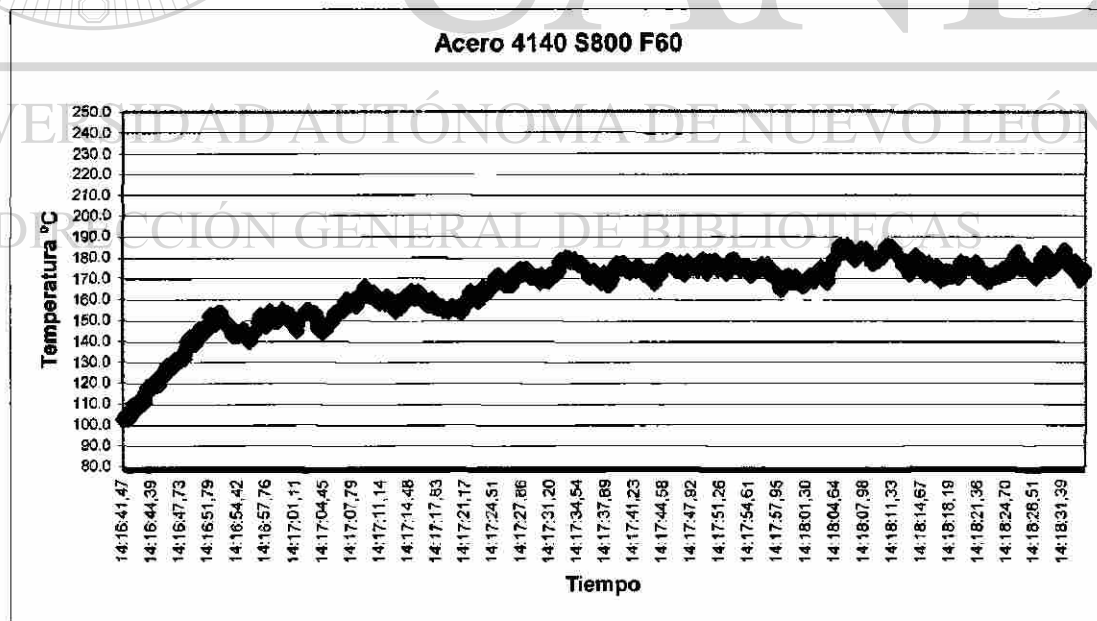


Figura 7.29 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min

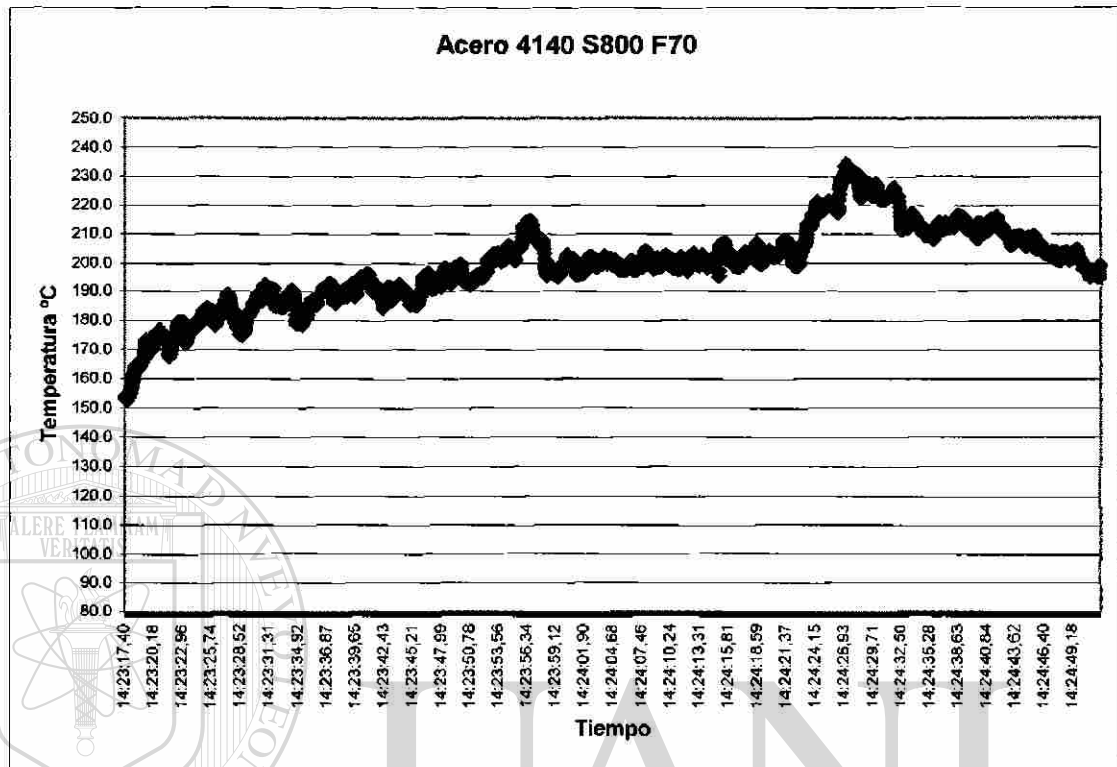
### 7.1.5 Resultado de temperatura en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de corte de 800 RPM.



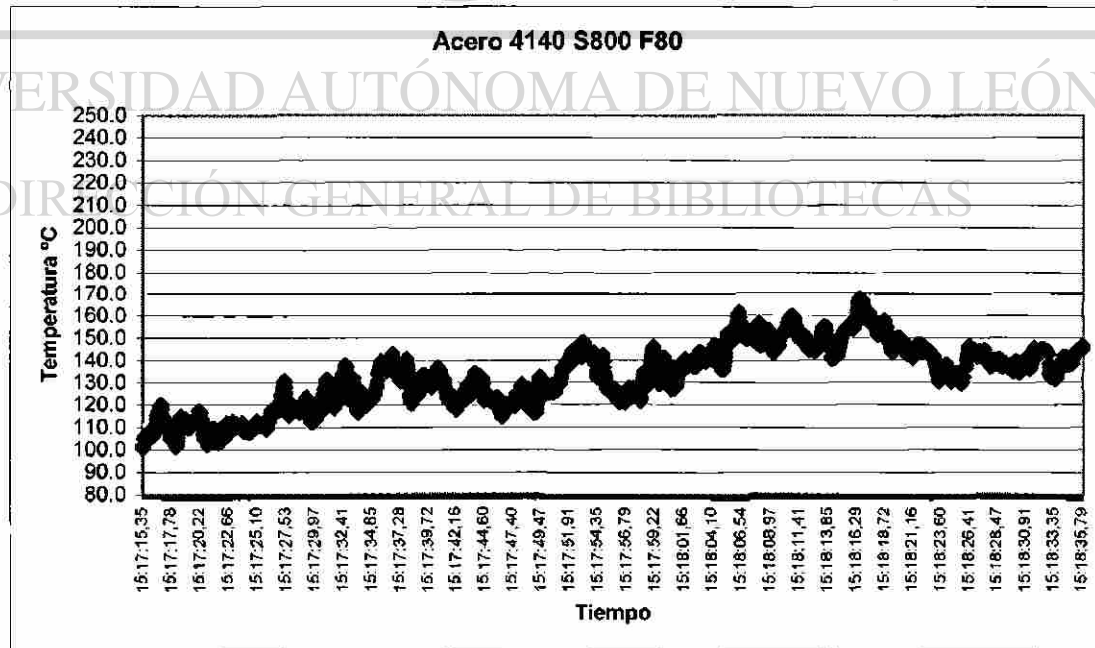
**Figura 7.30 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min**



**Figura 7.31 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min**



**Figura 7.32 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min**



**Figura 7.33 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min**

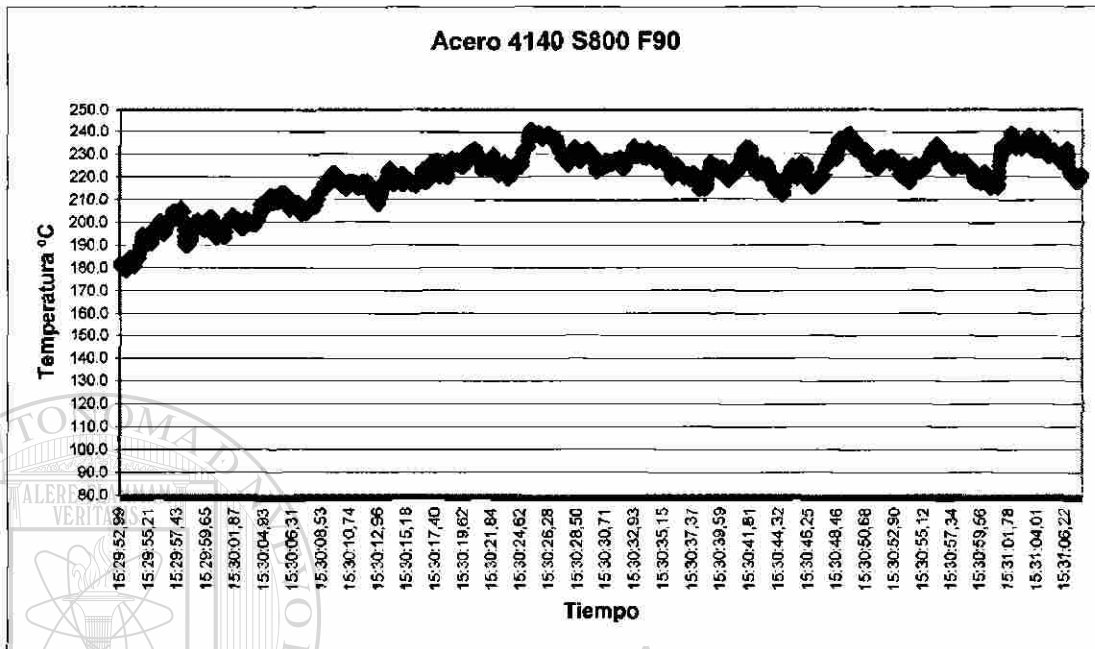


Figura 7.34 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min

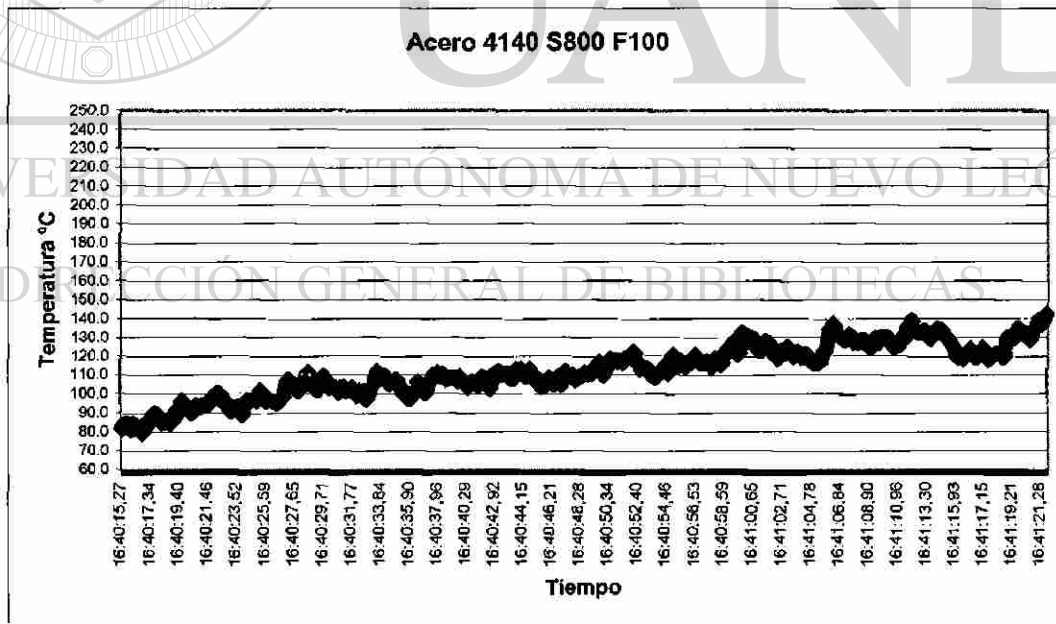


Figura 7.35 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min



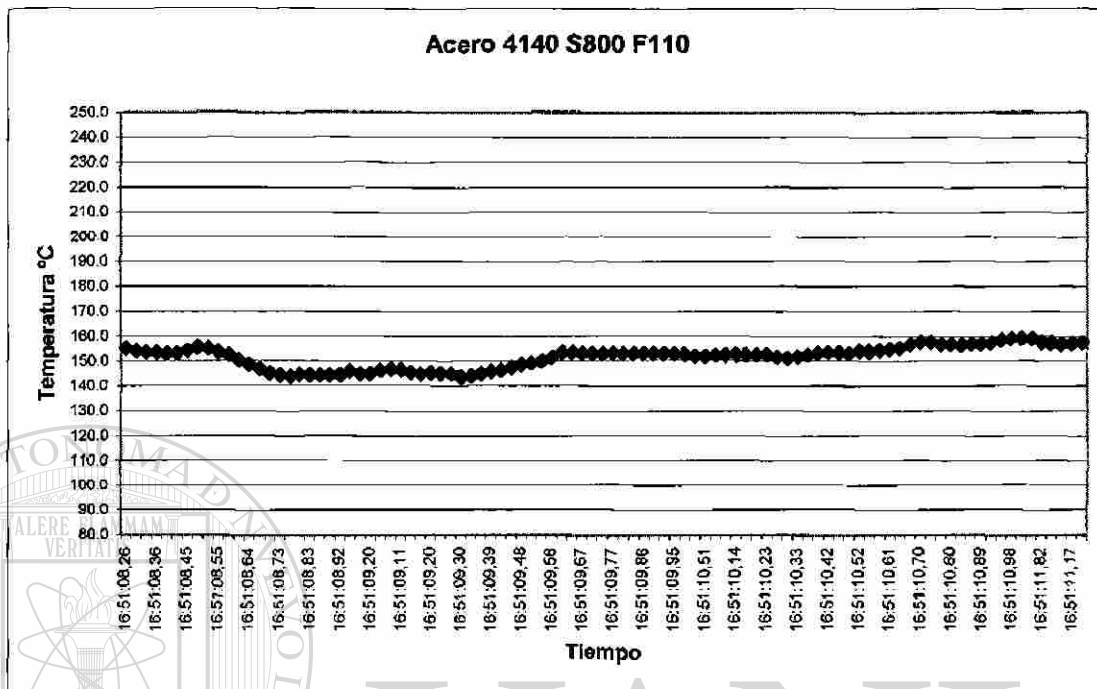


Figura 7.36 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min

**7.1.6 Resultado de temperatura en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de corte de 1000 RPM.**

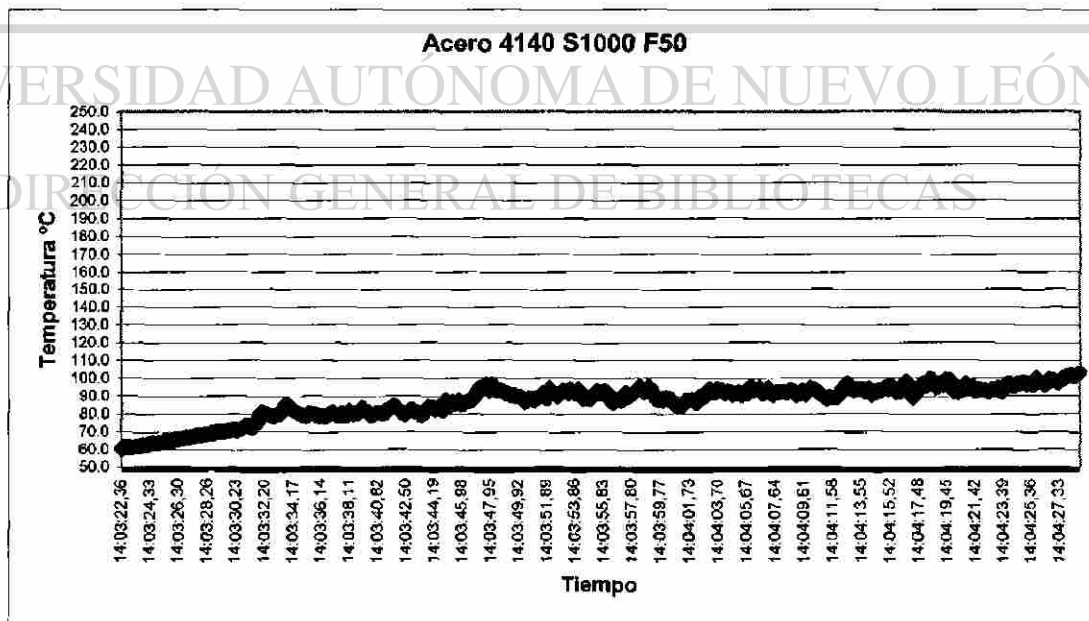


Figura 7.37 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min

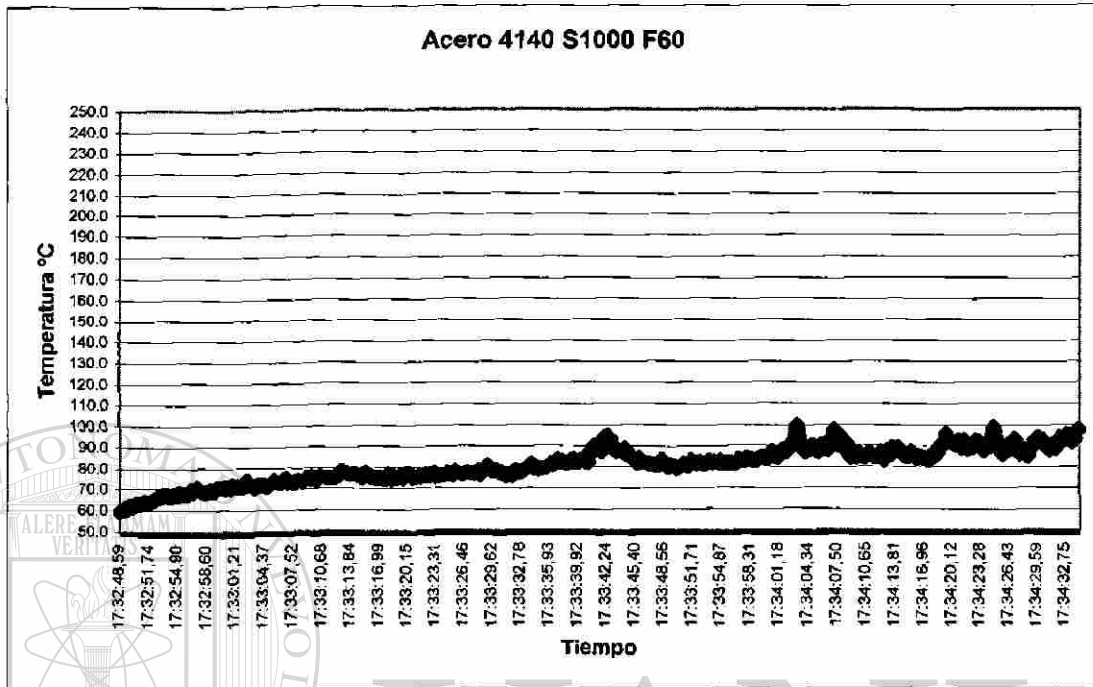


Figura 7.38 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min

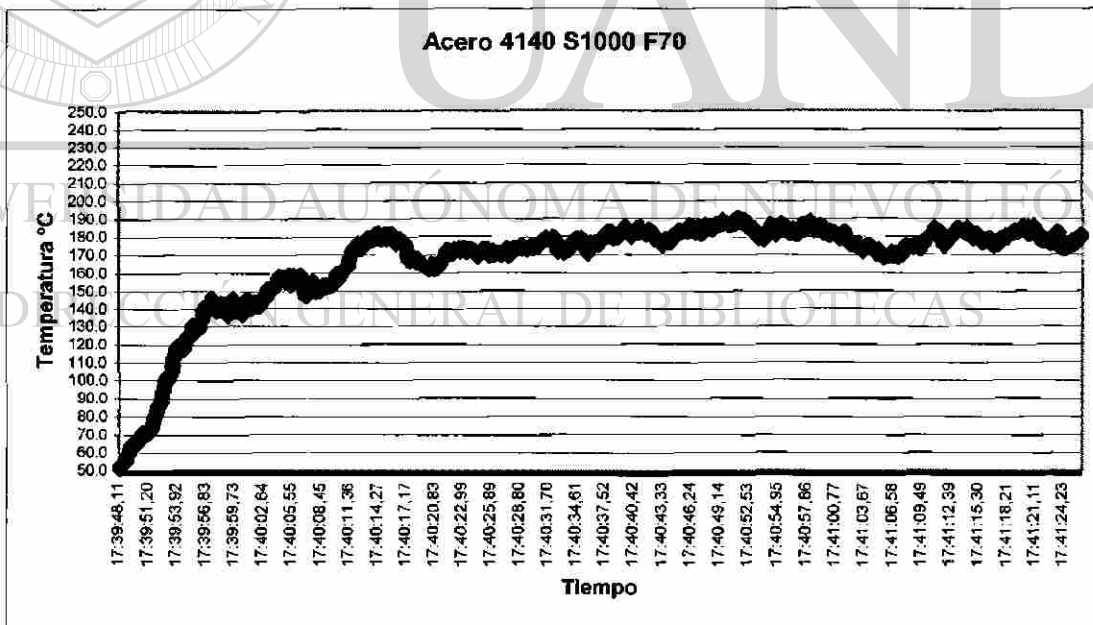
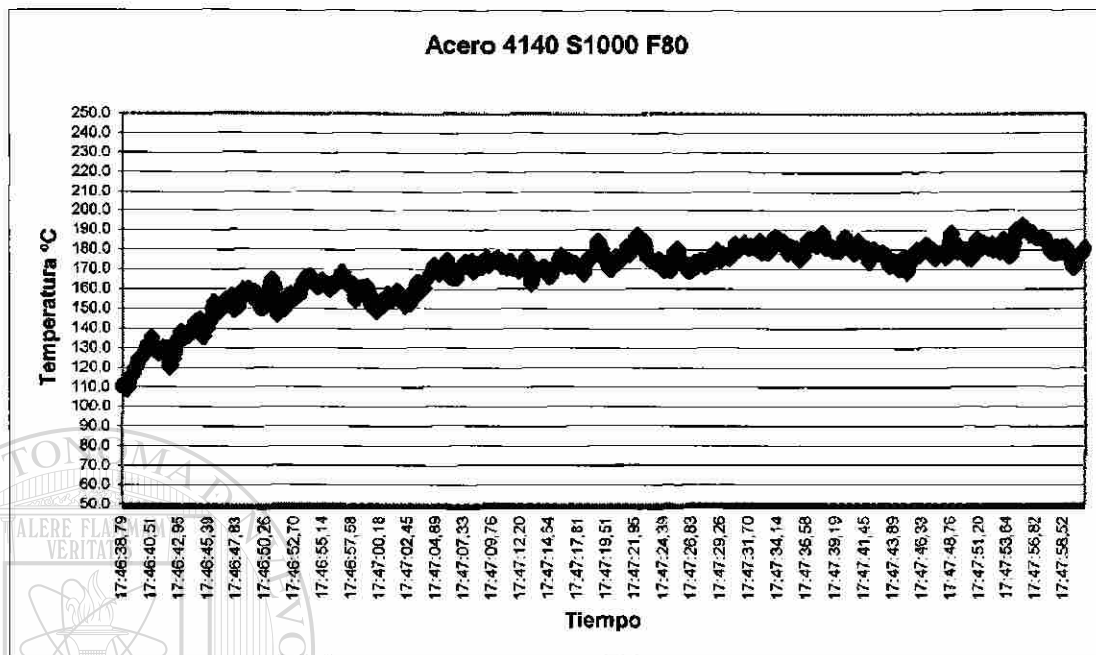
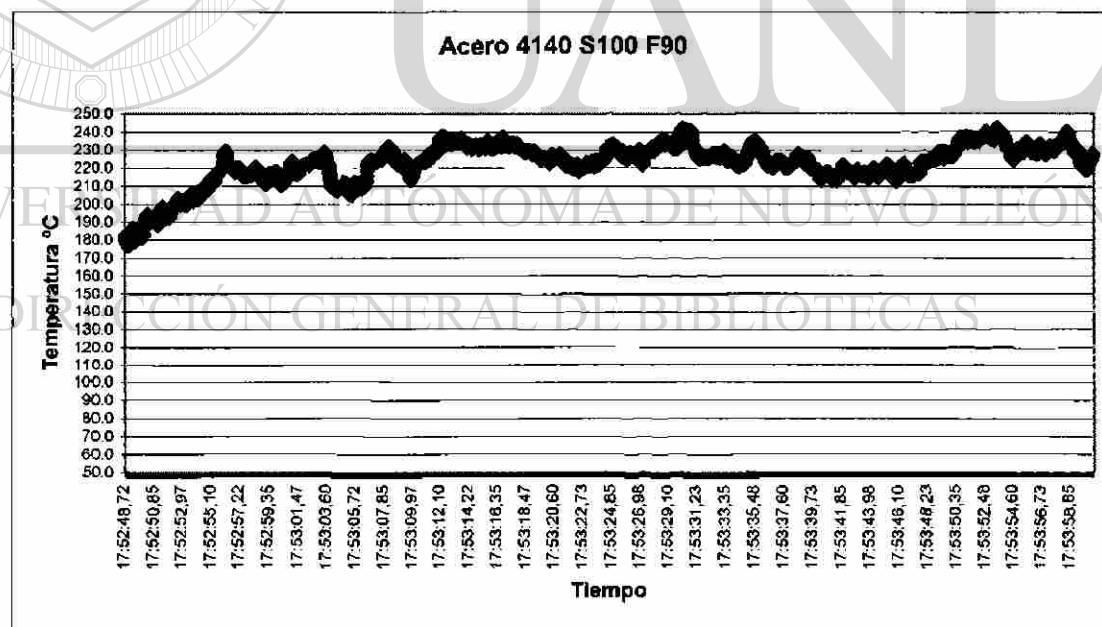


Figura 7.39 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min



**Figura 7.40 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min**



**Figura 7.41 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min**

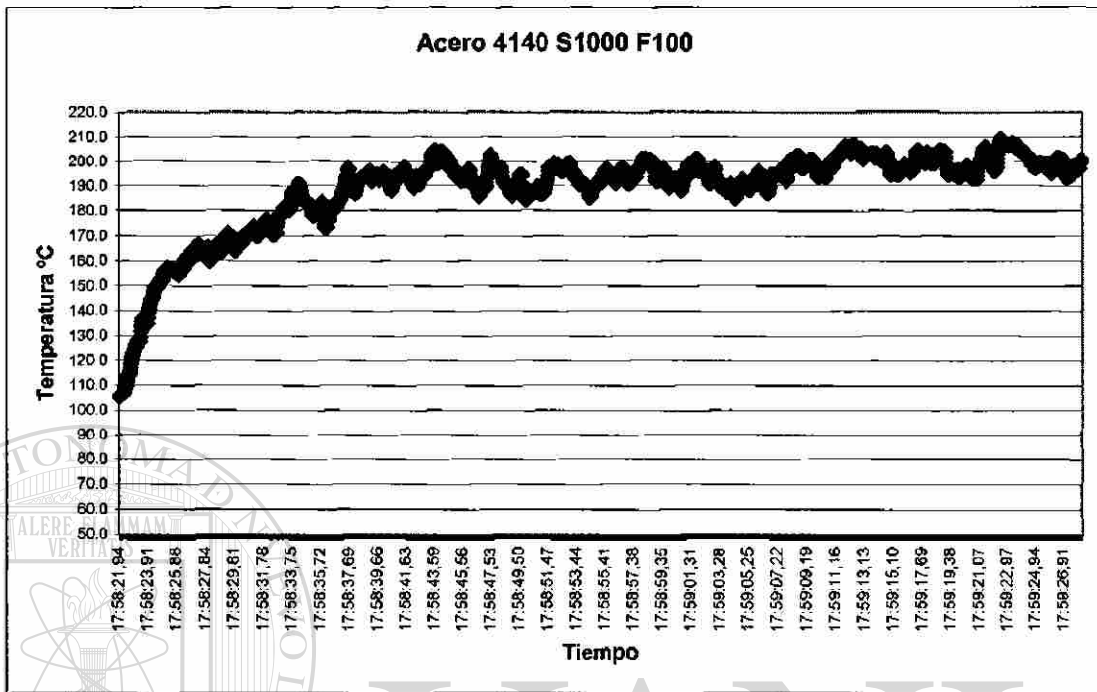


Figura 7.42 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min

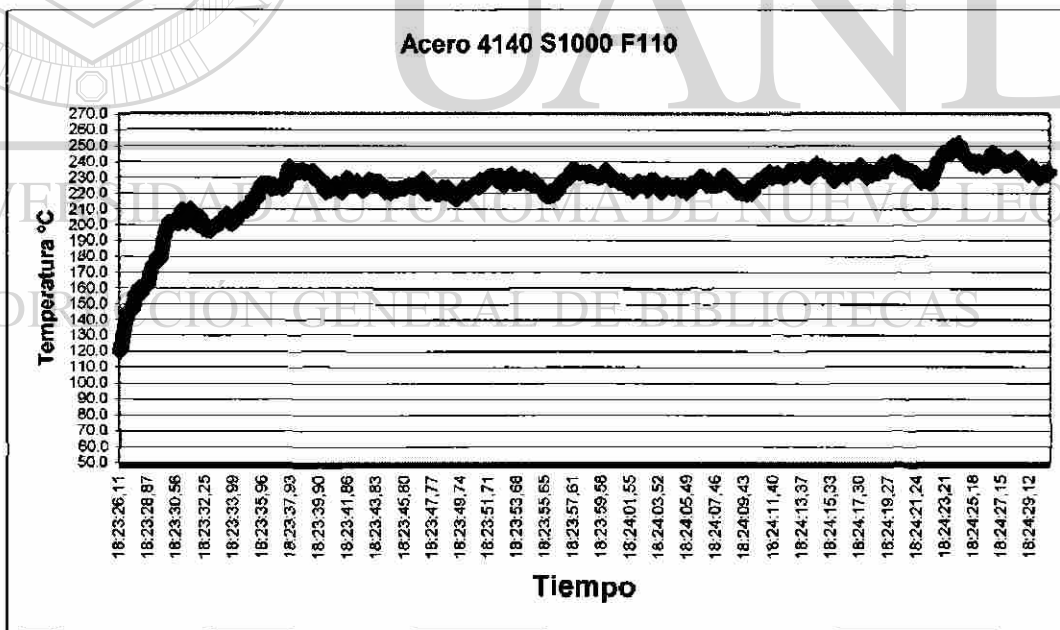


Figura 7.43 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min

## 7.2 Discusión de los resultados de temperatura.

En el caso del aluminio 6063 T5 para una velocidad de giro de S800 RPM la medición de la temperatura que se muestra en las figuras 7.2 a la 7.8, se comporta en línea ascendente en cada uno de los diferentes valores de avance, desde 40°C hasta 85°C, pero en los avances F90 y F110 mm/min se observan algunos descensos durante el periodo de tiempo del maquinado y para la velocidad de giro de S1000 RPM en las figuras 7.9 a la 7.15, el comportamiento de la temperatura es muy similar, ascendiendo en los intervalos de temperatura de 55°C hasta 85°C, en los avances F80, F90 y F110 mm/min se observan también algunos descensos en la temperatura en el lapso de operación del maquinado. Los rangos de temperatura aumentan en relación con el avance para las dos velocidades de giro, solamente en el avance F70 mm/min con S800 RPM y en una F60 y F100 mm/min con S1000 RPM se observa un descenso en el rango de temperatura.

Para el acero 1018 con una velocidad de giro de S800 RPM los resultados de la temperatura se observan en las figuras 7.16 a la 7.22, la variación de la temperatura es más estable en la mayoría de los valores de avance, el rango oscila de 60°C hasta 210°C, en los avances F50 y F100 mm/min la temperatura se mantiene en el límite inferior al inicio de la operación de maquinado y después aumenta de manera considerable, para los demás valores de avance, observando un aumento gradual en la temperatura; ahora para una S1000 RPM como se puede ver en las figuras 7.23 a la 7.29, la temperatura tiene también un incremento gradual, iniciando desde 85°C hasta 209°C, con excepción del avance F100 mm/min donde en un principio del maquinado se presenta un aumento de la temperatura para después descender por debajo de su valor inicial y volver a tener un incremento, sin embargo durante el periodo del maquinado existen ligeros descensos de la temperatura.

Los rangos de temperatura en la S800 RPM aumentan conforme se incrementa el avance, sólo en los casos de la F90 y F100 mm/min los rangos disminuyen, y para una S1000 RPM en los primeros dos valores de avance se observa un incremento en los rangos de temperatura, pero en una F70 mm/min existe un descenso que continua para una F80 y F90 mm/min y en la F100 mm/min vuelve a aumentar para disminuir nuevamente en la F110 mm/min.

En el acero 4140 con una velocidad de giro S800 RPM, la variación de temperatura también es estable como se muestra en las figuras 7.30 a la 7.36, los valores de temperatura empiezan en 90°C hasta 240°C, el aumento de la temperatura se observa de manera gradual, pero durante la operación de maquinado se aprecian ligeros descensos en la temperatura, en los rangos de temperatura para los primeros tres valores de avance se muestra una relación entre el incremento de los valores con respecto al aumento de los avances incluso para la F90 mm/min, pero en los avance de F80 y F100 mm/min existe un descenso en las temperaturas, y para una F110 mm/min la temperatura se mantiene en un rango pequeño, y un segundo después del inicio del maquinado la

temperatura disminuye con respecto a la temperatura inicial y vuelve a aumentar instantes después debido a la dureza del material.

Y para el mismo acero 4140 con velocidad de giro S1000 RPM, la temperatura tiene un comportamiento muy similar a la anterior en avances pequeños mostrados en las figuras 7.37 y 7.38 el rango de temperatura osciló entre 70°C y 100°C, pero al incrementar el avance como lo mostrado en las figuras 7.39 y 7.40 la temperatura cambia de rango el cual ahora es entre 130°C y 190°C, observando el resto de las figuras que son 7.41, 7.42 y 7.43 las cuales también tienen incremento en avance se observa que el rango de temperatura también aumenta y ahora es de 170°C a 250°C.

### 7.3 Resultados de la medición de rugosidad.

Los valores obtenidos en la medición de la rugosidad son mostrados a continuación. Primeramente se muestran los perfiles obtenidos para cada uno de los materiales con las diferentes combinaciones de velocidades de corte y avance, posteriormente se mostrarán los valores de rugosidad Ra, para cada prueba.

#### 7.3.1 Resultado de rugosidad en Aluminio 6063 T5 con una velocidad de corte de 800 RPM.

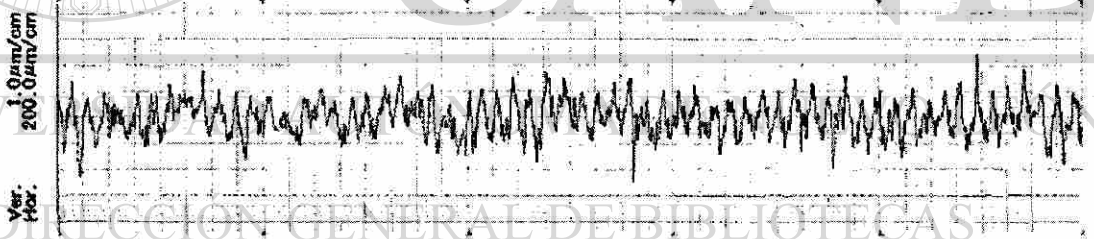


Figura 7.44 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min

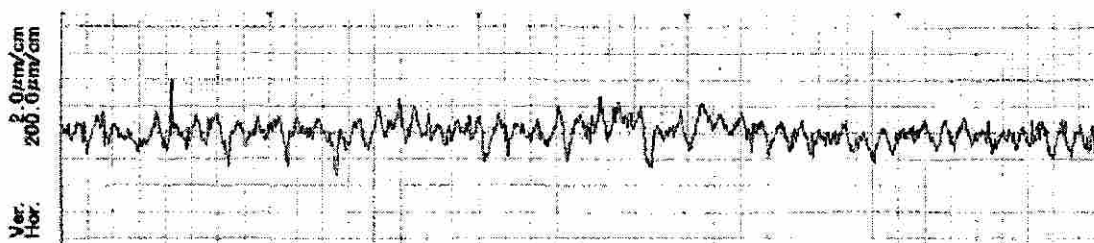
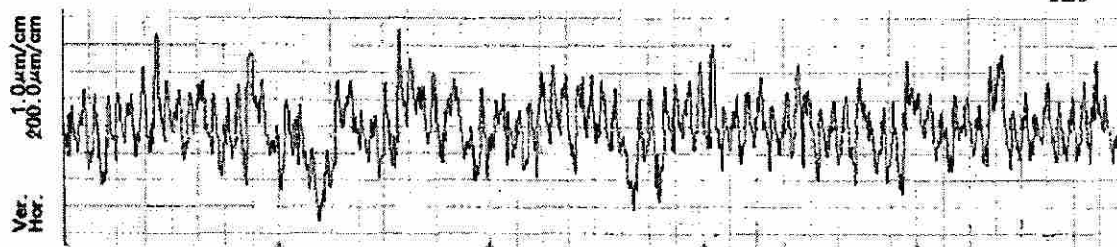
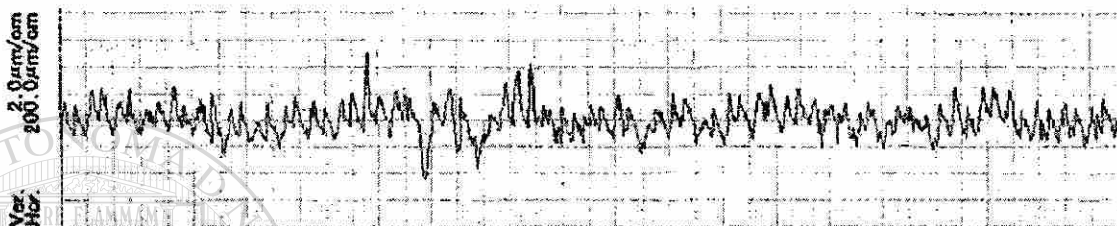


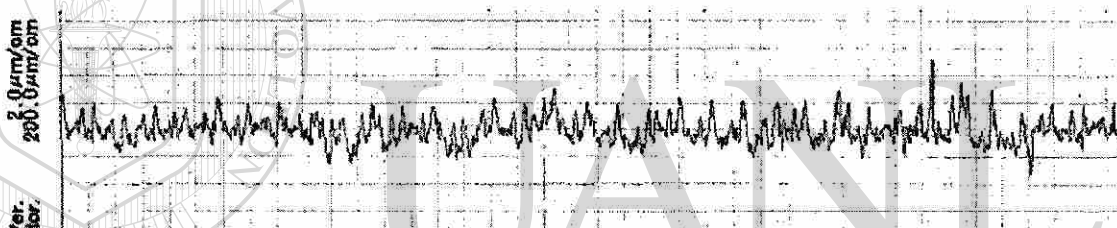
Figura 7.45 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min



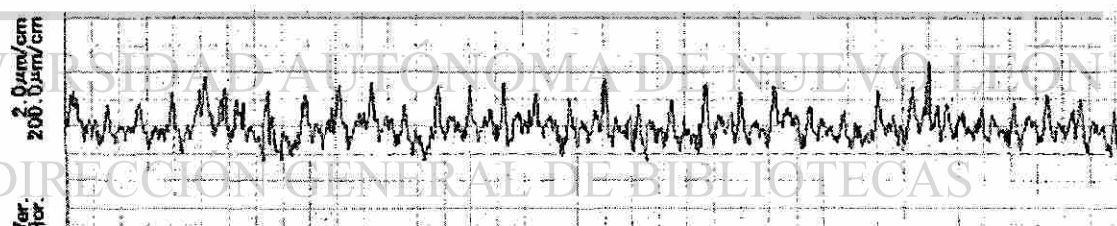
**Figura 7.46** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min



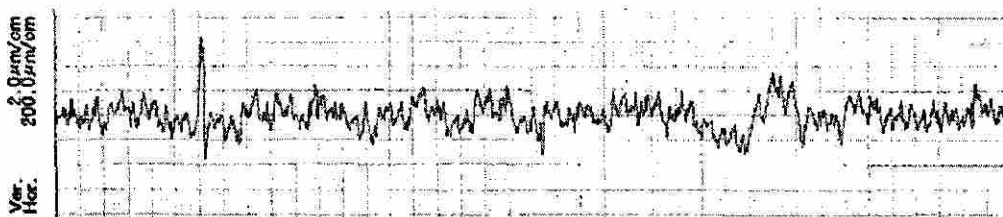
**Figura 7.47** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min



**Figura 7.48** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min



**Figura 7.49** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min



**Figura 7.50** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min

### 7.3.2 Resultado de rugosidad en Aluminio 6063 T5 con una velocidad de corte de 1000 RPM.

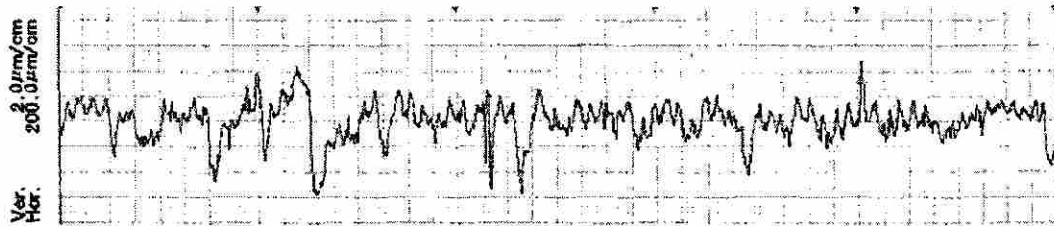


Figura 7.51 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min

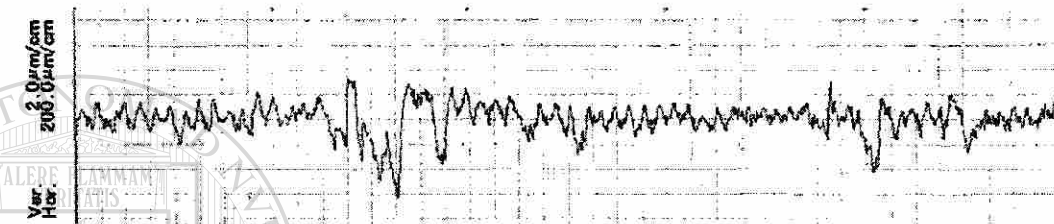


Figura 7.52 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min

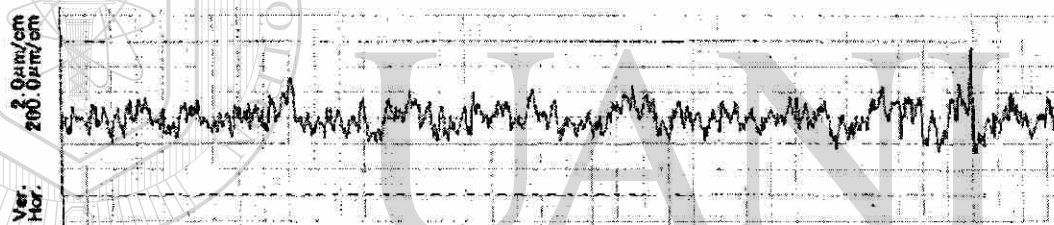


Figura 7.53 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min

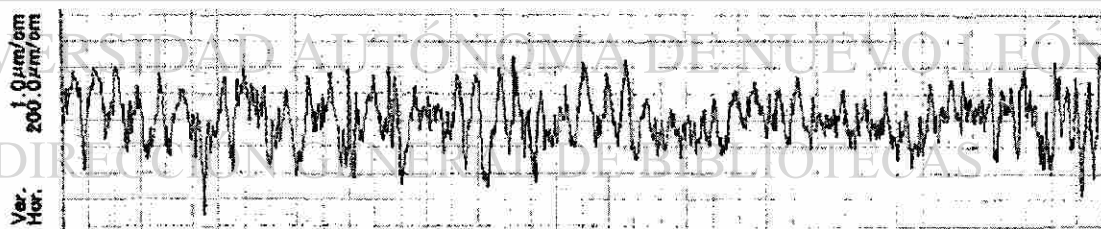


Figura 7.54 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min

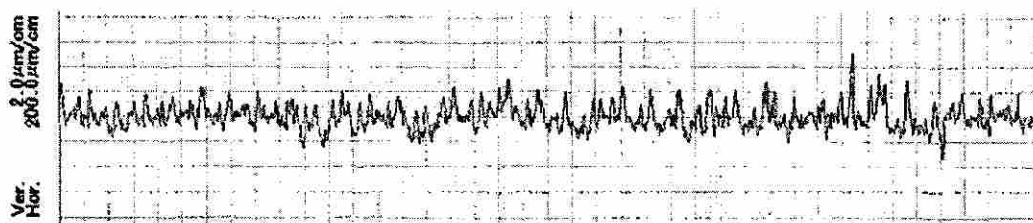
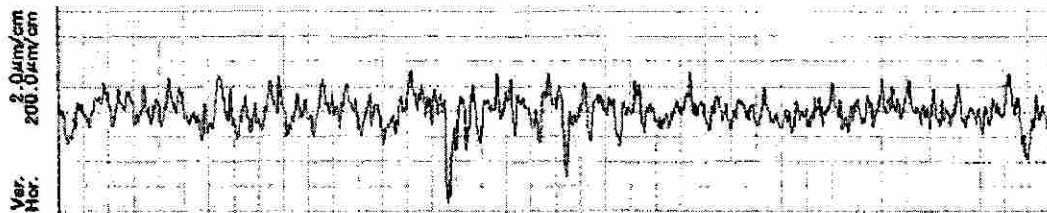
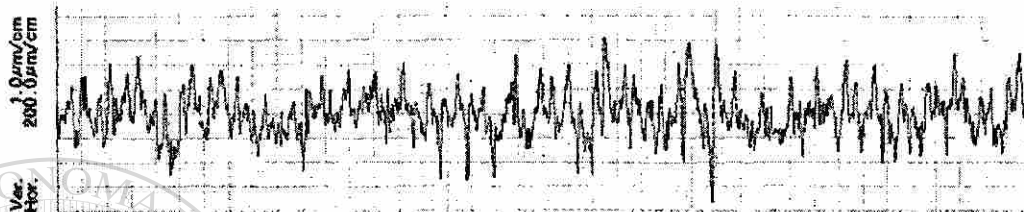


Figura 7.55 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min



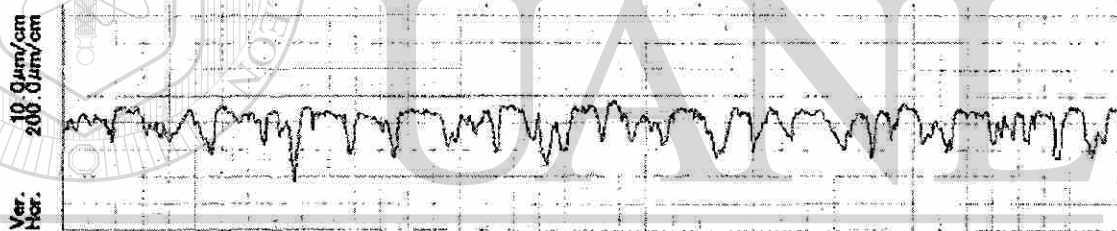


**Figura 7.56** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min

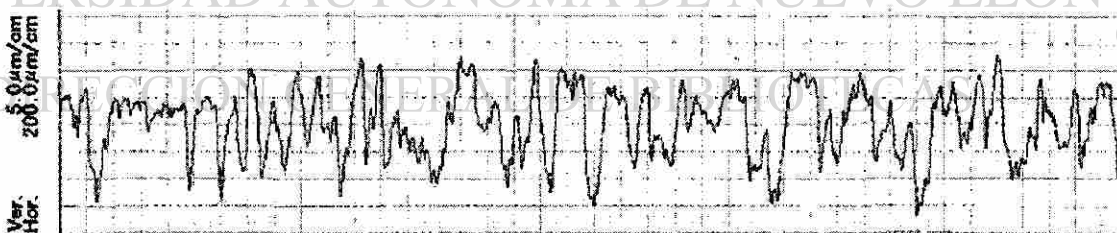


**Figura 7.57** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min

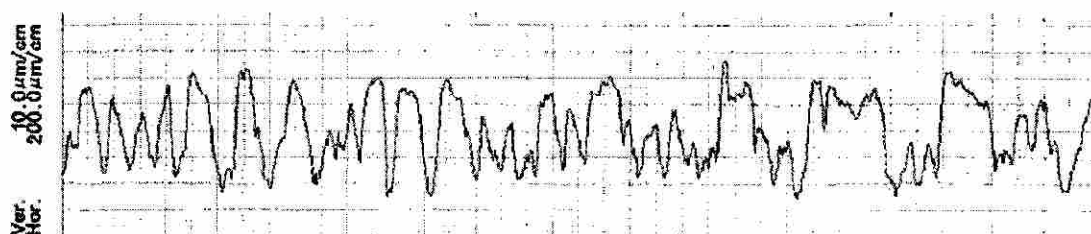
### 7.3.3 Resultado de rugosidad en Acero 1018 con una velocidad de corte de 800 RPM.



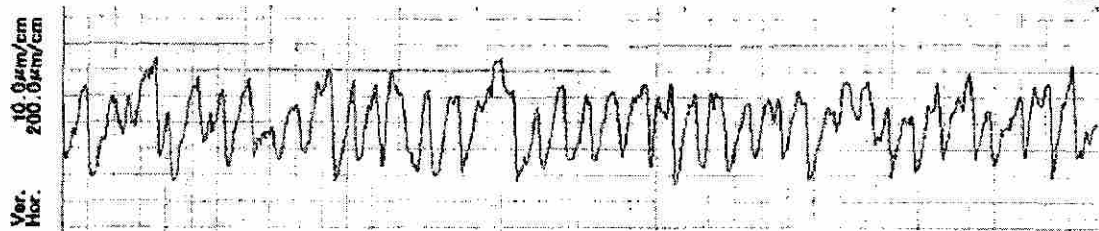
**Figura 7.58** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min



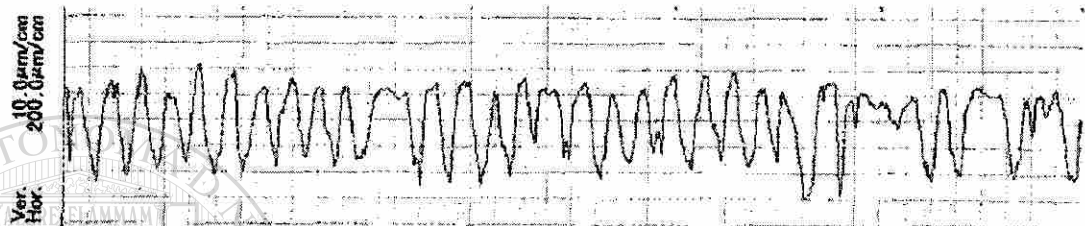
**Figura 7.59** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min



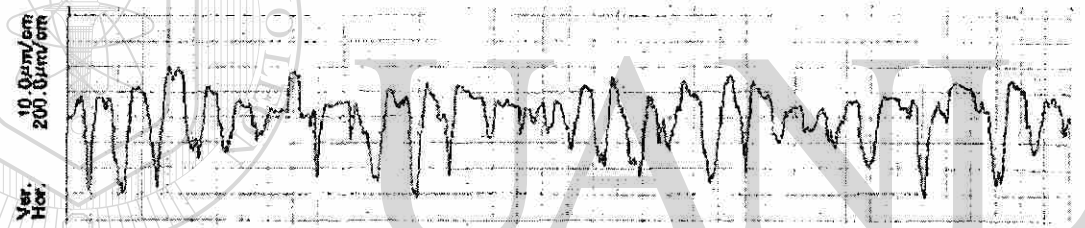
**Figura 7.60** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min



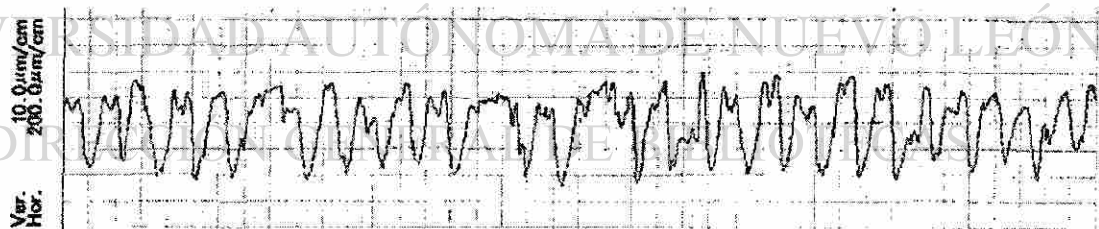
**Figura 7.61** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min



**Figura 7.62** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min

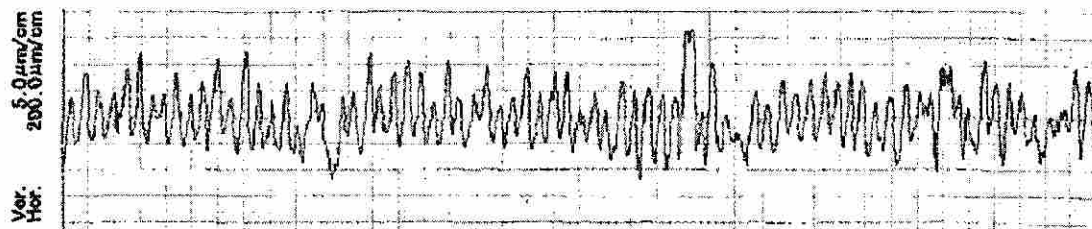


**Figura 7.63** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min



**Figura 7.64** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min

### 7.3.4 Resultado de rugosidad en Acero 1018 con una velocidad de corte de 1000 RPM.



**Figura 7.65** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min

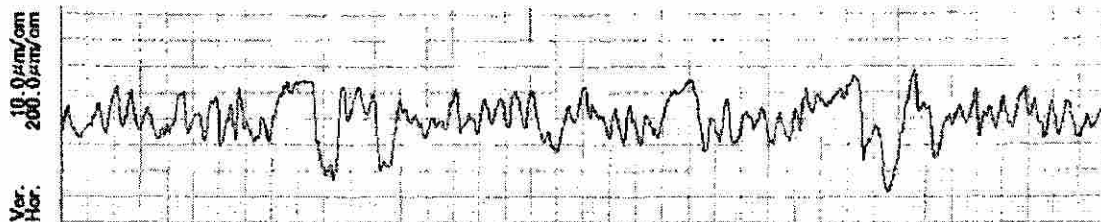


Figura 7.66 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min

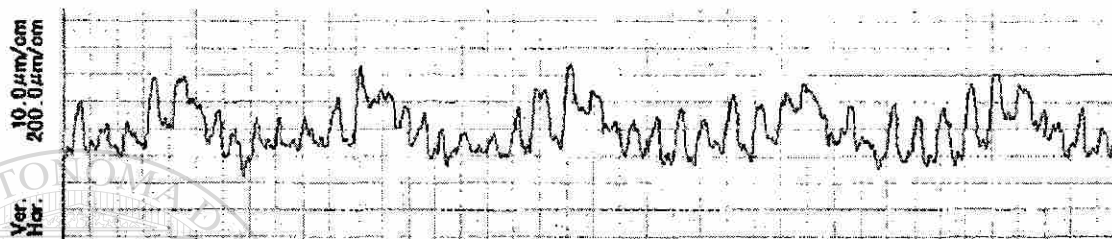


Figura 7.67 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min

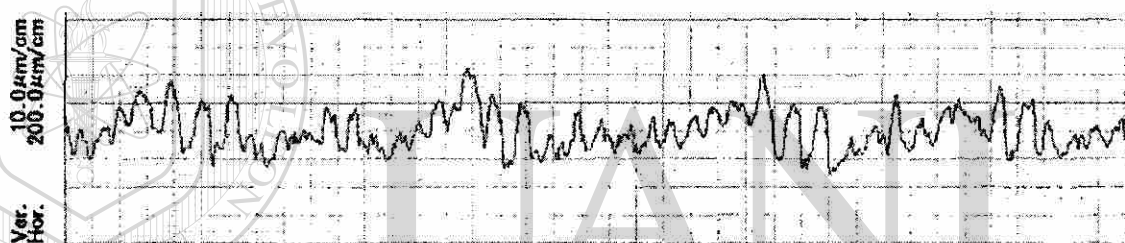


Figura 7.68 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min

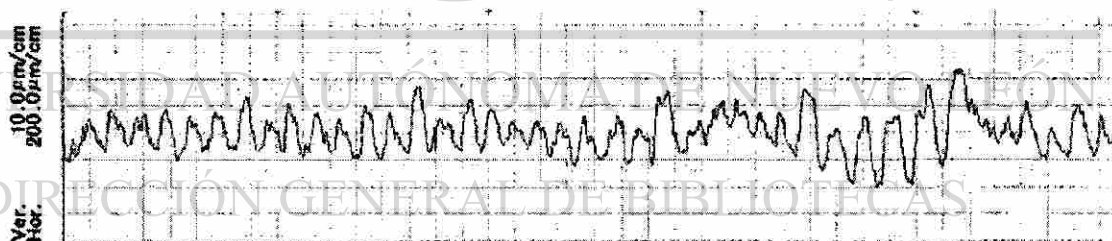


Figura 7.69 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min

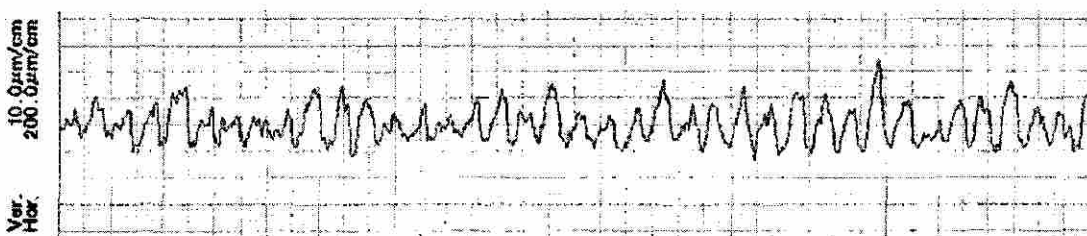
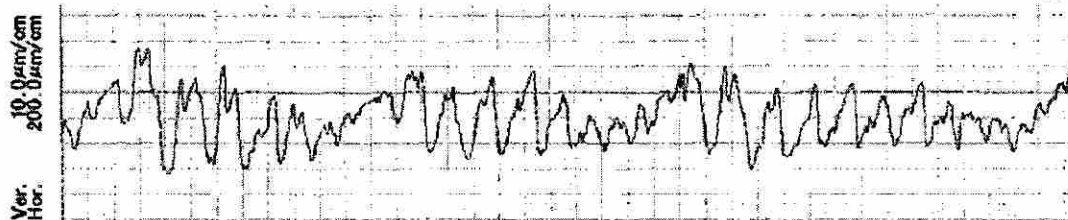
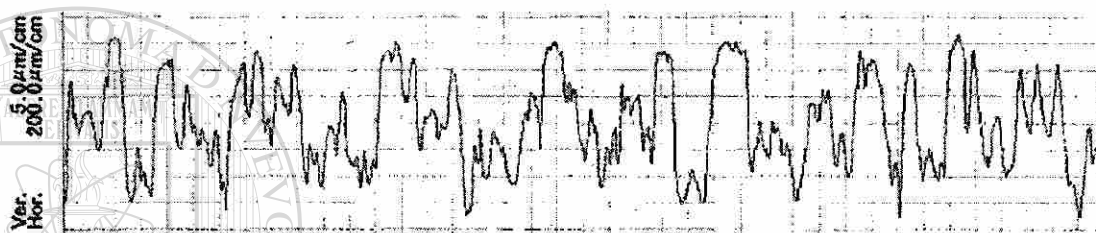


Figura 7.70 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min

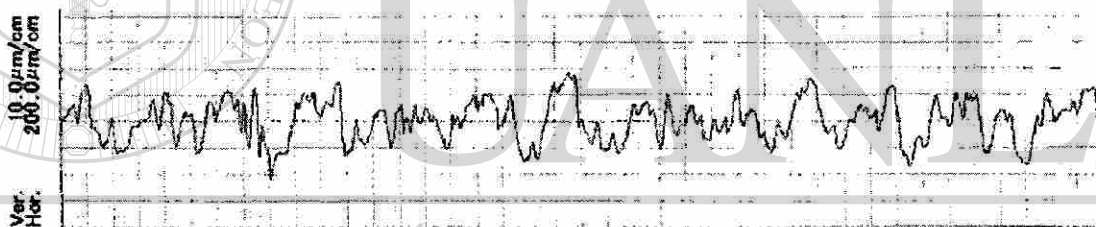


**Figura 7.71** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min

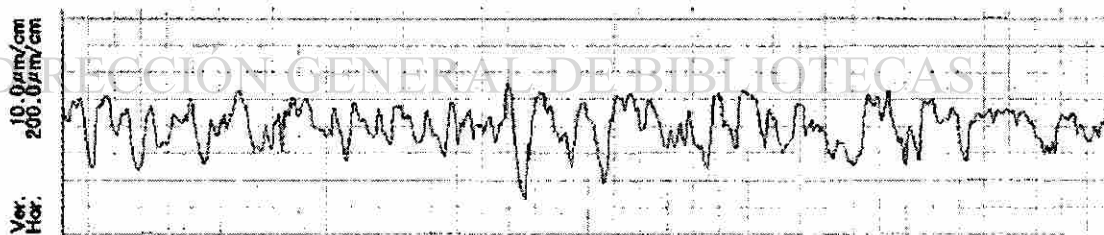
### 7.3.5 Resultado de rugosidad en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de corte de 800 RPM.



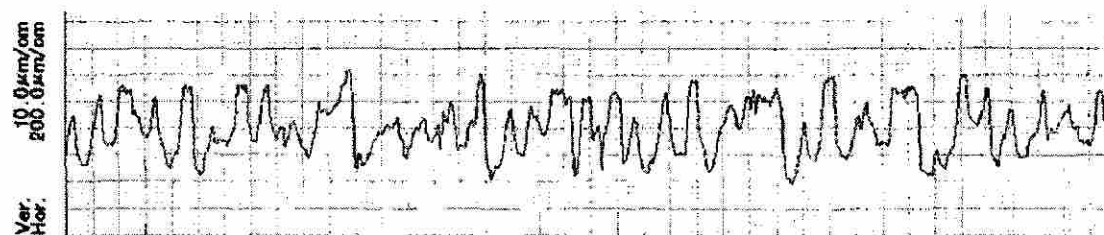
**Figura 7.72** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min



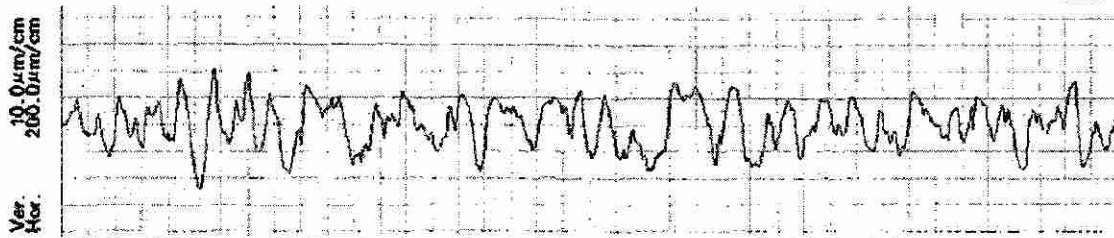
**Figura 7.73** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min



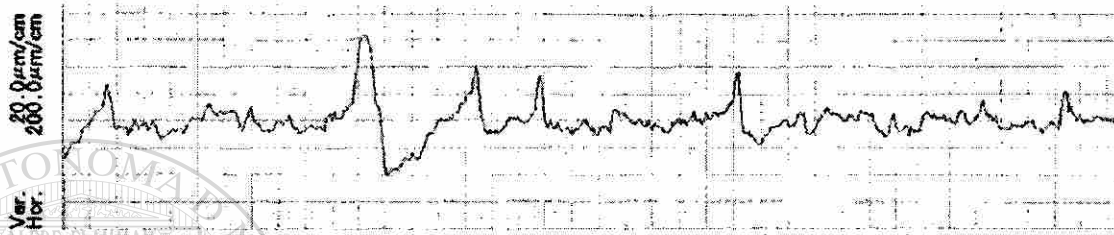
**Figura 7.74** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min



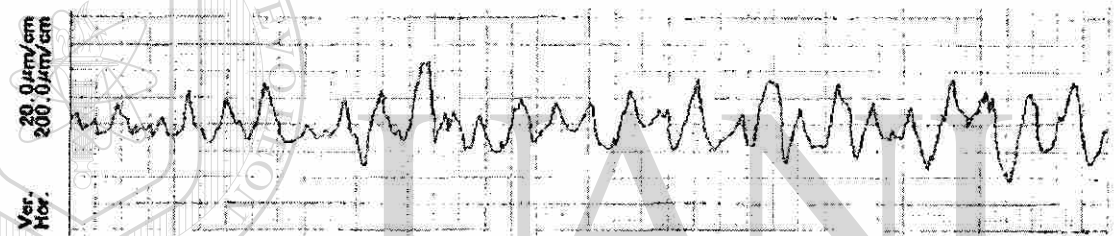
**Figura 7.75** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min



**Figura 7.76** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min

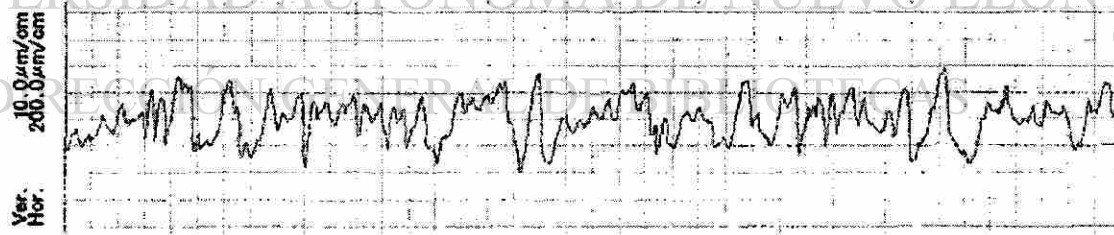


**Figura 7.77** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min

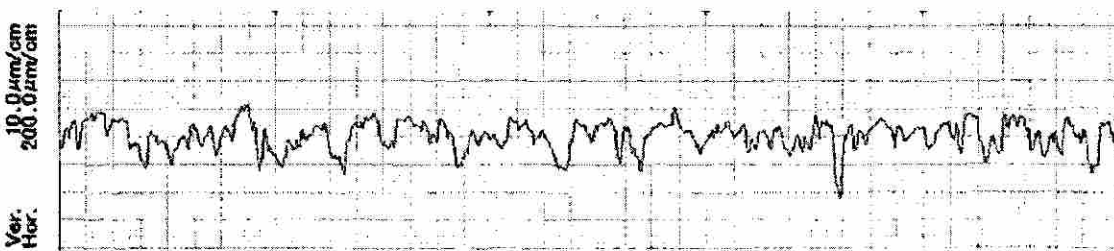


**Figura 7.78** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min

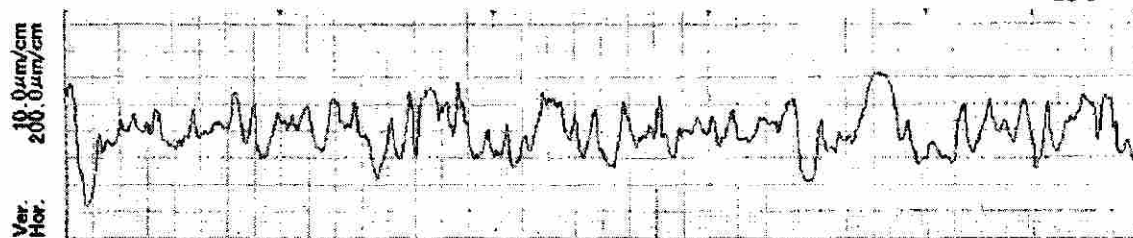
### 7.3.6 Resultado de rugosidad en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frio con una velocidad de corte de 1000 RPM.



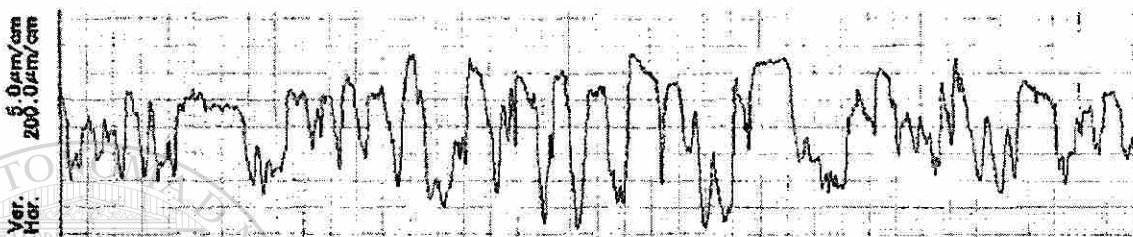
**Figura 7.79** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min



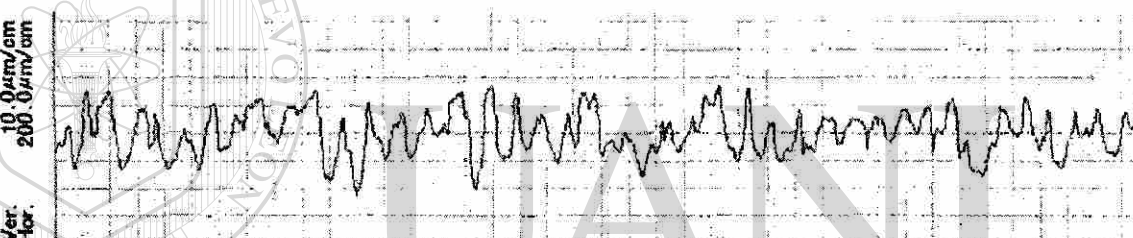
**Figura 7.80** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min



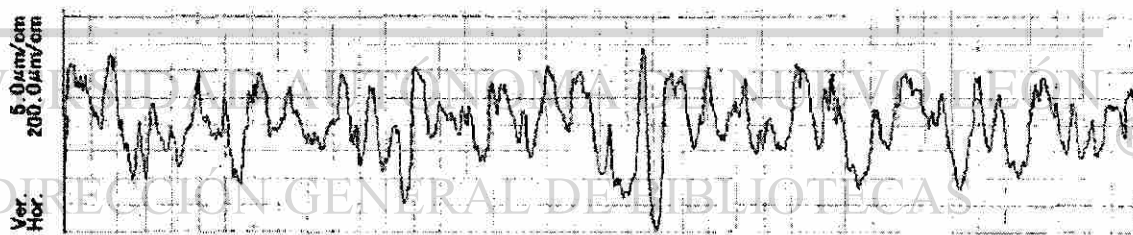
**Figura 7.81** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min



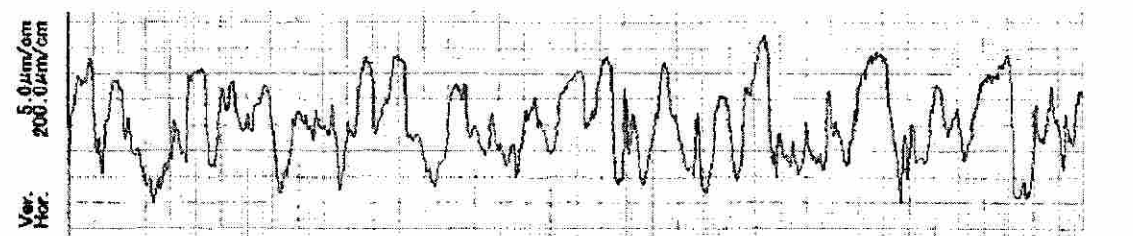
**Figura 7.82** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min



**Figura 7.83** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min



**Figura 7.84** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min



**Figura 7.85** Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min

#### 7.4 Discusión de los resultados de la rugosidad.

En las figuras 7.86 y 7.87 se observa un concentrado de las rugosidades obtenidas durante la prueba para el aluminio 6063 T5, es notable que el aluminio al ser maquinado mejora su calidad superficial ya que el valor de rugosidad mostrado en las gráficas con avance cero (material en bruto) es mayor que los registrados con avance diferente de cero.

Observando la figura 7.86 que tiene la gráfica de las rugosidades para el aluminio 6063 con S800 RPM se puede distinguir que el rango de rugosidad oscila entre 0.26 y 0.43  $\mu\text{m}$ , en los avances de F50 y F60 mm/min se detectan los valores menores y en el rango de avance de F70 a F110 mm/min la rugosidad varía relativamente muy poco en el rango de 0.38 a 0.43  $\mu\text{m}$ . Analizando la figura 7.87 se observa que el rango de rugosidades oscila entre 0.34 y 0.53  $\mu\text{m}$ , el valor más alto de rugosidad de 0.53  $\mu\text{m}$  es obtenido con el avance más pequeño F 50 mm/min lo cual indica que en velocidades como la S1000 RPM un valor tan pequeño de avance no es bueno para el acabado superficial de la pieza, avances como F60 y F100 mm/min arrojan resultados de 0.43 y 0.44  $\mu\text{m}$  de rugosidad respectivamente lo cual muestra que estos valores no son malos pero no son los óptimos para el acabado superficial en cambio en los valores de avance F70, F80, F90 y F110 mm/min se tiene una estabilidad en el acabado superficial de la pieza de trabajo.

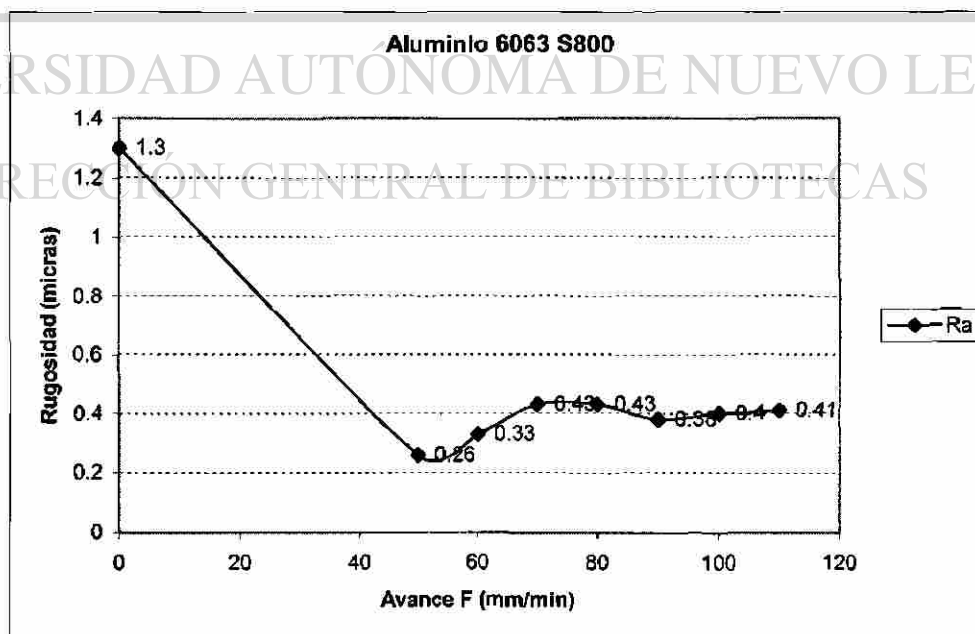


Figura 7.86 Rugosidad para Aluminio 6063 S800

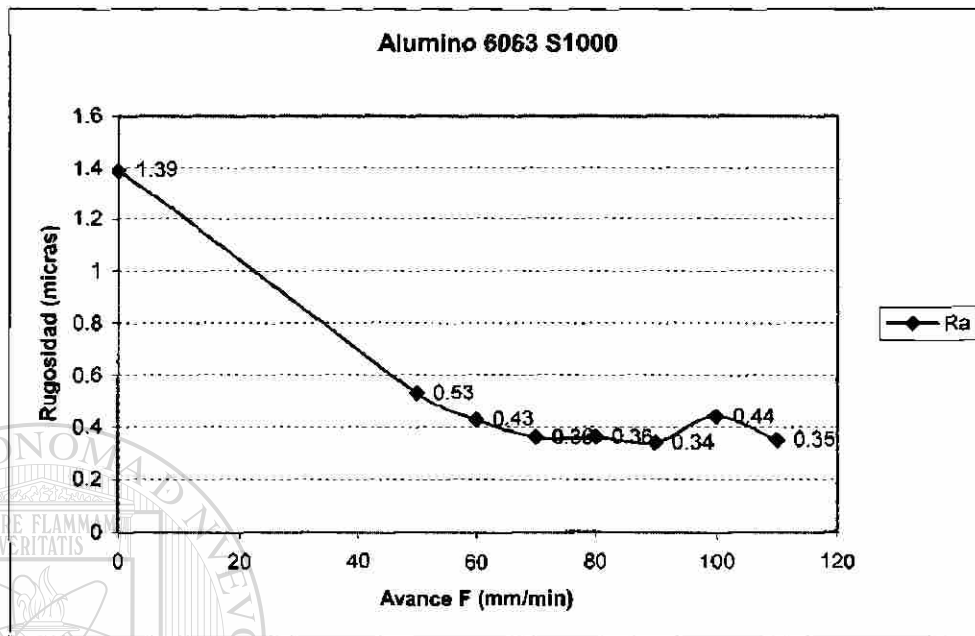


Figura 7.87 Rugosidad para Aluminio 6063 S1000

En las figuras 7.88 y 7.89 se muestra el concentrado de las rugosidades obtenidas durante la prueba para el acero 1018, es notable que para el acero 1018 al ser maquinado se ve afectada su calidad superficial ya que el valor mostrado en las gráficas con avance cero (material en bruto) es menor que los registrados con avance diferente de cero.

En el caso del acero 1018 con una S800 RPM observando la figura 7.88 que muestra la gráfica de los valores obtenidos para la rugosidad, se ve que el rango inicia en 2.04 hasta 5.49  $\mu\text{m}$ , para los primeros dos valores de avances F50 y F60 mm/min el valor de rugosidad es de 2.04 y 2.54  $\mu\text{m}$  respectivamente, los cuales son los valores más pequeños registrados en esta gráfica, aumentando el avance de F70 hasta F100 mm/min los valores presentaron un incremento considerable oscilando de 4.16 a 5.49  $\mu\text{m}$  esto indica, que los parámetros de operación elevados no son buenos para el acabado superficial. Observando la figura 7.89 que muestra los valores de rugosidad para el acero con una velocidad de giro de S1000 RPM se observa que para un avance pequeño como es una F50 mm/min el acabado superficial en la pieza ligeramente se ve afectado, conforme aumenta el avance la rugosidad se empieza a disparar hasta llegar a un valor de 3.66  $\mu\text{m}$  este valor es encontrado al llegar a un avance de F70 mm/min, pero si se incrementa el avance la rugosidad baja, como se observa, ya que para avances de F80, F90 y F100 mm/min las rugosidades son 2.9, 2.84 y 2.64  $\mu\text{m}$  respectivamente, pero si se incrementa más el avance a un valor de F110 mm/min la rugosidad vuelve a aumentar, pero ahora alcanzando las 4  $\mu\text{m}$ . Con esto se concluye que el comportamiento del acero 1018 en el acabado superficial es más favorable para una S1000 RPM que en S800 RPM.



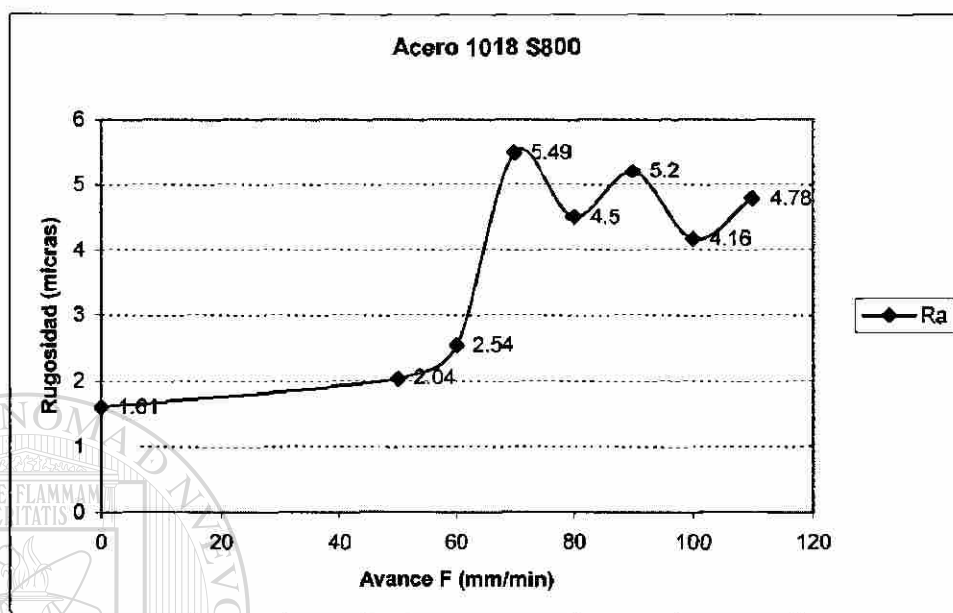


Figura 7.88 Rugosidad para Acero 1018 S800

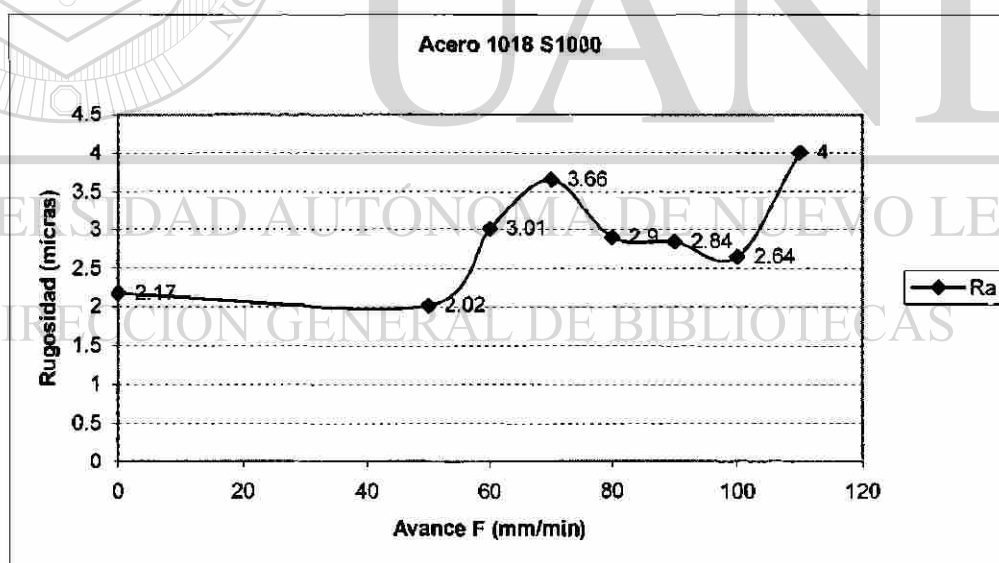


Figura 7.89 Rugosidad para Acero 1018 S1000

En las figuras 7.90 y 7.91 se observa el concentrado de las rugosidades obtenidas durante la prueba para el acero 4140, como se ve al ser maquinado, su calidad superficial mejora ya que el valor de rugosidad mostrado en las gráficas con avance cero (material

en bruto) es más grande que los registrados con avance diferente de cero, con excepción del avance F110 mm/min con una S800 RPM.

En el acero 4140 y una S800 RPM se observa en la figura 7.90 la gráfica de los valores de la rugosidad obtenida en los diferentes avances, se puede observar que el rango es de 2.92 hasta 5.89  $\mu\text{m}$ , en los avances F60 y F70 mm/min el valor de rugosidad es de 3.15 y 2.92  $\mu\text{m}$  respectivamente, estos valores son los más pequeños registrados en esta gráfica, para los avances F50 y F90 mm/min los valores de rugosidad presentaron un ligero incremento de 3.52 y 3.48  $\mu\text{m}$  respectivamente y en los avances F80 y F100 mm/min la rugosidad vuelve a incrementarse en 3.99 y 3.91  $\mu\text{m}$ , pero si se incrementa más el avance a un valor de F110 mm/min la rugosidad aumenta nuevamente de manera considerada alcanzando las 5.89  $\mu\text{m}$ . En la figura 7.91 se muestran los datos obtenidos de la rugosidad para una velocidad de giro S1000 RPM, se observa que para los avances F50 y de F70 al F90 mm/min la calidad superficial mejora y varía muy poco dentro del rango de 3.07 a 3.23  $\mu\text{m}$ , pero no representan el mejor resultado; en un avance F110 mm/min se puede ver una ligera disminución a un valor de 2.97  $\mu\text{m}$ , y para los avances F60 y F100 mm/min se observan los valores más pequeños de rugosidad los cuales son 2.05 y 2.46  $\mu\text{m}$ . Se puede observar que en el acero 4140 con una velocidad de giro S1000 RPM se pueden alcanzar resultados favorables en el acabado superficial para avances como F60 y F100 mm/min, a diferencia que con una S800 RPM.

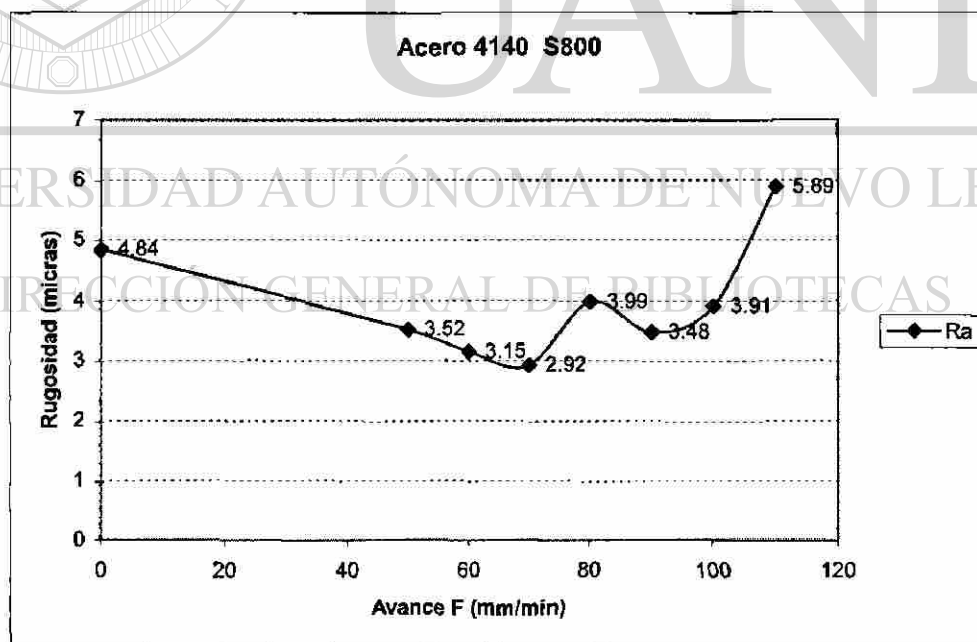


Figura 7.90 Rugosidad para Acero 4140 S800

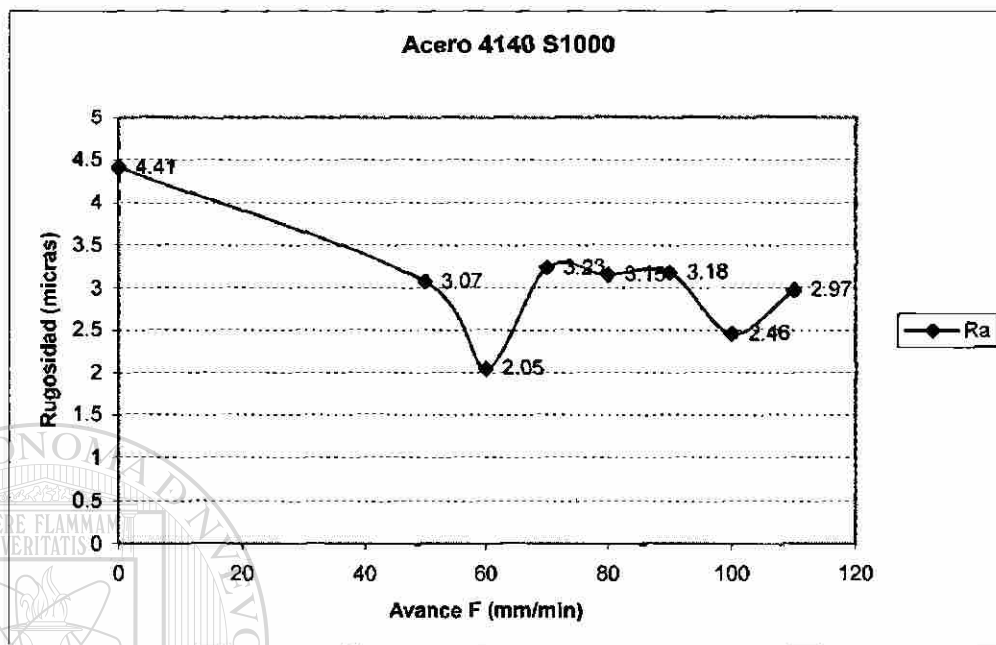


Figura 7.91 Rugosidad para Acero 4140 S1000

## 7.5 Discusión de los resultados de la correlación de las variables temperatura y rugosidad.

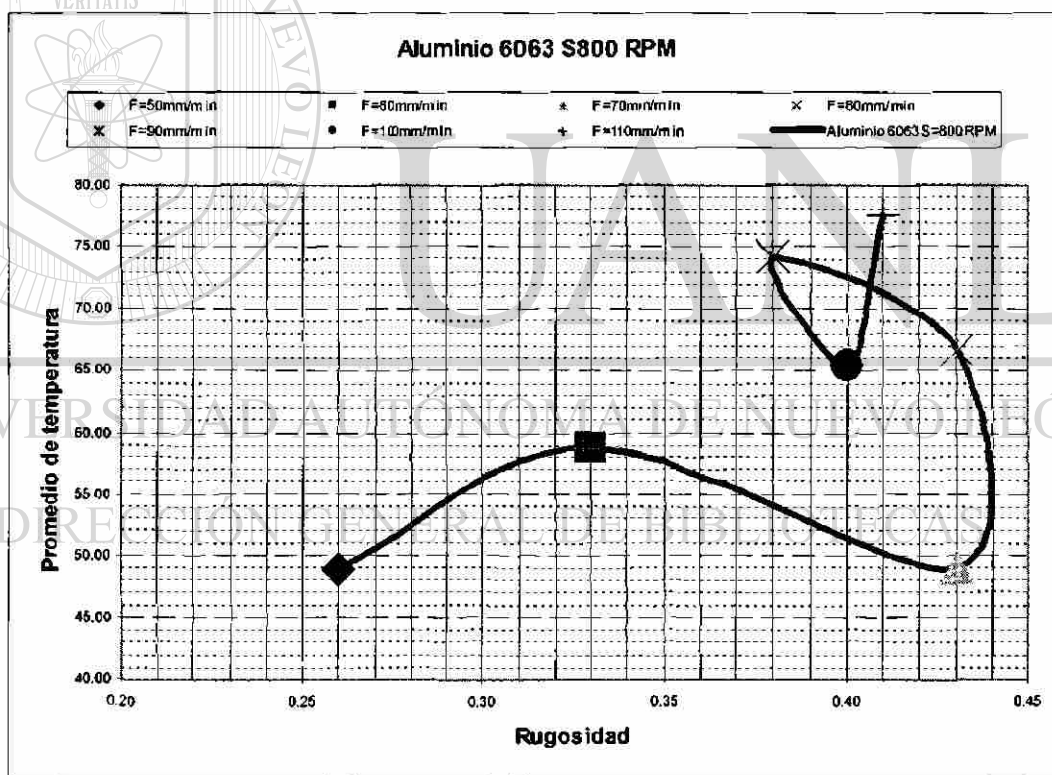
Las figuras 7.92 y 7.93 resultantes en el aluminio 6063 se puede observar que la velocidad de corte influye grandemente en el aumento o disminución de los resultados de temperatura y rugosidad. Existe también una relación inversa en las primeras velocidades de avance.

En la figura 7.92, que corresponde al aluminio 6063 con la velocidad de giro S800 RPM se observa que al ir aumentando el avance, la rugosidad también lo hace hasta llegar a un máximo que se tiene en el avance F80 mm/min, después comienza a disminuir como se ve en el avance F90 mm/min, posteriormente la rugosidad comienza a aumentar de nuevo. En el caso la temperatura es diferente, comienza con un incremento hasta llegar al avance de F70 mm/min para descender nuevamente y aumentar a una escala mayor y al llegar al avance de F100 mm/min disminuye un poco para después volver a aumentar. Se observa un comportamiento que carece de linealidad.

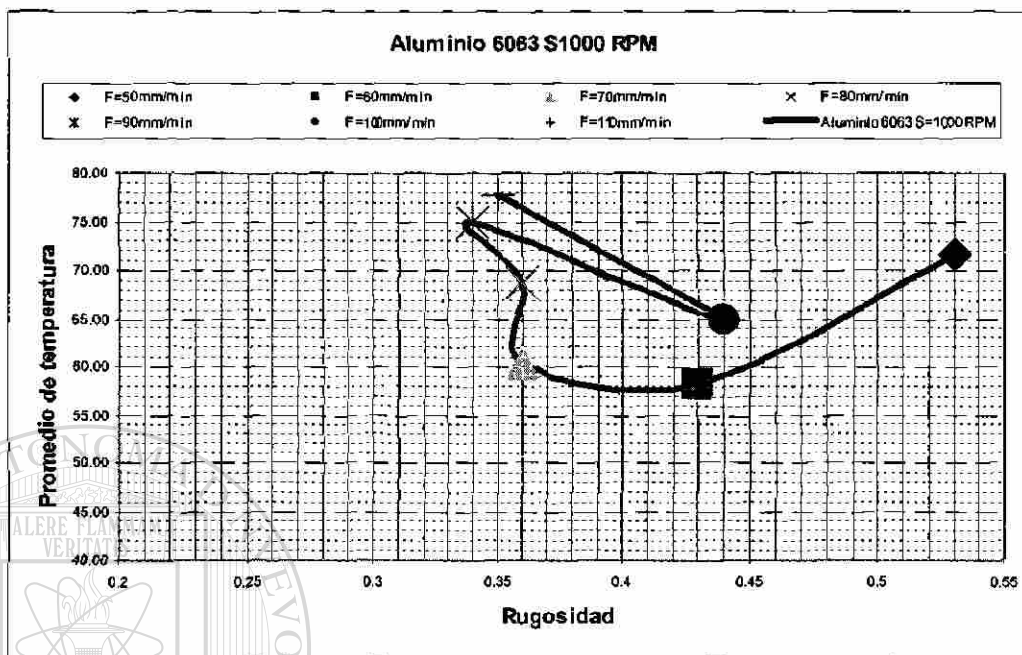
En la figura 7.93 para el aluminio 6063 con una velocidad de giro S1000 RPM, se observa que en un valor de avance pequeño de F50 mm/min se obtienen una rugosidad y temperatura altas; conforme se aumenta la velocidad de avance la temperatura y la rugosidad disminuyen, pero al acercarse al valor de avance F70 mm/min la temperatura

va aumentando a un rango muy alto hasta el avance de F90 mm/min y la rugosidad sigue disminuyendo, a partir de este valor la temperatura disminuye y la rugosidad aumenta un poco hasta el avance F100 mm/min y después vuelve la temperatura a aumentar y la rugosidad a disminuir, esto se debe a una velocidad de giro y avance altos que provocan alta temperatura.

Esto muestra que para el aluminio maquinado bajo estas condiciones y con la herramienta utilizada, es mejor que se trabaje con la velocidad de giro y un avance bajo, ya que el comportamiento de la herramienta es más favorable en esas circunstancias, ya que genera menos temperaturas y mejor acabado superficial, es decir una menor rugosidad.



**Figura 7.92** Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el aluminio 6063 a una velocidad de giro de 800 RPM



**Figura 7.93** Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el aluminio 6063 a una velocidad de giro de 1000 RPM

En el caso del acero 1018 con una velocidad de giro S800 RPM mostrado en la figura 7.94 se obtiene un valor bajo de temperatura y de rugosidad para el avance de F50 mm/min, al llegar al avance de F60 mm/min la temperatura y la rugosidad aumentan, para el valor de avance F70 mm/min la rugosidad aumenta de forma considerable y la temperatura solo ligeramente, a partir de este punto los resultados son un poco irregulares, la rugosidad disminuye pero la temperatura se incrementa hasta el valor de F80 mm/min, después la temperatura se vuelve a reducir y la rugosidad a aumentar en el valor de avance F90 mm/min y para el avance de F100 mm/min la temperatura y la rugosidad disminuyen, y después nuevamente vuelven a aumentar.

Hablando de rugosidad se puede destacar que para avances bajos de F50 mm/min la velocidad de giro no es determinante, pero conforme el avance aumenta la velocidad de giro va siendo muy importante para la rugosidad ya que a la S1000 RPM como se observa en la figura 7.95 los valores para la rugosidad son mucho menores. Ahora si lo más importante es la temperatura de la herramienta al momento del maquinado, se debe tener más cuidado con la velocidad de giro ya que si se aumenta la temperatura lo hace también. Entonces es muy importante, saber que si se quieren buscar las condiciones de corte adecuadas se tiene que tener en claro que es más importante, si la temperatura de la herramienta que es la que controla la vida de la misma o la rugosidad que es la que le da el acabado superficial a la pieza.

Lo cual nos está demostrando que entre menor es la velocidad de giro y el avance, los resultados de temperatura y acabado superficial se mejoran considerablemente.

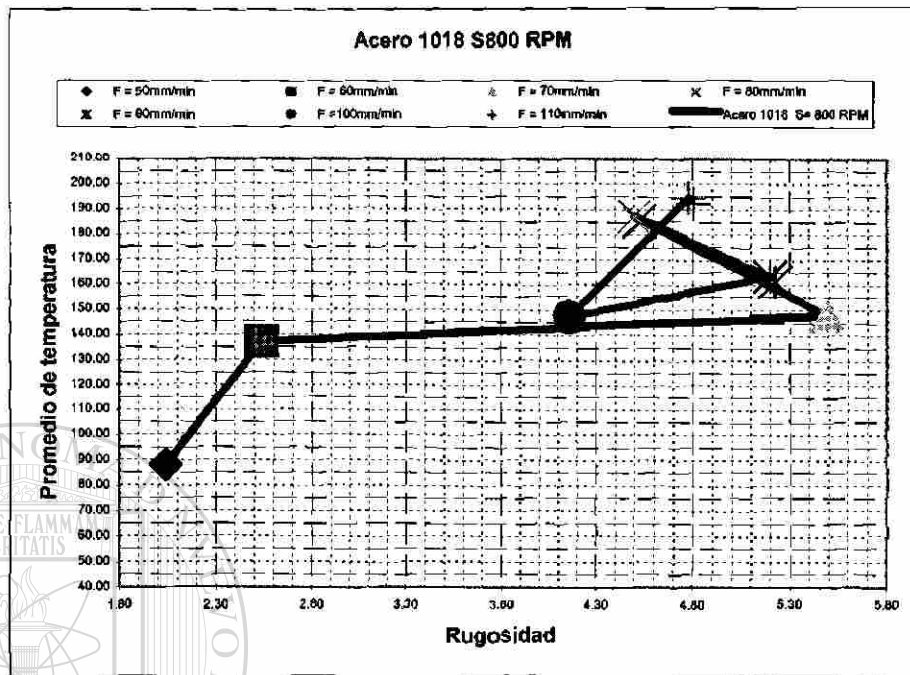


Figura 7.94 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 1018 a una velocidad de giro de 800 RPM

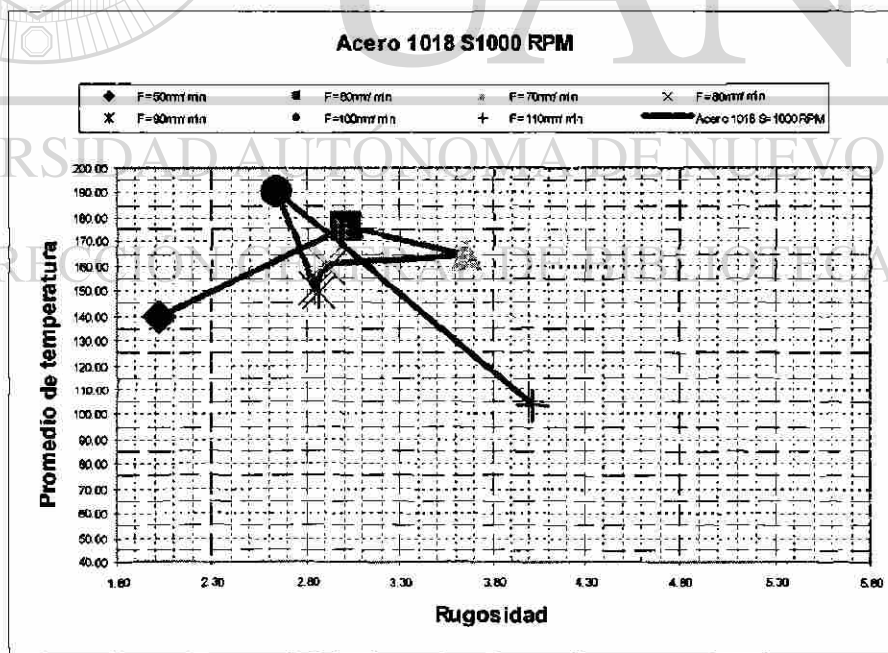


Figura 7.95 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 1018 a una velocidad de giro de 1000 RPM

Para el acero 4140 con una velocidad de giro de S800 RPM se puede observar en la figura 7.96 que en los primeros avances la relación es inversa entre temperatura y rugosidad, ya que la temperatura va aumentando conforme la rugosidad disminuye hasta el avance F70 mm/min, después cambian las condiciones al acercarse al avance de F80 mm/min, la temperatura disminuye y la rugosidad aumenta de forma considerable, posteriormente para el avance de F90 mm/min la temperatura aumenta a un rango muy alto disminuyendo la rugosidad ligeramente, a partir de este punto la temperatura disminuye considerablemente y conforme el avance aumenta hasta F110 mm/min sufre un ligero incremento, y en el caso de la rugosidad tiende a seguir aumentado.

Analizando ahora el acero 4140 con velocidad de giro S1000 RPM en la figura 7.97 para el caso de avances menores de F60 mm/min existe un ligero aumento de la temperatura y la rugosidad hasta un valor alto, y para avances mayores de F60 mm/min hay una tendencia continua del aumento de la temperatura, esta se puede incrementar de manera considerable hasta en más del doble y la rugosidad también aumenta; en el rango de avances de F70 mm/min a F80 mm/min la temperatura se mantiene constante y la rugosidad disminuye muy poco, después vuelve a aumentar la temperatura, pero en valores de avance mayores de F90 mm/min la temperatura y rugosidad tienen un descenso hasta una F100 mm/min para volver a incrementarse.

Comparando la rugosidad obtenida con el mismo avance para las 2 velocidades, es menor la registrada en la velocidad de giro de S1000 RPM, excepto el avance de F70 mm/min, en el caso de la temperatura para los avances de F50, F60 y F70 mm/min es mayor la registrada con una velocidad de giro de S800 RPM luego en el avance de 80 a 110 se invierte, siendo mayor la temperatura registrada con la velocidad de giro de S1000 RPM.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En este acero se determina que el maquinado en velocidades de giro mayores son más predecible los parámetros de corte que a velocidades pequeñas, ya que en las primeras muestra una clara tendencia, entre mayor es el avance la temperatura aumenta como se esperaba, en la rugosidad no es tan clara la tendencia pero la tiene.

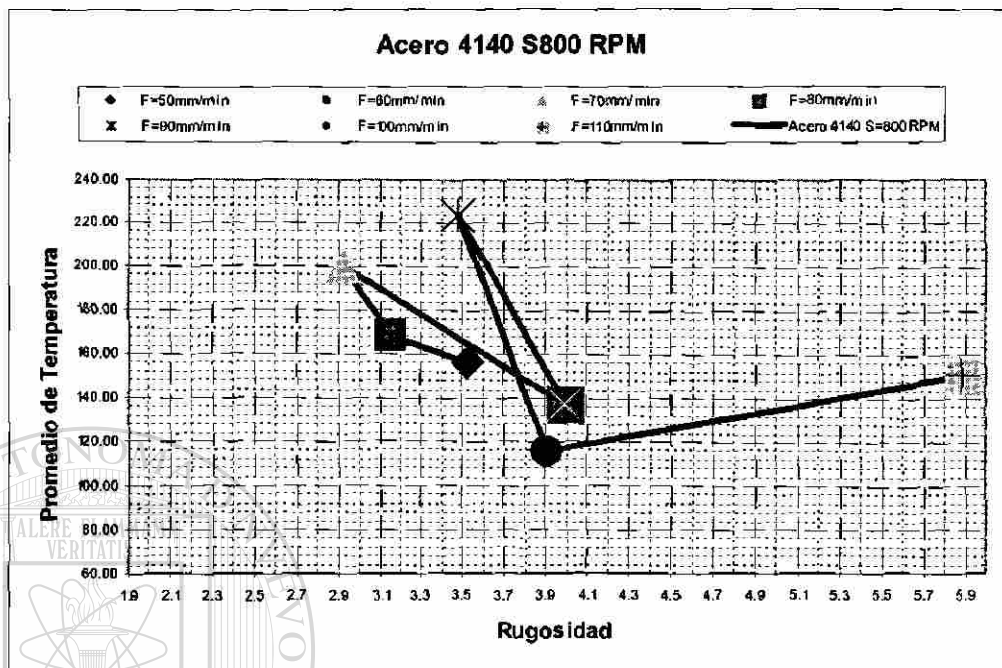


Figura 7.96 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 4140 a una velocidad de giro de 800 RPM

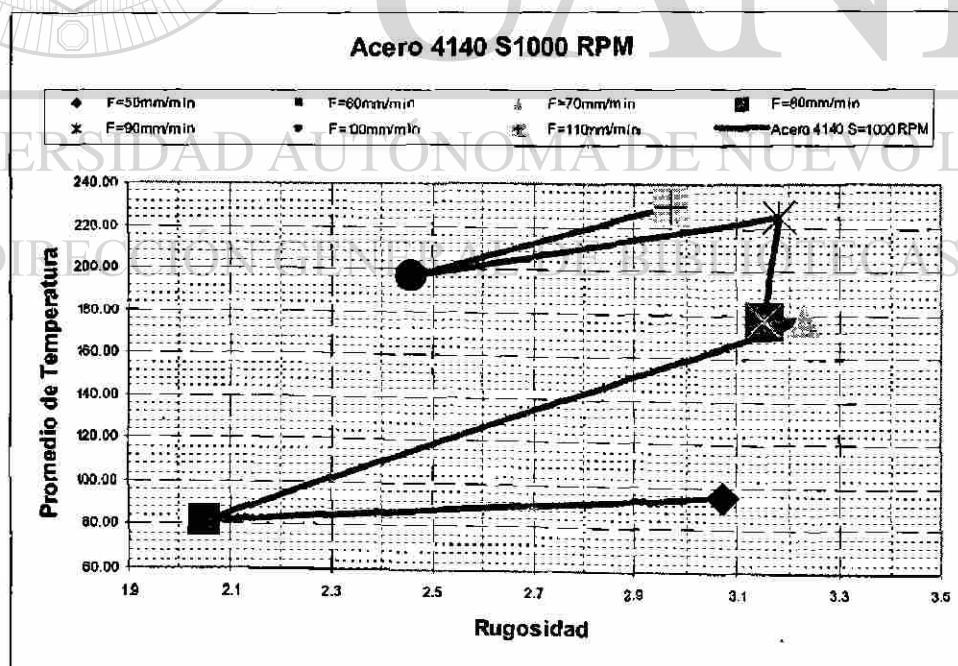


Figura 7.97 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 4140 a una velocidad de giro de 1000 RPM



## CAPÍTULO 8

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 8.1 Conclusiones.

El presente trabajo presenta las características de los controles de nueva generación y los que hoy dominan el ámbito industrial y de taller, especialmente en México. Dichas diferencias marcan la pauta para que, una vez establecida la comparación, se establezcan objetivos de desempeño alcanzables para aquellos industriales poseedores de maquinaria no moderna.

El desarrollo de nuevas tecnologías, criterios de evaluación y complejidad de productos obligan a replantear el análisis del proceso de maquinado en forma integral. El estudio de la maquinabilidad aquí propuesto contempla algo más que las propiedades de maquinado de un material bajo un análisis ortogonal simple.

Se observó el proceso de corte de un aluminio comercial 6063, un acero 1018 y un acero 4140 recocido y estirado en frío bajo condiciones particulares y su influencia en los parámetros del proceso de maquinado como mejora del análisis convencional del proceso de maquinado.

Se ha demostrado que bajo condiciones de maquinado moderadas es posible determinar una relación proporcional a la temperatura y rugosidad en función del avance y velocidad de giro. El presente trabajo no considera experimentos exhaustivos que permitan relacionar completamente la morfología con la situación de corte ni las propiedades del material.

La interpretación del proceso de maquinado bajo el criterio establecido permite concluir que la temperatura generada durante el mismo permite evaluar condiciones

determinantes del proceso. Esto significa que la temperatura tiende a alcanzar un estado de estabilidad propio de la situación de maquinado, pero también que existe una proporcionalidad con respecto a la velocidad de avance.

Se estableció una relación entre la temperatura generada durante el proceso y la rugosidad superficial, para que de esta manera inferir mejores situaciones de maquinado.

En conclusión las condiciones óptimas de maquinado para el aluminio 6063 según el estudio realizado son: avance F50 mm/min y velocidad de giro S800 RPM porque se obtiene una menor temperatura y una mejor rugosidad comparado con los otros valores de avance y velocidad de giro.

De acuerdo con este estudio las condiciones de corte óptimas para el Acero 1018 son: avance F50 mm/min y velocidad de giro S800 RPM ya que se encontraron mejores valores de temperatura y rugosidad, que en los otros parámetros.

En base al estudio realizado se puede deducir que las condiciones adecuadas de maquinado para el acero 4140 son: avance F60 mm/min y velocidad de giro de S1000 RPM debido a una temperatura menor y mejor calidad superficial con respecto a los otros parámetros de avance y velocidad de giro.

## **8.2 Recomendaciones.**

La experimentación fue realizada bajo condiciones específicas de velocidad de avance y velocidad de giro, y aunque los resultados arrojados en el desarrollo de las mediciones proporcionen una visión general del comportamiento de la temperatura y la rugosidad, esto no significa que siempre se presente el mismo comportamiento. Para esto se sugiere la realización posterior de experimentos, en los que se varíen más parámetros involucrados, como el tipo de herramienta, de maquinado, y lubricante.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Procesos de Manufactura, versión SI, de B. H. Amstead. P Ostwald y M. Begeman. Editorial Continental. pp. 520 a 541
  2. [www.ing.puc.cl/icmcursos/procesos/apuntes/cap3](http://www.ing.puc.cl/icmcursos/procesos/apuntes/cap3)
  3. Fundamentos de Manufactura Moderna de Mikell P. Groover. Editorial Prentice Hall. pp. 544
  4. Fundamentos de Manufactura Moderna de Mikell P. Groover. Editorial Prentice Hall. pp. 551
  5. Materials and Processes in Manufacturing 7<sup>th</sup> ed. de DeGarmo, E. P., Black, J.T., and Kohser, R.A., Editorial Macmillan Publishing Co., New York 1988
  6. Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools of Boothroyd, G., and Knight, W. A., Editorial Marcel Dekker Inc. New York 1989
  7. Tool Wear and Tool Life of Cook, N. Editorial J. Engrg. For Industry, Vol. 95 November 1973 pp 931-938
- 
8. On the Analysis of Cutting Tool Temperatures of Loewen, E.G. and Shaw, M.C. ASME Transactions, Vol, 76 No. 2 February 1954 pp 217-225
  9. An Analytical Evaluation of Metal Cutting Temperatures of Tigger, K. J., and Chao, B. T., Editorial ASME Transactions, Vol 73, No. 1 January 1951. pp 57-68
  10. Tool-Chip Interface Temperatures of Tigger, K. J. ASME Transactions, Vol. 71, No.2, February 1949
  11. Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond, Krar, S. F. and Ratterman, E. Mc Graw Hill, Inc., New York, 1990
  12. The History of Tools. Liebhold, P. Cutting Tool Engineer, June 1989. pp 137-138
  13. Machining Data Handbook 3<sup>rd</sup> ed, Vol. I and II. Metalcut Research Associates, Inc., Cincinnati, Ohio, 1980
  14. [www.ing.puc.cl/icmcursos/procesos/apuntes/cap2](http://www.ing.puc.cl/icmcursos/procesos/apuntes/cap2)

15. Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4<sup>th</sup> ed. Drozda, T.J., and Wick, C. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Mich., 1983
16. Short History of Machine Tools. M.I.T. Press, Cambridge, Mass, 1965
17. History of Machine Tools. Steeds, W., A. Oxford University Press, London 1969
18. [www.campus.fortunecity.com/duquensne/623/home/m.html](http://www.campus.fortunecity.com/duquensne/623/home/m.html)
19. CNC Programming Handbook. Meter Smid. Industrial Press, Inc
20. Procesos básicos de manufactura, de H. C. Kazanas, y E. Backer, Thomas Gregor. Editorial Mc Graw Hill. pp 195 – 203
21. Principios de Ingeniería de Manufactura, de Stewart C. Black, Vic Chiles editorial. de la Compañía Editorial Mexicana pp 102 - 177 y 226 – 260
22. Metrología Dimensional. Ramón Zeleny Vázquez y Carlos González González. Mc. Graw Hill. pp 156
23. Metrología Dimensional. Ramón Zeleny Vázquez y Carlos González González. Mc. Graw Hill. pp 160
24. Metrología Dimensional. Ramón Seleny Vázquez y Carlos González González., McGraw-Hill. pp. 436

---

25. Metrología Dimensional. Ramón Seleny Vázquez y Carlos González González., McGraw-Hill. pp 438
26. Technical data RTW catalogo 448860

## LISTADO DE FIGURAS

<b>FIGURAS</b>	<b>PÁGINAS</b>
Figura 2.1 Rangos de velocidades de corte en función del material	4
Figura 2.2 Maquinado de contorno CNC	5
Figura 2.3 Maquinado de cara CNC	5
Figura 2.4 (a) Proceso de Torneado, (b) Herramienta de corte	7
Figura 2.5 Los tres procesos más comunes de maquinado	7
Figura 2.6 (a) Herramienta de punta sencilla, (b) Herramienta de múltiples filos cortantes	9
Figura 2.7 Condiciones de corte en el proceso de torneado	10
Figura 2.8 Corte Ortogonal: (a) Como un proceso tridimensional y (b) dos dimensiones en una vista lateral	13
Figura 2.9 Deformación cortante	14
Figura 2.10 Forma de la viruta	15
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	16
Figura 2.12 Temperatura contra velocidad de corte para varios materiales de trabajo	18
Figura 3.1 Falla por fractura en las herramientas de corte	19
Figura 3.2 Falla por temperatura en una herramienta de corte	20
Figura 3.3 Falla por gradual de flanco (izquierdo) y de cráter (derecho)	20
Figura 3.4 Desgaste de la herramienta	21
Figura 3.5 Relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte	27
Figura 3.6 Curvas de desgaste de la herramienta para varias velocidades de corte	28
Figura 3.7 Vida de la herramienta	29
Figura 3.8 Operaciones de mandrinado	34
Figura 3.9 Partes típicas hechas por mandrinado	34
Figura 3.10 Sierra cinta típica	35
Figura 3.11 Sierra de brazo superior	35
Figura 3.12 Sierra de corte	36
Figura 3.13 Cortador Sierra	36
Figura 3.14 a) Terminología para dientes de sierra, b) tipos de dientes de sierra, en "zig zag" para dar holgura y evitar dobladuras	37
Figura 3.15 Cortadores de fresadora	38
Figura 3.16 Herramientas de fresado	39

Figura 3.17 Clasificación del fresado según la posición de la herramienta	40
Figura 3.18 Fresado con rotación a favor del avance	41
Figura 3.19 Fresado con rotación en contra del avance	41
Figura 3.20 Operaciones del fresado horizontal	42
Figura 3.21 Fresado horizontal	43
Figura 3.22 Desplazamiento de la herramienta	45
Figura 3.23 Desplazamiento de la herramienta	46
Figura 3.24 Proceso de la pieza al fresar	47
Figura 3.25 Ángulos de corte en los filos de la fresadora	47
Figura 3.26 Ángulos de corte y paso entre dientes para trabajo de diferentes materiales	49
Figura 3.27 Disposición de los filos	49
Figura 3.28 Dirección del corte y dirección del filo	50
Figura 3.29 Fresas cilíndricas y fresas frontales cilíndricas	50
Figura 3.30 Las fresas en forma de disco se utilizan para fresar entalladuras estrechas	51
Figura 3.31 Fresa con vástago	51
Figura 3.32 Fresas de forma	52
Figura 3.33 Plato de cuchillas	52
Figura 3.34 Forma de los filos en una fresa con despulla	53
Figura 3.35 Fresa de forma con despulla	53
Figura 3.36 Fresa compuesta, formada a base de una fresa de disco de dientes cruzados, de una fresa cilíndrica y de una fresa de forma de despulla	53
Figura 3.37 Fresa compuesta formada por dos fresas de disco, una fresa cilíndrica con hélice a la izquierda y otra con hélice a la derecha, para neutralizar el empuje axial	54
Figura 4.1 Fresado vertical indicando el ancho de la herramienta	60
Figura 4.2 Dos tipos básicos de la operación de fresado	63
Figura 4.3 Fresado periférico	63
Figura 4.4 Dos formas de fresado con una fresa de 20 dientes	64
Figura 4.5 Operaciones de fresado	65
Figura 4.6 Elementos de la geometría de una fresa plana de 18 dientes	66
Figura 4.7 Elementos de la geometría de una fresa frontal de 4 dientes	66
Figura 4.8 Cortador para acabado o fresa terminal	67
Figura 4.9 Fresado de una plancha	68
Figura 4.10 Fresa centrada sobre la pieza de trabajo	69
Figura 4.11 Fresadora sobresaliente a uno de los lados de la pieza de trabajo	69
Figura 4.12 Centro de maquinado de control numérico EMCO PC MILL 125	70
Figura 4.13 Ejemplos de piezas de trabajo en máquinas-herramientas CNC	77
Figura 4.14 Clasificación de tipos de control para desplazamientos	77

Figura 4.15 Para mantener una velocidad constante de avance al fresar una curva, se necesita variar la velocidad del carro en X y Y, es decir, X a X <sub>2</sub> ; Y a Y <sub>2</sub>	78
Figura 4.16 Ejemplos de señales de entrada y condiciones reales de respuesta	79
Figura 4.17 a) Tipos de sistemas de impulsión para desplazar carros de máquinas-herramientas, b) Ejemplos de métodos analógicos y digitales para obtener alimentación en la Posición del carro	80
Figura 4.18 Secciones de lazo abierto y cerrado para controles de carro de máquina-herramienta	80
Figura 4.19 Tiempo de ciclo de la pieza en relación con la velocidad de corte	85
Figura 4.20 Costo de la pieza en relación con la velocidad de corte	86
Figura 5.1 Rangos de rugosidad superficial que pueden obtenerse mediante métodos comunes de producción	88
Figura 5.2 Lamina con diferentes acabados superficiales	88
Figura 5.3 Longitud que recorre el palpador durante la medición	89
Figura 5.4 Ilustra la superficie de una pieza en la que se observan marcas originadas por el maquinado, también se muestra la amplificación de la superficie donde se observan las irregularidades más claramente	90
Figura 5.5 Curva P (perfil de rugosidad sin filtrar)	91
Figura 5.6 Curva R (perfil de rugosidad)	91
Figura 5.7 Muestra la línea media	92
Figura 5.8 Forma en la que se mide la rugosidad Ra	93
Figura 5.9 Picos y valles medidos de acuerdo a las normas JIS e ISO	94
Figura 5.10 Muestra la manera de calcular Rz de acuerdo con la norma DIN	94
Figura 5.11 Muestra la manera de calcular Ry	95
Figura 5.12 Muestra el símbolo básico de rugosidad con las definiciones de cada parámetro	98
Figura 5.13 Símbolo de rugosidad mas comúnmente utilizado	98
Figura 6.1 Termómetro infrarrojo RAYMX4PE	100
Figura 6.2 Rugosímetro Mitutoyo SJ-301	100
Figura 6.3 Herramientas usadas para el maquinado	101
Figura 6.4 Centro de maquinado EMCO PC MILL 125	101
Figura 6.5 Acero 1018	102
Figura 6.6 Aluminio 6063	102
Figura 6.7 Acero 4041 Recocido y Estirado en Frío	102
Figura 6.8 Ensamble del pirómetro en la máquina	102
Figura 6.9 Rayo láser emitido por el pirómetro	104
Figura 6.10 Medición de la rugosidad en las piezas terminadas	104
Figura 7.1 Medición de la temperatura	105
Figura 7.2 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min	106

Figura 7.3 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min	106
Figura 7.4 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min	107
Figura 7.5 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min	107
Figura 7.6 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min	108
Figura 7.7 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min	108
Figura 7.8 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min	109
Figura 7.9 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min	109
Figura 7.10 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min	110
Figura 7.11 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min	110
Figura 7.12 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min	111
Figura 7.13 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min	111
Figura 7.14 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min	112
Figura 7.15 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min	112
Figura 7.16 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min	113
Figura 7.17 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min	113
Figura 7.18 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min	114
Figura 7.19 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min	114
Figura 7.20 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min	115
Figura 7.21 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min	115
Figura 7.22 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min	116
Figura 7.23 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min	116
Figura 7.24 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min	117
Figura 7.25 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min	117
Figura 7.26 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min	118
Figura 7.27 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min	118
Figura 7.28 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min	119
Figura 7.29 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min	119
Figura 7.30 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min	120
Figura 7.31 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min	120
Figura 7.32 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min	121
Figura 7.33 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min	121
Figura 7.34 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min	122
Figura 7.35 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min	122
Figura 7.36 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min	123
Figura 7.37 Resultados de temperatura para un avance de 50 mm/min	123
Figura 7.38 Resultados de temperatura para un avance de 60 mm/min	124
Figura 7.39 Resultados de temperatura para un avance de 70 mm/min	124
Figura 7.40 Resultados de temperatura para un avance de 80 mm/min	125
Figura 7.41 Resultados de temperatura para un avance de 90 mm/min	125
Figura 7.42 Resultados de temperatura para un avance de 100 mm/min	126
Figura 7.43 Resultados de temperatura para un avance de 110 mm/min	126
Figura 7.44 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min	128



Figura 7.45 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min	128
Figura 7.46 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min	129
Figura 7.47 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min	129
Figura 7.48 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min	129
Figura 7.49 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min	129
Figura 7.50 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min	129
Figura 7.51 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min	130
Figura 7.52 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min	130
Figura 7.53 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min	130
Figura 7.54 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min	130
Figura 7.55 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min	130
Figura 7.56 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min	131
Figura 7.57 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min	131
Figura 7.58 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min	131
Figura 7.59 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min	131
Figura 7.60 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min	131
Figura 7.61 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min	132
Figura 7.62 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min	132
Figura 7.63 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min	132
Figura 7.64 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min	132
Figura 7.65 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min	132
Figura 7.66 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min	133

Figura 7.67 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min	133
Figura 7.68 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min	133
Figura 7.69 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min	133
Figura 7.70 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min	133
Figura 7.71 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min	134
Figura 7.72 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min	134
Figura 7.73 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min	134
Figura 7.74 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min	134
Figura 7.75 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min	134
Figura 7.76 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min	135
Figura 7.77 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min	135
Figura 7.78 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min	135
Figura 7.79 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 50 mm/min	135
Figura 7.80 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 60 mm/min	135
Figura 7.81 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 70 mm/min	136
Figura 7.82 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 80 mm/min	136
Figura 7.83 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 90 mm/min	136
Figura 7.84 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 100 mm/min	136
Figura 7.85 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 110 mm/min	136
Figura 7.86 Rugosidad para Aluminio 6063 S800	137
Figura 7.87 Rugosidad para Aluminio 6063 S1000	138
Figura 7.88 Rugosidad para Acero 1018 S800	139
Figura 7.89 Rugosidad para Acero 1018 S1000	139
Figura 7.90 Rugosidad para Acero 4140 S800	140
Figura 7.91 Rugosidad para Acero 4140 S1000	141

Figura 7.92 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el aluminio 6063 a una velocidad de giro de 800 RPM	142
Figura 7.93 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el aluminio 6063 a una velocidad de giro de 1000 RPM	143
Figura 7.94 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 1018 a una velocidad de giro de 800 RPM	144
Figura 7.95 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 1018 a una velocidad de giro de 1000 RPM	144
Figura 7.96 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 4140 a una velocidad de giro de 800 RPM	146
Figura 7.97 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 4140 a una velocidad de giro de 1000 RPM	146



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## LISTADO DE TABLAS

TABLA		PÁGINAS
Tabla # 1	Máquinas-herramientas convencionales usadas para las tres operaciones comunes de maquinado	12
Tabla # 2	Elementos de cada aleación con sus propiedades	31
Tabla # 3	Las herramientas y su utilización	32
Tabla # 4	Algunas herramientas y como se agrupan para su clasificación	33
Tabla # 5	Ángulos de corte, clase de materiales y tipos de fresas	48
Tabla # 6	Diferentes herramientas y la temperatura de trabajo según diseño	55
Tabla # 7	Fluidos para corte	56
Tabla # 8	Fluidos de corte y su efecto refrigerante o lubricante	57
Tabla # 9	Tabla para obtener la velocidad óptima de maquinado para cada material	59
Tabla # 10	Viruta admisible en una fresadora	61
Tabla # 11	Parámetros de rugosidades utilizados en diferentes países	93
Tabla # 12	Muestra las direcciones de marca producidas por el proceso de maquinado	96
Tabla # 13	Símbolos de rugosidades sin indicación adicional	97
Tabla # 14	Símbolos de rugosidad con indicación del principal criterio de rugosidad Ra	97
Tabla # 15	Símbolos de rugosidad con indicación adicional	97
Tabla # 16	Grado de rugosidad contra valor numérico	99

## LISTADO DE ECUACIONES

ECUACIÓN	PÁGINAS	
Ecuación # 1	Velocidad de remoción de material	10
Ecuación # 2	Potencia de corte	16
Ecuación # 3	Temperatura media en la interfase herramienta-viruta	17
Ecuación # 4	Temperatura medida en la interfase herramienta viruta	18
Ecuación # 5	Avance en el fresado Horizontal	42
Ecuación # 6	Encaje de avance	42
Ecuación # 7	Espesor máximo de viruta no deformada	43
Ecuación # 8	Encaje axial	43
Ecuación # 9	Diámetro exterior	43
Ecuación # 10	Ángulo de inclinación	44
Ecuación # 11	Encaje axial máximo	44
Ecuación # 12	Encaje axial máximo	44
Ecuación # 13	Tiempo maquinado	44
Ecuación # 14	Material removido por unidad de tiempo	45
Ecuación # 15	Potencia para la operación de maquinado	45
Ecuación # 16	Espesor máximo de viruta (fresado vertical)	45
Ecuación # 17	Tiempo de maquinado (fresado vertical)	45
Ecuación # 18	Tiempo de maquinado (fresado vertical)	46
Ecuación # 19	Número de revoluciones de operación	58
Ecuación # 20	Cantidad máxima de viruta posible de una fresadora	60
Ecuación # 21	Cantidad máxima de viruta posible de una fresadora	61
Ecuación # 22	Velocidad de avance	61
Ecuación # 23	Tiempo Principal	61
Ecuación # 24	Longitud total de recorrido sobre la pieza	62
Ecuación # 25	Velocidad de rotación del husillo	67
Ecuación # 26	Velocidad de avance (pulg./min.)	67
Ecuación # 27	Velocidad de remoción de material	67
Ecuación # 28	Distancia de aproximación para alcanzar la velocidad de corte completo	68
Ecuación # 29	Tiempo para fresar la pieza de trabajo	68
Ecuación # 30	Profundidad de devaste inicial	69
Ecuación # 31	Profundidad de devaste inicial	69
Ecuación # 32	Tiempo de maquinado de los casos	70
Ecuación # 33	Tiempo de ciclo de producción por pieza	84
Ecuación # 34	Tiempo de maquinado	85
Ecuación # 35	Promedio de los picos mas altos y valles mas bajos (JIS, ISO)	94
Ecuación # 36	Promedio del pico mas alto y valle mas bajo (DIN)	94

## ANEXO A

### EQUIPO UTILIZADO

#### A.1 Termómetro infrarrojo RAYMX4PE marca Raytek.

El aparato mide la cantidad de la radiación infrarroja emitida por el objeto a medir en cuestión y partiendo de ello calcula la temperatura de su superficie. Las características técnicas del termómetro infrarrojo RAYMX4PE se muestran en las siguientes tablas:

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	VALORES
Rango de temperatura	-30 a 900°C (-25 a 1600°F)
Resolución de la lectura	0.1°C (0.2°F)
Precisión	+1% del valor de la lectura o $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ( $\pm 1.5^{\circ}\text{F}$ ), lo que sea mayor, a 23°C ambiente. $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ( $\pm 4^{\circ}\text{F}$ ) para temp. Debajo de 0°C (32°F)
Repetibilidad	$\pm 0.5\%$ de la lectura o $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (1.5°F) lo que sea mayor
Tiempo de respuesta (95%)	250 mseg.
Respuesta espectral	8 a 14 micras
Resolución óptica	60:1 en el punto focal hasta 35:1 campo lejano
Temp. Ambiente de operación	0 a 50°C (32 a 122°F)
Temperatura Ambiente Láser máximo	45°C (113°F)
Temp. Almacenaje s/baterías	-30 a 50°C (-25 a 122°F)
Salida Analógica	1mV/°C (°F)
Alimentación	Batería alcalina. 2x1.5V, tipo AA
Dimensiones	200x170x50mm (7.9x6.7x2plg)
Montaje en triple	¼" 20UNC

AJUSTES DE FABRICA	AJUSTE	RANGO
Emisividad / Ganancia	0.95	0.10 a 1.50 en incrementos de 0.01
Tabla de emisividad	Libre	30 materiales
Modo	Normal	
Alarma alta	50°C (100°F)	-30 a 900°C (-25 a 1600°F)
Alarma baja	0°C (32°F)	-30 a 900°C (-25 a 1600°F)
Ajuste de compensación	0°C (0°F)	-10 a 10°C (-18 a 18°F)
Pantalla gráfica	Auto rango	Auto Rango / Rango Manual
Ciclo	0.5 seg.	0.1 seg. a 300 seg.
Modo de impresión	Registro de datos	3 modos, seleccionables por software
Salida impresora	ASCII 8 bit 1 bit de paro Sin paridad Velocidad de transmisión: 9600bd	
Almacenamiento de datos	100 puntos Preasignado con Emisividad de 0.95 Alarma baja: 0°C Alarma alta: 50°C Ajustable solo por software	

## A.2 Medidor de rugosidad superficial (Rugosímetro) SJ-301.

El Rugosímetro SJ-301 es un instrumento del tipo estilógrafo que mide la rugosidad superficial, el cual ha sido desarrollado para ser usado en superficies lisas.

El SJ-301 es capaz de evaluar la textura de superficies con una variedad de parámetros de acuerdo a varias normas nacionales e internacionales. Los resultados de la medición son mostrados digital y gráficamente en la pantalla sensible al tacto y pueden ser impresos en la impresora integrada.

### A.2.1 Principio de medición del Rugosímetro SJ-301.

El estilógrafo de la unidad detectora del SJ-301 traza las más mínimas irregularidades de la superficie de la pieza de trabajo. La rugosidad de la superficie es determinada por el desplazamiento vertical del estilógrafo producido durante el movimiento recorrido del detector sobre las irregularidades de la superficie. Los resultados de la medición son mostrados digital y gráficamente en la pantalla sensible al tacto y pueden ser impresos en la impresora integrada.

### A.2.2 Especificaciones del SJ-301 marca Mitutoyo.

Modelo	SJ-301.	
Calibración	178-953-2 (para mm).	178-952-2 (para mm).
	178-954-2 (para in/mm).	178-955-2 (para in/mm).
Método de detección	Método de inductancia diferencial.	
Rango de medición	350 $\mu\text{m}$ (-200 a +150 $\mu\text{m}$ ).	
Material del estilógrafo	Diamante.	
Radio de la punta	5 $\mu\text{m}$ .	2 $\mu\text{m}$ .
Fuerza de medición	4mN (0.4gf).	0.75mN (0.075gf).
Radio del estilógrafo	40mm (1.57in).	

### A.2.3 Unidad conductora.

Modelo	SJ-301
Rango de manejo del detector	21mm.
Velocidad del recorrido	Avance: 0.25mm/s, 0.5 mm/s. Regreso: 1mm/s.
Función de retracción del detector	Estilógrafo UP
Configuración baja	V-way

### A.2.4 Unidad de despliegue.

Normas compatibles de textura de superficies:

- JIS (B 0601-1994, B 0601-1982)
- DIN
- ISO
- ANSI

### A.2.5 Perfiles medidos y filtros aplicables.

Perfil medido	Filtro
Perfil R DIN4776	GAUSS PC75 2RC (sin corrección de fase)
Perfil P	-
Perfil MOTIF.R	-
Perfil MOTIF.W	-



Longitud de corte/longitud de muestreo, número de longitudes de muestreo e intervalos de muestreo.

Longitud de corte ( $\lambda_c$ )	Longitud del muestreo (l)	$\lambda_s$	Intervalo de muestreo	Número de muestras por longitud	Número de longitudes de muestreo
0.08 mm.	0.08 mm.	2.5 $\mu$ m.	0.25 $\mu$ m.	320	1,3,5
0.25 mm.	0.25 mm.	2.5 $\mu$ m.	0.25 $\mu$ m.	1000	1,3,5
0.8 mm.	0.8 mm.	2.5 $\mu$ m.	0.5 $\mu$ m.	1600	1,3,5
2.5 mm.	2.5 mm.	8 $\mu$ m.	1.5 $\mu$ m.	1666	1,3,5
8 mm.	8 mm.	25 $\mu$ m.	5 $\mu$ m.	1600	1

Longitud de evaluación arbitraria (L)	Longitud de corte ( $\lambda_c$ )	$\lambda_s$	Intervalo de muestreo	Número de muestras
0.3 mm. $\leq L < 1.2$ mm.	0.25 mm.	2.5 $\mu$ m.	0.25 $\mu$ m.	1000-4800
1.2 mm. $\leq L < 4$ mm.	0.8 mm.	2.5 $\mu$ m.	0.5 $\mu$ m.	2400-8000
4 mm. $\leq L \leq 12.5$ mm.	2.5 mm.	8 $\mu$ m.	1.5 $\mu$ m.	2666-8333

Longitud límite inferior (A)	Longitud límite superior (A)	Longitud de evaluación (L)	Longitud de corte ( $\lambda_c$ )	Intervalo de muestreo
0.02 mm.	0.1 mm.	0.3 mm. $\leq L \leq 0.64$ mm.	2.5 $\mu$ m.	0.25 $\mu$ m.
0.1 mm.	0.5 mm.	0.7 mm. $\leq L \leq 3.2$ mm.	2.5 $\mu$ m.	0.5 $\mu$ m.
0.5 mm.	2.5 mm.	3.3 mm. $\leq L \leq 16$ mm.	8 $\mu$ m.	1.5 $\mu$ m.

### A.2.6 Parámetros de rugosidad y rango de despliegue.

Parámetro	Rango de despliegue
$R_a$ $R_q$	0.01 a 100 $\mu\text{m}$ .
$R_y$ $R_z$ $R_p$ $R_k$ $R_x$ $W_x$ $W_{te}$	0.02 a 350 $\mu\text{m}$ .
AR AW	2 a 350 $\mu\text{m}$ .
$P_c$ HSC	2.5 a 5000 $\text{cm}^{-1}$
$S_m$ S	2 a 4000 $\mu\text{m}$ .
$m_r$ $M_{r1}$ $M_{r2}$	0% a 100%
$\delta_c$	-350 a 350 $\mu\text{m}$ .
$L_0$	0.1 a 99.999 mm.
$A_1$ $A_2$	0 a 15000
$\Delta_a$ $\Delta_q$	0.01 a 100
$S_k$	-99.99 a 99.99
$V_0$	0 a 999.99

### A.2.7 Longitud de evaluación.

Perfil	Longitud de evaluación
Perfil R	Longitud de corte ( $\lambda_c$ ) x número de longitudes de muestreo (1, 3, 5)
Perfil P	Longitud del muestreo (l) x número de longitudes de muestreo (1, 3, 5)
Perfil MOTIF.R	0.64, 3.2, 16mm
Perfil MOTIF.W	0.64, 3.2, 16mm

### A.2.8 Rango y resolución de la medición.

Rango de medición	Resolución
Automático	0.01 $\mu\text{m}$ dependiendo del rango
350 $\mu\text{m}$ (14000 $\mu\text{in}$ )	0.4 $\mu\text{m}$ .
100 $\mu\text{m}$ (4000 $\mu\text{in}$ )	0.1 $\mu\text{m}$ .
50 $\mu\text{m}$ (2000 $\mu\text{in}$ )	0.05 $\mu\text{m}$ .
10 $\mu\text{m}$ (400 $\mu\text{in}$ )	0.01 $\mu\text{m}$ .

### A.3 Centro de maquinado EMCO PC MILL 125.

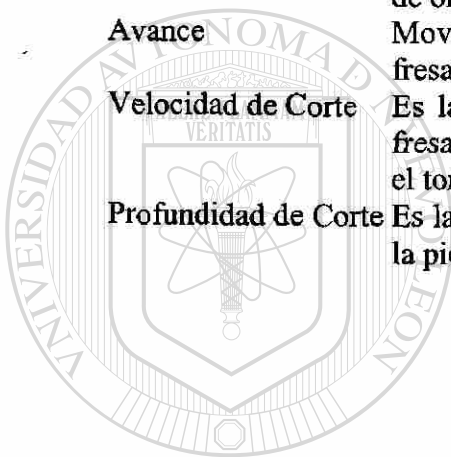
#### A.3.1 Características técnicas.

Área de trabajo	
Recorrido longitudinal del carro (eje x)	185 mm.
Recorrido transversal del carro (eje y)	125 mm.
Recorrido vertical del carro (eje z)	200 mm.
Carrera vertical útil (z)	100 mm.
Distancia entre el cabezal y la superficie de mesa	95 -195 mm.
Mesa de fresado	
Superficie de fijación (l x t)	520 x 125 mm.
Carga máxima de la mesa	10 Kg.
2 ranuras en T	11 mm.
Distancia entre las ranuras en T	90 mm.
Husillo de la fresa	
Cojinete del husillo	40 mm. $\phi$
Tipo de cojinete	De rodamiento.
Recepción de herramienta: como DIN 2079	SK 30.
Amarre de herramienta	Automático.
Accionamiento del husillo de la fresa	
Motor de corriente alterna	
Potencia a 100%/60% ED	640/700 W.
Revoluciones del motor	5,000 rpm.
Gamma de revoluciones (infinitamente variable)	150-5,000 rpm.
Par de giro máximo del husillo de la pieza (60% DC)	3.5 Nm.
Diámetro máximo de fresa para trabajos de fresado de acero	25 mm.
Capacidad de taladrar en aluminio (Torrador B)	16 mm.
Capacidad de roscar en aluminio (Torrador B)	M8 mm.
Motores de avance	
Resolución de paso/precisión	0.00125 mm.
Avance de trabajo en x/y/z (infinitamente variable)	0-4,000 mm/min.
Marcha rápida en x/y/z	4,500 mm/min.
Fuerza máxima de avance en x/y/z	2,000/2,000/2,400 mm/min.

## GLOSARIO

CNC	Control Numérico Computarizado.
CONACyT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
MAV	Maquinado a Alta Velocidad.
HRC	Escala de Dureza Rockwell C.
RPM	Revoluciones por minuto.
CAD	Diseño Asistido por Computadora.
CAM	Manufactura Asistida por Computadora.
Maquinado	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.
Torneado	Se utiliza 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.
Taladrado	Se usa para crear un agujero redondo. Esto se realiza generalmente con una herramienta rotatoria que tiene dos filos cortantes.
Fresado	Se utiliza una herramienta rotatoria con múltiples filos cortantes se mueve lentamente sobre el material para generar un plano o superficie recta.
MRR	Velocidad de remoción de material.
to	Espesor de la viruta antes del corte.
v	Velocidad de corte.
Qc	Calor específico volumétrico del material de trabajo.
K	Difusividad térmica del material de trabajo.
WC	Carburo de tungsteno.
TiC	Carburo de titanio.
TaC	Carburo de tantalio.
NbC	Carburo de niobio.
Co	Cobalto.
TiN	Nitruro de titanio.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido de aluminio.
TiCN	Nitruro de titanio carbono.
TiAlN	Nitruro de titanio y aluminio.
CDV	Deposición química por vapor.
PVD	Deposición física por vapor.
MTCVD	Deposición química por vapor a temperatura media.
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Nitruro de silicio.
CBN	Nitruro de Boro Cúbico.
PCD	Diamante policristalino.
WS	Acero de herramientas no aleado o acero al carbono.
SS	Acero de herramientas aleado o acero rápido.
HS	Acero duro aleado.

CN	Control Numérico.
CNA	Control Numérico Adaptativo.
ROM	Unidad de memoria fija.
RAM	Unidad de memoria volátil.
2D	Dos dimensiones.
2L, 3L, 4L	Designación para control lineal de dos, tres o cuatro ejes.
3D	Tres dimensiones.
IM	Índice de maquinabilidad.
cut-off	En los rugosímetros es el valor que se le da a la longitud de muestreo, se varía por medio de filtros que modifican la frecuencia de respuesta del amplificador y, por lo tanto, la forma de onda del perfil.
Avance	Movimiento que tiene la pieza de trabajo, en una operación de fresado; y lo tiene la herramienta para el torneado y el taladrado.
Velocidad de Corte	Es la velocidad con la que gira la herramienta de corte, para el fresado o el taladrado; y es con la que gira la pieza de trabajo, para el torneado.
Profundidad de Corte	Es la cantidad de material que penetra o corta la herramienta sobre la pieza de trabajo.



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# AUTOBIOGRAFÍA

Nacido el 21 de Octubre de 1973 en Ciudad Victoria, Tamaulipas, hijo del Lic. Sergio González González y la Sra. Juliana Ortiz de González. El primer hijo de 3 en su familia, Bernardo González Ortiz cursó el C.B.T.I.S. # 103 en especialidad Técnica en Electromecánica e Ingeniero Mecánico Administrador en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Su tesis para la obtención de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería de Manufactura con especialidad en Automatización, lleva por nombre "Optimización de las variables envueltas en el maquinado en un Centro de Maquinado de Control Numérico Computarizado".

Su experiencia profesional comenzó en Sistemas Distribuidos de Comunicación (SIDICOM) desarrollándose en el departamento de Proyectos y Administración, de ahí pasó a la Compañía Tecnología Electrónica Avanzada de México (TEAM) como Ingeniero de Servicio, y a la par ingreso a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, como Catedrático; en el 2000 ingresó a Equipos y Servicios de Monterrey como Ingeniero de mantenimiento, en esa fecha continuaba como catedrático en FIME, puesto que desempeña actualmente impartiendo las clases de Taller Mecánico y Eléctrico, Máquinas-Herramientas y su laboratorio, Metrología y su laboratorio, Dibujo Asistido por Computadora (AutoCad) y Diplomado en Maquinabilidad.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





GUANAJUATO

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECA