

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



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

POR

ING. INDIRA GARY ESCAMILLA SALAZAR

TESIS

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

CD. UNIVERSITARIA

FEBRERO 2004

L.G.F.S.

OPTIMIZACION DE LAS VARIABLES ENTIVERTAS EN EL

MAQUINAADO EN UN TORNO DE CONTROL NUMERICO

COMPUTARIZADO

TM
Z 5 8 5 3
. M 2
F I M E
2 0 0 4
. E 8 2

2004



1020149790



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

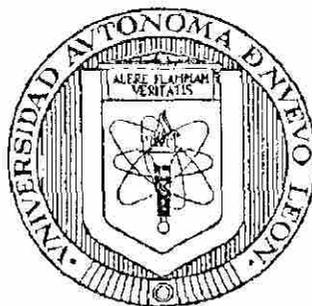
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



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

POR

ING. INDIRA GARY ESCAMILLA SALAZAR

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

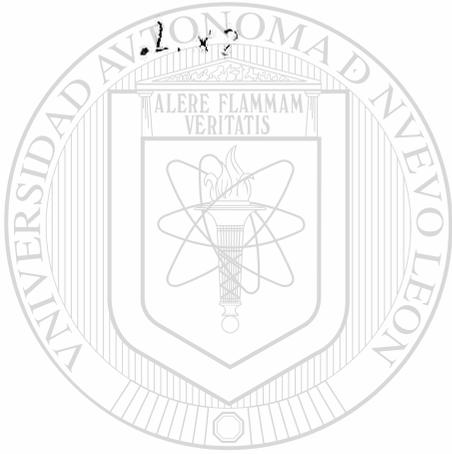
TESIS

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

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2004

990 46

T11
25853
.118
F.H.
2001



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

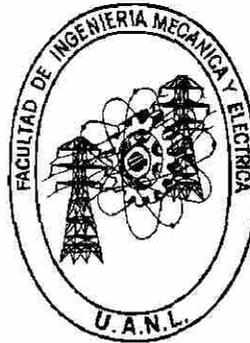


FONDO
TESIS

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 TORNO DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO

POR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
ING. INDIRA GARY ESCAMILLA SALAZAR

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
TESIS

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

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2004



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

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

El Comité de Tesis



Patricia Zambrano R.

Dra. Patricia del C. Zambrano Robledo

Asesor

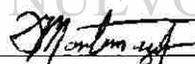


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



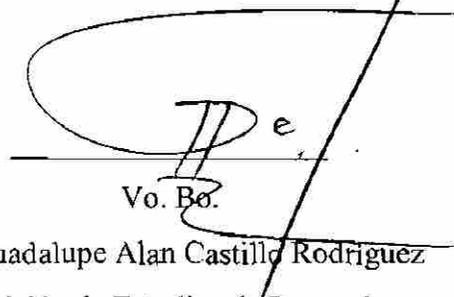
M. C. Arturo R. González Escamilla

Coasesor



M. C. Fernando Montemayor Ibarra

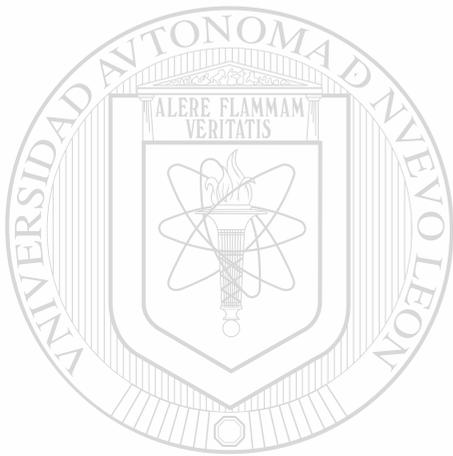
Coasesor



Vo. Bø.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez

División de Estudios de Posgrado



U A N L

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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN ^{Anónimo}

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS [®]

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

DEDICATORIA

A Dios:

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

A mis Fabulosos Padres:

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

A mi Amado Esposo:

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

A mis Hermanos:

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

A mi Abuelita:

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

A mis Grandes Amigos:

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

AGRADECIMIENTOS

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

A los Becarios de Máquinas-Herramientas:

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

A los Maestros:

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

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

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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ÍNDICE

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

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

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



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SÍNTESIS

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

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

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

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

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

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

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema:

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

1.2 Objetivo:

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

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

1.3 Hipótesis:

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

1.4 Límites:

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

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

1.5 Justificación del Trabajo:

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

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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

1.6 Metodología:

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

CAPÍTULO 2

TEORÍA DEL MAQUINADO DE METALES

2.1 Maquinado de alta velocidad

2.1.1 Introducción

Iniciado el siglo XXI es prácticamente inimaginable la revolución experimentada por la tecnología de fabricación en los últimos 10 o 15 años. La evolución de los ordenadores, de las nuevas tecnologías de comunicación, etc, están 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 maquinado de materiales y figuras que antes no se podían maquinar mediante el trabajo convencional, como por ejemplo: materiales con una dureza superior a 50 Hrc o paredes delgadas de 0.2 mm, etc.

2.1.2 ¿Qué es el maquinado de alta velocidad?

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

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

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

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

- ✦ Materiales blandos (aluminio, cobre, magnesio, etc.) que duros (aceros templados, titanio, níquel, etc.)
- ✦ Materiales de gran maquinabilidad (aluminio, magnesio,...) que de poca maquinabilidad (titanio, 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 muestra los rangos de velocidades de corte en función del material maquinado.¹

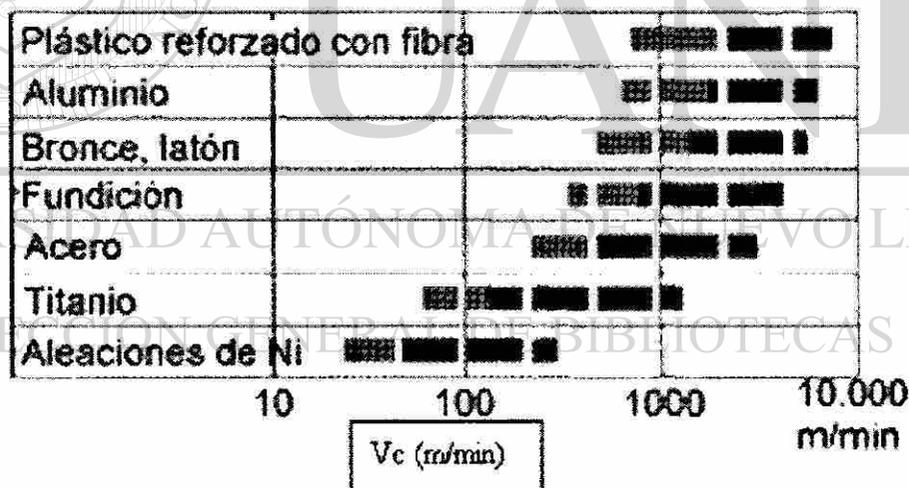


Figura 2.1 Rangos de velocidades de corte en función del material

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

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

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

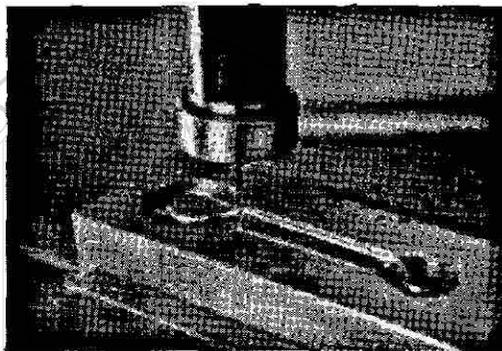


Figura 2.2 Maquinado de contorno CNC

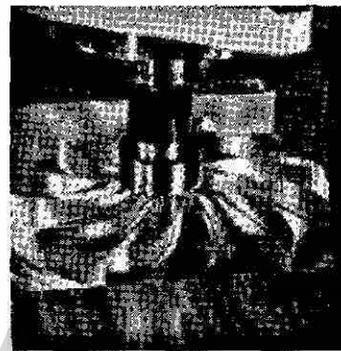


Figura 2.3 Maquinado de cara CNC

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

Ventajas que ofrece el MAV

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

2.2 Panorama general de la tecnología del maquinado

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

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

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

El maquinado es capaz de crear acabados superficiales muy tersos que pueden llegar a ser mejores que 0.4 μm . Algunos procesos abrasivos pueden lograr mejores acabados aún.

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

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

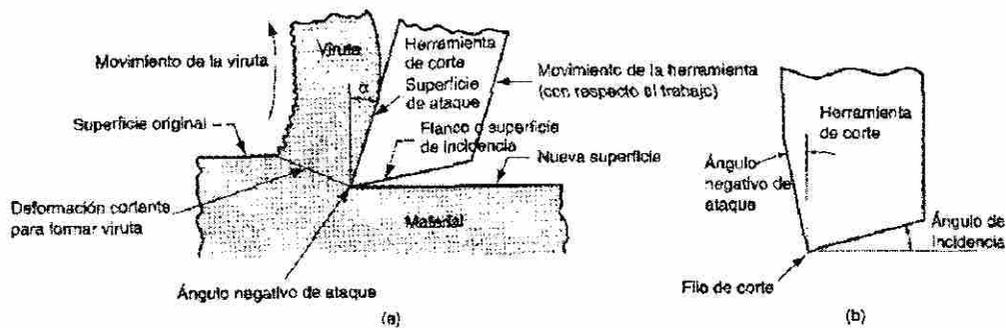


Figura 2.4 (a) Proceso de Torneado, (b) Herramienta de corte

2.2.1 Tipos de operaciones de maquinado

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

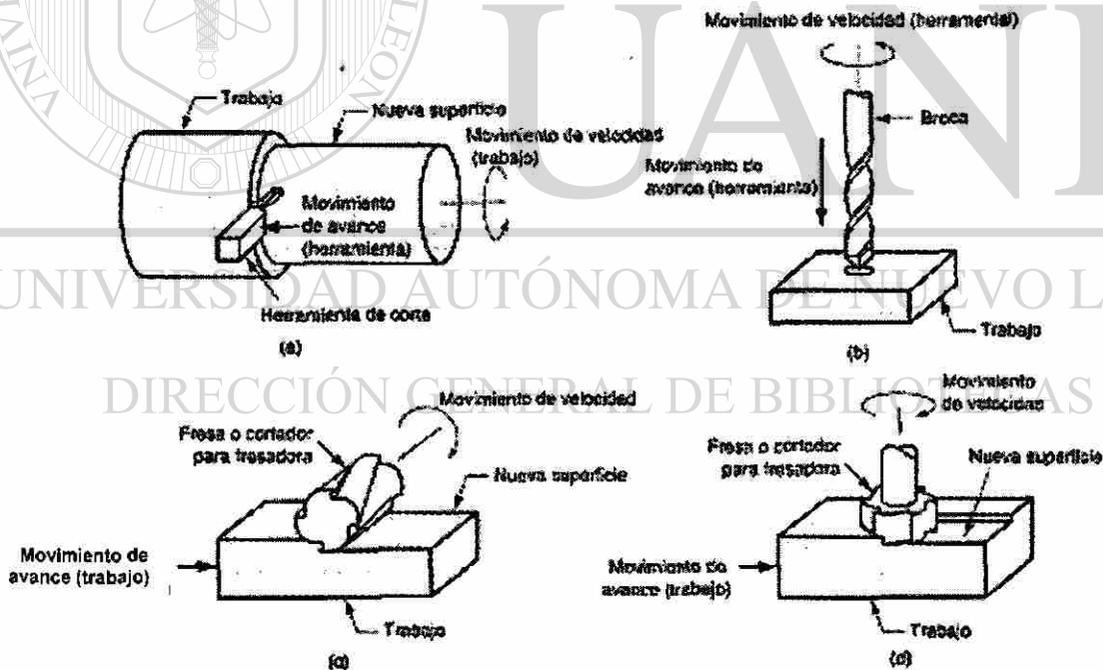


Figura 2.5 Los tres procesos más comunes de maquinado: (a) torneado, (b) taladrado y dos formas de fresado: (c) fresado periférico y (d) fresado de frente.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

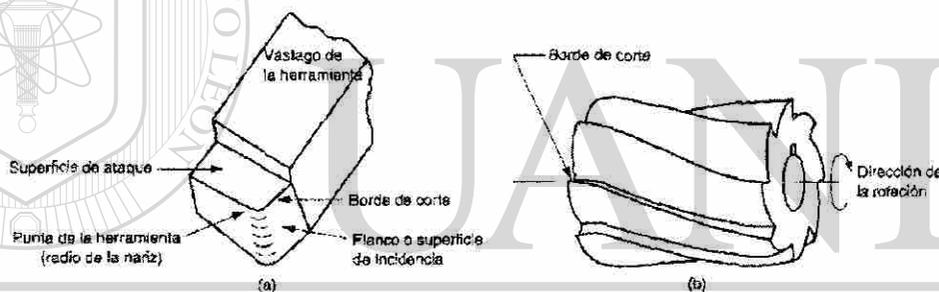


Figura 2.6 (a) Herramienta de punta sencilla, (b) Herramienta de múltiples filos cortantes

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

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

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

2.2.3 Condiciones de corte

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

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

donde MRR = velocidad de remoción de material en mm^3/seg .

v = velocidad de corte en mm/seg .

f = avance en mm/rev .

d = profundidad de corte en mm .

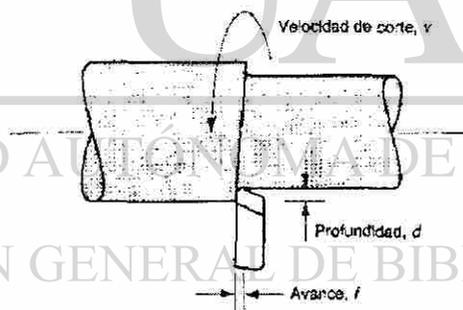


Figura 2.7 Condiciones de corte en el proceso de torneado

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

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

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

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

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

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

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

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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

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

2.3.1 Modelo de corte ortogonal.

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

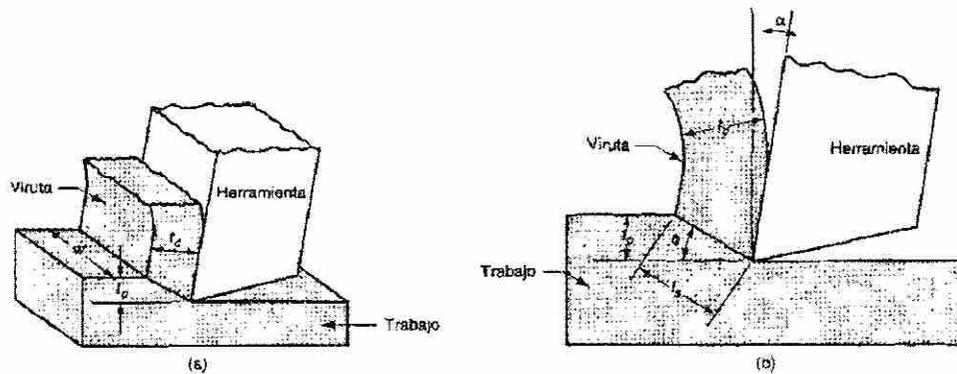


Figura 2.8 Corte Ortogonal: (a) Como un proceso tridimensional y (b) dos dimensiones en una vista lateral

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.

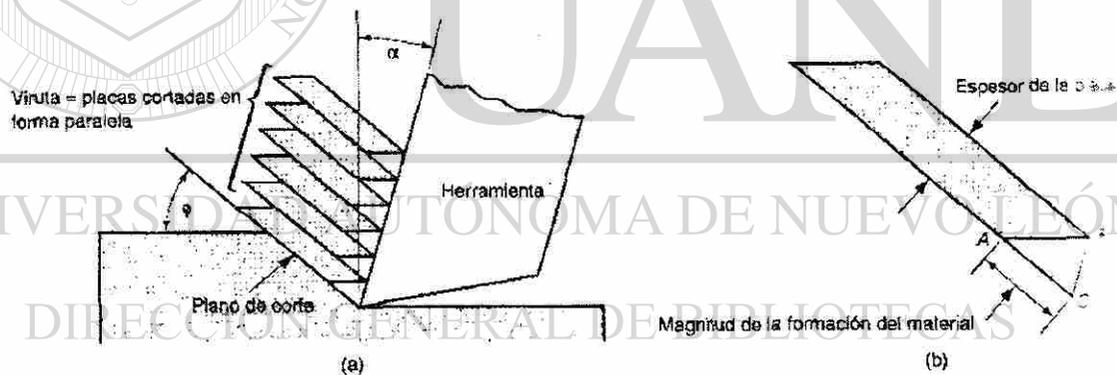


Figura 2.9 Deformación cortante

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.²

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.

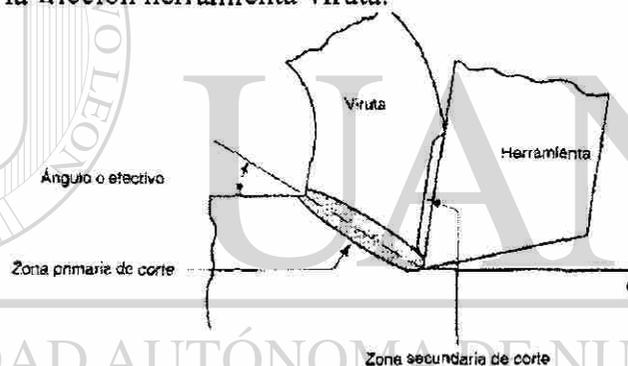


Figura 2.10 Forma de la viruta

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

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

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

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

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

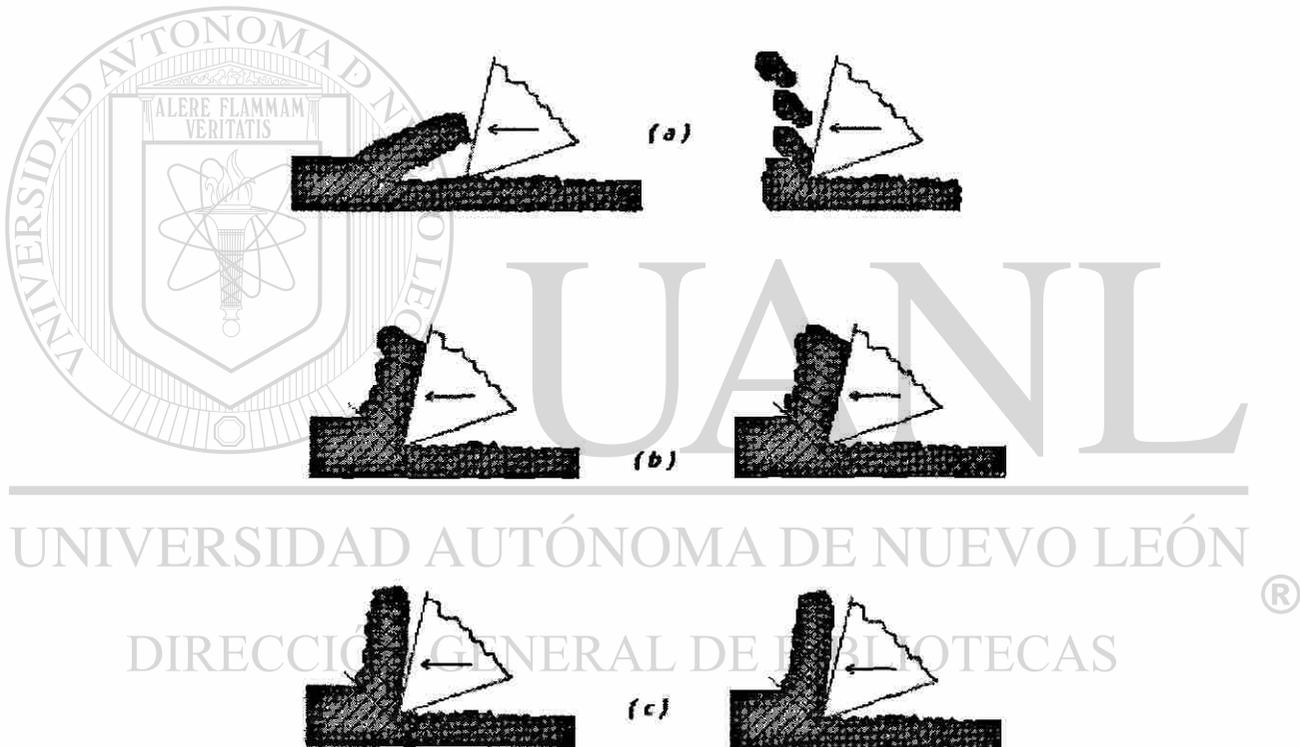


Figura 2.11 Tres tipos de formación de viruta en el corte de metales (a) discontinua, (b) continua y (c) continua con acumulación en el borde

2.4 Relaciones entre potencia y energía en el maquinado

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

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

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

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

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.^{4, 5, 6, 7}

2.4.2 Métodos analíticos

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

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

donde T = aumento de la temperatura media en la interfase herramienta-viruta,
 U = energía específica en la operación, N-m/mm³;
 v = velocidad de corte, mm/seg;
 t_o = espesor de la viruta antes del corte, m;
 Qc = calor específico volumétrico del material de trabajo;
 K = difusividad térmica del material de trabajo, mm²/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. Trigger⁸ determinó la relación entre velocidad y temperatura y obtuvo la siguiente forma general:

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

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

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

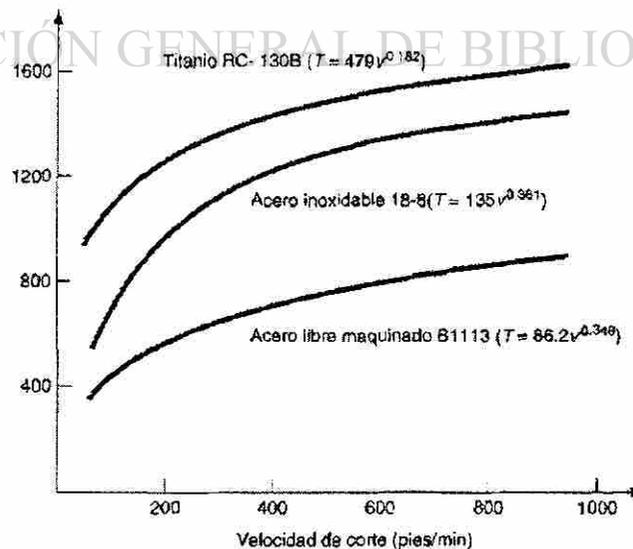


Figura 2.12 Temperatura contra velocidad de corte para varios materiales de trabajo

CAPÍTULO 3

TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

3.1 Vida de las herramientas

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

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

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

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

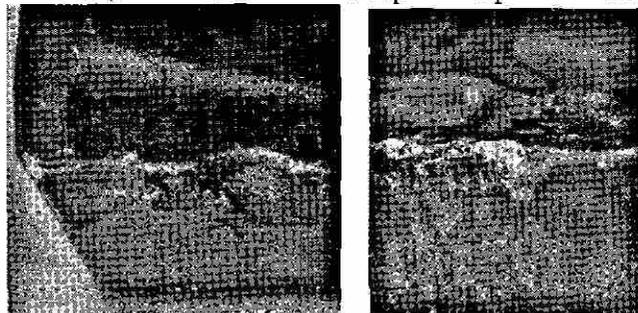


Figura 3.1 Falla por fractura en las herramientas de corte

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

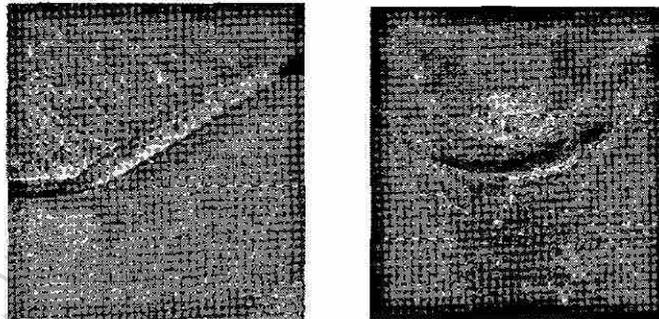


Figura 3.2 Falla por temperatura en una herramienta

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



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

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

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

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

3.1.1 Desgaste de la herramienta

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

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

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

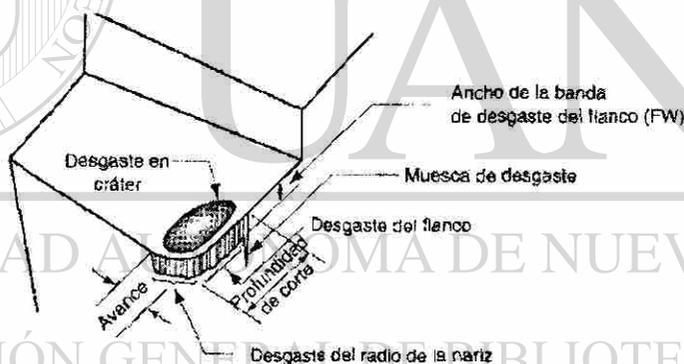


Figura 3.4 Desgaste de la herramienta

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Material de la herramienta

Sustrato

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Geometría

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

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

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

Mango cilíndrico largo: Para una mejor sujeción y equilibrio.

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

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

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

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

Herramientas enterizas y de insertos:

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

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

- **Recubrimientos**

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

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

Recubrimientos de TiAlN

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

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

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

Recubrimiento de diamante

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

Recubrimiento WC/C:

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

Recubrimientos de TiAlN monocapa combinado con WC/C

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

3.1.2 Vida de las herramientas

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

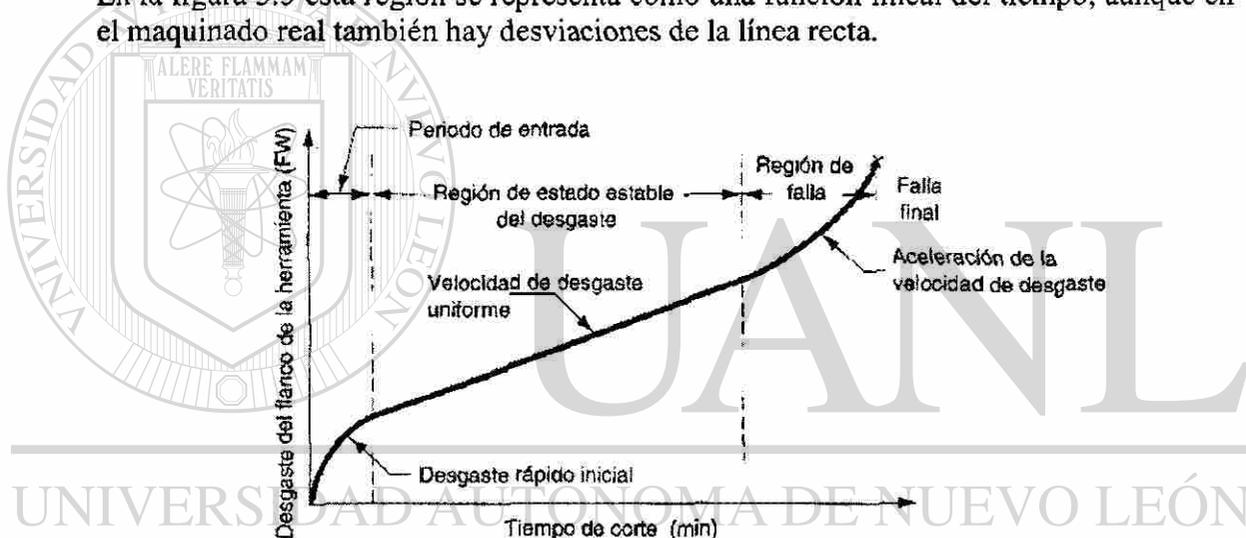


Figura 3.5 Relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte

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

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

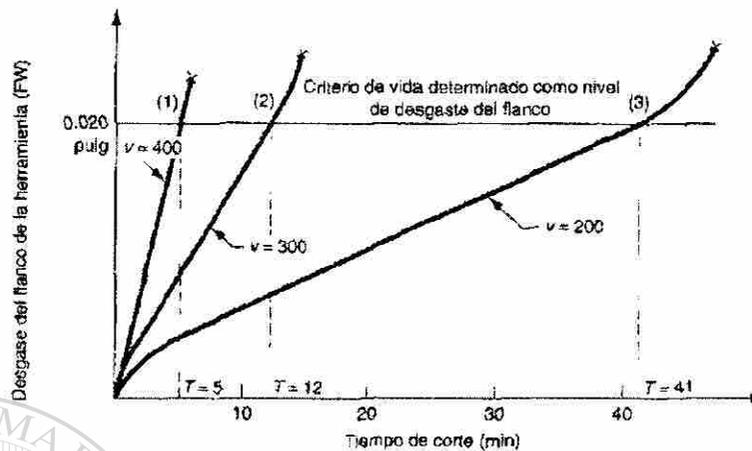


Figura 3.6 Curvas de desgaste de la herramienta para varias velocidades de corte

La vida de la herramienta se define como la longitud de tiempo de corte en el cual se puede utilizar la herramienta. Una forma de definirla consiste en permitir su operación hasta que ocurra una falla catastrófica. Esto se indica en la figura 3.7 por el final de cada curva de desgaste. Sin embargo, en producción frecuentemente es inconveniente usar una herramienta hasta que ocurra una falla, debido a las dificultades que acarrea el reafilado de la herramienta y a los problemas que ocasiona a la calidad de las partes de trabajo. Como una alternativa se puede seleccionar un nivel de desgaste como criterio de la vida de la herramienta y reemplazarla cuando el desgaste alcance este nivel. Un criterio conveniente de la vida de la herramienta es un cierto valor de desgaste del flanco o superficie de incidencia, como 0.05 mm que en la gráfica de la figura 3.7 se ilustra como una línea horizontal. Cuando cada una de las tres curvas de desgaste 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.

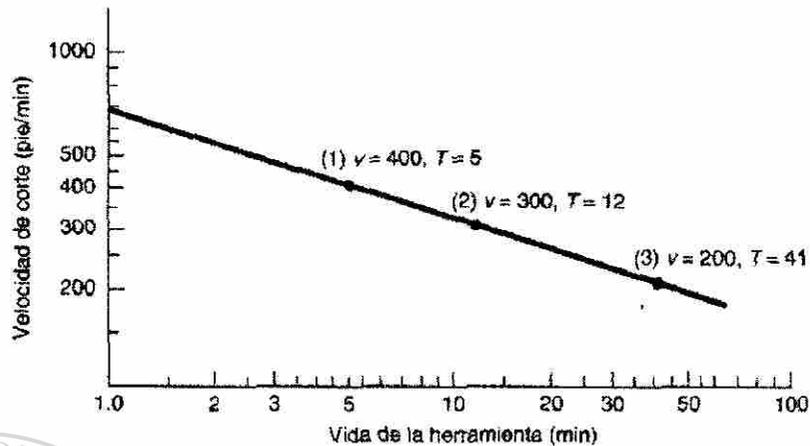


Figura 3.7 Vida de la herramienta

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-herramientas controladas por computadora, la cual se programa para registrar el tiempo total de corte de cada herramienta.

3.2 Materiales para herramientas

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

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

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

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

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

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

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

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

Tabla # 2 Elementos de cada aleación con sus propiedades

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

Herramienta	Características	Utilización
Aceros al Carbono y de baja aleación	Son el tipo de acero más antiguo en herramientas de corte. Son muy baratos. Tienen buena resistencia al impacto. Se pueden someter fácilmente a tratamientos térmicos como el 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 Niquel y Molibdeno.	W: Tungsteno C: Carbono Ti: Titanio Ta: Tantalio Nb: Niobio Opera a altas temperaturas debido a las altas velocidades de corte. Trabaja piezas de materiales con alta resistencia mecánica.	<input type="checkbox"/> Se emplean para maquinar fierros fundidos y metales abrasivos no ferrosos. Maquinar aceros. Cortar.
Carburos recubiertos	Son insertos normales de carburo revestidos con una capa delgada de carburo de titanio, nitruro de titanio u óxido de aluminio. Con el revestimiento se obtiene una resistencia superior al desgaste, a la vez que se mantiene la resistencia mecánica y la tenacidad. No se necesitan fluidos de corte, si se aplica debe ser en forma continua y en grandes cantidades, para evitar calentamiento y 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 hay en la actualidad. Se liga a un sustrato de carburo. La capa de CBN produce una gran resistencia al desgaste. Gran resistencia mecánica de los bordes. Es químicamente inerte al hierro y al níquel a altas temperaturas.	<input type="checkbox"/> Es adecuado para trabajar aleaciones de altas temperaturas y diversas aleaciones ferrosas. <input type="checkbox"/> Se emplea como abrasivo en operaciones de rectificado.

Tabla #3. Las herramientas y su utilización

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

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

3.3 Geometría de las herramientas

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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

DE ACUERDO AL NÚMERO DE FILOS	<ol style="list-style-type: none"> a. De un filo, como los buriles de corte de los tornos 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	<p>WS. Acero de herramientas no aleado. 0.5 a 1.5% de contenido de carbón. Soportan sin deformación o pérdida de filo 250°C. También se les conoce como acero al carbono.</p> <p>SS. Aceros de herramienta aleados con wolframio, cromo, vanadio, molibdeno y otros. Soporta hasta 600°C. También se les conoce como aceros rápidos.</p> <p>HS. Metales duros aleados con cobalto, carburo de carbono, tungsteno, wolframio y molibdeno. Son pequeñas plaquitas que se unen a metales corrientes para que los soporten. Soportan hasta 900°C.</p> <p>Diamante. Material natural que soporta hasta 1800°C. Se utiliza como punta de algunas barrenas o como polvo abrasivo.</p> <p>Materiales cerámicos. Se aplica en herramientas de arcilla que soportan hasta 1500°C. Por lo regular se utilizan para terminados.</p>
POR EL TIPO DE MOVIMIENTO DE CORTE	<ol style="list-style-type: none"> 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 torno.
POR EL TIPO DE VIRUTA QUE GENERA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Polvo sin forma definida o viruta discontinua. (Fig. 3.8 a) 2. Viruta continua, en forma de espiral. (Fig. 3.8 b) 3. Viruta continua con borde acumulado. (Fig. 3.8 c)
POR EL TIPO DE MÁQUINA EN LA QUE SE UTILIZA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Torno 2. Taladro 3. Fresa 4. Cepillo 5. Broca

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

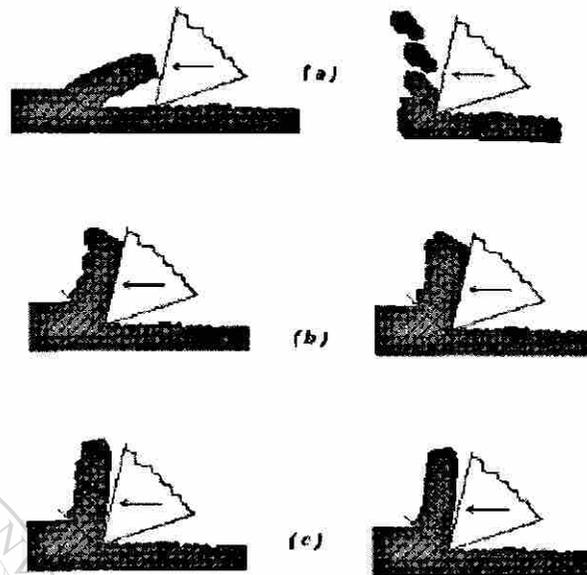


Figura 3.8 Tipos de virutas

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

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

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

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

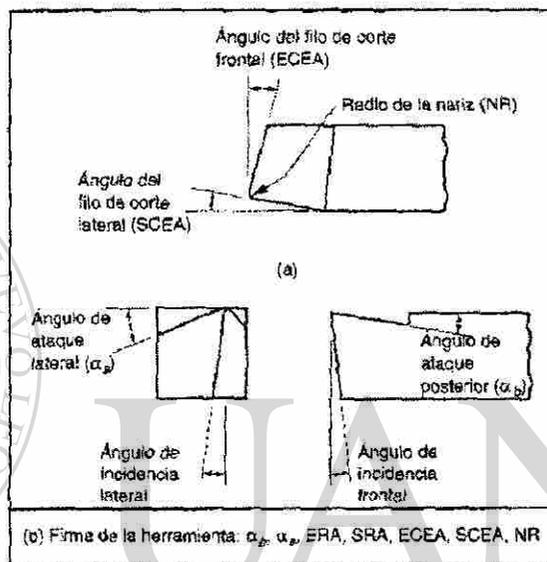


Figura 3.9 Geometría de la herramienta de punta sencilla

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

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

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

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

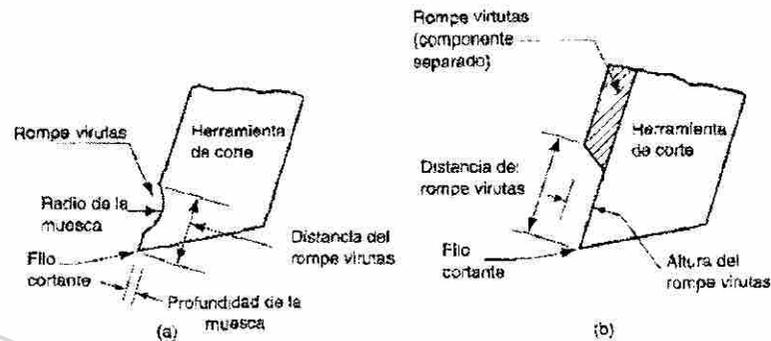


Figura 3.10 Diseños de rompevirutas

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

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

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

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

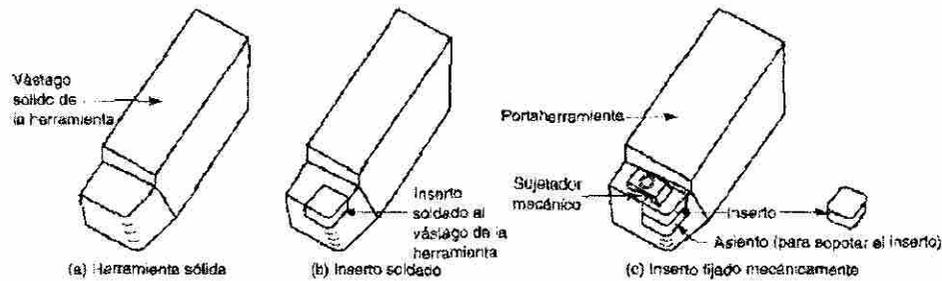


Figura 3.11 Geometría de la herramienta

Útiles para el torno

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

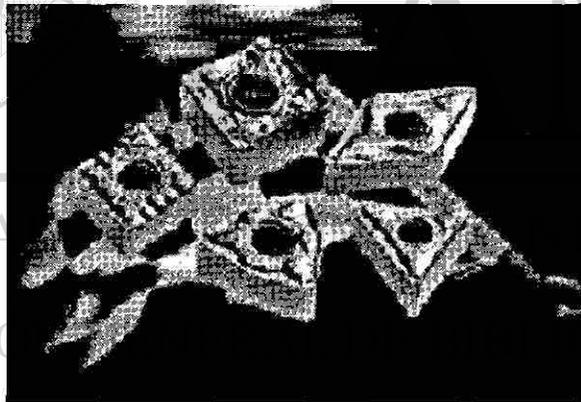


Figura 3.12 Pastillas para buriles de corte en torno

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

Útiles de desbaste:

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

Útiles de afinado:

- puntiagudos
- cuadrados

Útiles de corte lateral

- derechos
- izquierdos

Útiles de forma

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



UANL

Ángulos, filos y fuerzas

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

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

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

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

Ángulos

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

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

Superficies y ángulos de corte

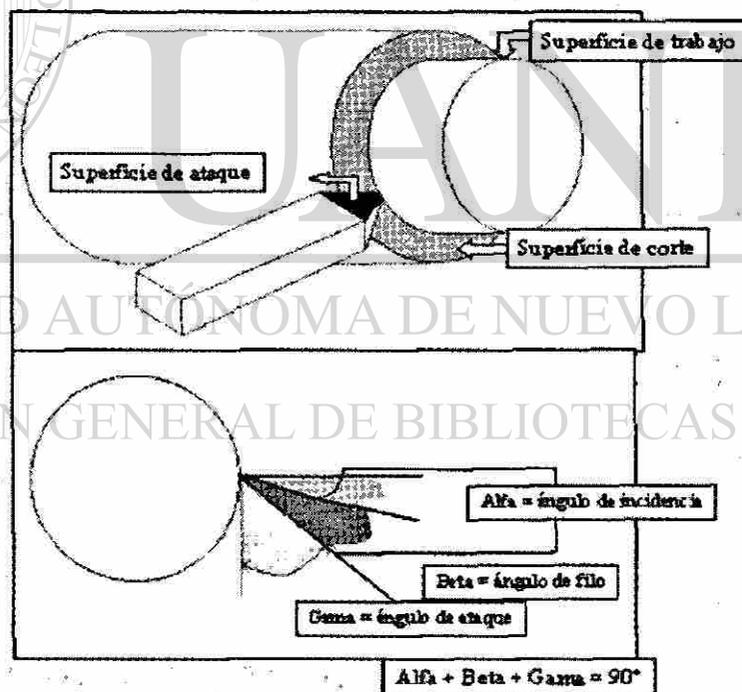


Figura 3.13 Superficies de ataque y ángulos

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

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

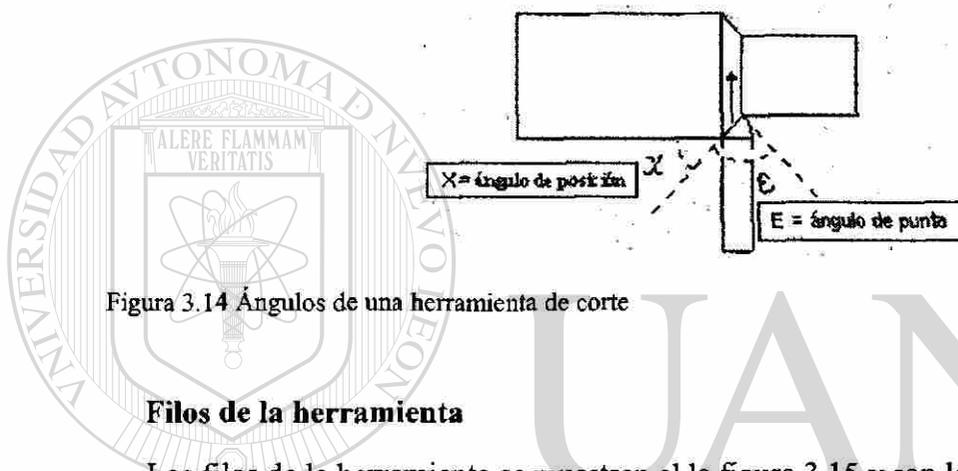


Figura 3.14 Ángulos de una herramienta de corte

Filos de la herramienta

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

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

Superficies y fuerzas de corte.

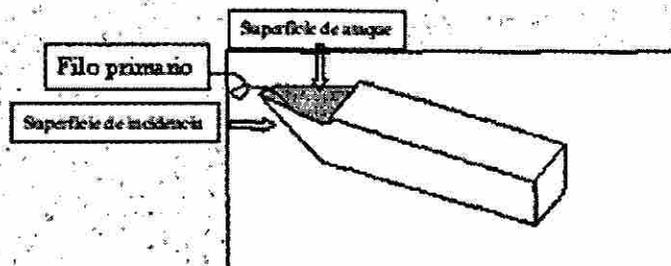


Figura 3.15 Filos de la herramienta

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

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

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

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

3.4 Fluidos para corte

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

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

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

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

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

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

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

Herramienta	Composición	Temperatura
WS. Acero de herramientas. 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.
SS. Aceros de herramienta aleados. También se les conoce como aceros rápidos.	Con wolframio, cromo, vanadio, molibdeno y otros.	Soporta hasta 600°C.
HS. Metales duros aleados. 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.
Diamante. Se utiliza como punta de algunas barrenas o como polvo abrasivo.		Material natural que soporta hasta 1800°C.
Materiales cerámicos. Por lo regular se utilizan para terminados.		Se aplica en herramientas de arcilla que soportan hasta 1500°C.

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

FLUIDOS DE CORTE

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

Ventajas económicas

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

Características de los líquidos para corte

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

Fluidos más comunes para corte

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

Tabla # 7 Fluidos para corte

CAPÍTULO 4

OPERACIONES DE MAQUINADO Y MÁQUINAS-HERRAMIENTAS

4.1 Torneado y operaciones afines

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

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

ANTECEDENTES

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

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

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

4.1.1 Condiciones de corte en el torneado

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

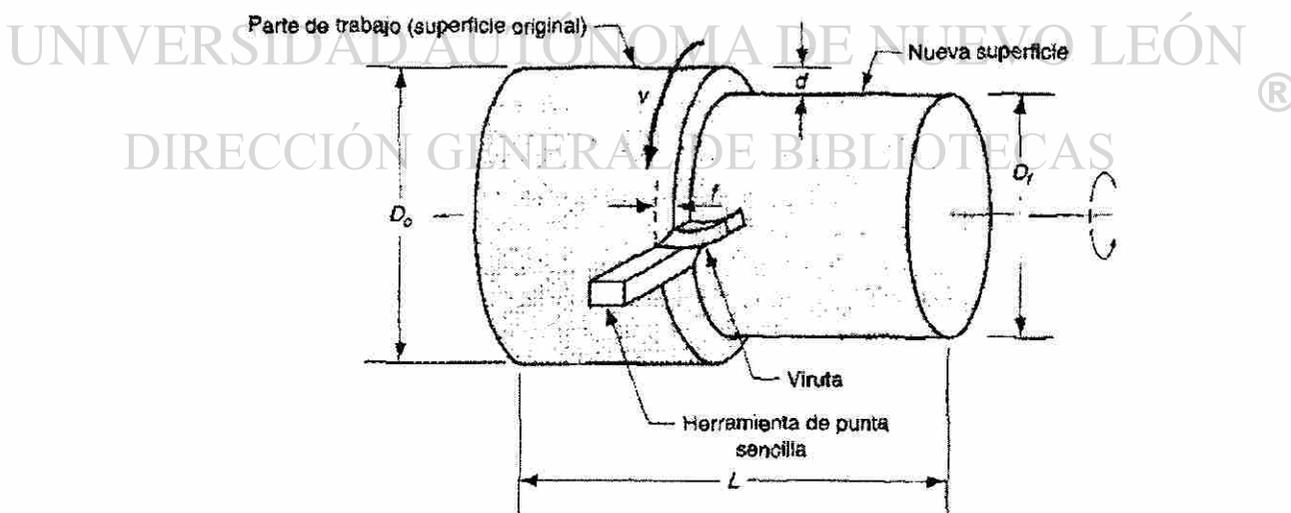


Figura 4.1 Condiciones de corte en una pieza torneada

4.1.2 Operaciones relacionadas con el torneado

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

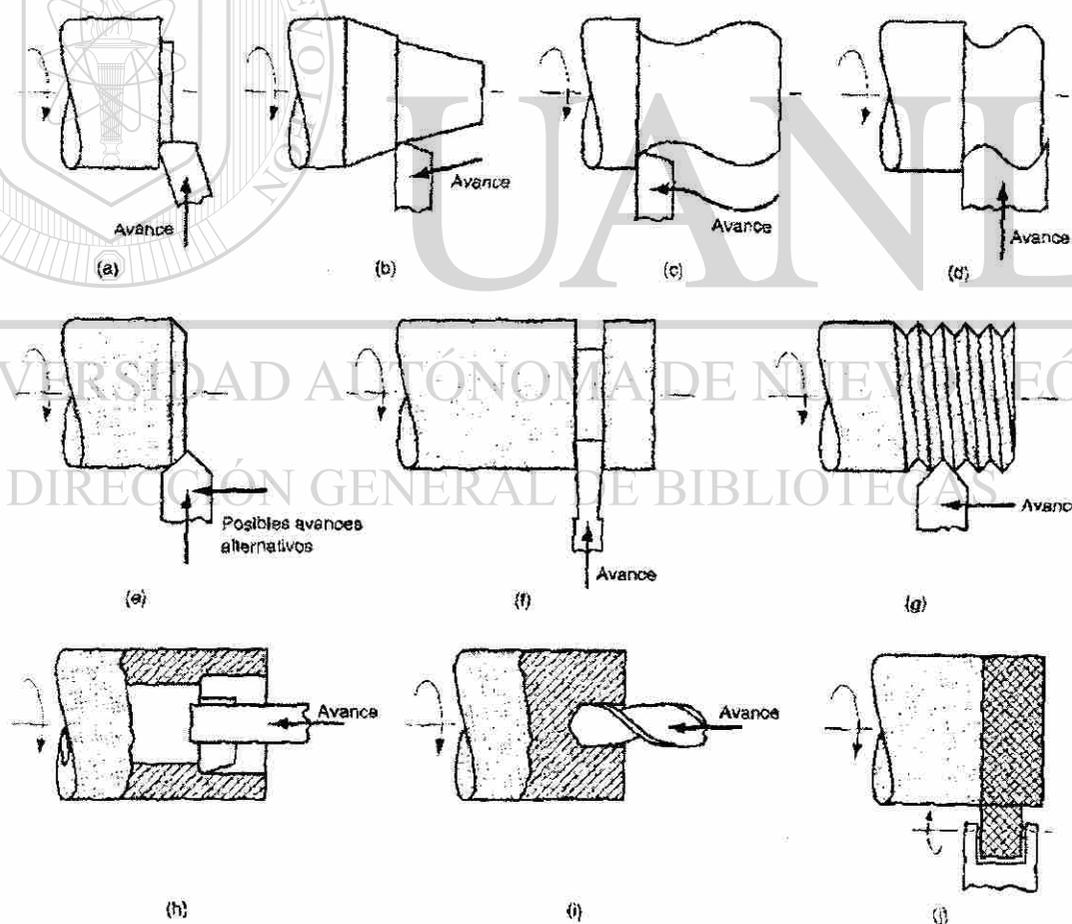


Figura 4.2 Principales operaciones vinculadas con el torneado

Operaciones en el Torno

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

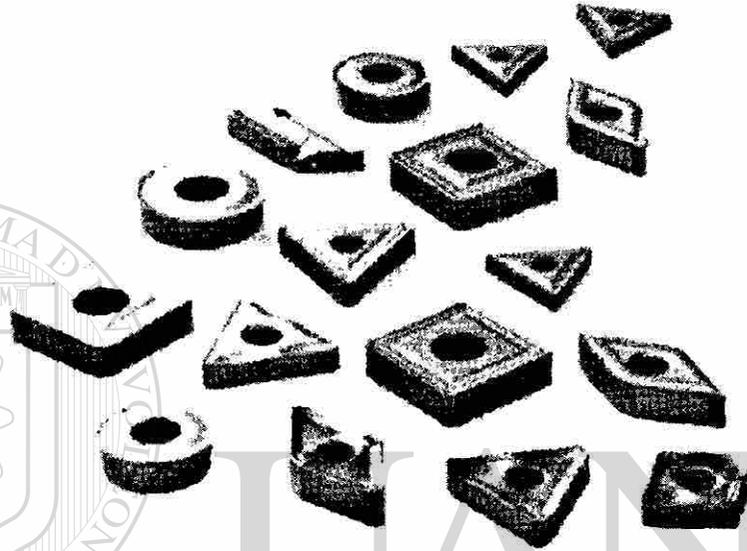


Figura 4.3 Herramientas monofilas utilizadas para el proceso de torneado

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

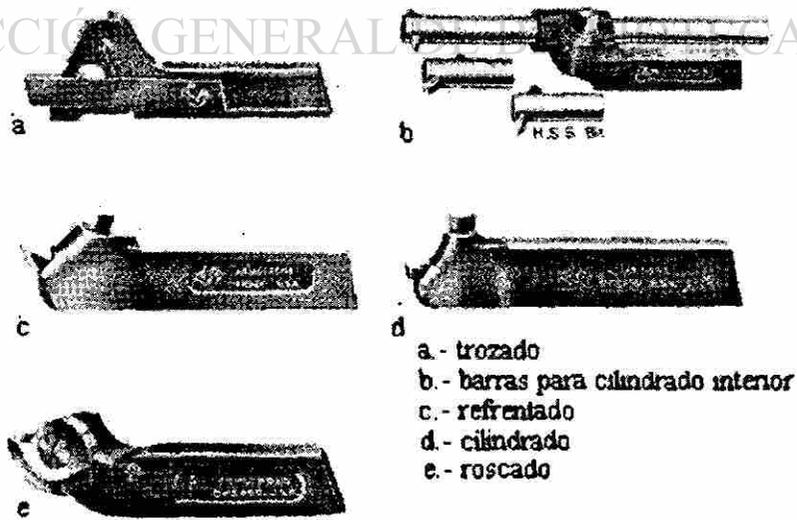


Figura 4.4 Portaherramientas utilizados en el proceso de torneado.

CILINDRADO

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

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

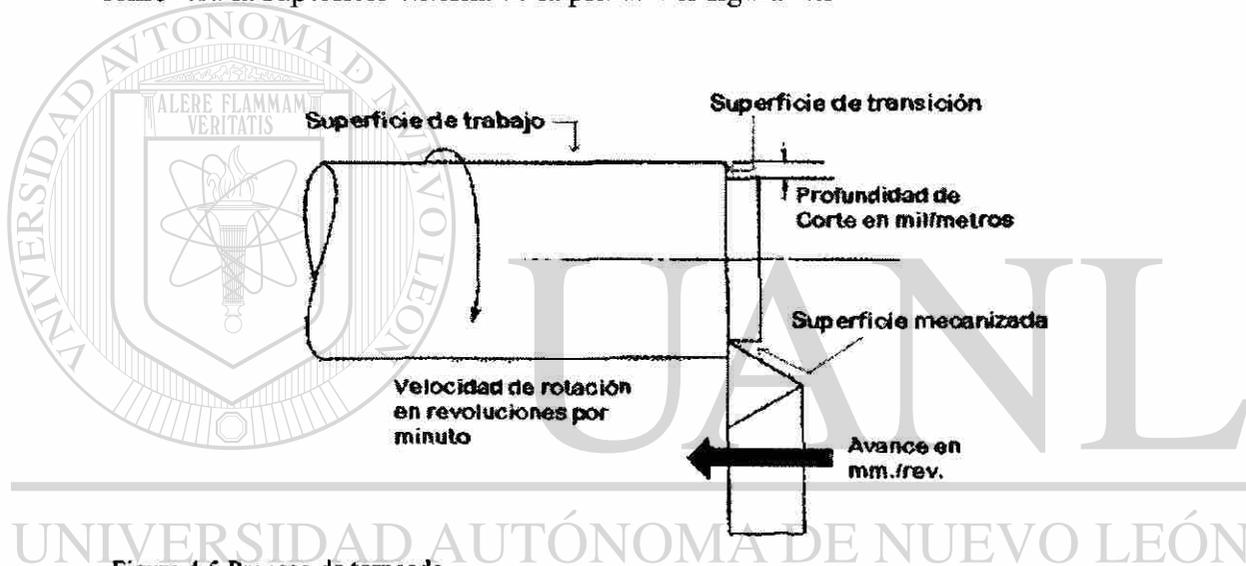


Figura 4.5 Proceso de torneado

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

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

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

El encaje axial se define como:

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

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

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

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

donde n_w es la velocidad de rotación del husillo.

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

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

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

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

Por lo tanto,

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

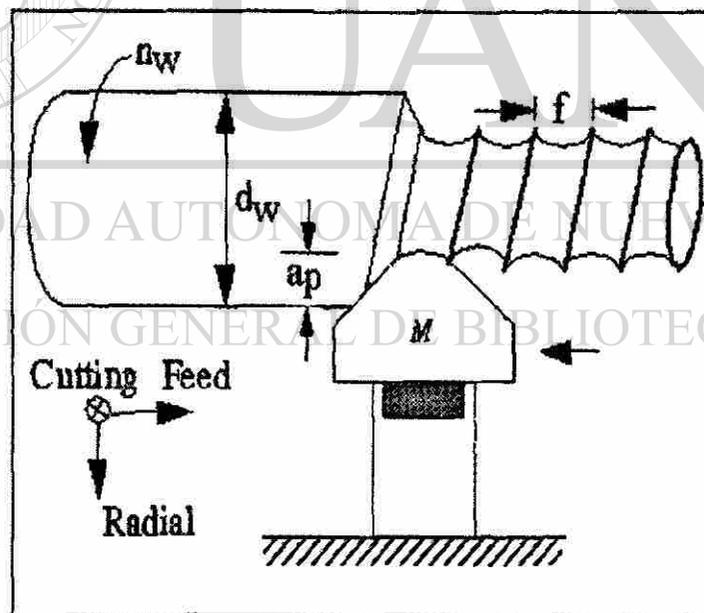


Figura 4.6 Material removido por unidad de tiempo

El tiempo de maquinado es:

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

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

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

Reemplazando en (13)

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

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

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

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

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

donde p_s es la energía requerida para remover un volumen unitario de material, ésta es obtenida del gráfico que se muestra en la figura 4.7¹⁶, considerando el espesor medio de la viruta no deformada, a_c , y el material que está siendo maquinado.

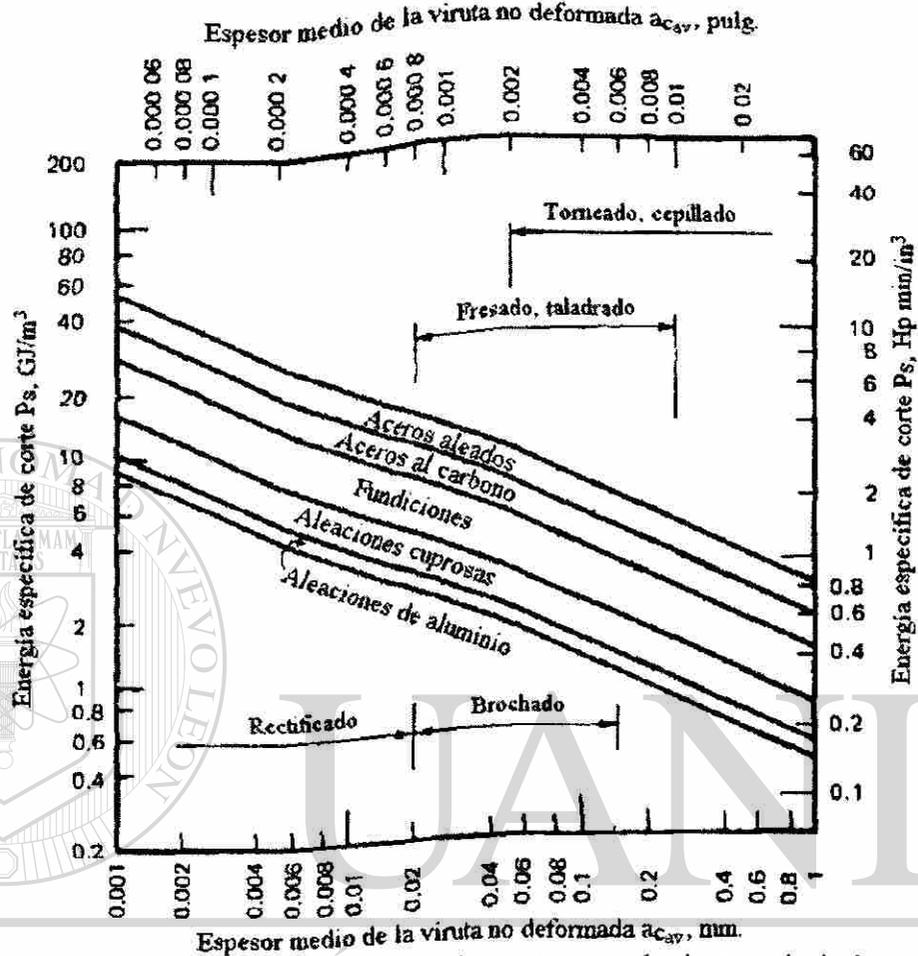


Figura 4.7 Muestra como obtener la energía requerida para remover el volumen unitario de material

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

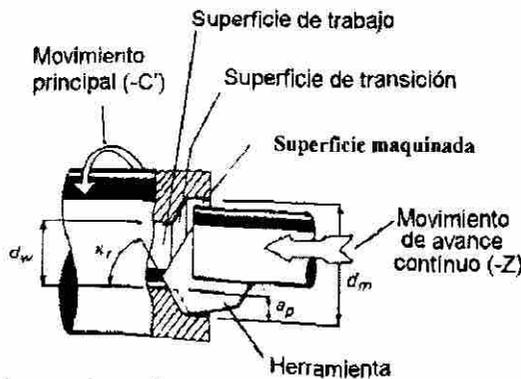


Figura 4.8 Agujero interior de una pieza cilíndrica

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

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

REFRENTADO

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

El tiempo de maquinado en el refrentado es:

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

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

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

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

La cantidad total de material removido es:

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

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

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

En la figura 4.9 se muestra una operación de refrentado.

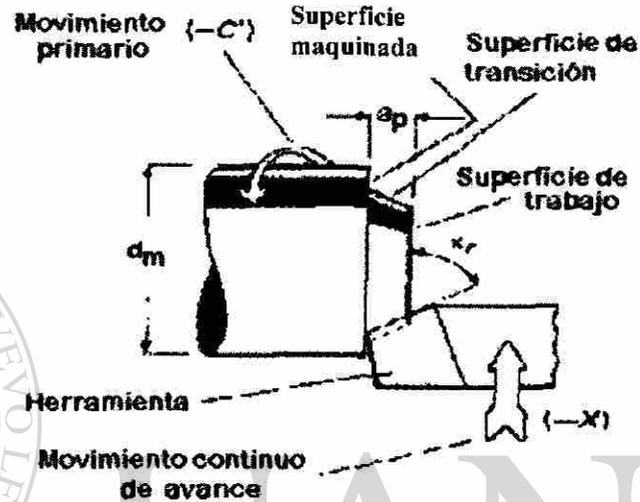


Figura 4.9 Operación de refrentado

TRONZADO

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

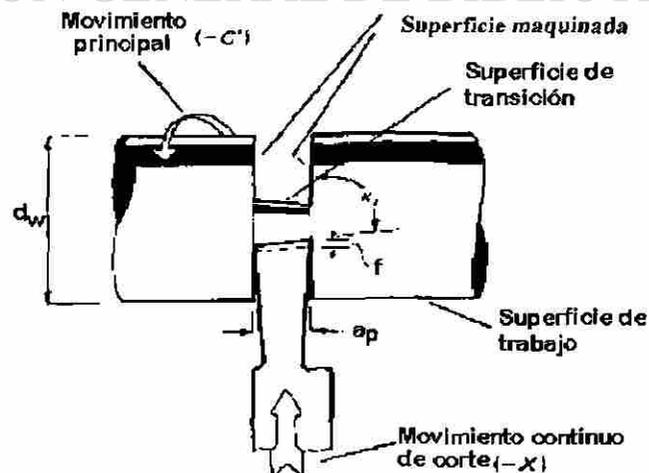


Figura 4.10 Operación de tronizado

4.1.3 El torno mecánico

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

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

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

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

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

El tamaño del torno se designa por:

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

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

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

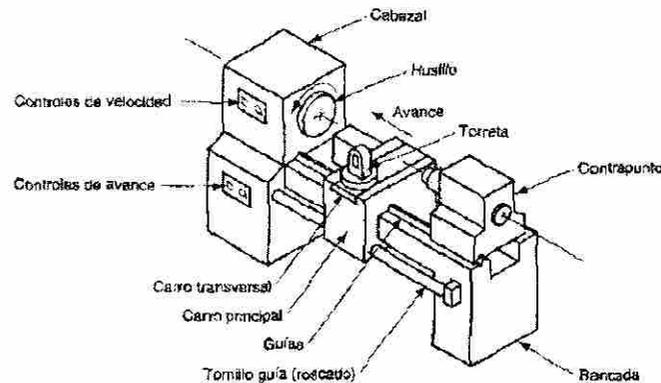


Figura 4.11 Torno y su partes

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

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

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

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

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

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

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

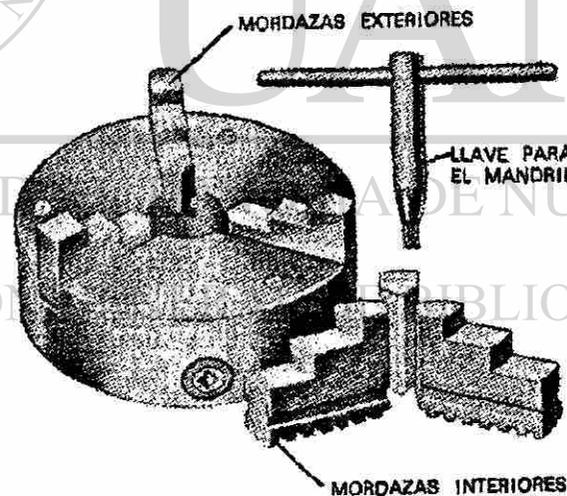


Figura 4.12. Mandril universal de 3 mordazas

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

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

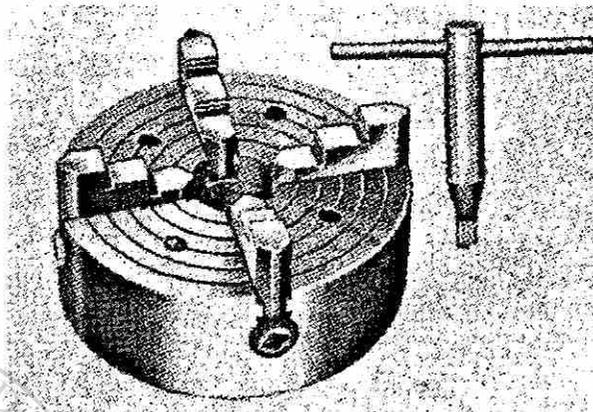


Figura 4.13 Mandril de 4 mordazas

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

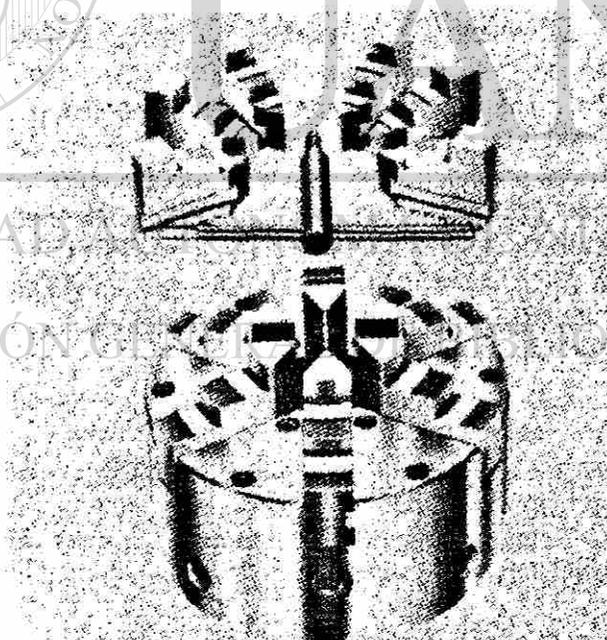


Figura 4.14 Mandril combinado de 6 mordazas

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

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

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

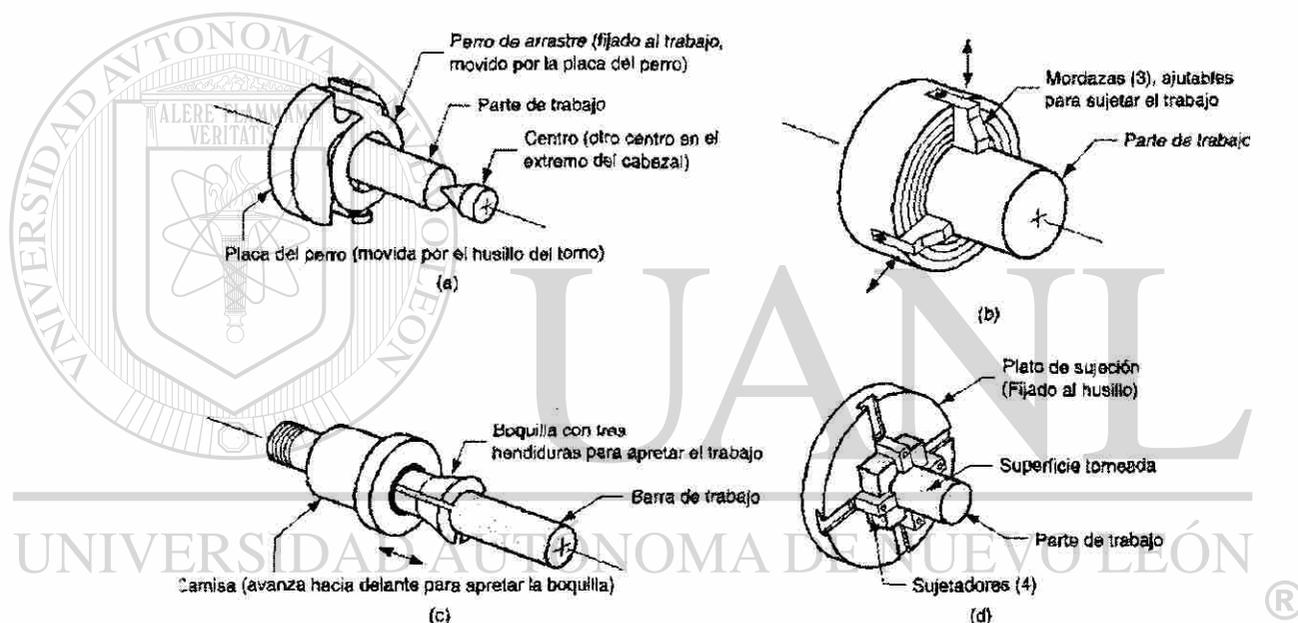


Figura 4.15 Métodos de sujeción de la pieza de trabajo al torno

4.1.4 Otros tornos y máquinas de tornear

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

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

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

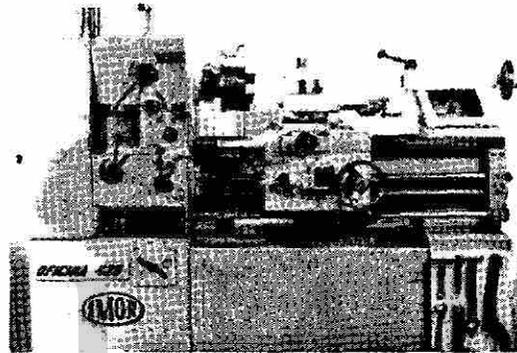


Figura 4.16 Torno para herramientas

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

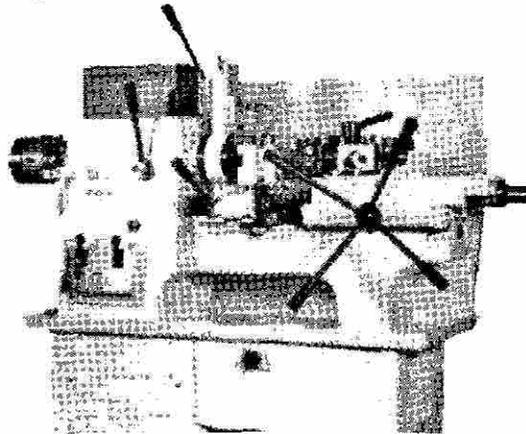


Figura 4.17 Torno revólver

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

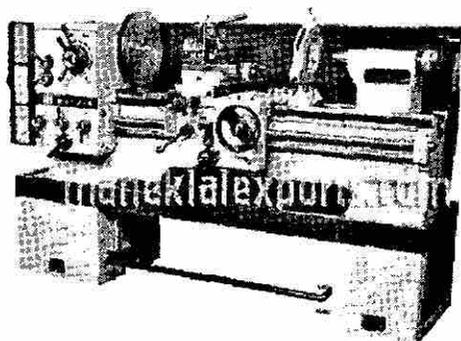


Figura 4.18 Torno Mandril

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

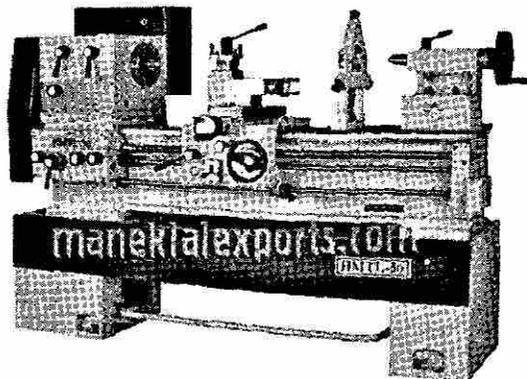


Figura 4.19 Torno de barra automática

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

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

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

4.2 Tecnología de fabricación y tecnología de máquinas

4.2.1 Control Numérico

El control numérico es un ejemplo de automatización programable. Se diseñó para adaptar las variaciones en la configuración de los productos. Su principal aplicación se centra en volúmenes de producción bajos y medios. Uno de los ejemplos más importantes de automatización programable es el control numérico en la fabricación de partes metálicas. El control numérico (CN), ver figura 4.20 es una forma de automatización programable en la cual el equipo de procesado se controla a través de números, letras y otros símbolos. Estos números, letras y símbolos están codificados en un formato apropiado para definir un programa de instrucciones para desarrollar una tarea concreta. Cuando la tarea en cuestión cambia, se cambia el programa de instrucciones. La capacidad de cambiar el programa hace que el CN sea apropiado para volúmenes de producción bajos o medios, dado que es más fácil escribir nuevos programas que realizar cambios en los equipos de procesado. El primer desarrollo en el área del control numérico se le atribuye a John Parsons¹⁷. El concepto de control numérico implicaba el uso de datos en un sistema de referencia para definir las superficies de contorno de las hélices de un helicóptero.

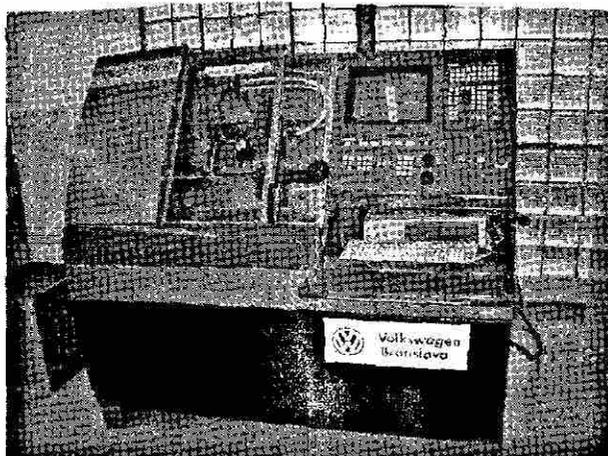


Figura 4.20 Torno de Control Numérico Computarizado

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

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

4.2.2 Estructura de Sistema Control Numérico.

Definición de control numérico

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

- 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.¹⁷
- 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.¹⁷

- 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.¹⁷
- 4.- Quizá la definición más clara en lo que se refiere al CN aplicado a las máquinas-herramienta sea la siguiente: "Sistema que aplicado a una máquina-herramienta automatiza y controla todas las acciones de la misma, entre las que se encuentran: los movimientos de los carros y del cabezal, el valor y el sentido de las velocidades de avance y de corte, los cambios de herramientas y de piezas a maquinar, las condiciones de funcionamiento de la máquina (bloqueos, refrigerantes, lubricación, etc.), el estado de funcionamiento de la máquina (averías, funcionamiento defectuoso, etc.), la coordinación y el control de las propias acciones del CN (flujos de información, sintaxis de programación, diagnóstico de su funcionamiento, comunicación con otros dispositivos, etc.)." De todo ello se deduce que los elementos básicos de un sistema de control numérico son, con carácter general)¹⁷.
- 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-232.¹⁷
- 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.¹⁷

Tecnología de fabricación y tecnología de máquinas

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

4.2.3 Clasificación de los Controles Numéricos

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

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

a) Clasificación según el sistema de referencia

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

b) Control de trayectorias

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

c) Según el tipo de accionamiento

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

d) Según el bucle de control

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

e) Clasificación según la tecnología de control

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

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

Control Numérico (CN):

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

Control Numérico Computerizado (CNC)

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

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

Control Numérico Adaptativo (CNA)

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

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

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL CONTROL NUMÉRICO

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

a) Ventajas

Entre las ventajas podemos enumerar las siguientes:

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

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

Los tiempos de cambio de pieza también se reducen.

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

Se reduce el número de verificaciones entre operaciones.

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

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

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

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

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

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

b) Desventajas

Entre las desventajas podemos citar:

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

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

4.2.4 Sistema de Control

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

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

a) Unidad de entrada-salida de datos

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

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

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

4.2.5 Características y tipos de tornos de CNC

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

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

Se pueden realizar trabajos especiales como:

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

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

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

Tabla # 8 Características de los tornos

Los tornos se pueden clasificar de diferentes maneras. Ver tabla # 9

CLASIFICACIÓN	NOMBRE	CARACTERÍSTICAS
Por su movimiento principal	Vertical	El eje Z del torno es vertical, por lo regular se utilizan para el trabajo en piezas de gran peso.
	Horizontal	Son los tronos más conocidos y utilizados, el eje Z del torno es horizontal y puede haber de varios tamaños.
Tornos de taller	Torno de banco	Tornos pequeños que se montan sobre un banco o una mesa de trabajo robusta, se usan para piezas ligeras y pequeñas.
	Torno rápido	Torno que se utiliza para operaciones de corte ligero y de acabado, se monta sobre una mesa y es fácil de operar y mover.
	Torno para cuatro herramientas o de taller mecánico	Está equipado con una serie de accesorios que permiten realizar una serie de operaciones de precisión. En su torre portaherramientas se pueden colocar cuatro herramientas.
	Torno de escote o bancada partida	Torno que tiene una sección en su bancada que se puede desmontar bajo el plato, con esto se pueden trabajar piezas de mayor diámetro.
Torno de semiproducción o copiadores	Tornos de semiproducción	Son tornos de taller con un aditamento copiator o un sistema de lectura digital que permite copiar piezas que serían muy difíciles de hacer sin un patrón (ejemplo los cerrajeros).
Tornos para producción en serie	Torno revólver o de torreta	Son tornos que se utilizan cuando se deben producir una gran cantidad de piezas iguales, tienen un solo husillo y varias herramientas, pueden tener hasta 20 diferentes herramientas las que pueden actuar una por una o varias al mismo tiempo.
	Torno automático de un solo husillo	Produce en serie y de manera automática, se utilizan para la producción en masa de piezas que requieren de refrentado, cilindrado y barrenado, pueden trabajar dos o más herramientas al mismo tiempo y se controlan por medio de sistemas de lectura digital.
	Tornos de control numérico	Equipos que se controlan por medio de cintas magnéticas o consolas de computadora. Pueden tomear ejes de casi cualquier tamaño y forma, hacen trabajos con varias herramientas al mismo tiempo, existen tornos CN que pueden tener una torre revólver con 60 herramientas.

Tabla # 9 Clasificación de los tornos

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.¹⁸

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, aun 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*.¹⁹

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:

$$T_c = T_h + T_m + T_t/np \quad (24)$$

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 4.21

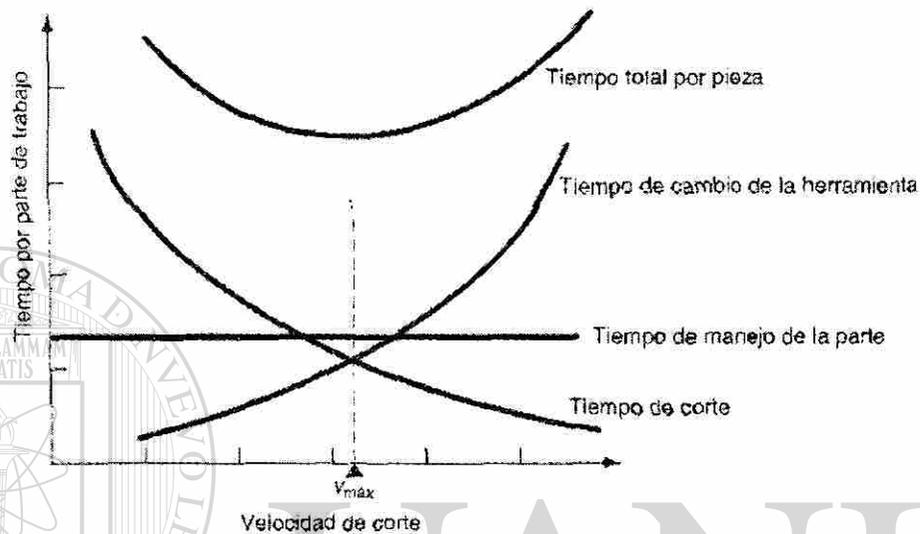


Figura 4.21 Tiempo de ciclo de la pieza en relación con la velocidad de corte

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:

$$T_m = (\pi DL / vf) \quad (25)$$

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:

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

En la figura 4.22 los podemos observar

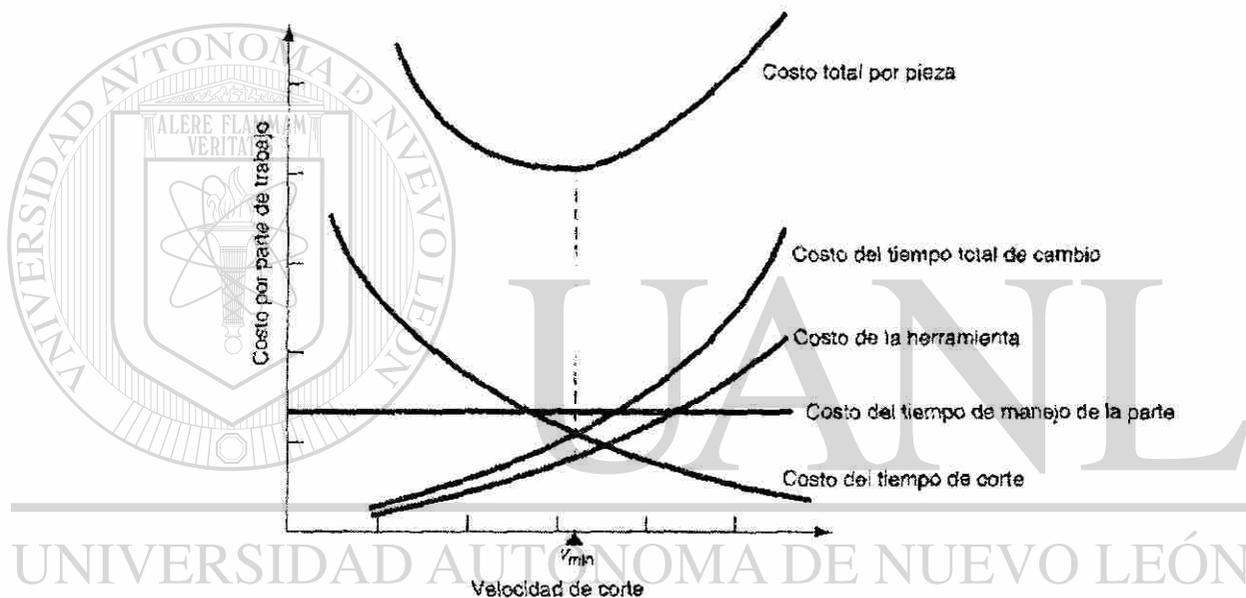
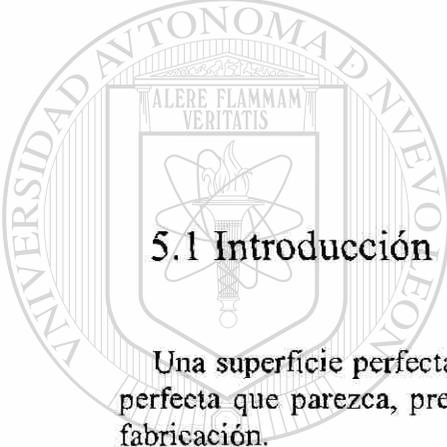


Figura 4.22 Costo de la pieza en relación con la velocidad de corte

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 5

ACABADO 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 46.1-1995²⁰ que muestra los rangos típicos de valores de rugosidad superficial que pueden obtenerse mediante métodos comunes de producción.

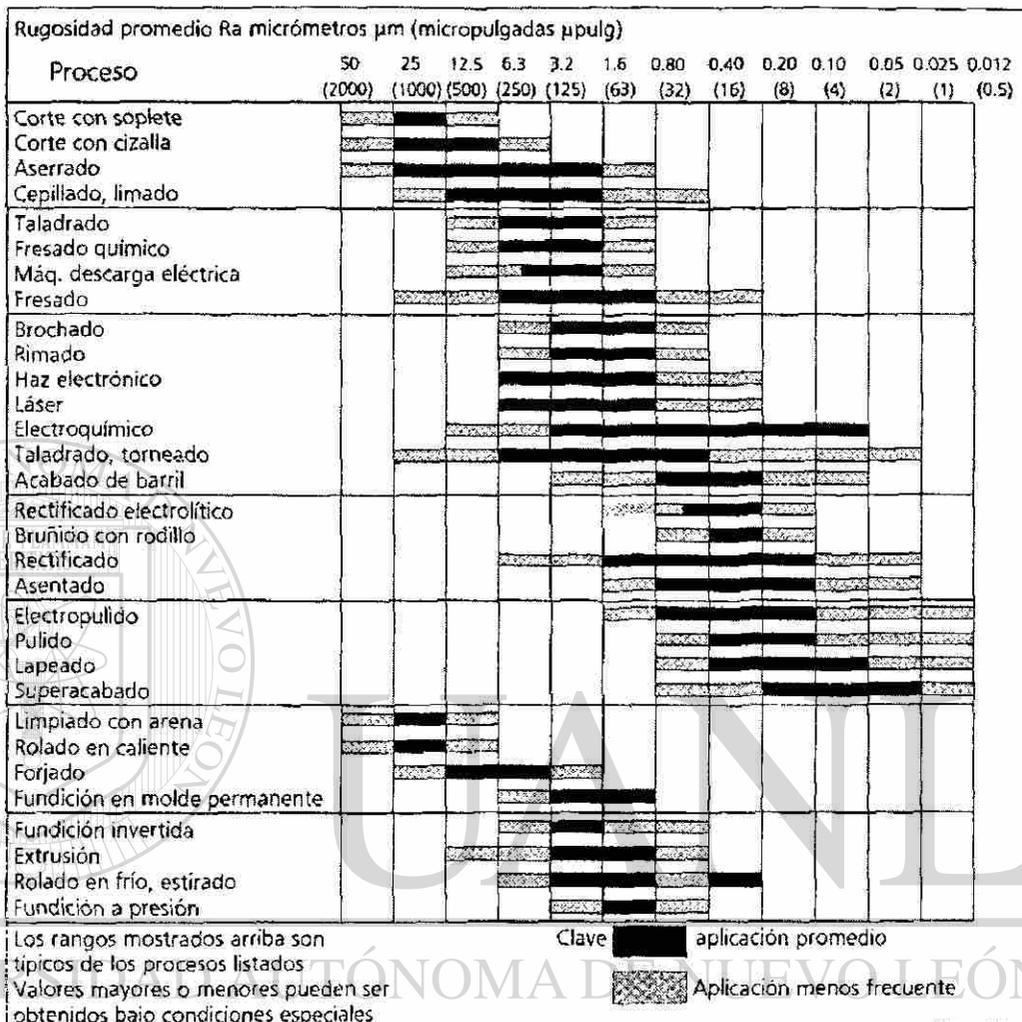


Figura 5.1 Rangos de rugosidad superficial que pueden obtenerse mediante métodos comunes de producción

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.

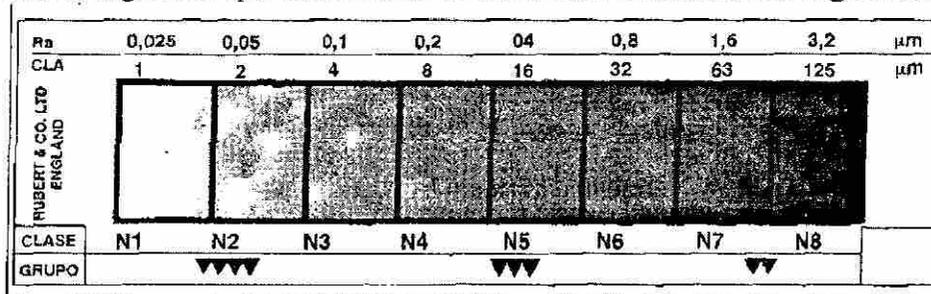


Figura 5.2 Lámina con diferentes acabados superficiales

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 de 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 (l_e), sobre la superficie localizada. Los valores normalizados para esta longitud de muestreo son, 0.08 , 0.25 , 2.5 , 8 y 25mm .

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.

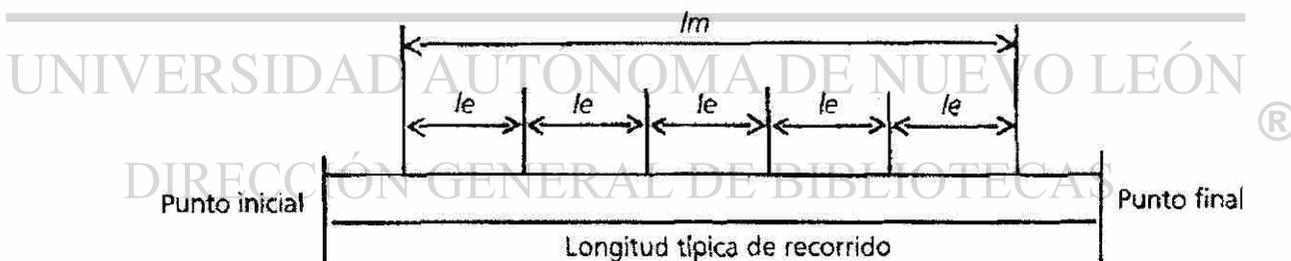


Figura 5.3 Longitud que recorre el palpador durante la medición

La figura 5.4 tomada de la norma ANSI/ASME B46.1 - 1985²¹ 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.

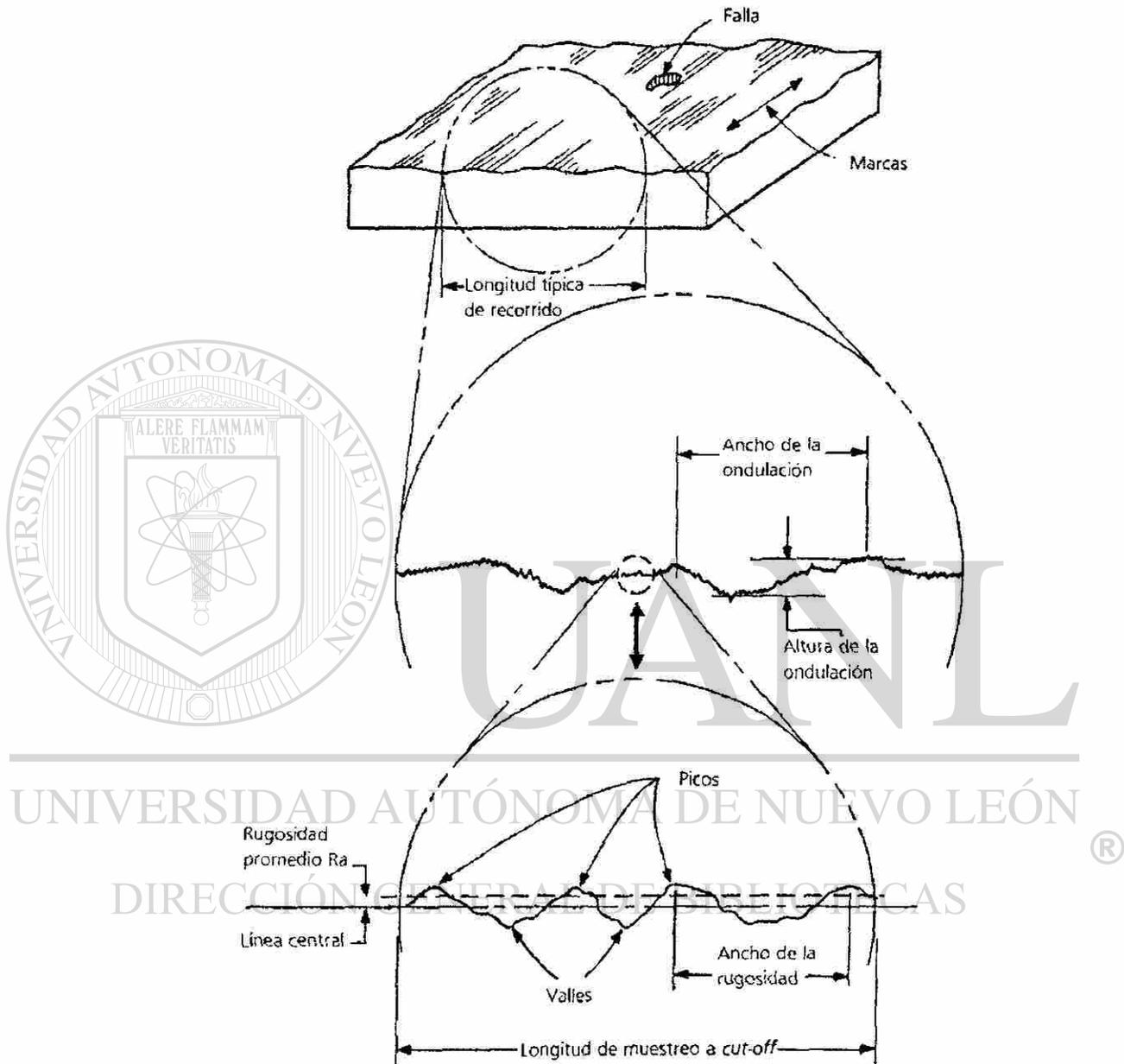


Figura 5.4 Ilustra la superficie de una pieza en la que se observan marcas originadas por el maquinado, también se muestra la amplificación de la superficie donde se observan las irregularidades más claramente.

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)

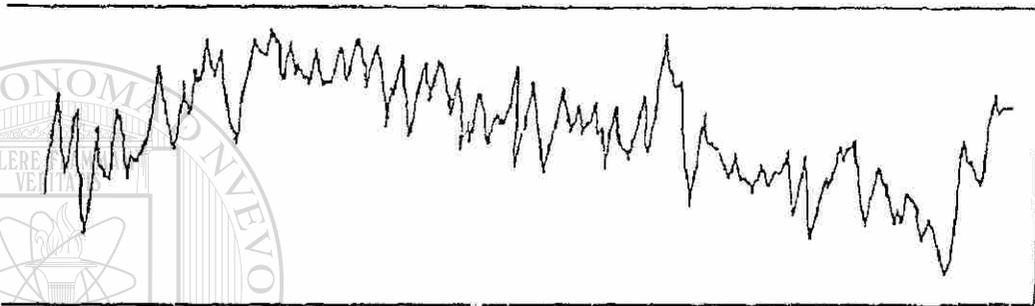


Figura 5.5 Curva P (perfil de rugosidad sin filtrar)

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* (λ_C) (figura 5.6)

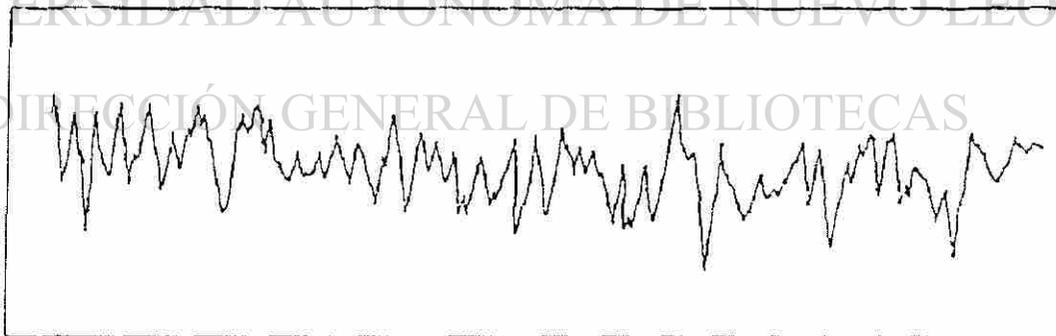


Figura 5.6 Curva R (perfil de rugosidad)

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).

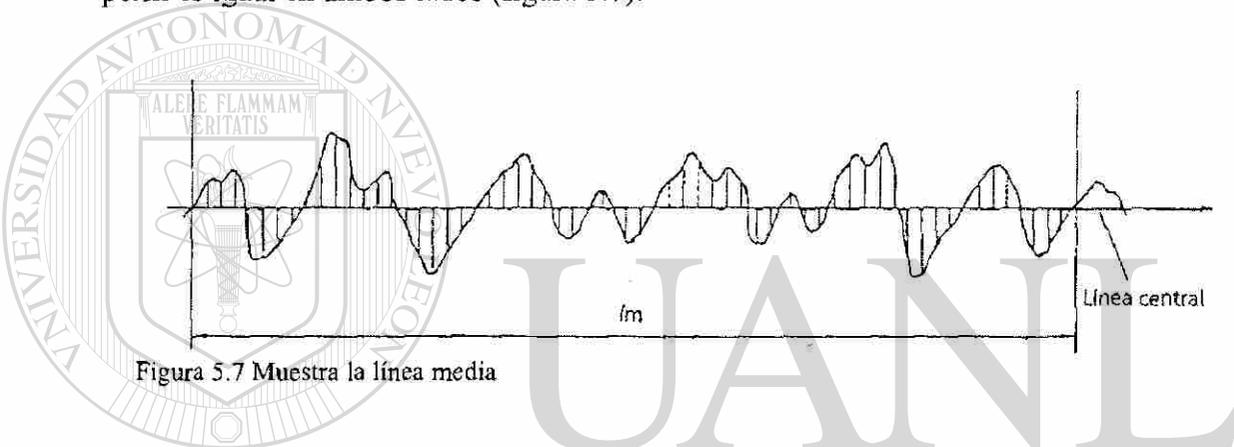


Figura 5.7 Muestra la línea media

5.2.1 Definición de R_a

La definición de R_a equivalente, 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.)

5.2.2 Definición de Rz

El promedio de las alturas de pico a valle se denomina Rz, y las normas JIS e ISO²² 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

$$Rz \text{ (JIS-ISO)} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) - (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5)}{5} \quad (26)$$

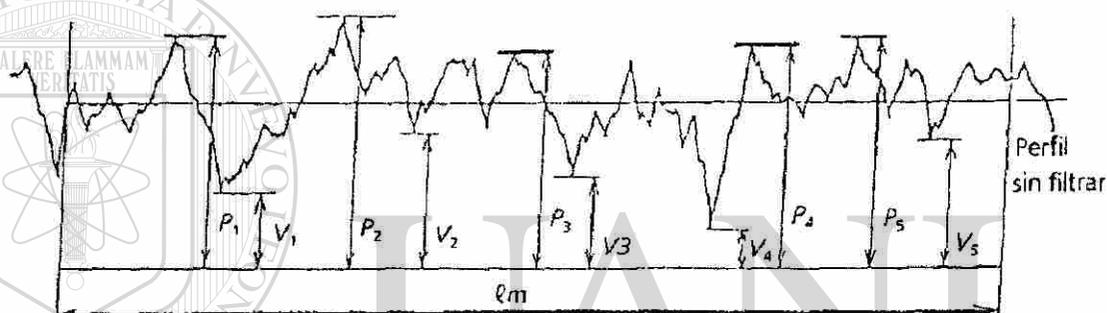


Figura 5.9 Picos y valles medidos de acuerdo a las normas JIS e ISO

El promedio de alturas de pico a valle, denominado Rz, la norma DIN²³ lo define como el valor promedio de la diferencia (Z_i) entre el pico más alto y el valle más 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

$$Rz \text{ (DIN)} = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (27)$$

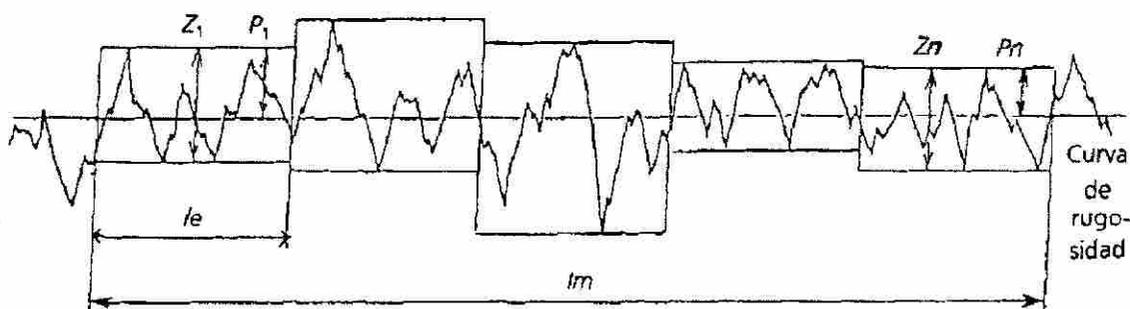


Figura 5.10 muestra la manera de calcular Rz de acuerdo con la norma DIN

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 según la norma DIN. En otros países R_y se denomina R_{max} ; este método de evaluación ocupa el segundo lugar en cuanto su adopción por diferentes países industriales, mientras que el tercer lugar lo ocupa R_z .

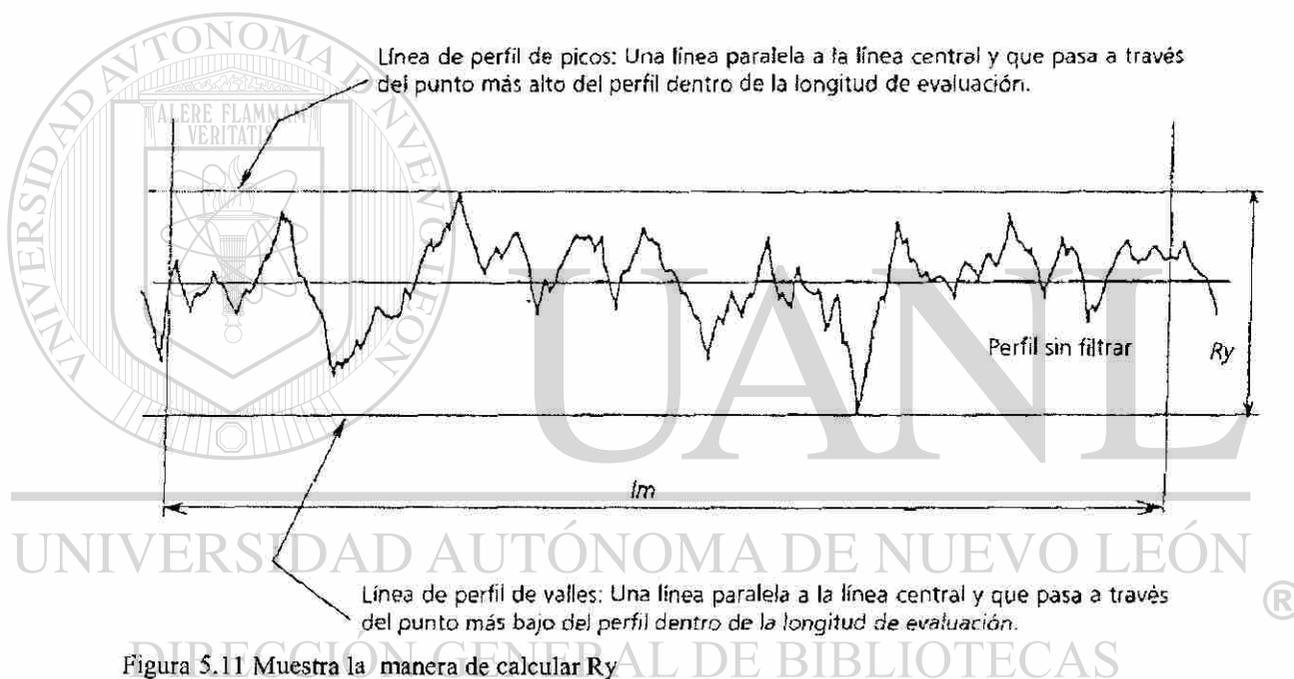


Figura 5.11 Muestra la manera de calcular R_y

5.2.4 Símbolos para la dirección de marcado

La tabla # 11 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.

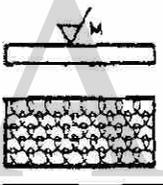
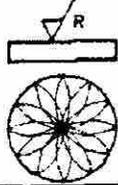
Símbolo	Interpretación
=	<p>Paralelo al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo.</p> 
⊥	<p>Perpendicular al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo.</p> 
X	<p>Cruzado en dos direcciones inclinadas con relación al plano de proyección de la vista en la cual se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

Tabla # 11 Muestra las direcciones de marca producidas por el proceso de maquinado

Las tablas #12, #13 y #14 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 # 12 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 $6.3 \mu\text{m}$ y un mínimo de $1.6 \mu\text{m}$.

Tabla # 13 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 # 14 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 N1 a N12.
- 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)

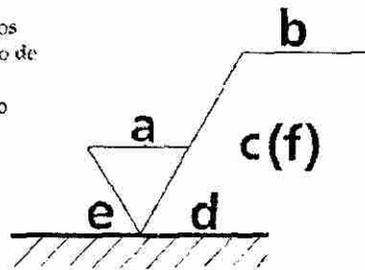


Figura 5.12 Muestra el símbolo básico de rugosidad con las definiciones de cada parámetro

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

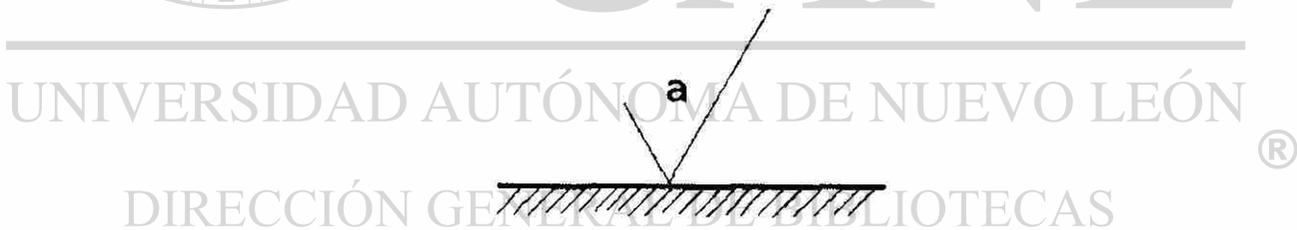


Figura 5.13 Símbolo de rugosidad más comúnmente utilizado

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 indicará 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 0.8mm
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 # 15), 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
μm	μpulg	
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 # 15 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 y 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, 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.

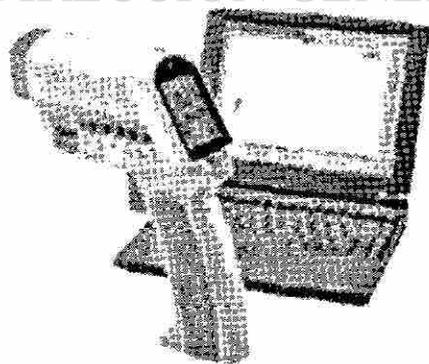


Figura 6.1 Termómetro infrarrojo RAYMX4PE.



Figura 6.2.- Rugosímetro Mitutoyo SJ-301.

El maquinado de las piezas se realizó en un torno modelo Okuma LB15, ver figura 6.3, utilizando las herramientas recomendadas por el fabricante. Para los aceros recomendó la tipo DNMG 432 PG grado RC8025, ver figura 6.4 y para el aluminio DNMG 432 GP grado CQ23 mostradas en la figura 6.5

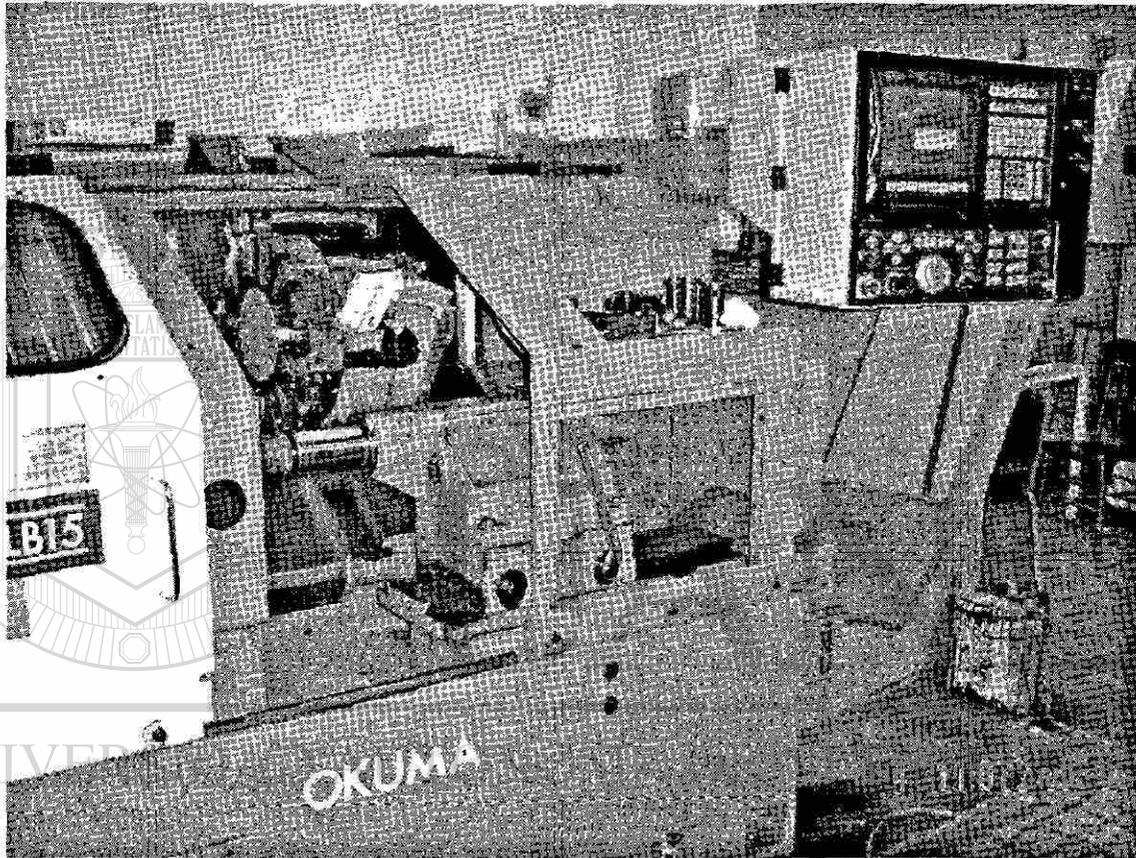


Figura 6.3 Okuma LB15 torno de dos-ejes de CNC



Figura 6.4 DNMG-432PG grado RC8025



Figura 6.5 DNMG-432GP grado CQ23

6.3 Material maquinado

Las piezas utilizadas para el proceso de maquinado fueron Aluminio 6061 T6, Acero 1018 y Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío, en forma de barra cilíndrica como se muestra en la figura 6.6, 6.7 y 6.8

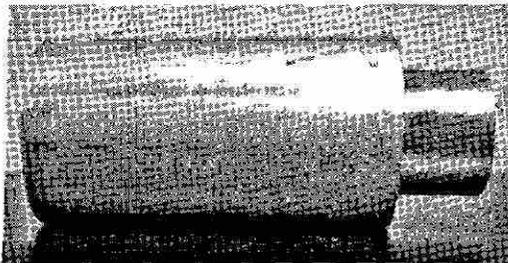


Figura 6.6 Aluminio 6061 T6

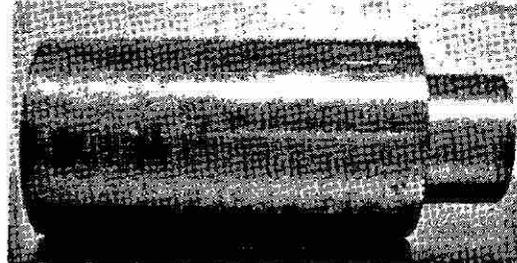


Figura 6.7 Acero 1018

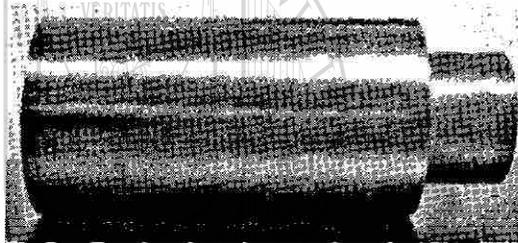


Figura 6.8 Acero 4140

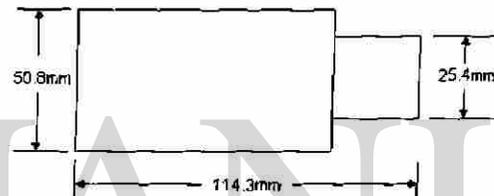


Figura 6.9 Dimensiones de la pieza

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 torreta del torno para que pueda seguir el desplazamiento de la herramienta y poder tener más puntos de medición, como se muestra en la figura 6.10

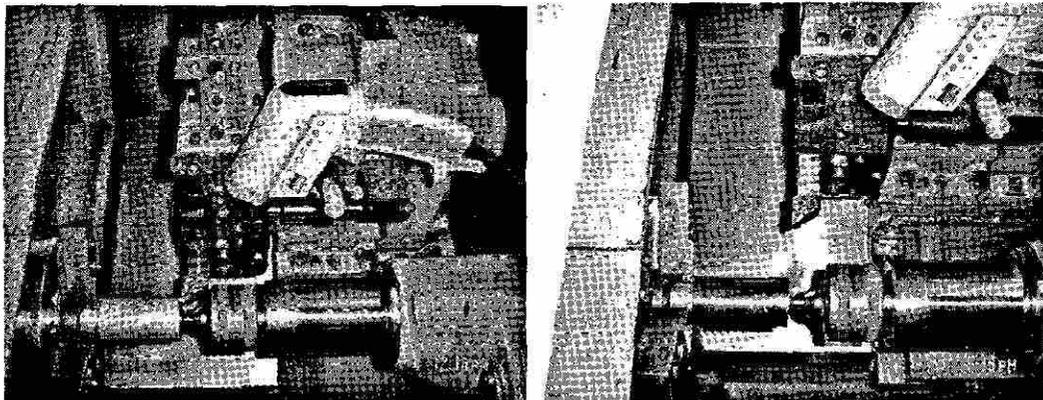
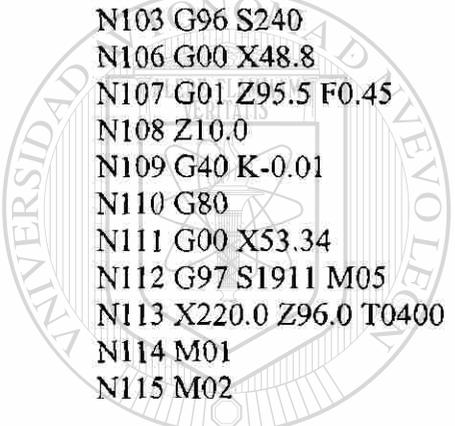


Figura 6.10 Termómetro infrarrojo montado en el torno apuntando sobre la herramienta

Después de haber montado el termómetro infrarrojo se procedió a colocar la pieza en un mandril de 3 mordazas, de ahí se colocó la herramienta en la torreta en la posición # 1 posteriormente se ajustó el cero de pieza (trasladar el centro del sistema de coordenadas a un punto conocido sobre la pieza para que facilite la programación) y el cero de herramienta (trasladar el origen de la herramienta a la punta de ella), de ahí se realizó el programa de maquinado para las pruebas. El cual se reproduce a continuación:



```

N1 G00 X220.0 Z96.0
N2 G50 S3500
NAT04
N100 G97 S1500 M42 M04
N101 G00 X53.34 Z65.5 T040404
N103 G96 S240
N106 G00 X48.8
N107 G01 Z95.5 F0.45
N108 Z10.0
N109 G40 K-0.01
N110 G80
N111 G00 X53.34
N112 G97 S1911 M05
N113 X220.0 Z96.0 T0400
N114 M01
N115 M02

```

UANL

El maquinado de los 3 tipos de materiales consistió en retirar 2 milímetros de diámetro de material en un recorrido de la herramienta por pieza y en cada pieza se le varían las condiciones de corte, dependiendo el material es el rango de avance y velocidad de corte, para el aluminio las condiciones de corte recomendadas por el fabricante²⁴, considerando que el maquinado que hicimos es un maquinado general, comenzando con un avance de 0.15 mm/rev y teniendo incrementos de 0.05 mm/rev hasta llegar a 0.45 mm/rev, esto para 2 velocidades de corte diferentes que son 1900 y 2500 RPM., para el acero 1018 el avance es de 0.15 a 0.45 mm/rev con incrementos de 0.05 y las velocidades de corte utilizadas son 1400 y 1600 RPM, y para el acero 4140 se utiliza el mismo avance de los anteriores y las velocidades de corte utilizadas serán 720 y 1000 RPM, todo esto está representado en la figura 6.11. La medición de la temperatura la realiza el pirómetro sacando un promedio de las tomas detectadas por un rayo láser con un diámetro de 2.5mm emitido por él, la medición inició desde que la herramienta tocó el material haciendo tomas cada 250 milisegundos hasta llegar al final del recorrido, las cuales son almacenadas en una computadora por medio del programa que incluye el pirómetro.

PIEZA Aluminio 6061	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
F (mm/rev)	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
S (RPM)	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900
PIEZA Aluminio 6061	Prueba 8	Prueba 9	Prueba 10	Prueba 11	Prueba 12	Prueba 13	Prueba 14
F (mm/rev)	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
S (RPM)	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
PIEZA Acero 1018	Prueba 15	Prueba 16	Prueba 17	Prueba 18	Prueba 19	Prueba 20	Prueba 21
F (mm/rev)	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
S (RPM)	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
PIEZA Acero 1018	Prueba 22	Prueba 23	Prueba 24	Prueba 25	Prueba 26	Prueba 27	Prueba 28
F (mm/rev)	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
S (RPM)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
PIEZA Acero 4140	Prueba 29	Prueba 30	Prueba 31	Prueba 32	Prueba 33	Prueba 34	Prueba 35
F (mm/rev)	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
S (RPM)	720	720	720	720	720	720	720
PIEZA Acero 4140	Prueba 36	Prueba 37	Prueba 38	Prueba 39	Prueba 40	Prueba 41	Prueba 42
F (mm/rev)	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
S (RPM)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Figura 6.11 Avance y velocidad de corte utilizados para cada material en la prueba de maquinado

Una vez terminadas de maquinar 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 sobre una mesa de granito el palpador del rugosímetro en cada pieza maquinada, nivelando la unidad conductora con ayuda de bloques patrón y un nivel de burbuja como lo muestra la figura 6.12. Las mediciones fueron tomadas en micrones para los parámetros Ra (el cual fue descrito en el capítulo 5), y se eligió este parámetro ya que es el más utilizado y se calcula de la misma manera en todo el mundo.

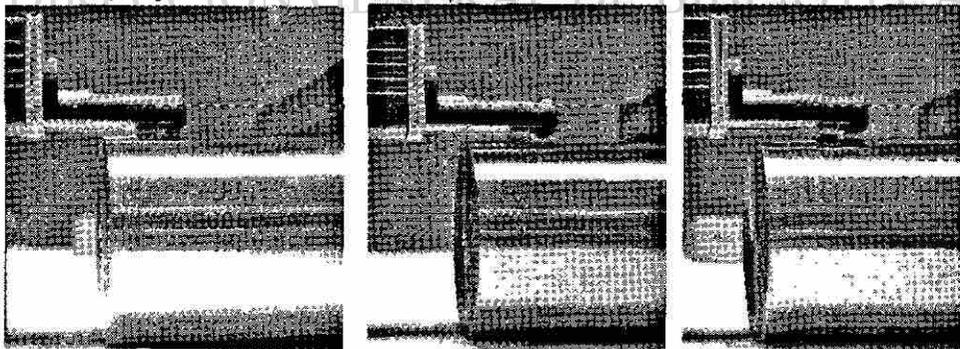


Figura 6.12 Palpador del rugosímetro sobre cada pieza maquinada

CAPITULO 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)

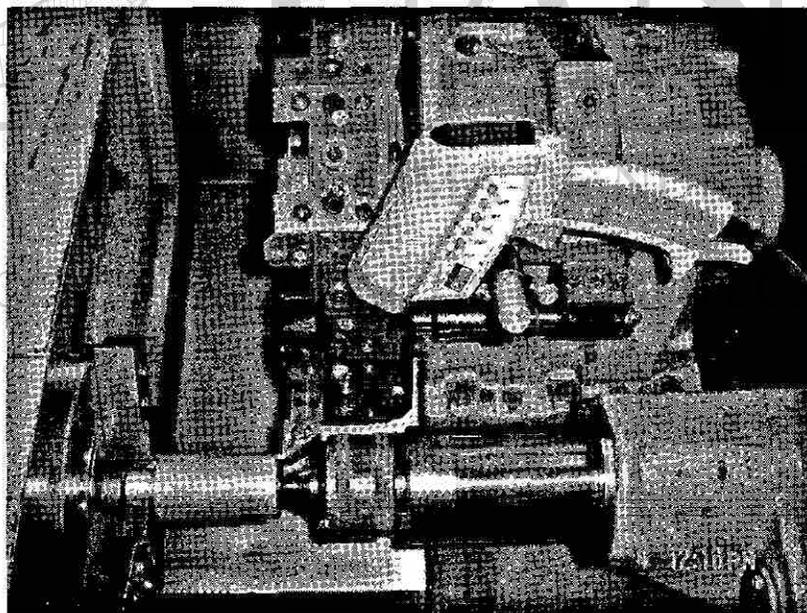


Figura 7.1 Obtención de temperatura con la pistola montada en el torno apuntando a la punta de la herramienta

A continuación se muestran los resultados obtenidos durante la medición.

7.1.1 Resultado de temperatura en Aluminio 6061 T6 con una velocidad de giro del husillo de 1900 RPM

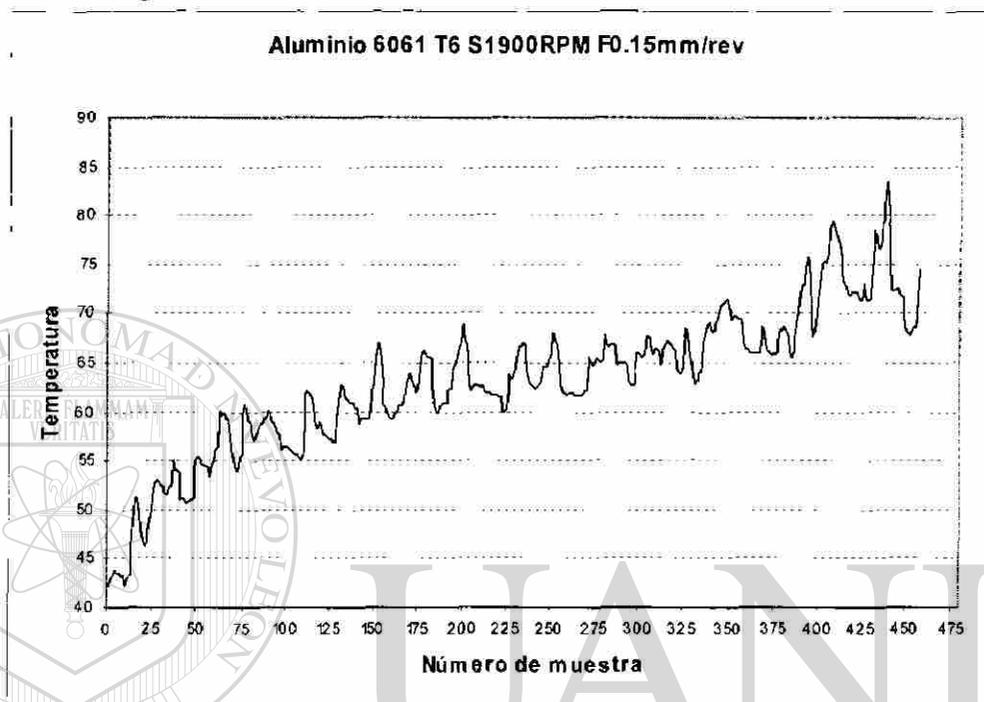


Figura 7.2 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev.

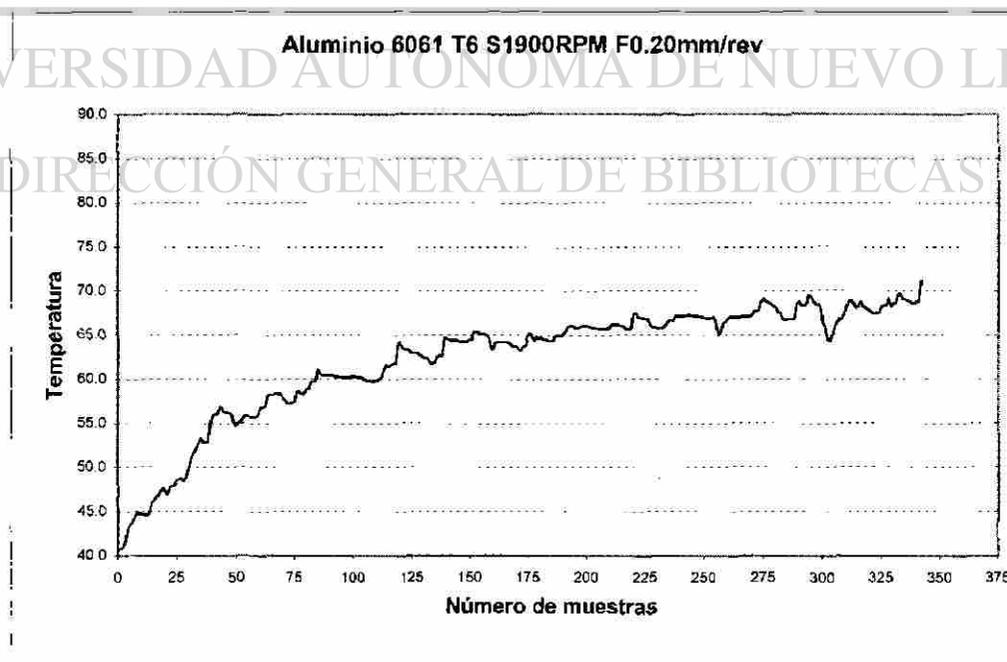


Figura 7.3 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev.

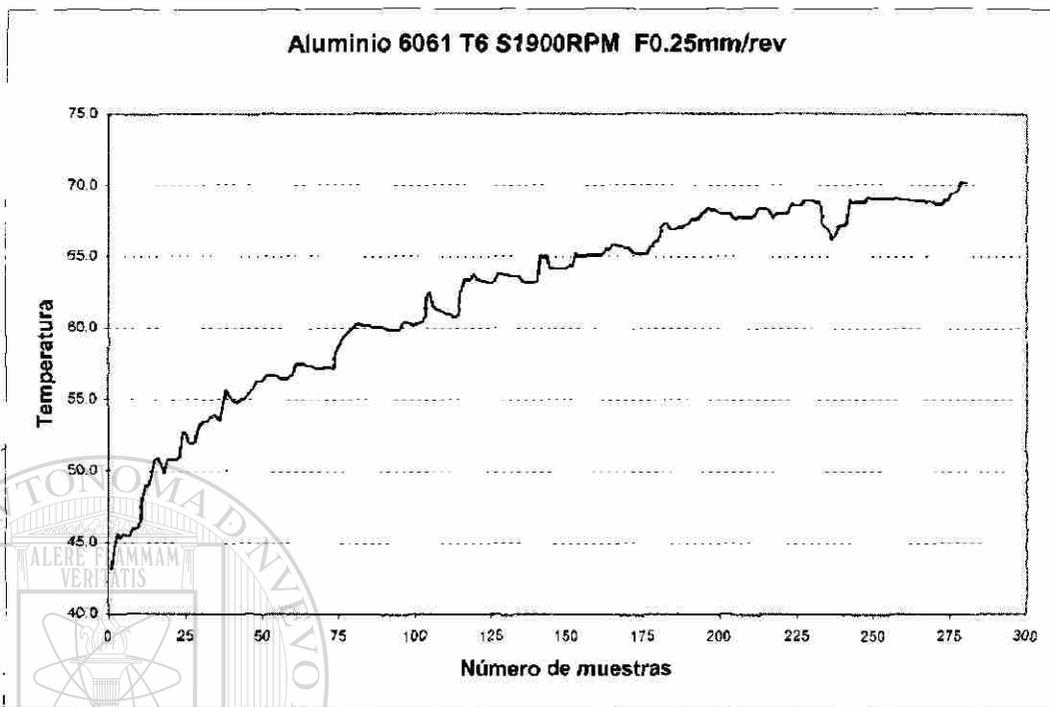


Figura 7.4 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.

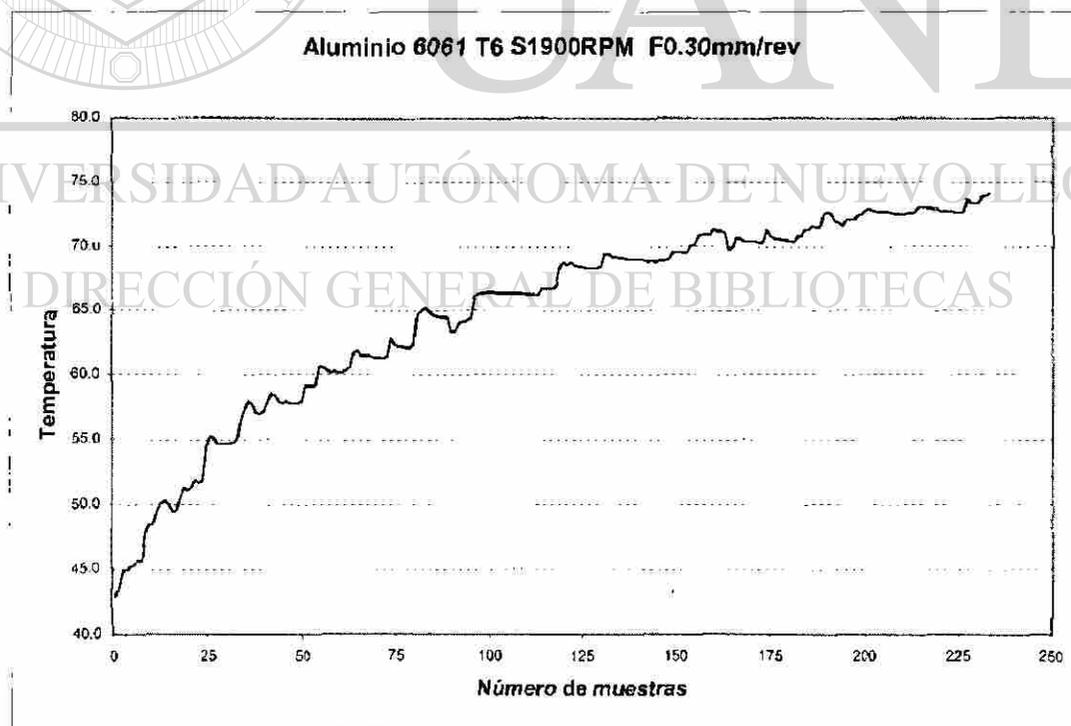


Figura 7.5 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.

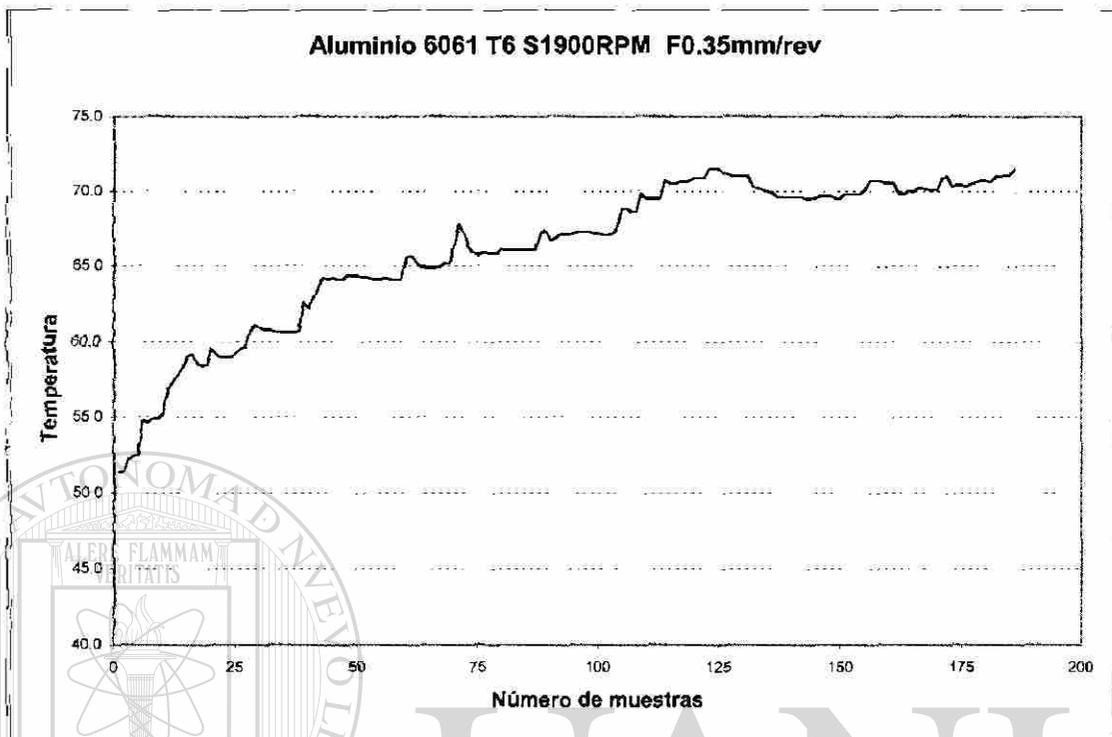


Figura 7.6 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.

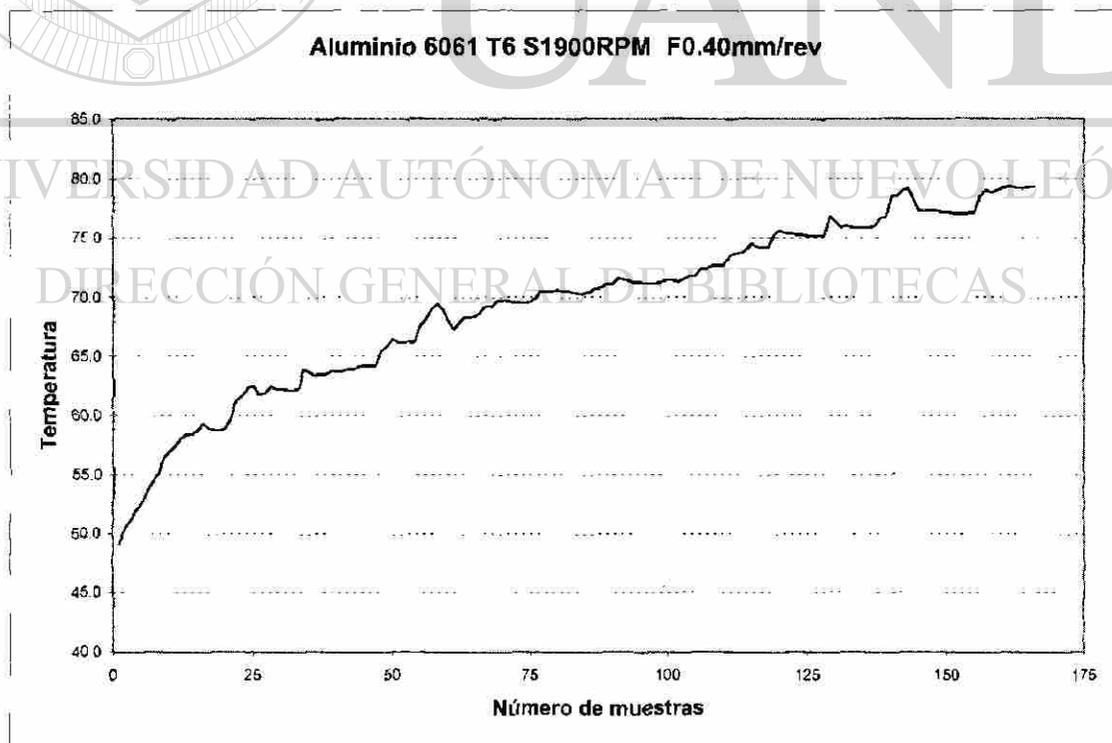


Figura 7.7 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.

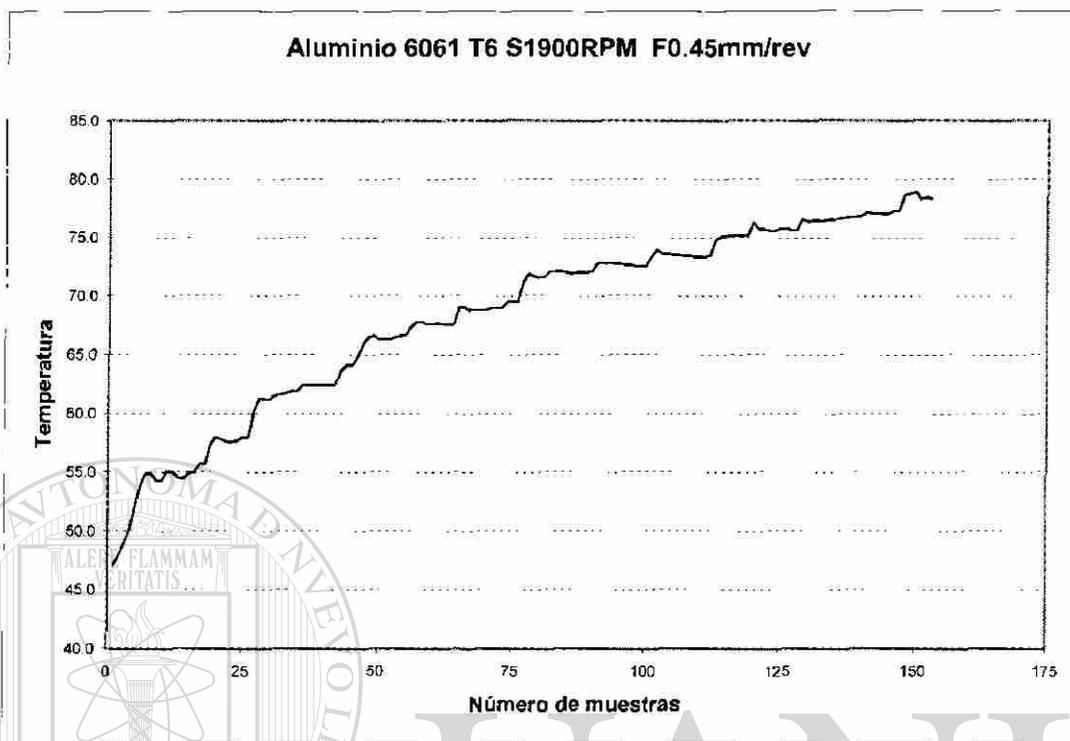


Figura 7.8 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.

7.1.2 Resultado de temperatura en Aluminio 6061 T6 con una velocidad de giro del husillo de 2500 RPM

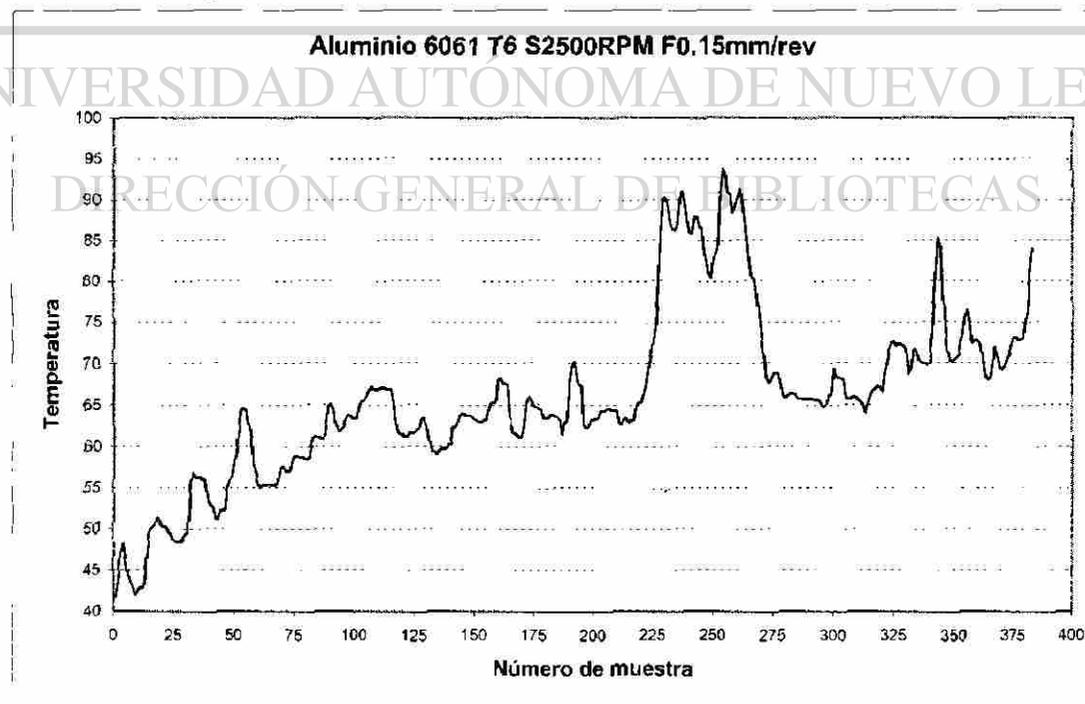


Figura 7.9 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev

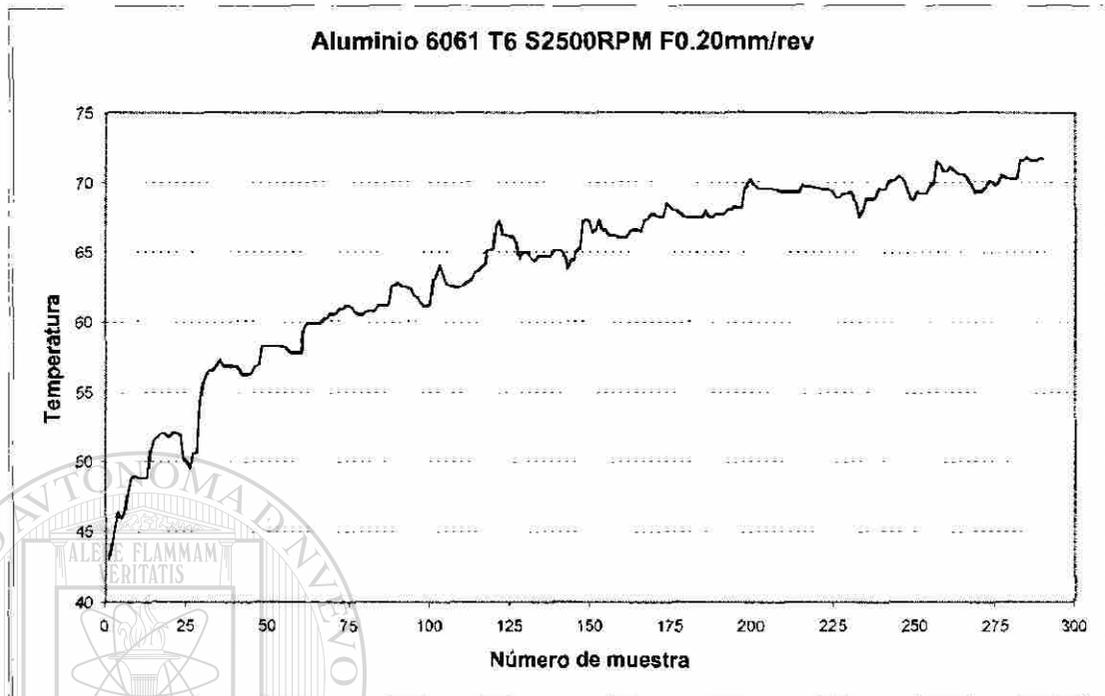


Figura 7.10 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev

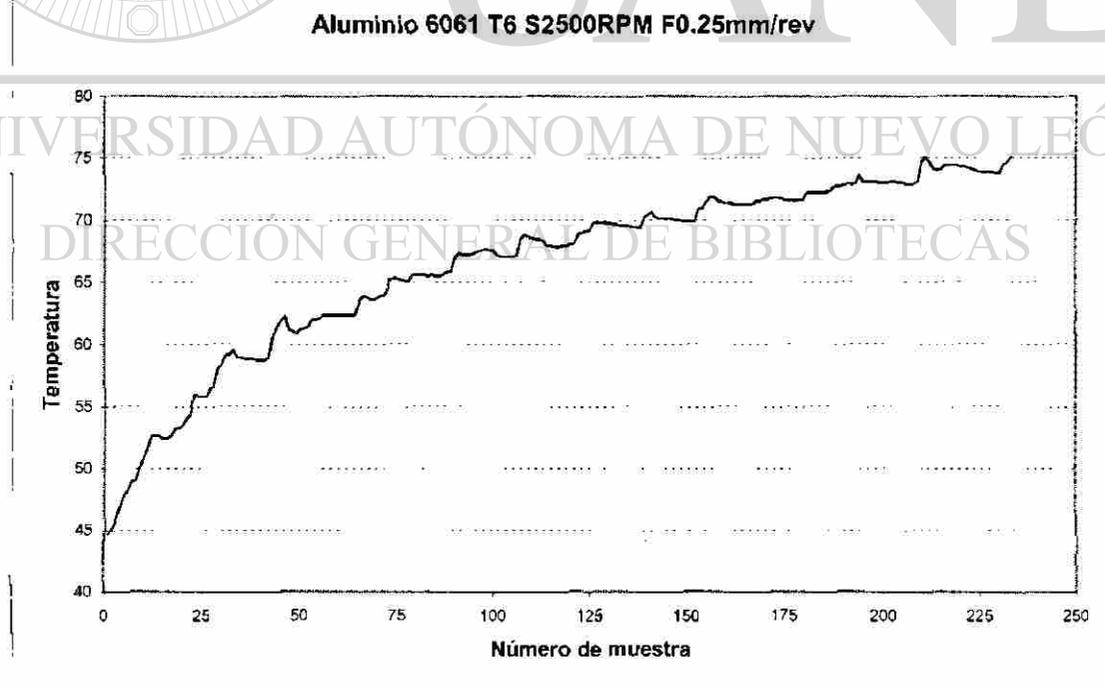


Figura 7.11 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.

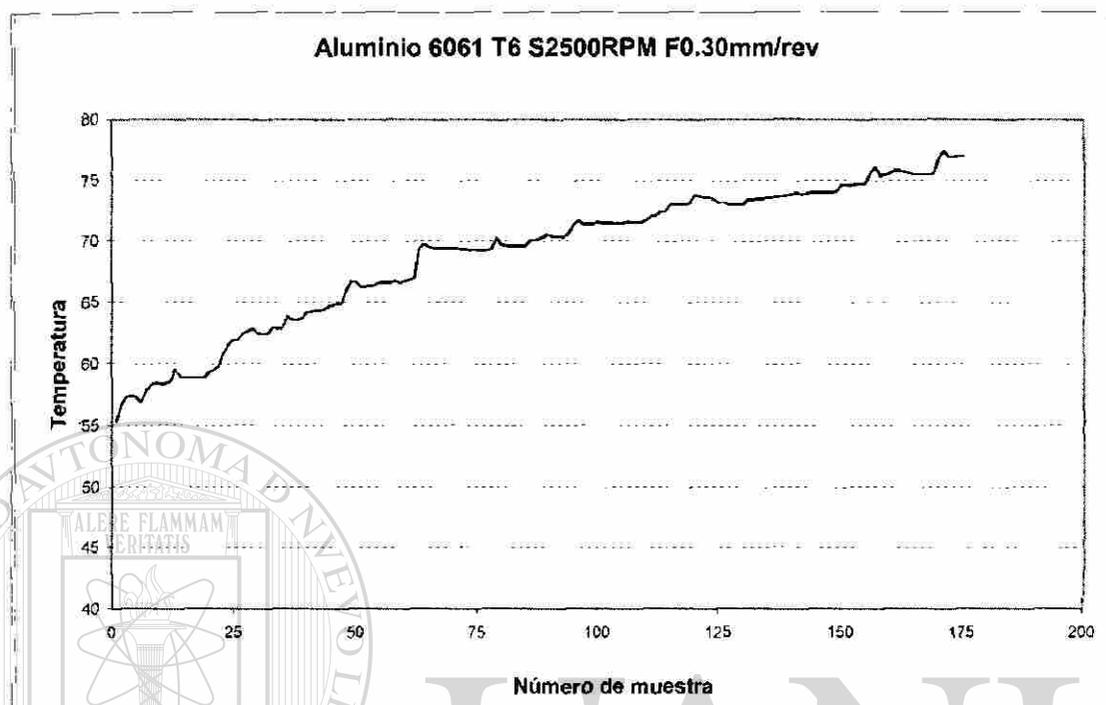


Figura 7.12 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.

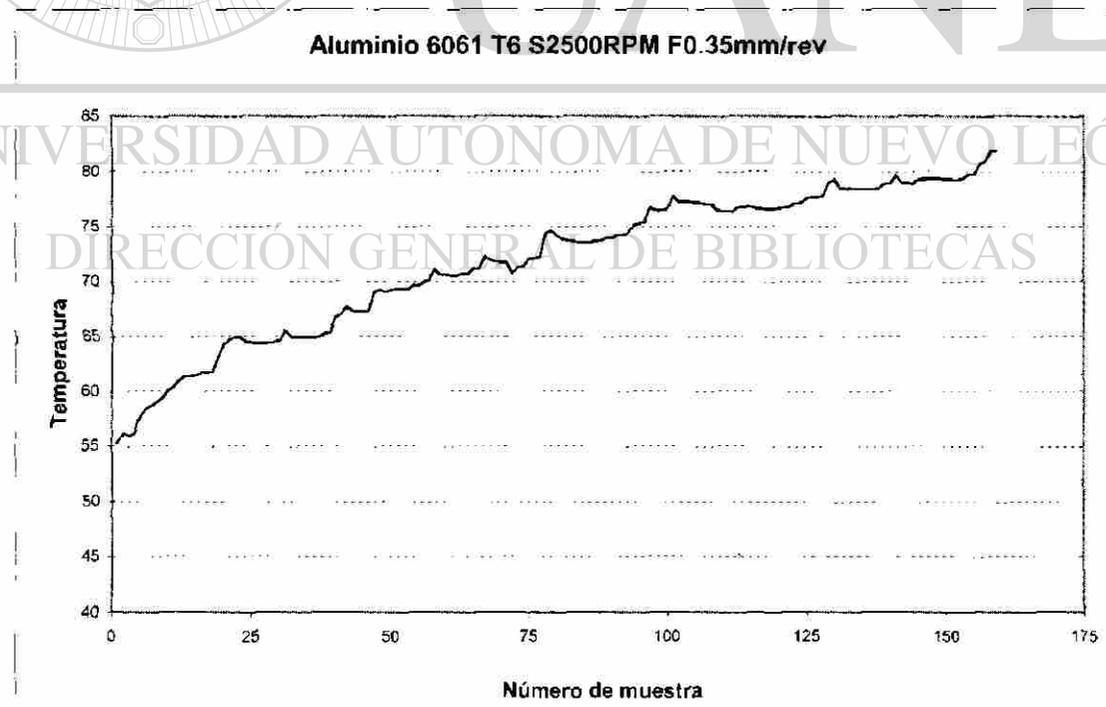


Figura 7.13 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.

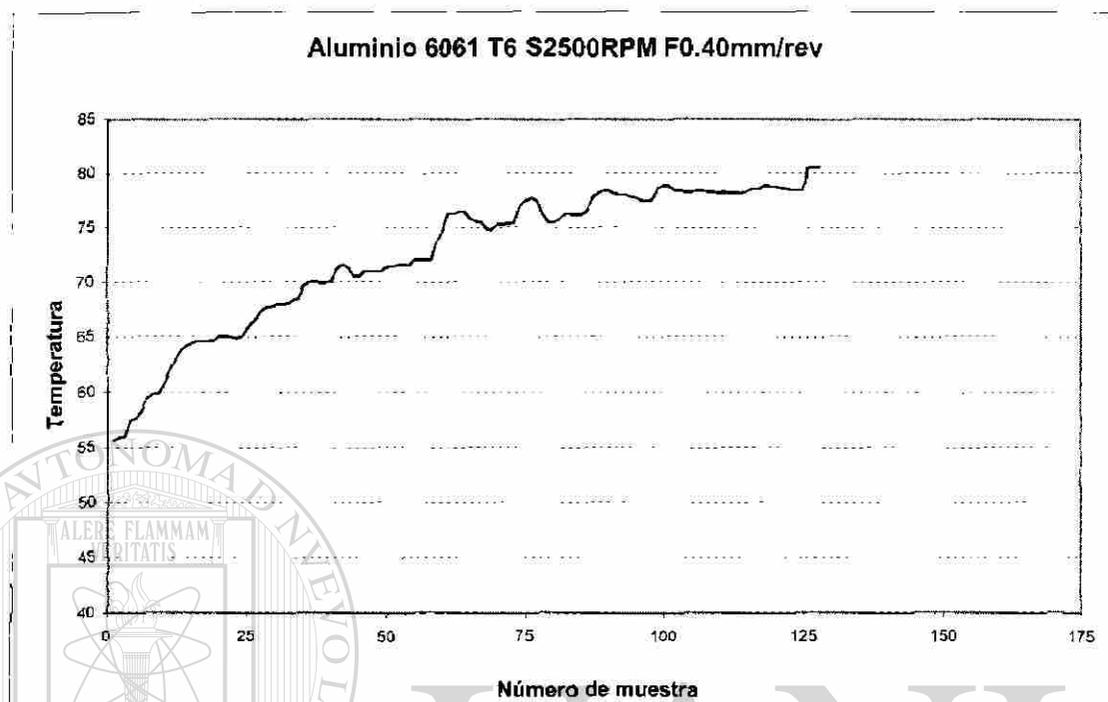


Figura 7.14 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.

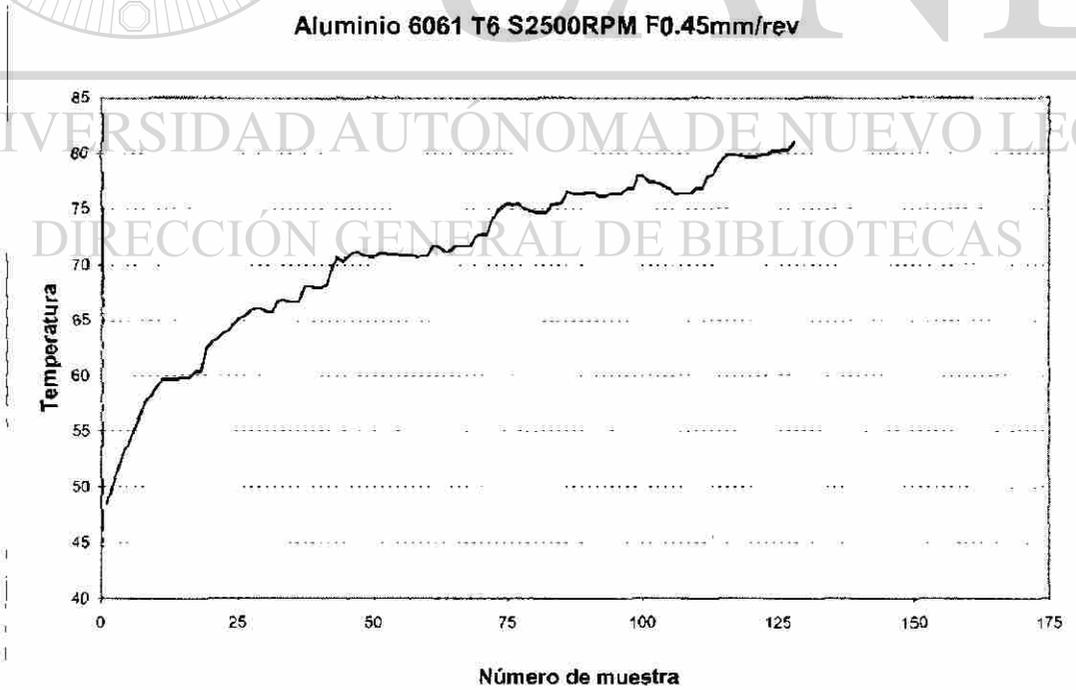


Figura 7.15 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.

7.1.3 Resultado de temperatura en Acero 1018 con una velocidad de giro del husillo de 1400 RPM

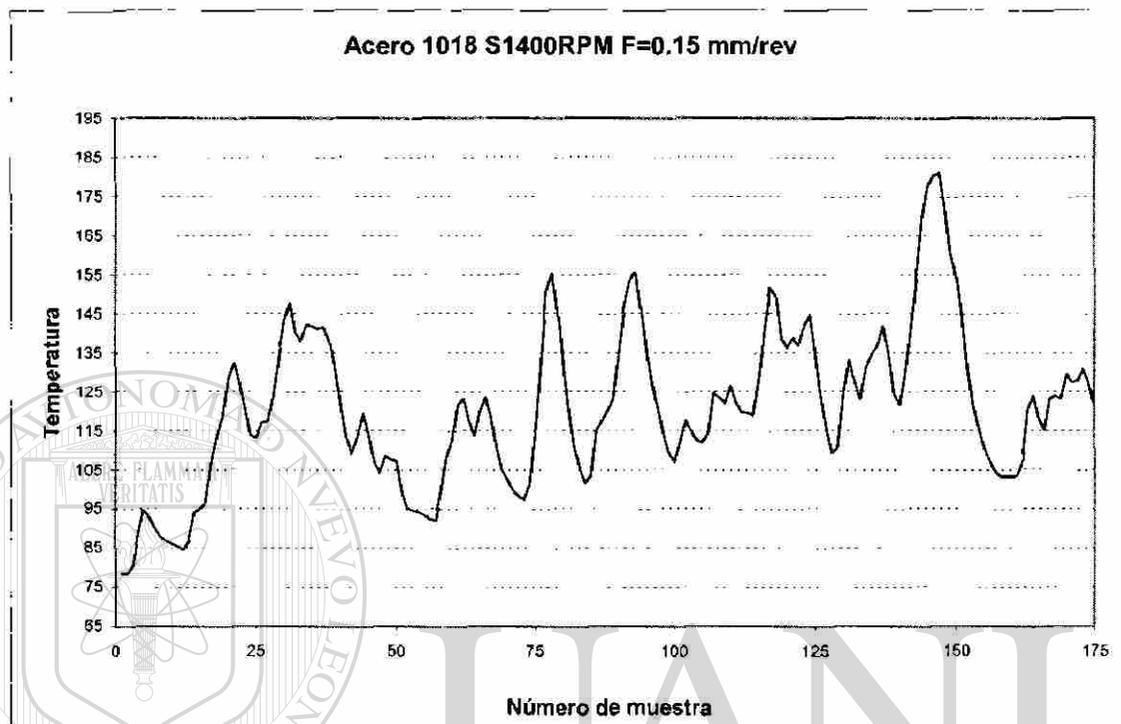


Figura 7.16 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev

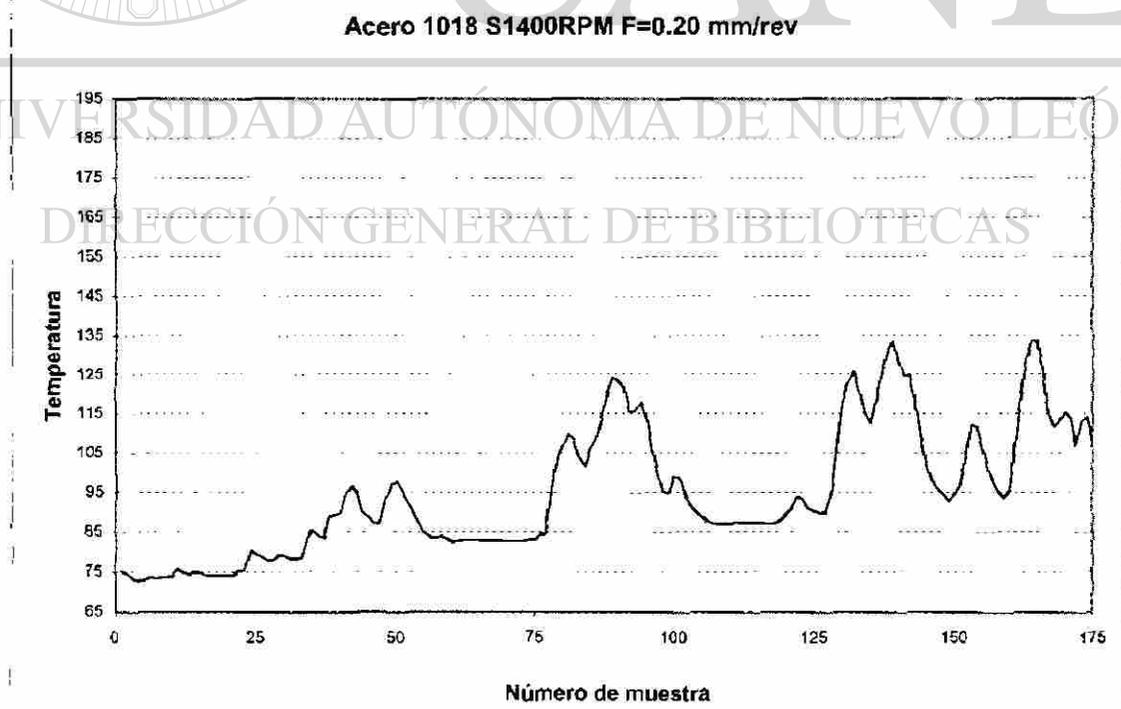


Figura 7.17 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev

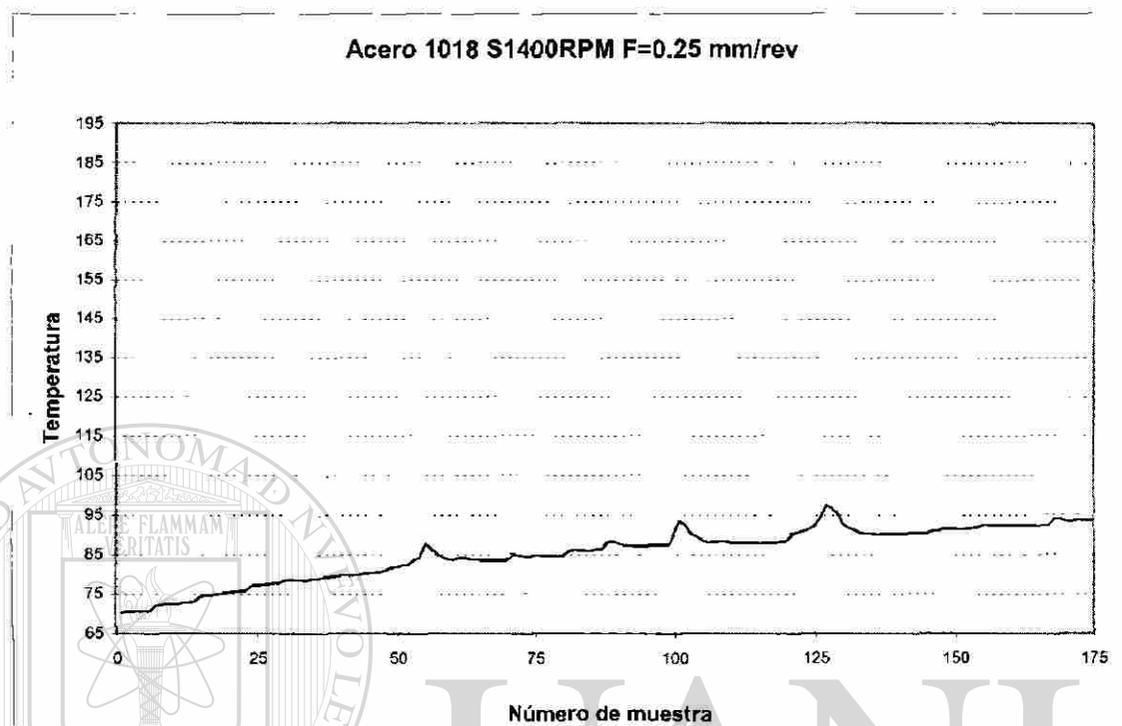


Figura 7.18 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.

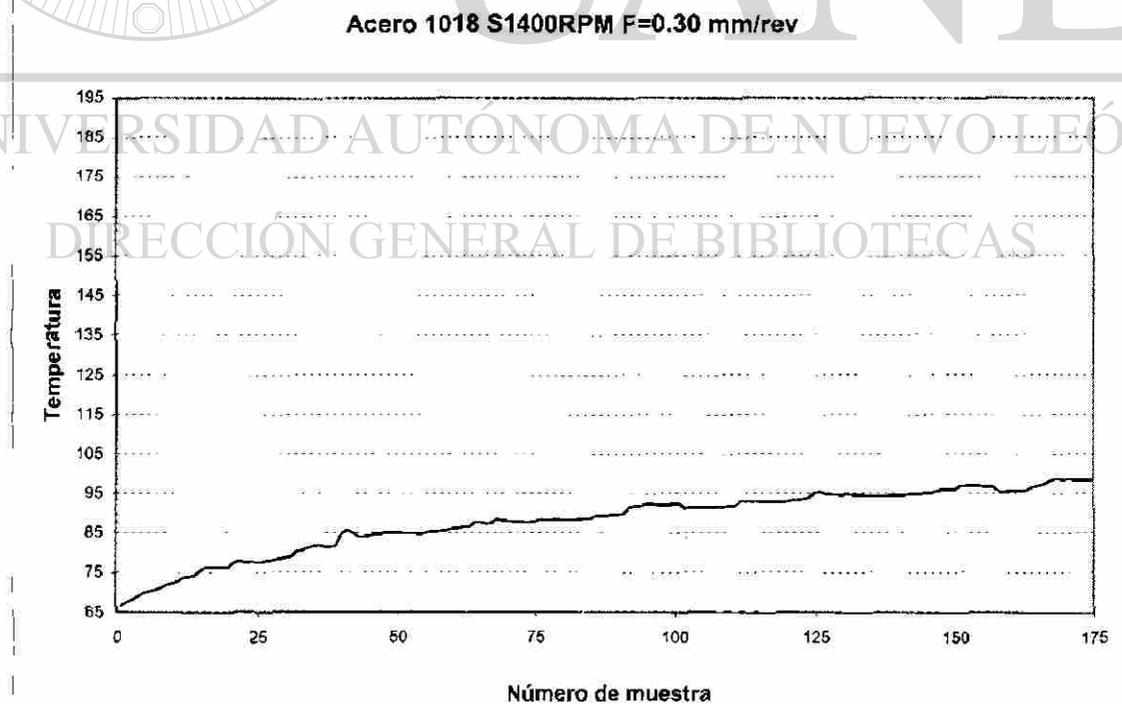


Figura 7.19 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.

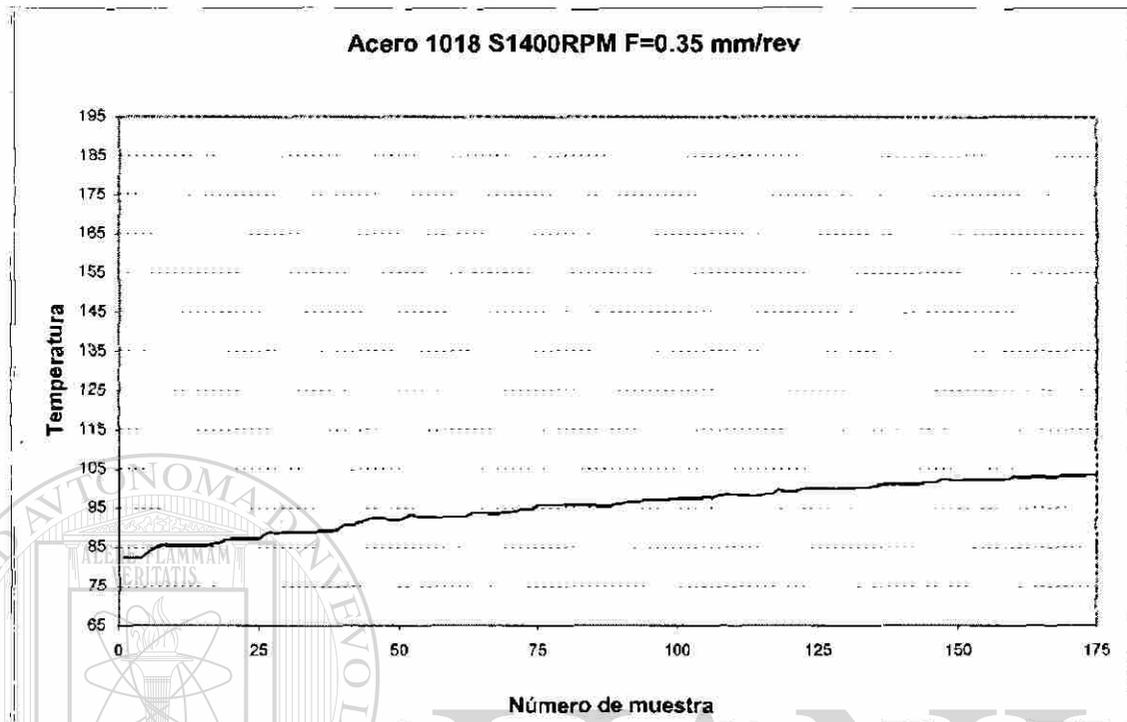


Figura 7.20 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.

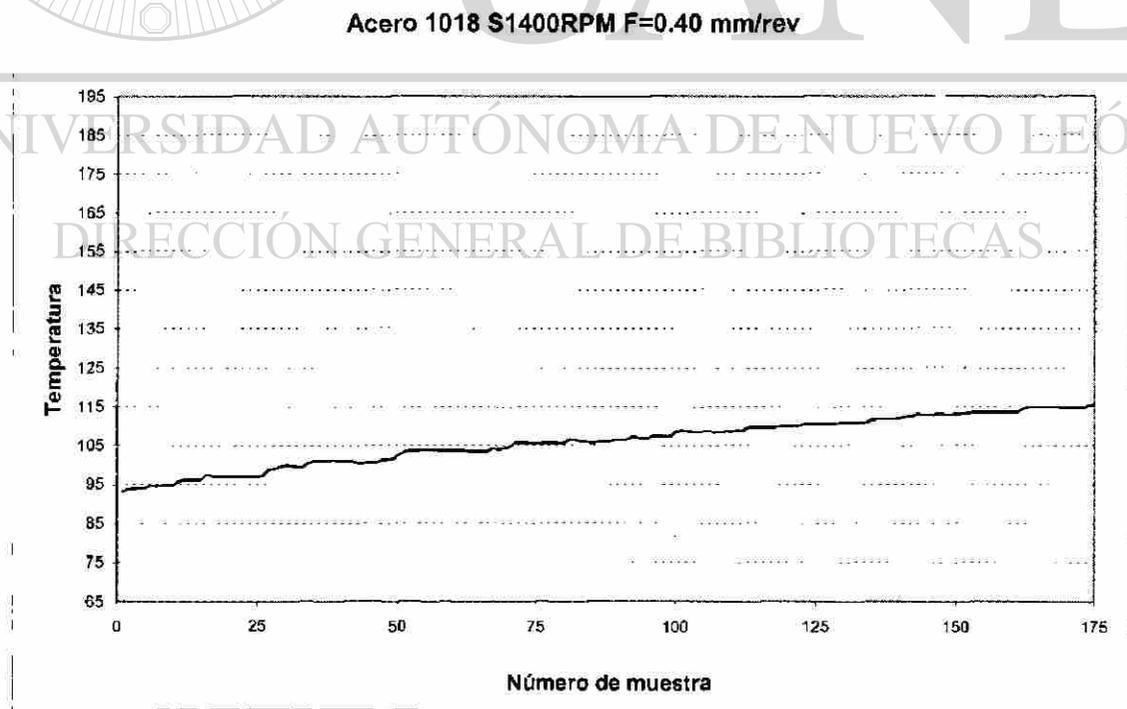


Figura 7.21 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.

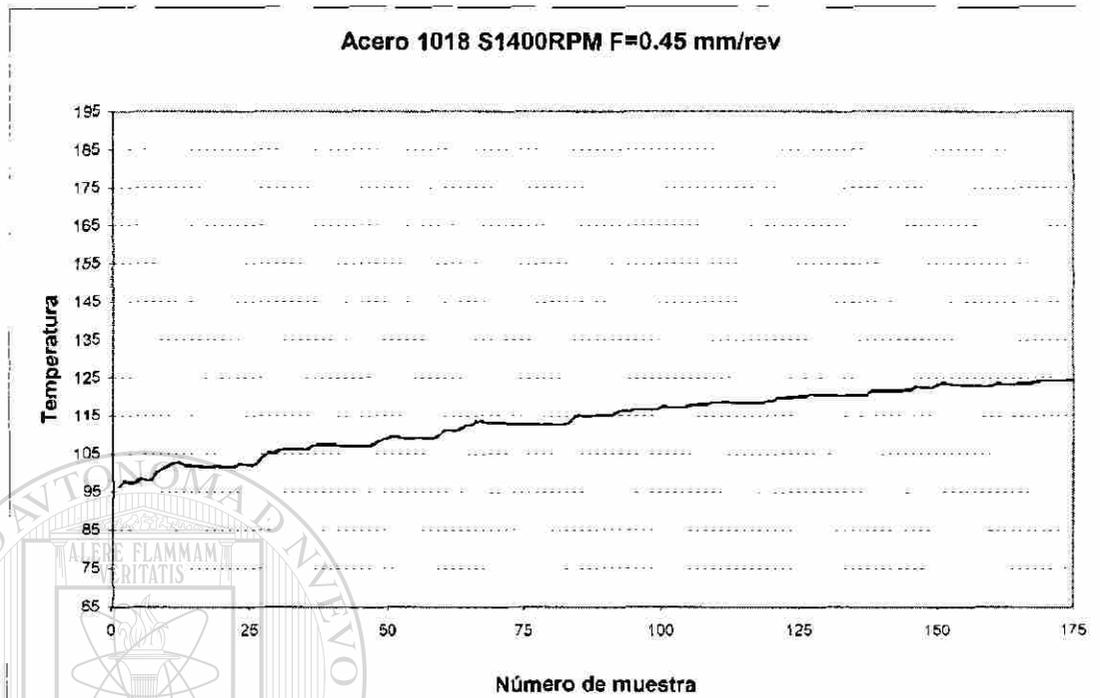


Figura 7.22 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.

7.1.4 Resultado de temperatura en Acero 1018 con una velocidad de giro del husillo de 1600 RPM

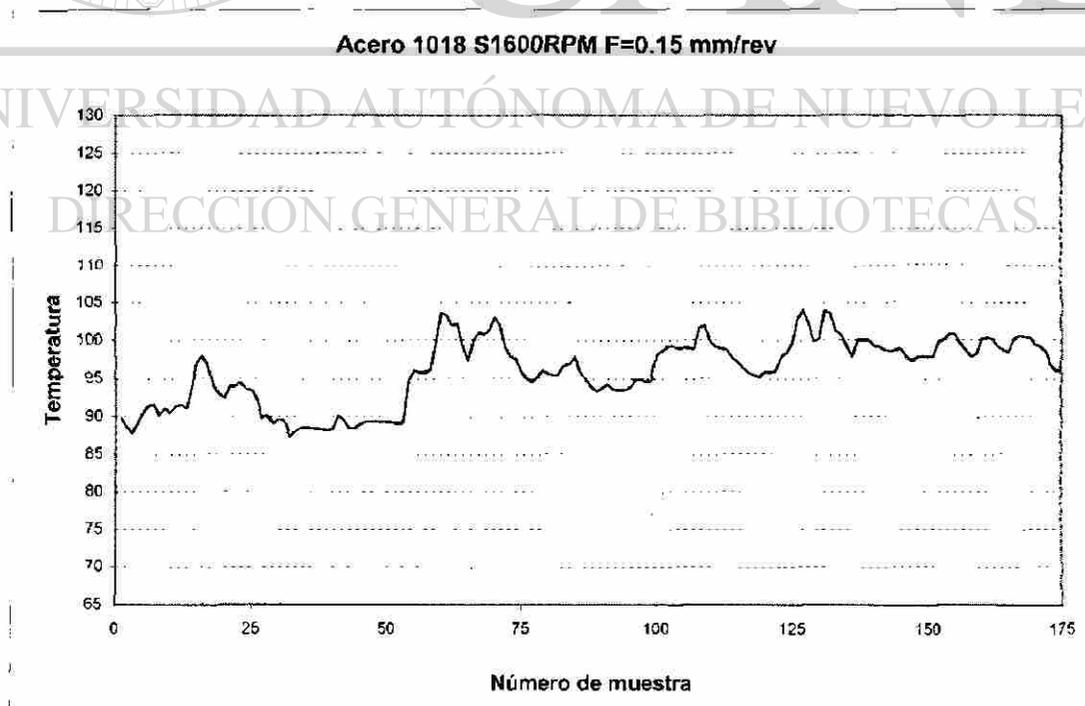


Figura 7.23 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev.

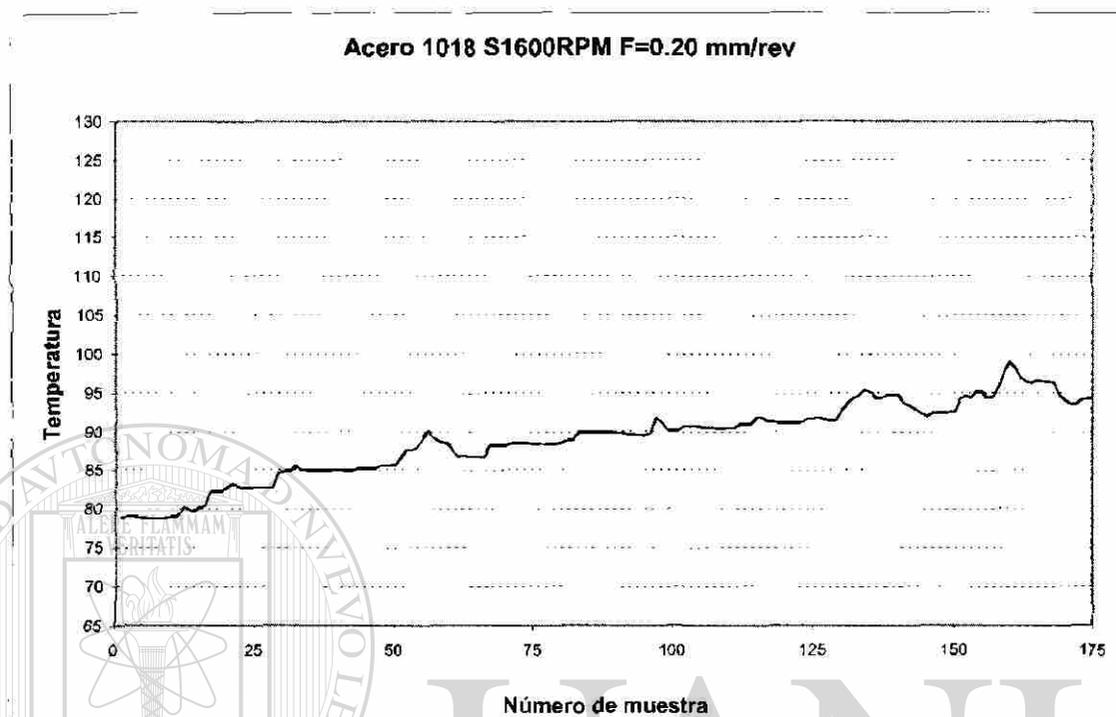


Figura 7.24 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev.

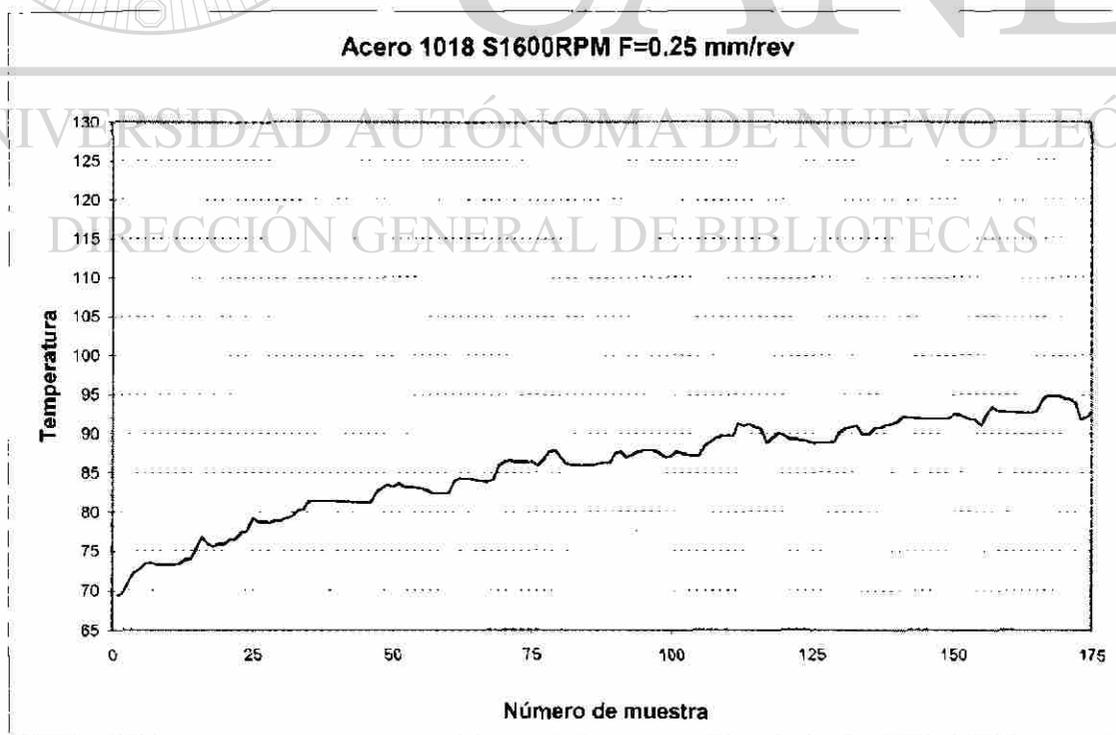


Figura 7.25 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.

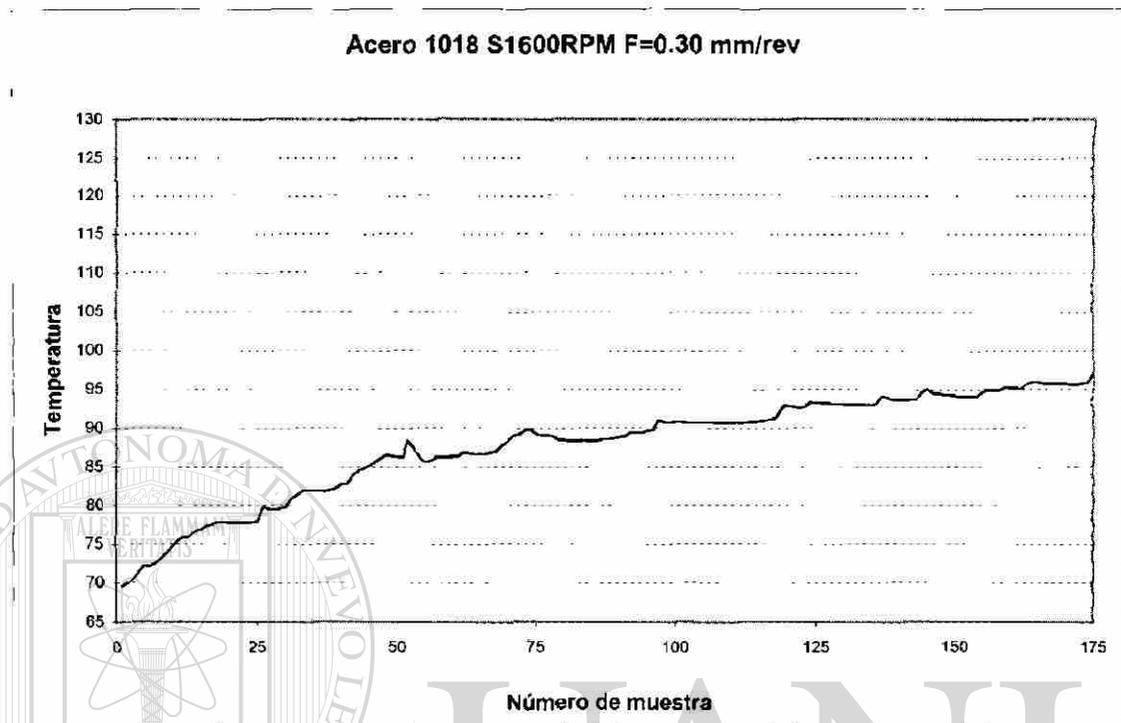


Figura 7.26 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.

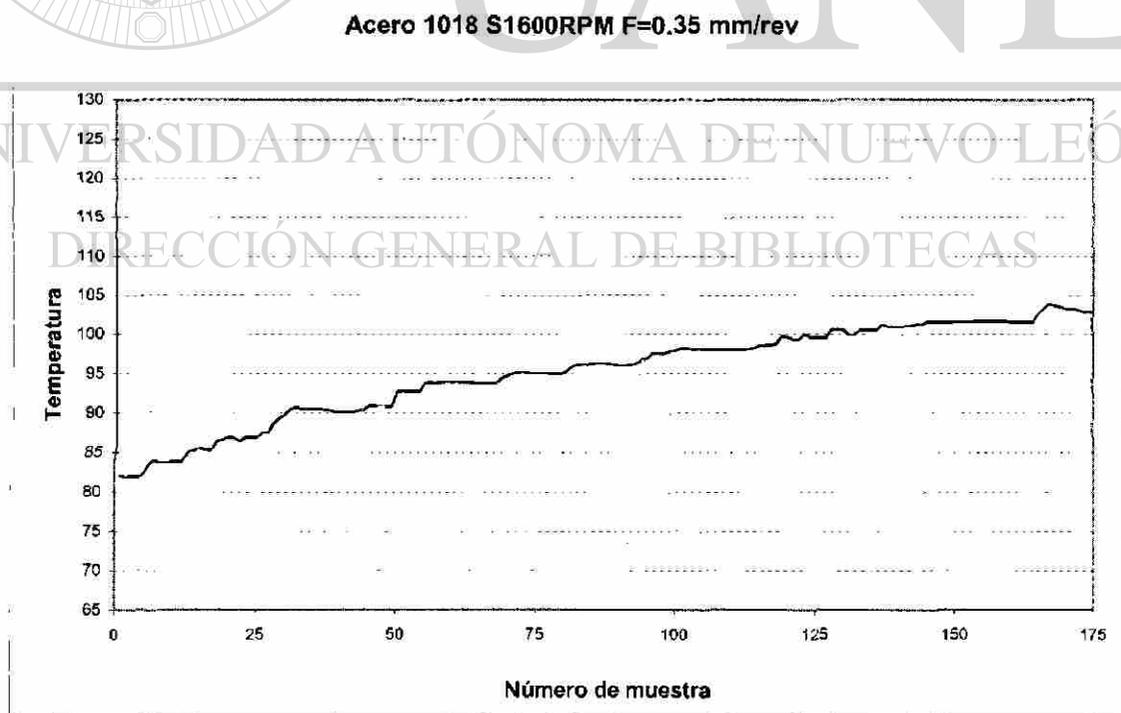


Figura 7.27 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.

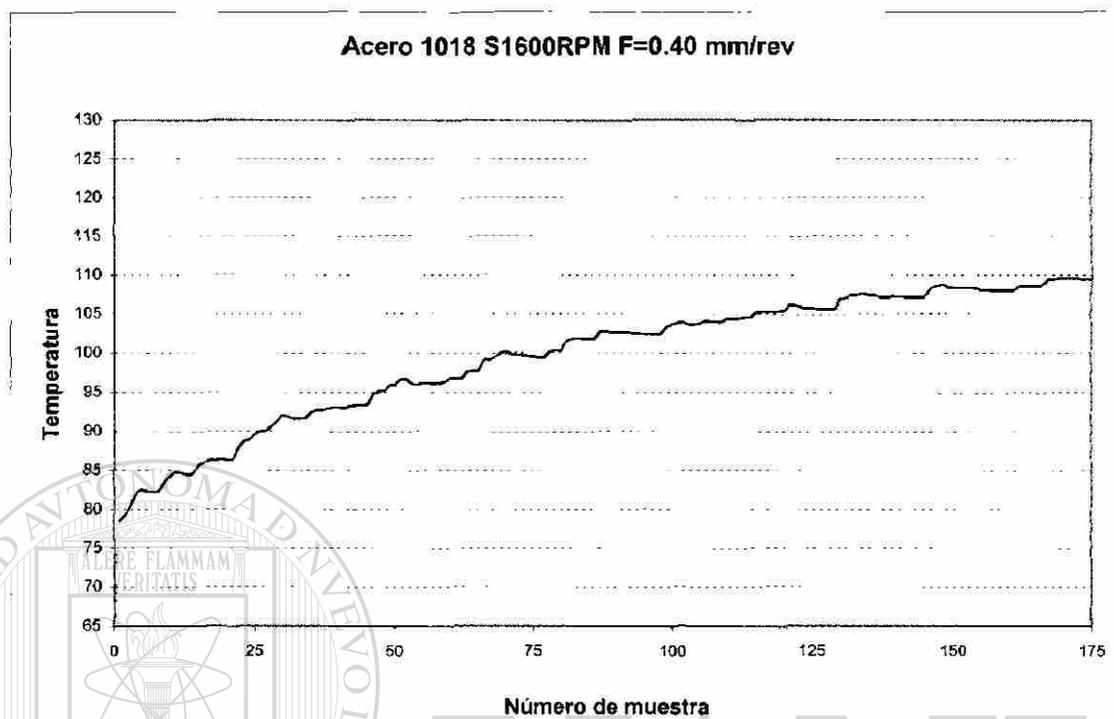


Figura 7.28 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.

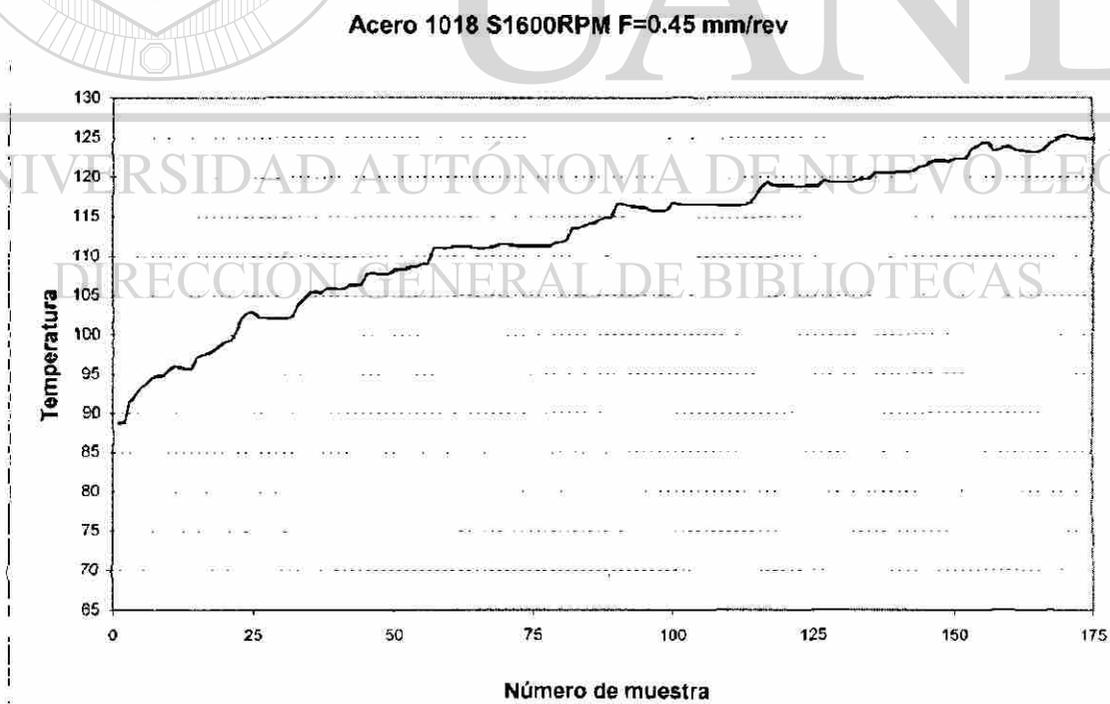


Figura 7.29 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.

7.1.5 Resultado de temperatura en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de giro del husillo de 720 RPM

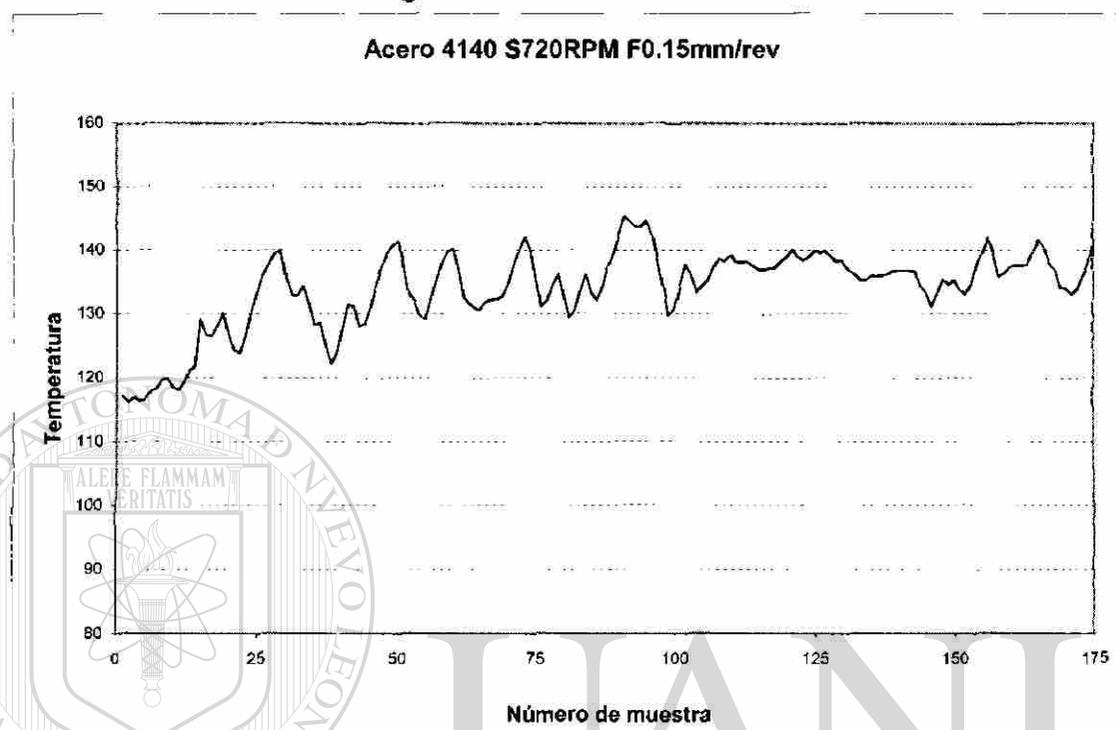


Figura 7.30 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev

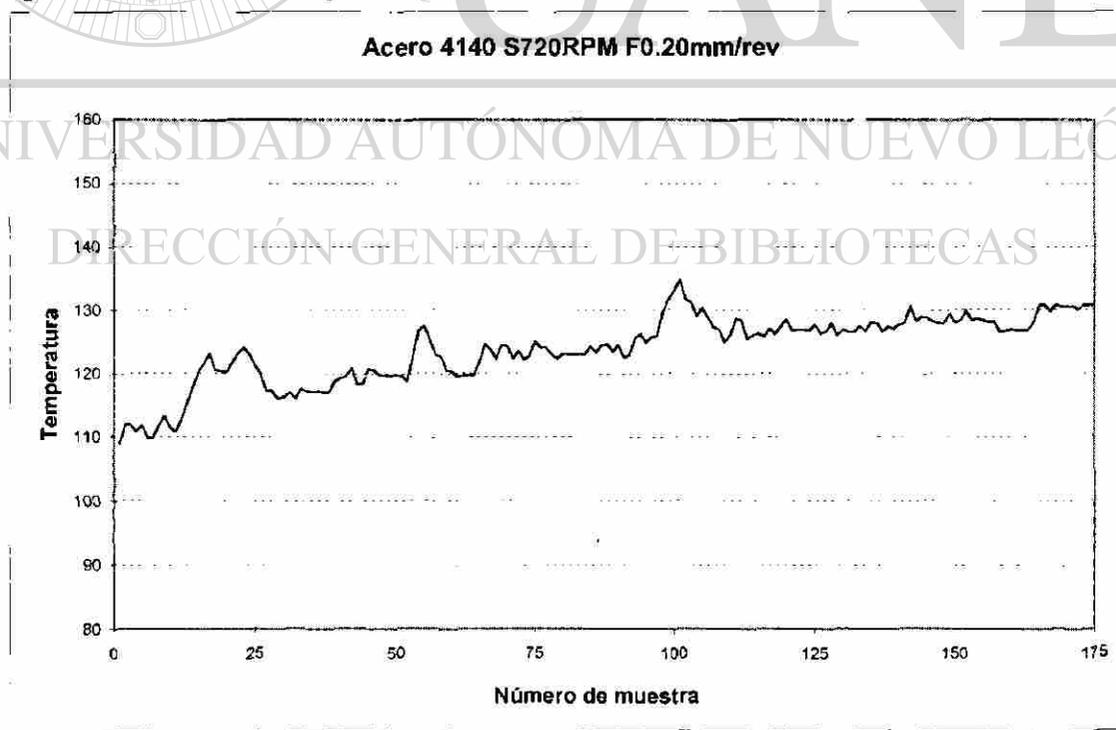


Figura 7.31 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev

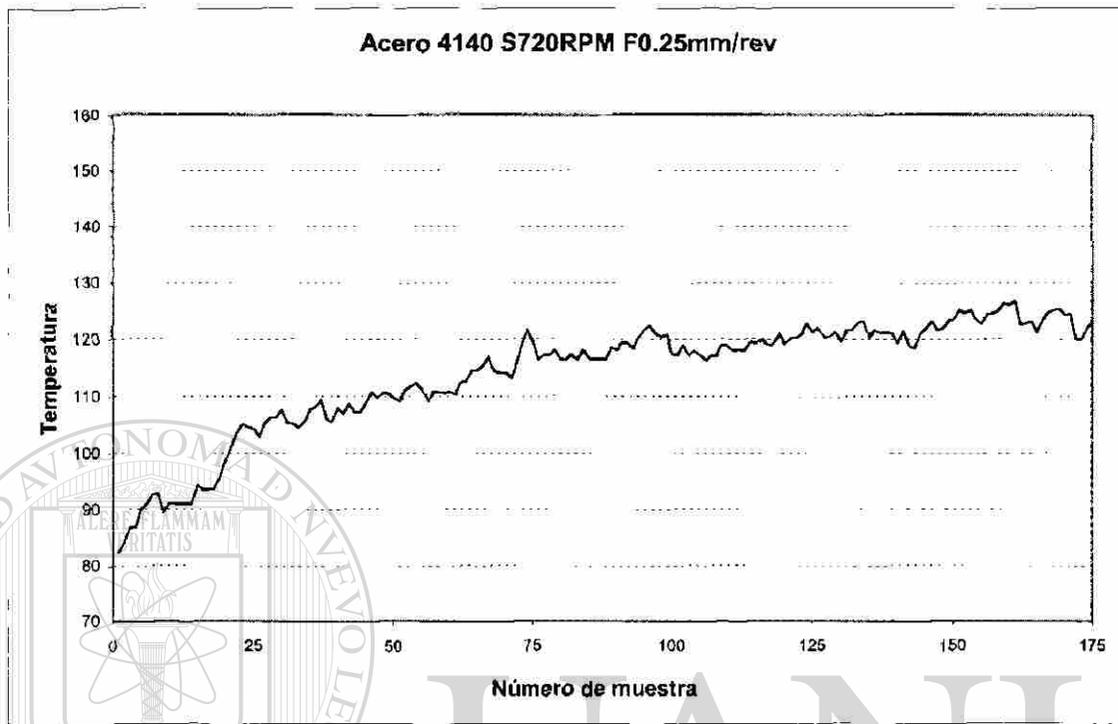


Figura 7.32 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.

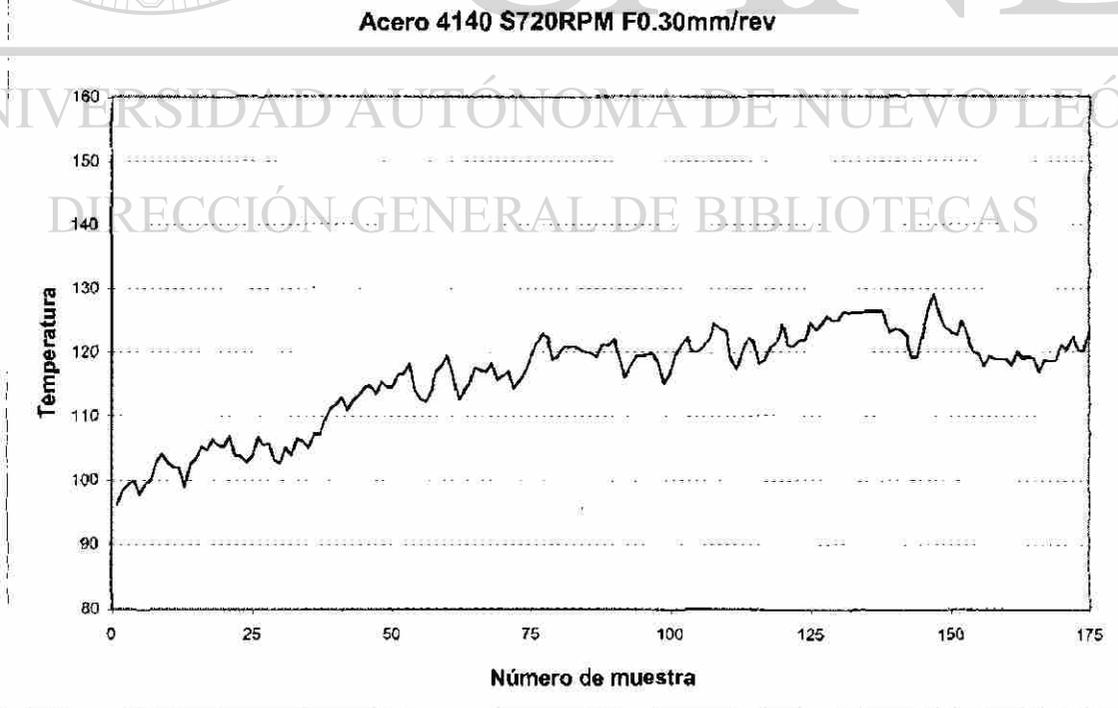


Figura 7.33 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.

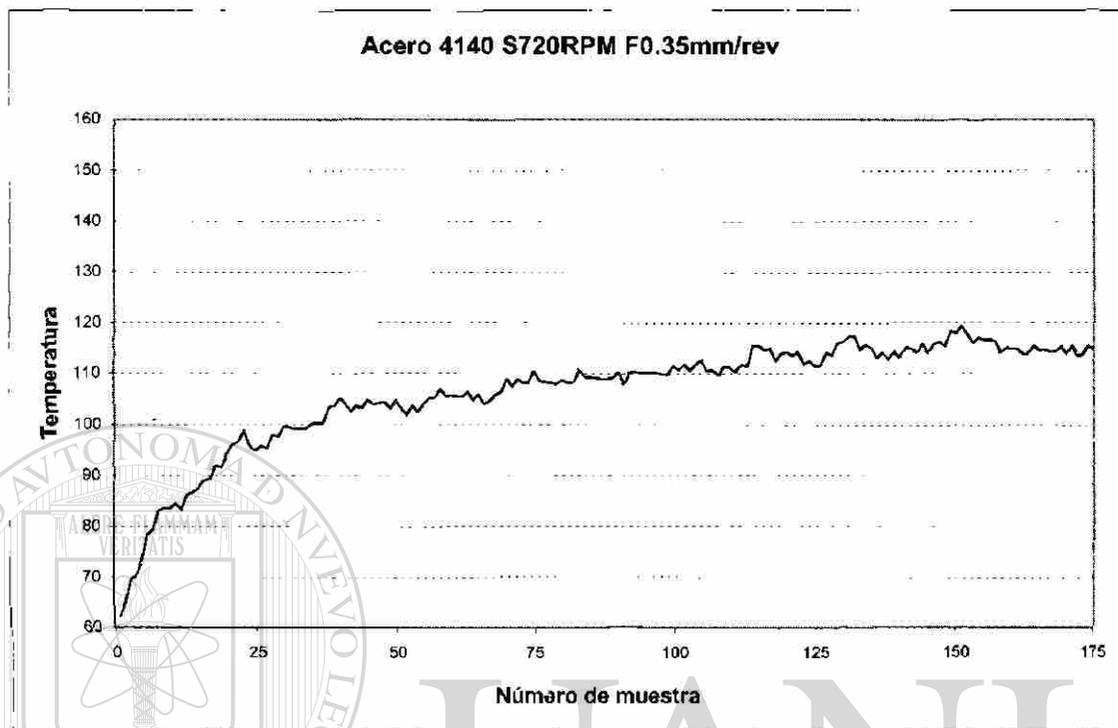


Figura 7.34 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.

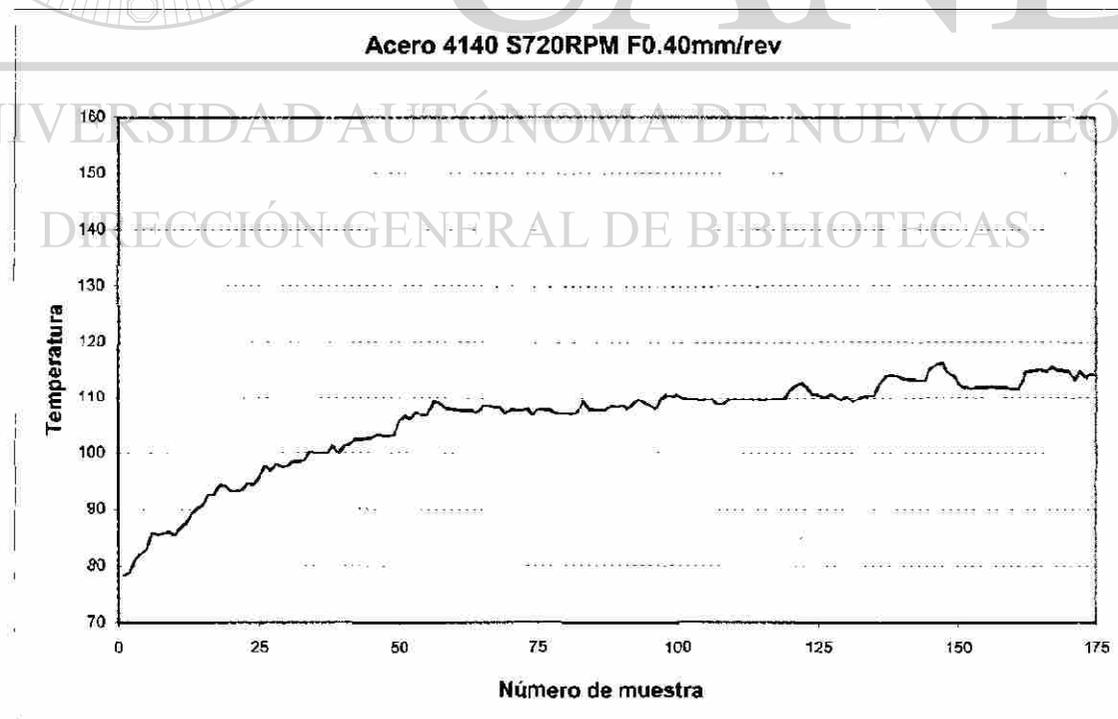


Figura 7.35 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.

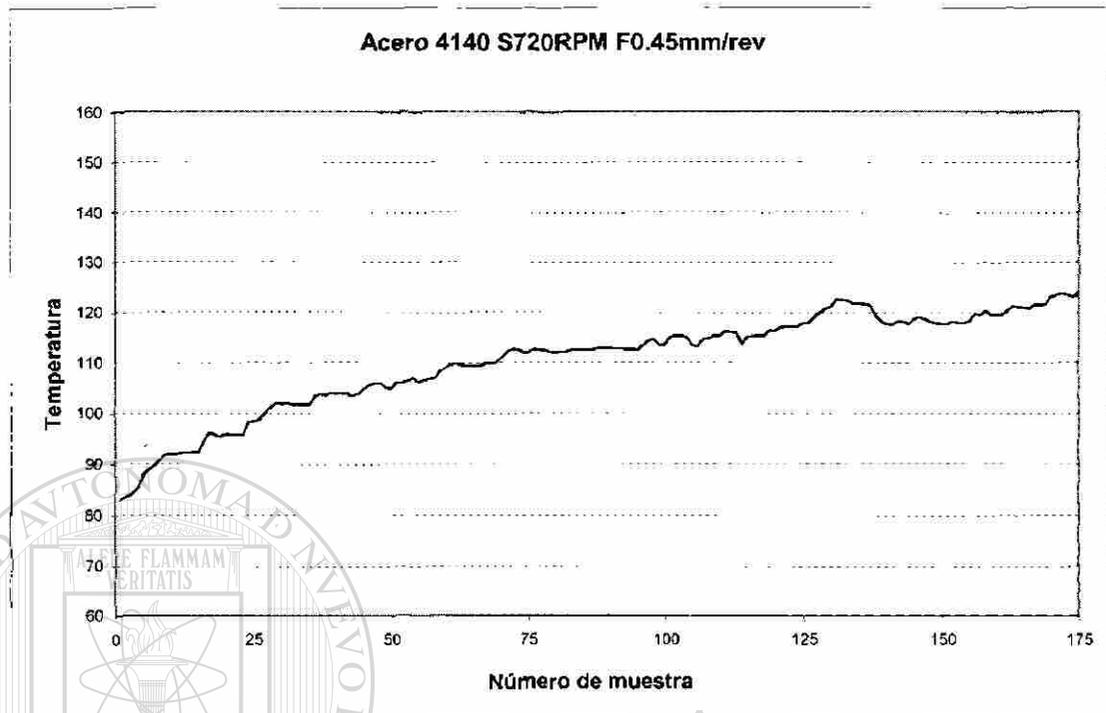


Figura 7.36 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.

7.1.6 Resultado de temperatura en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frio con una velocidad de giro del husillo de 1000 RPM

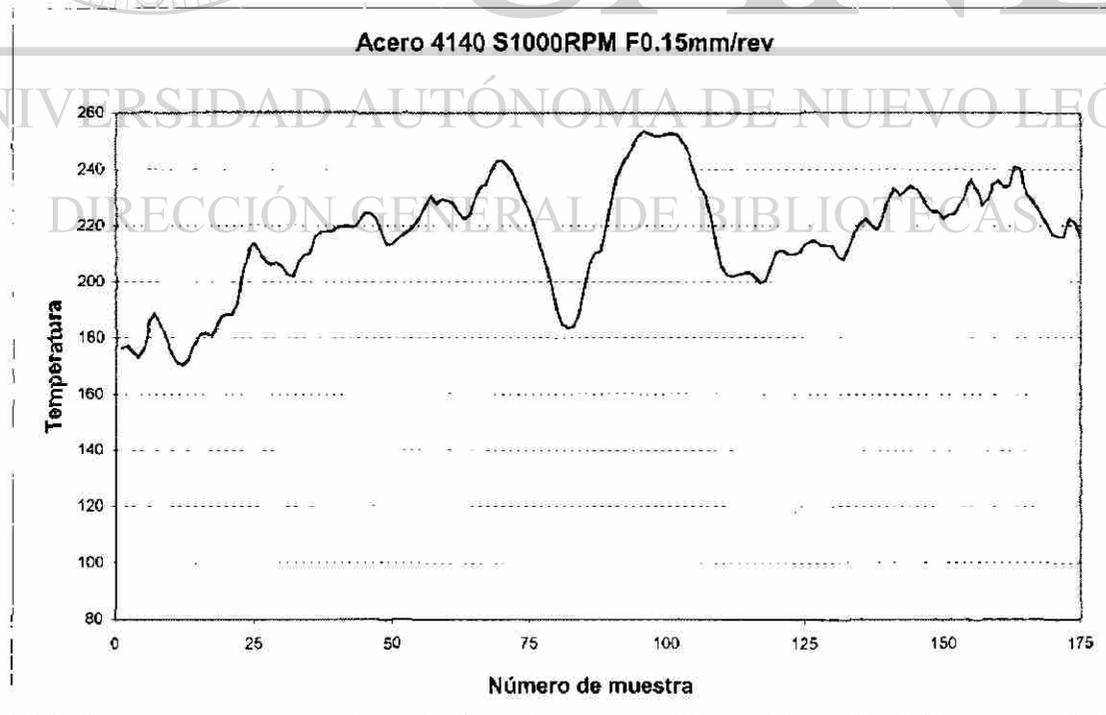


Figura 7.37 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev

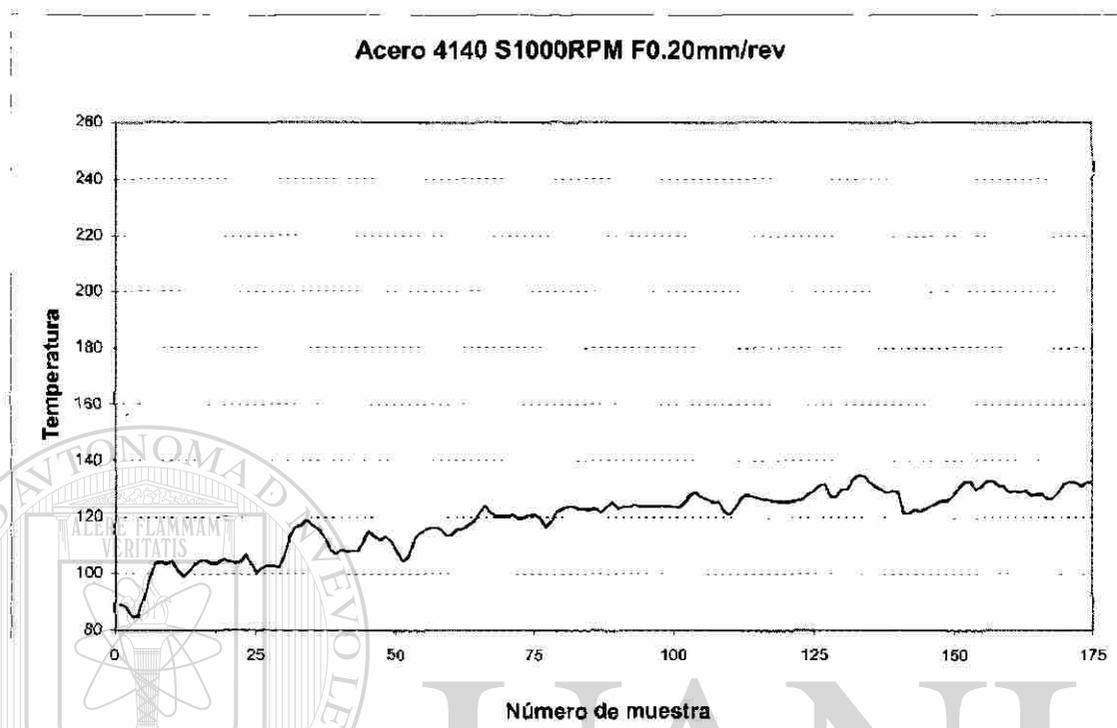


Figura 7.38 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev.

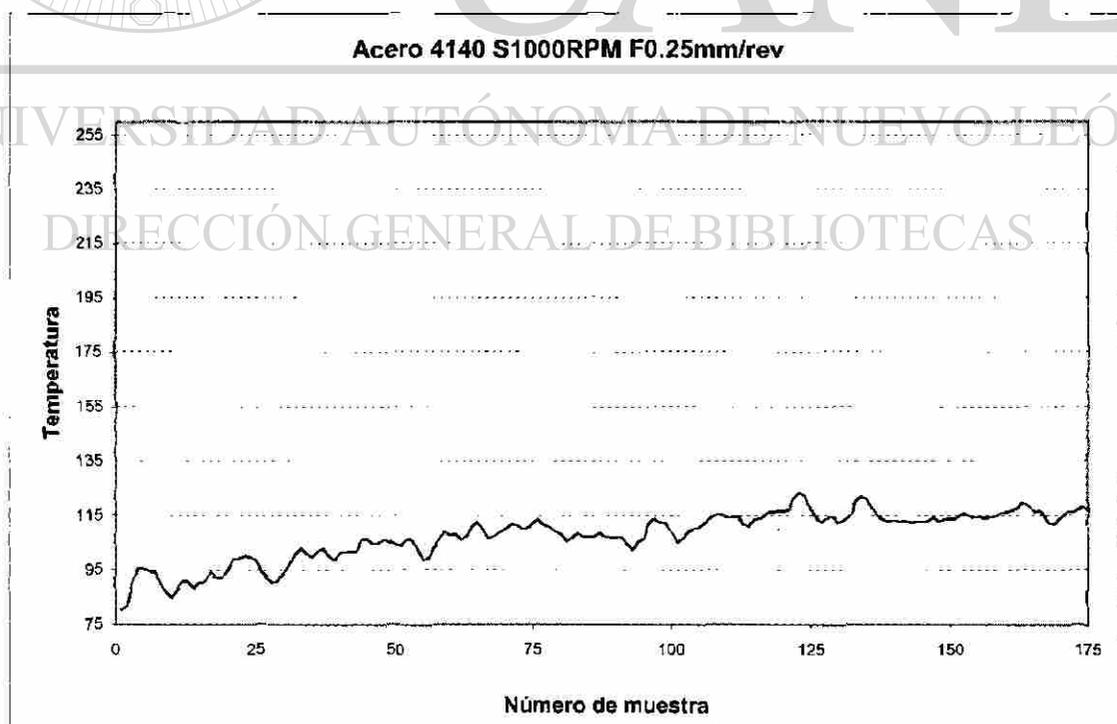


Figura 7.39 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.

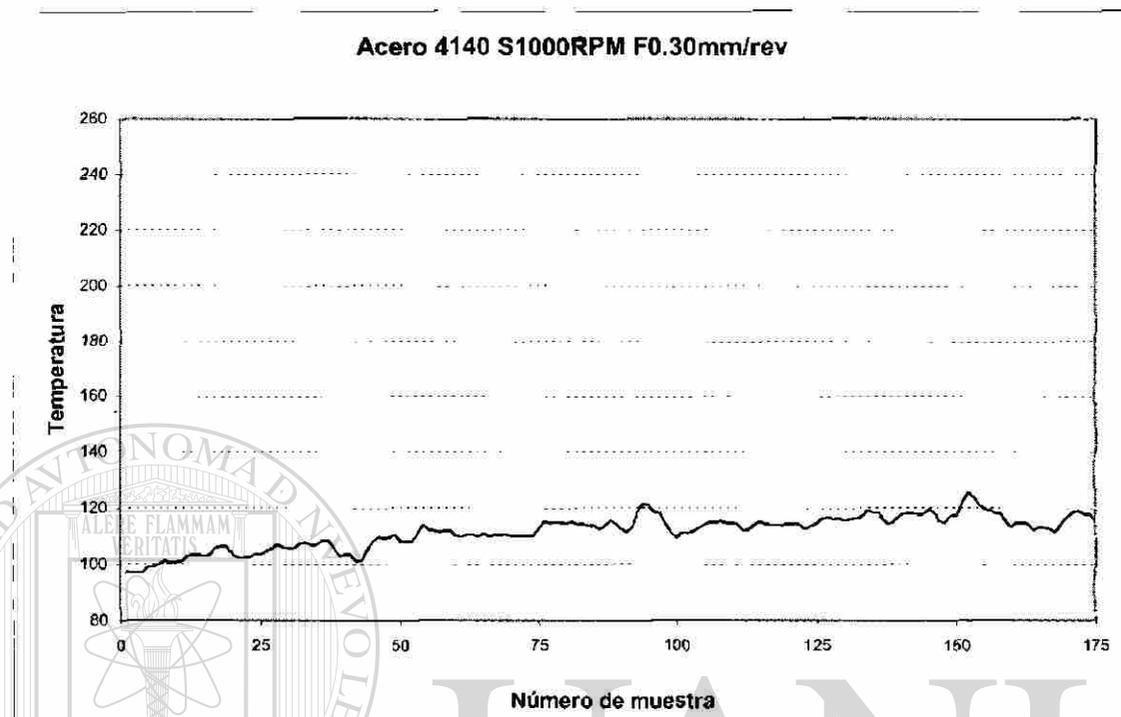


Figura 7.40 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.

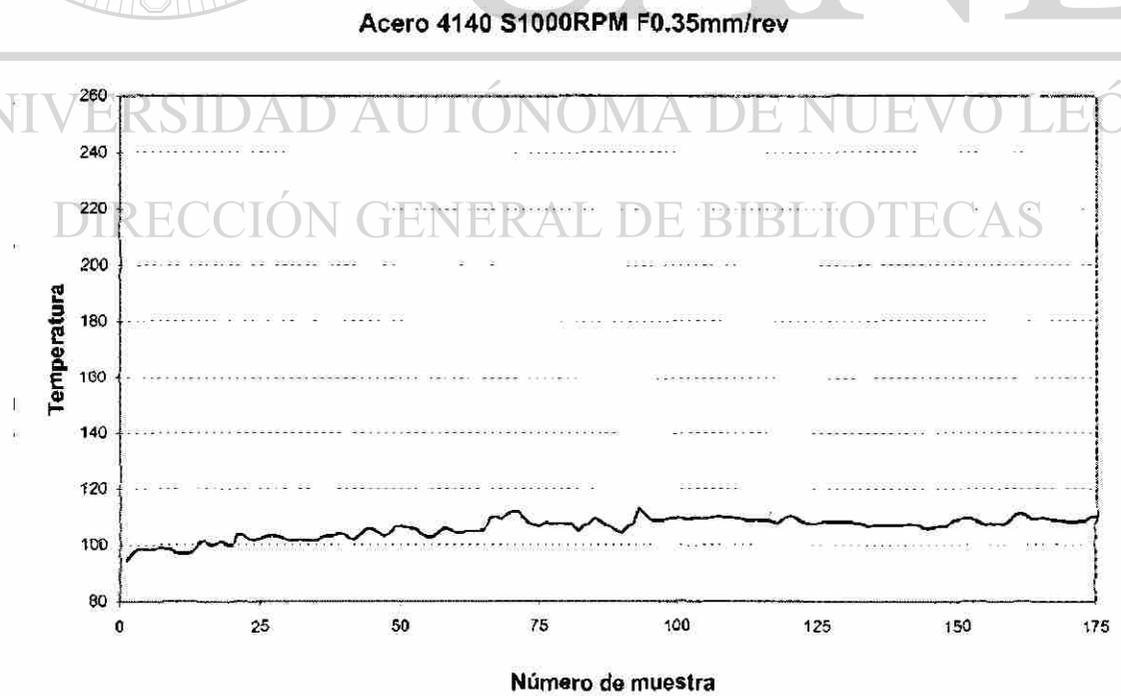


Figura 7.41 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.

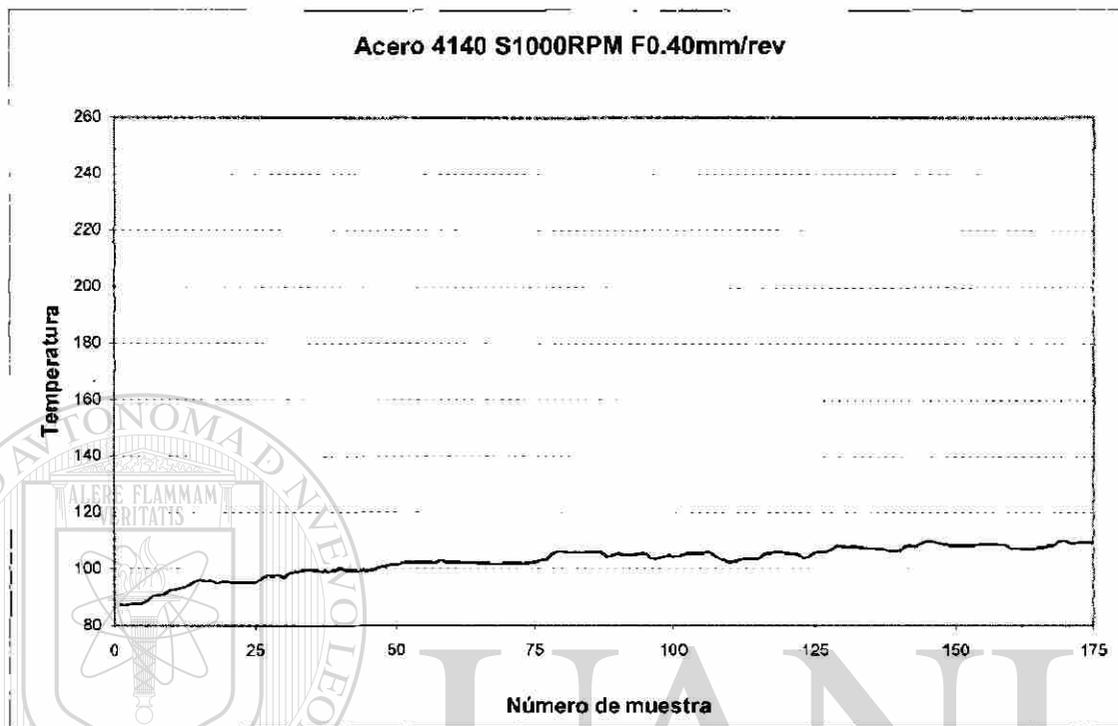


Figura 7.42 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.

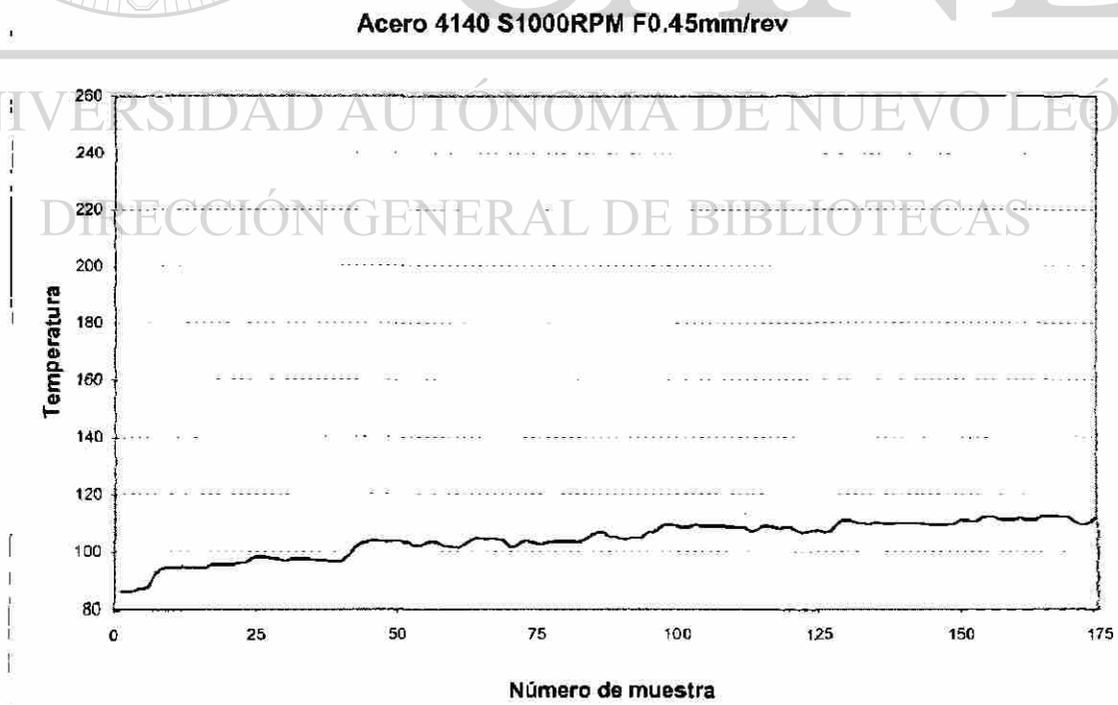


Figura 7.43 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.

7.2 Discusión de los resultados de temperatura

Para el aluminio la temperatura avanza en línea recta desde 55 hasta 85°C, en cambio para el acero 1018 y para el 4140 la variación de temperatura es más marcada, y el comportamiento con respecto a la variación en las condiciones de corte es más marcada para la temperatura.

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 6061 T6 con una velocidad de giro del husillo de 1900 RPM

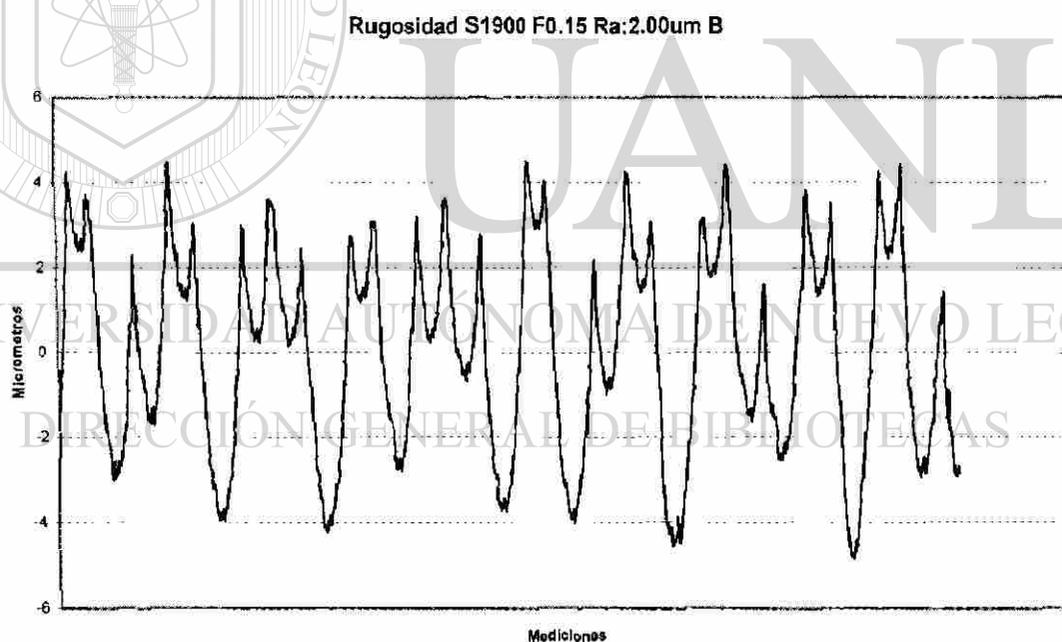


Figura 7.44 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev.

Rugosidad S1900 F0.20 Ra:2.32um B

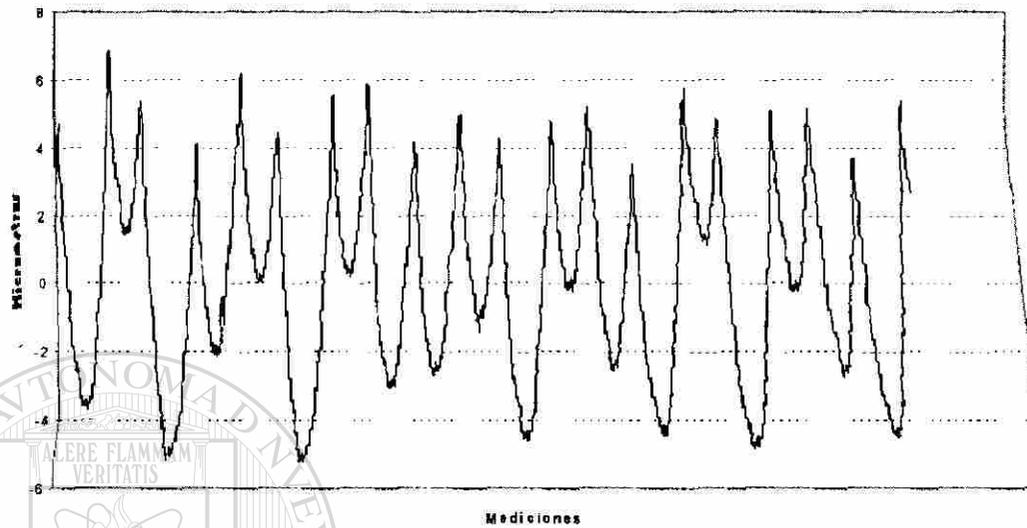


Figura 7.45 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev.

Rugosidad S1900 F0.25 Ra:2.89um B

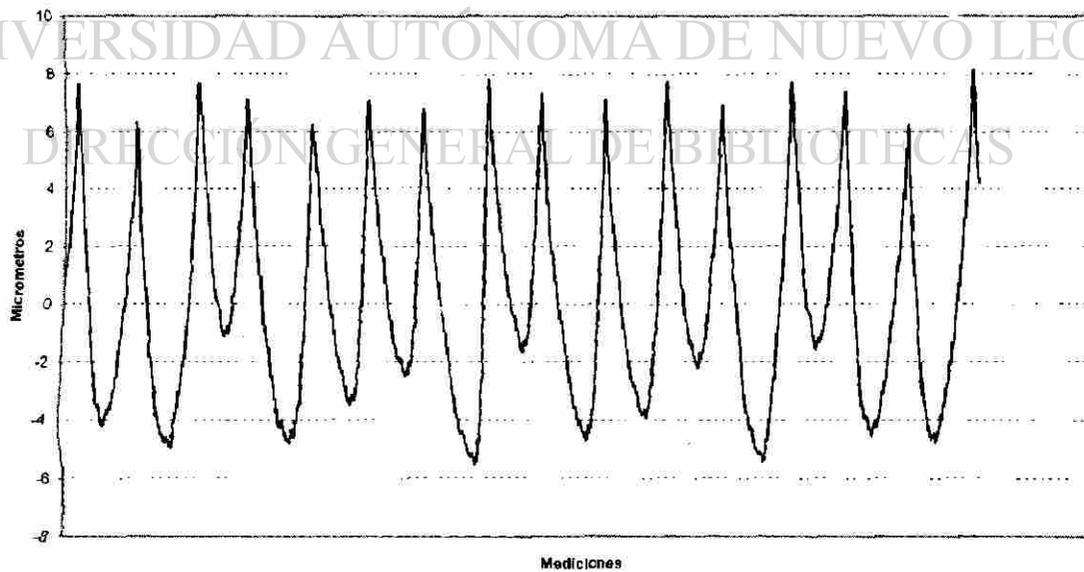


Figura 7.46 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev.

Rugosidad S1900 F0.30 Ra:3.87um B

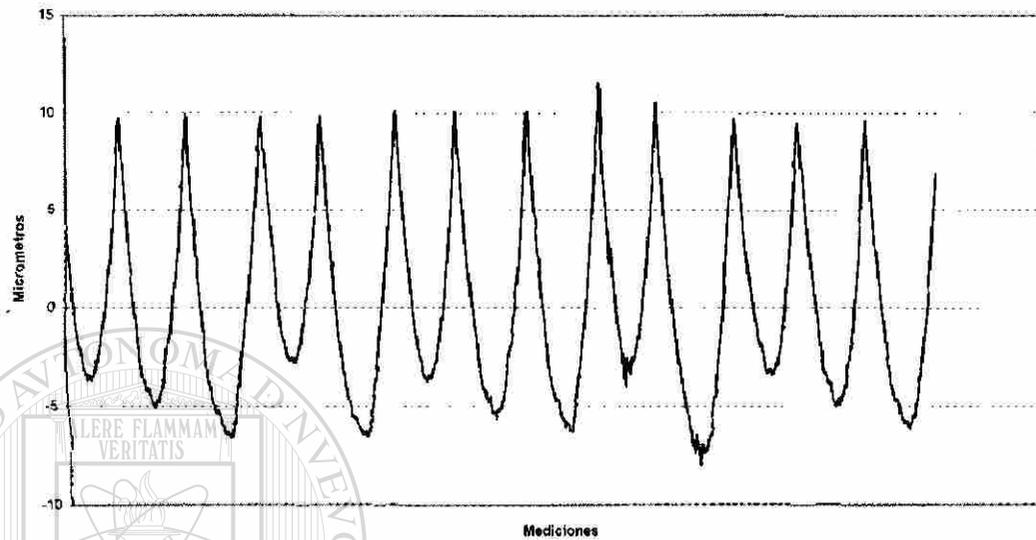


Figura 7.47 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev.

Rugosidad S1900 F0.35 Ra:4.97um B

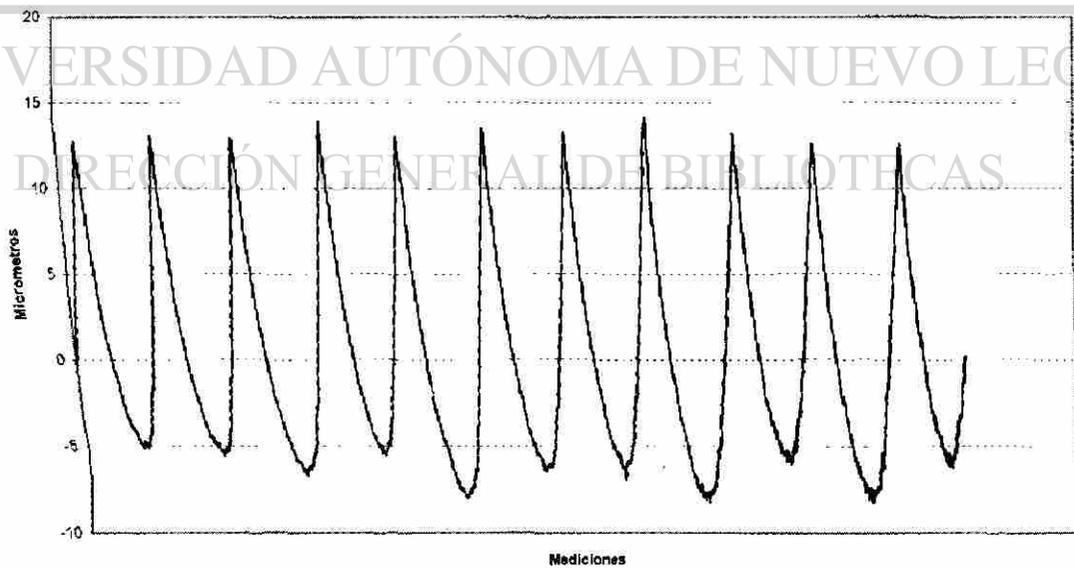


Figura 7.48 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev.

Rugosidad S1900 F0.40 Ra:6.11um B

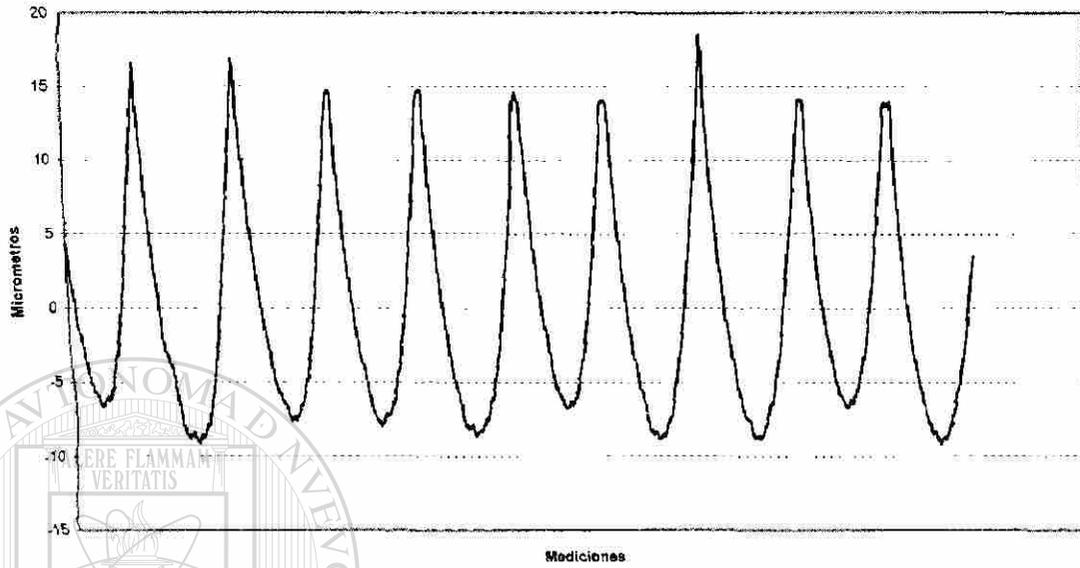


Figura 7.49 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev.

Rugosidad S1900 F0.45 Ra:7.59um B

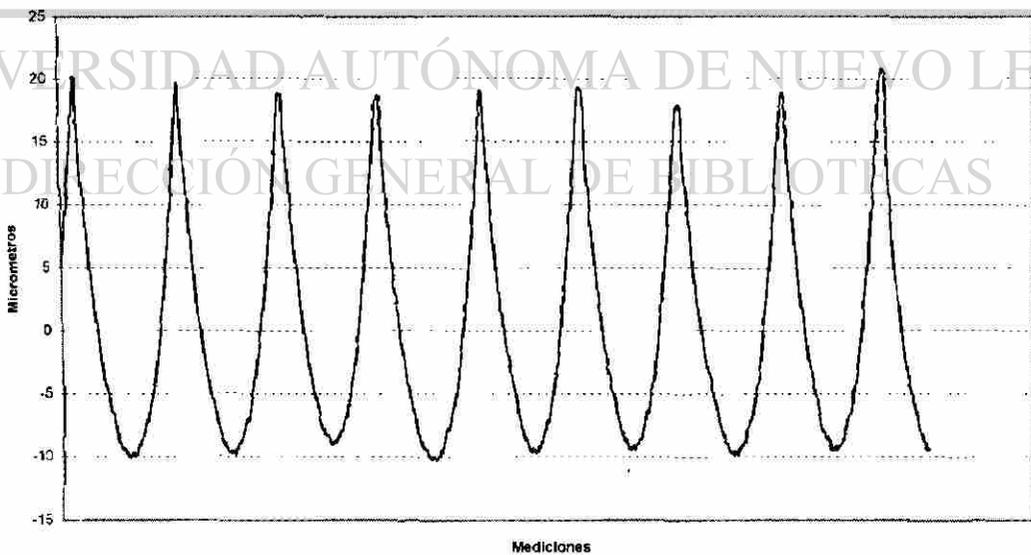


Figura 7.50 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev.

7.3.2 Resultado de rugosidad en Aluminio 6061 T6 con una velocidad de giro del husillo de 2500 RPM

Rugosidad S2500 F0.15 Ra:1.80um B

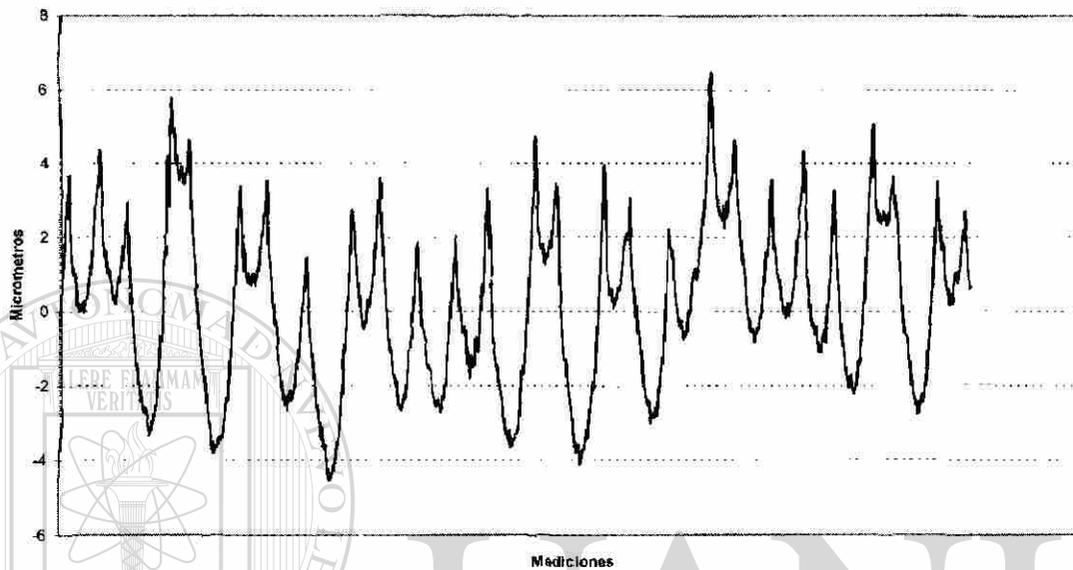


Figura 7.51 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev.

Rugosidad S2500 F0.20 Ra:2.35um B

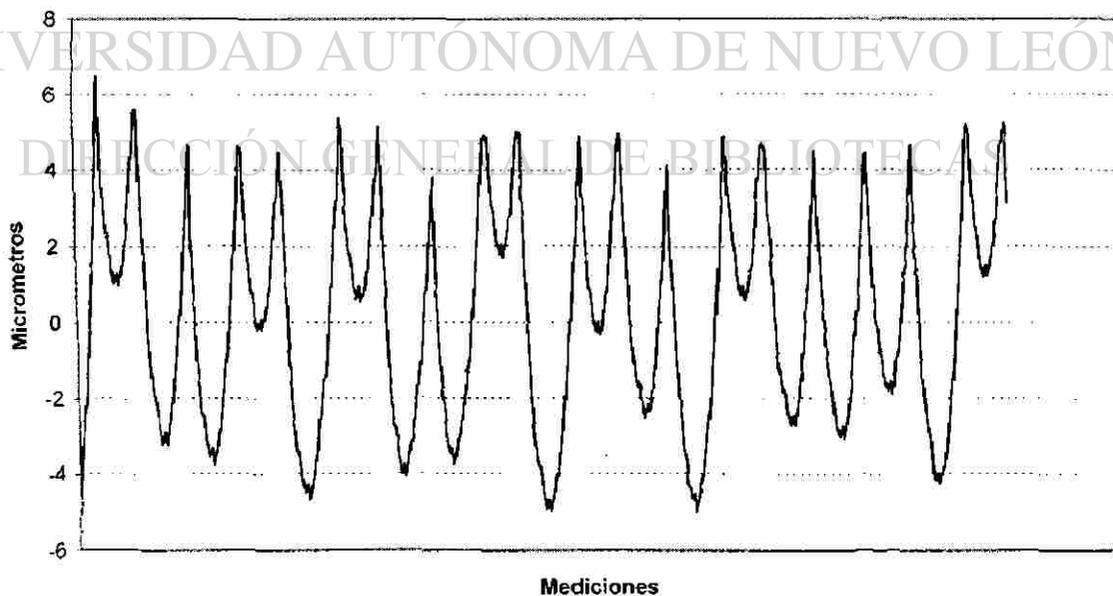


Figura 7.52 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev.

Rugosidad S2500 F0.25 Ra:2.84um B

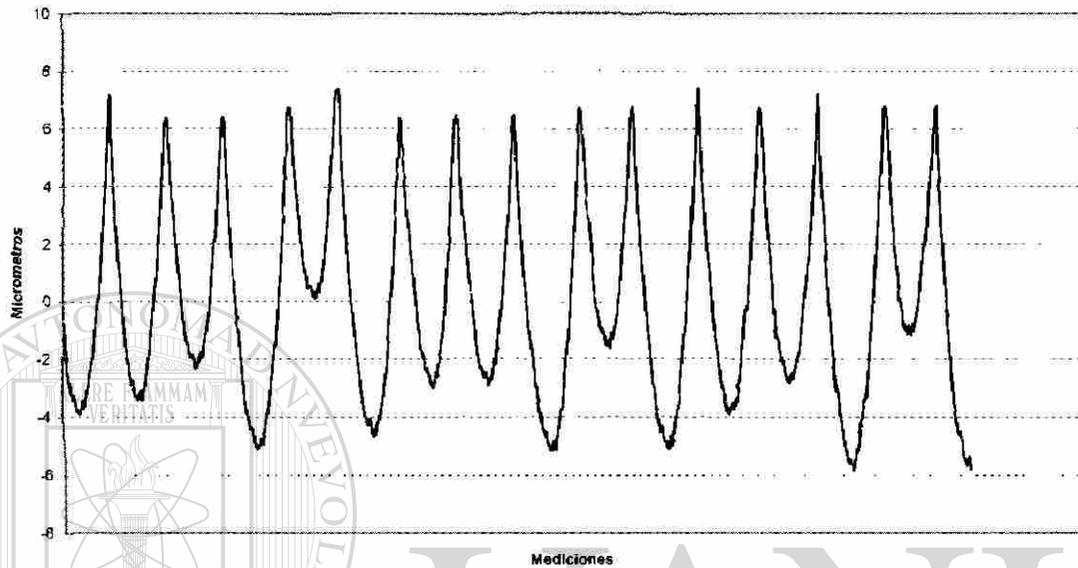


Figura 7.53 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev.

Rugosidad S2500 F0.30 Ra:3.88um B

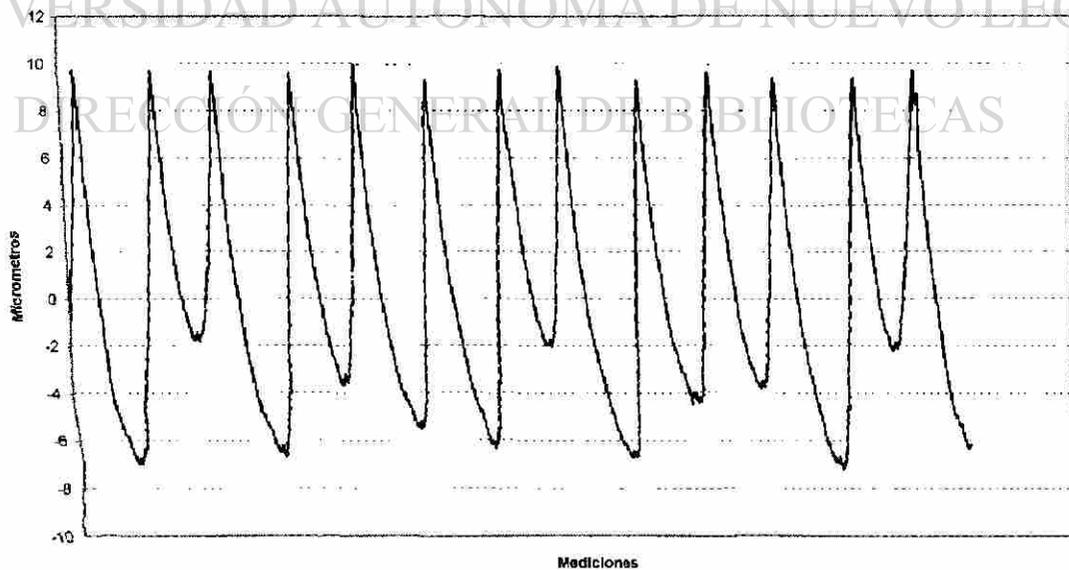


Figura 7.54 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev.

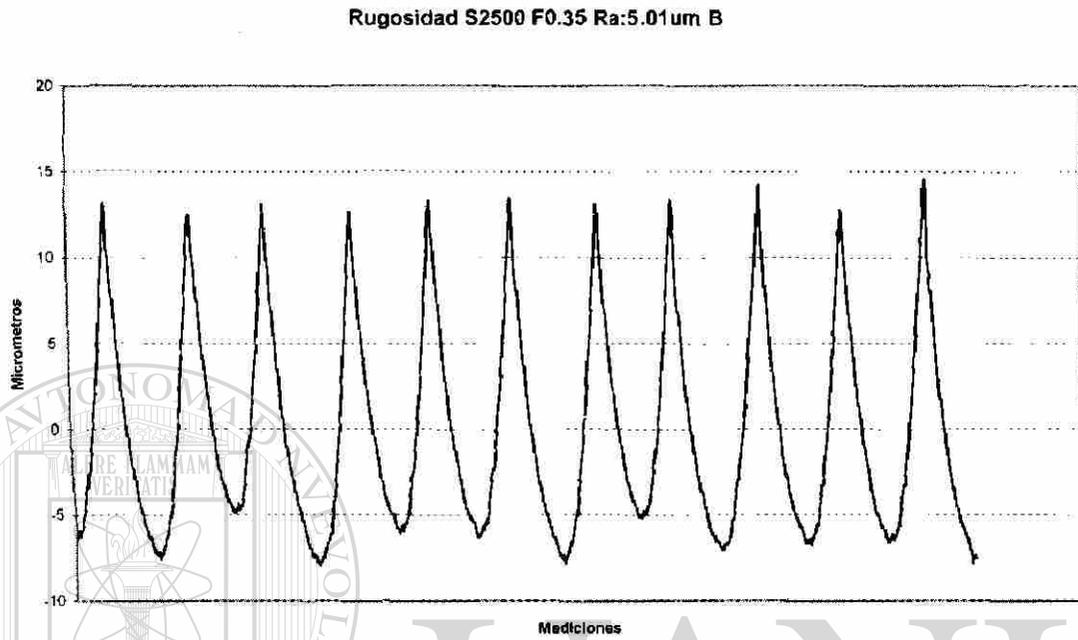


Figura 7.55 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev.

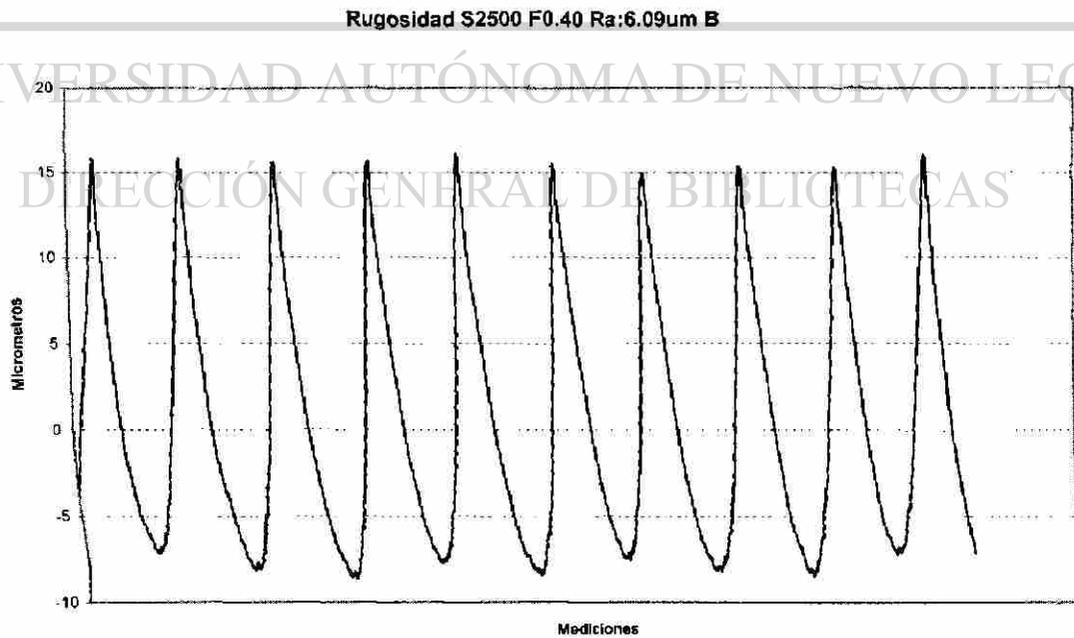


Figura 7.56 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev.

Rugosidad S2500 F0.45 Ra:7.15um B

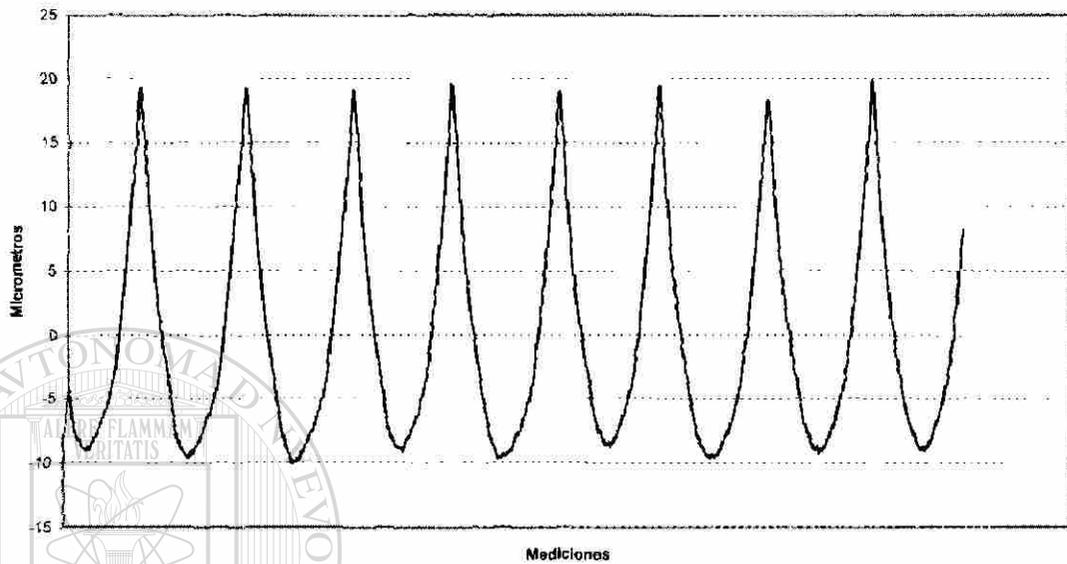


Figura 7.57 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev.

7.3.3 Resultado de rugosidad en Acero 1018 con una velocidad de giro del husillo de 1400 RPM

Rugosidad S1400 F0.15 Ra:5.15um B

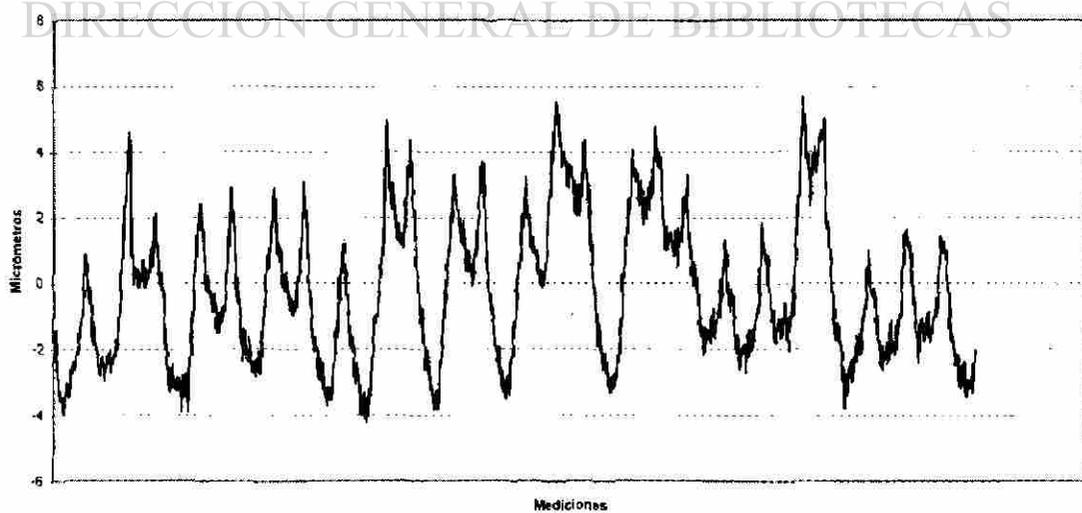


Figura 7.58 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15 mm/rev

Rugosidad S1400 F0.20 Ra:2.35um C

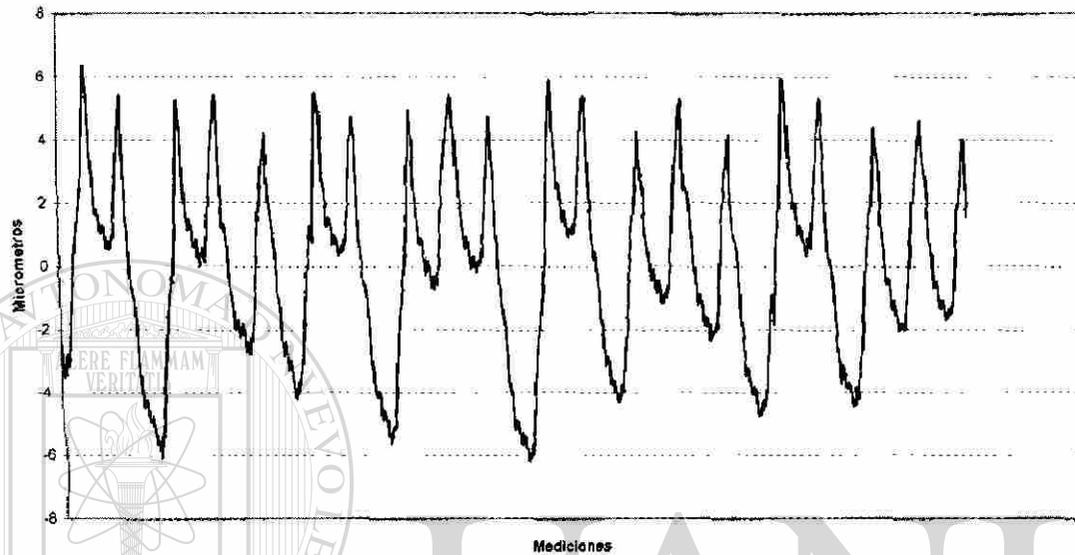


Figura 7.59 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev.

Rugosidad S1400 F0.25 Ra:3.12um B

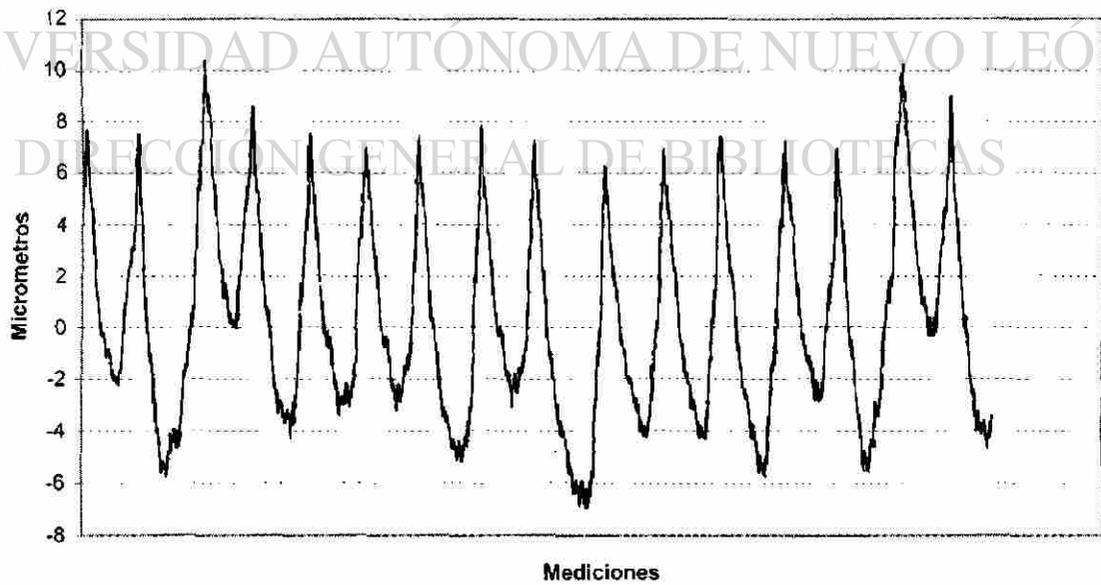


Figura 7.60 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev.

Rugosidad S1400 F0.30 Ra:4.11um B

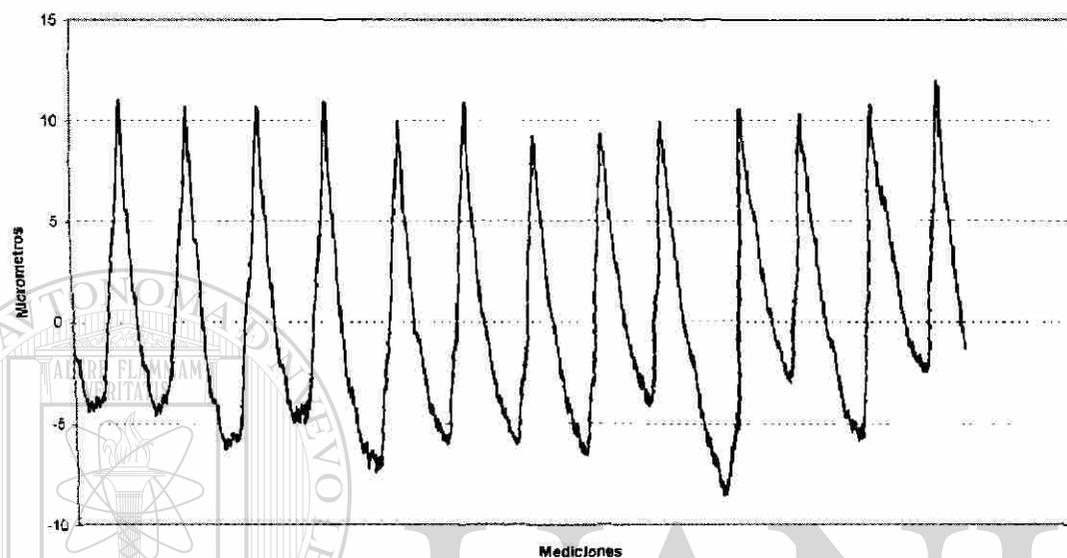


Figura 7.61 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev.

Rugosidad S1400 F0.35 Ra:5.21um B

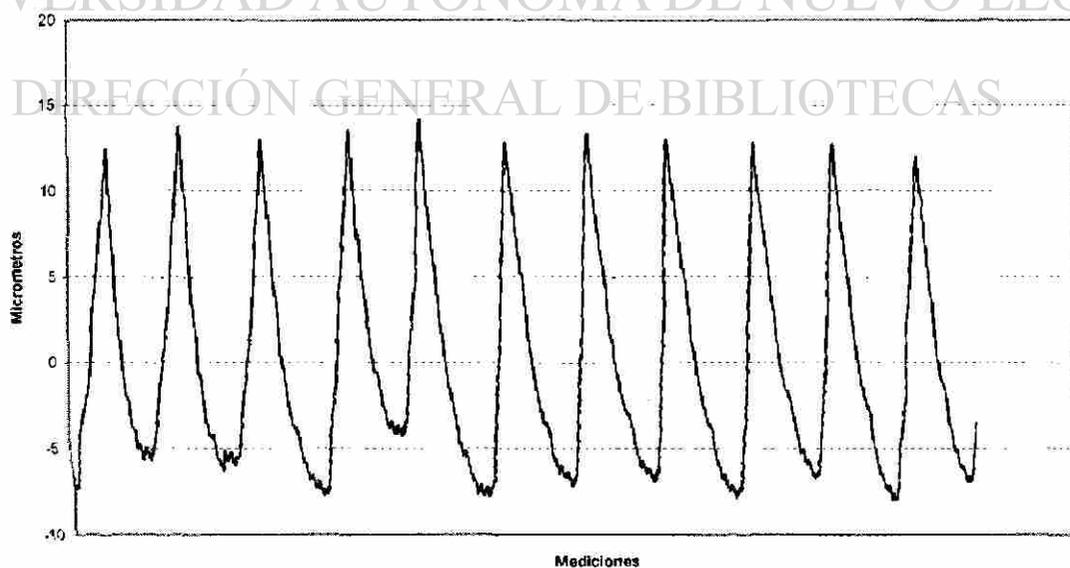


Figura 7.62 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev.

Rugosidad S1400 F0.4 Ra:6.38um B

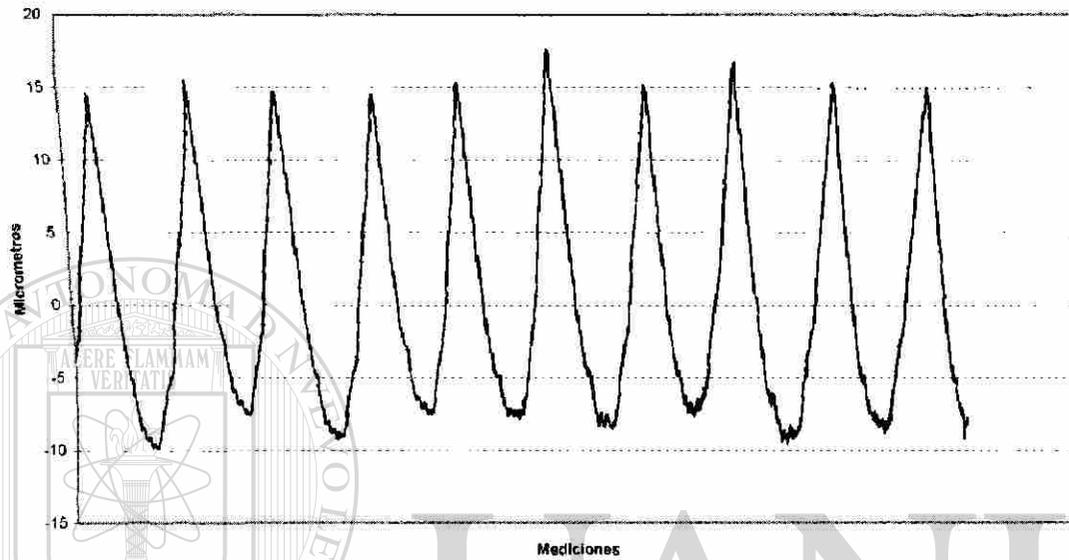


Figura 7.63 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev.

Rugosidad S1400 F0.45 Ra:7.37um B

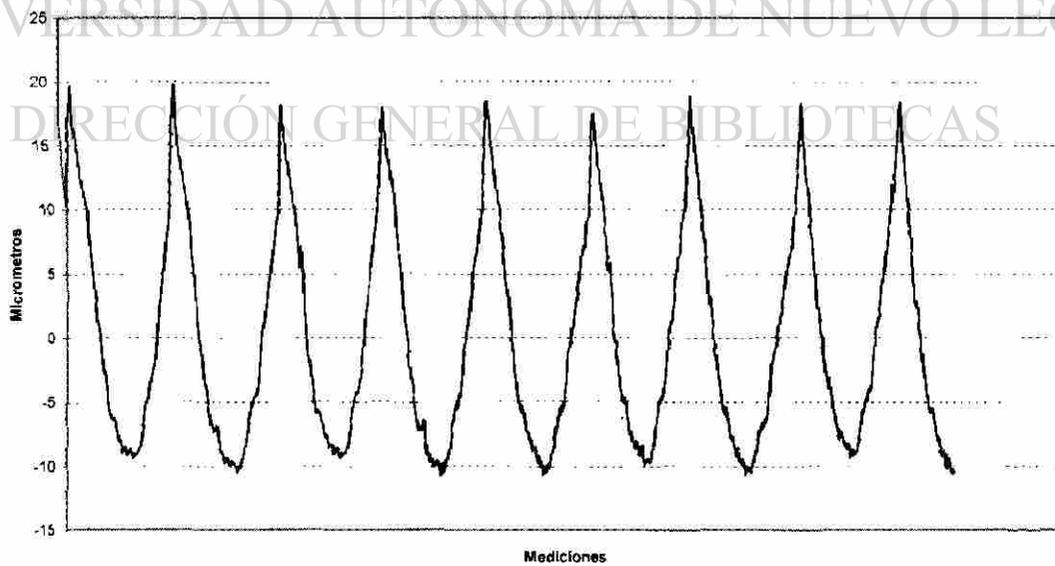


Figura 7.64 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev.

7.3.4 Resultado de rugosidad en Acero 1018 con una velocidad de giro del husillo de 1600 RPM

Rugosidad S1600 F0.15 Ra:1.92um B

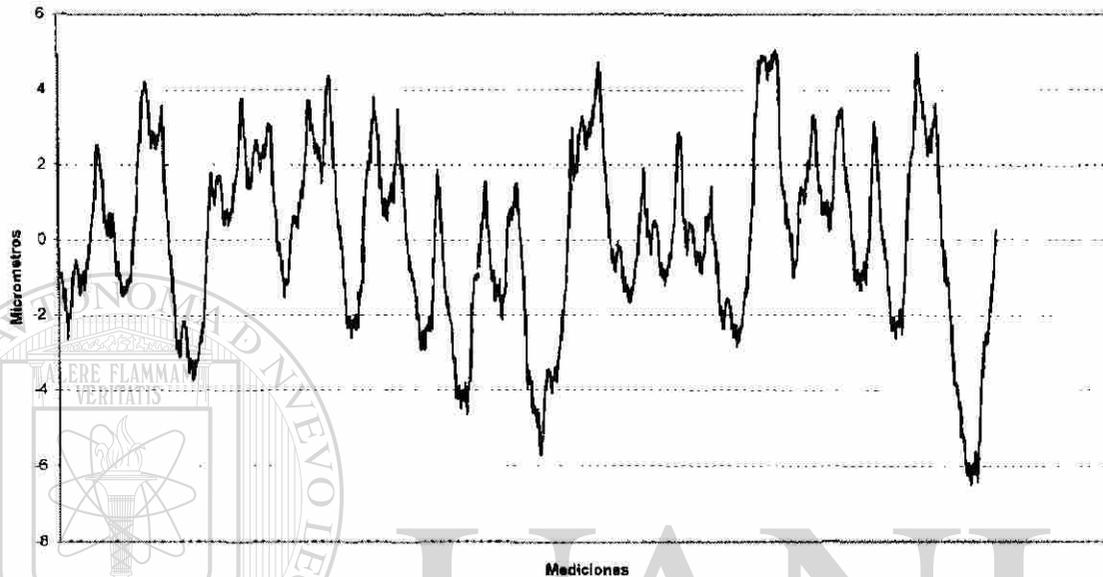


Figura 7.65 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev

Rugosidad S1600 F0.20 Ra:2.08 B

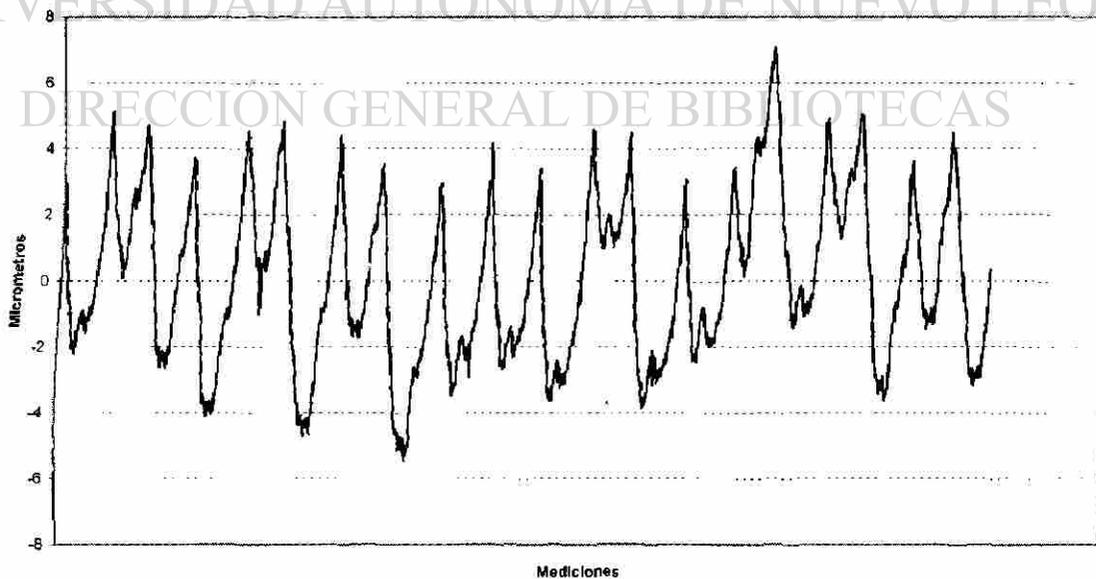


Figura 7.66 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev

Rugosidad S1600 F0.25 Ra:2.62 B

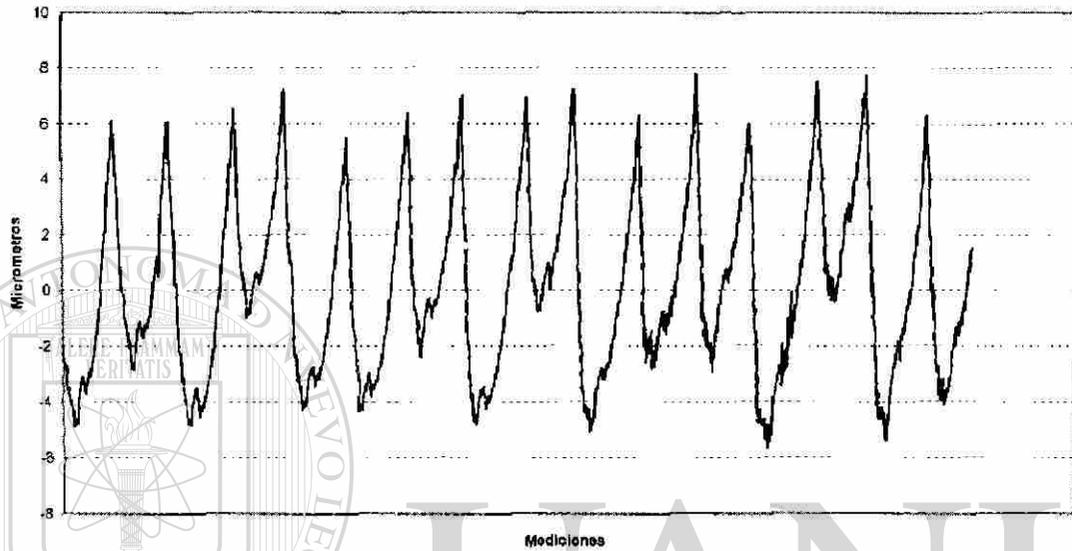


Figura 7.67 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev.

Rugosidad S1600 F0.30 Ra:3.42 B

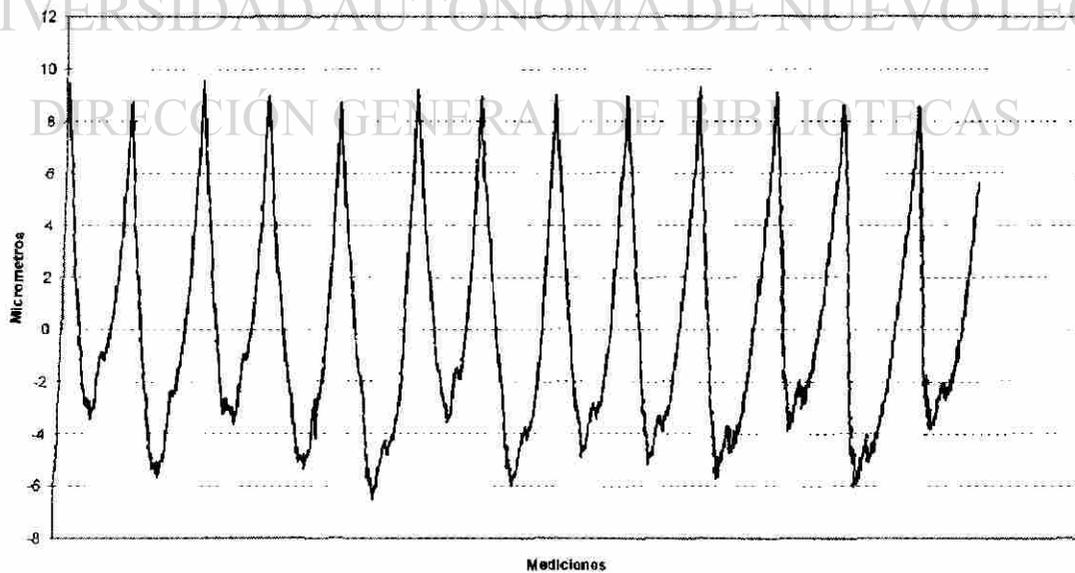


Figura 7.68 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev.

Rugosidad S1600 F0.35 Ra:4.42um B

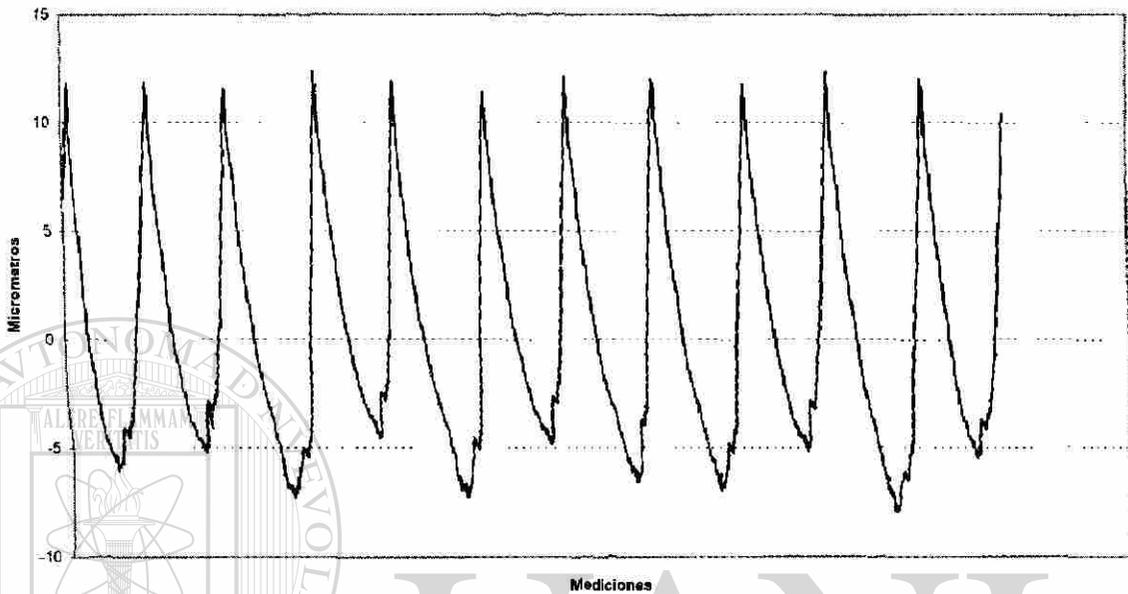


Figura 7.69 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev.

Rugosidad S1600 F0.40 Ra:5.66 B

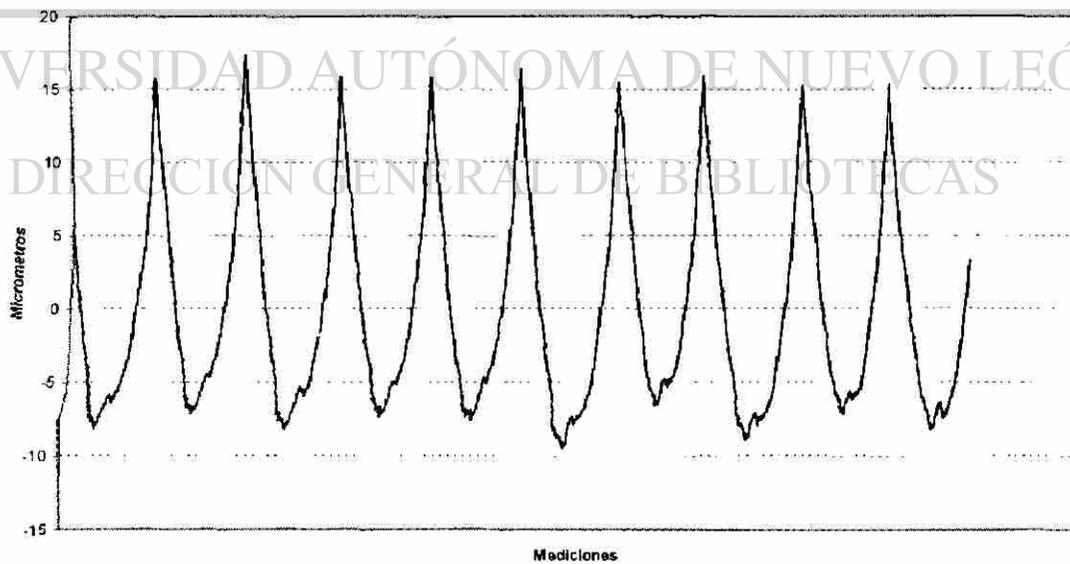


Figura 7.70 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev.

Rugosidad S1600 F0.45 Ra:6.81 B

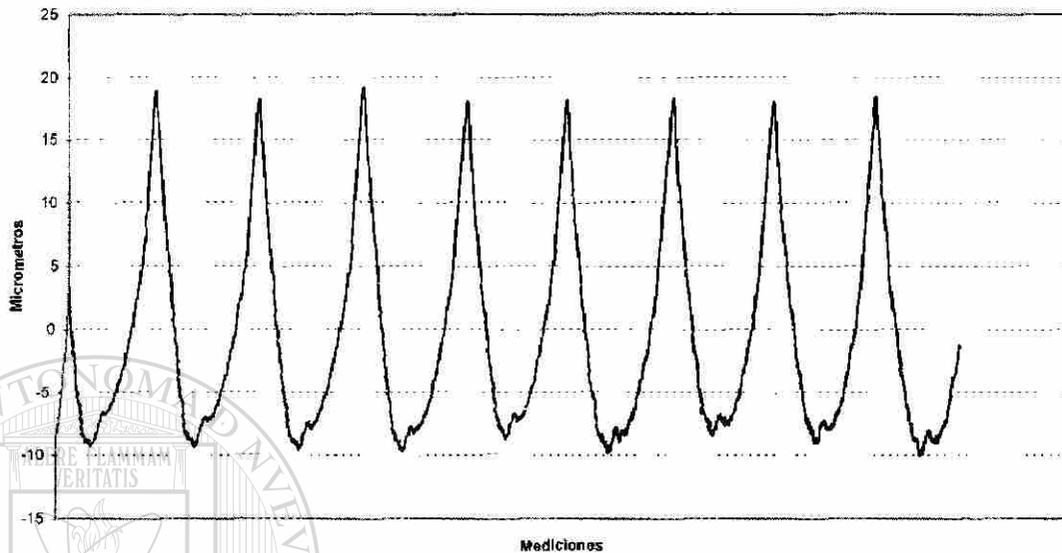


Figura 7.71 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0,45 mm/rev.

7.3.5 Resultado de rugosidad en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de giro del husillo de 720 RPM

Rugosidad S720 F0.15 Ra:1.77um B

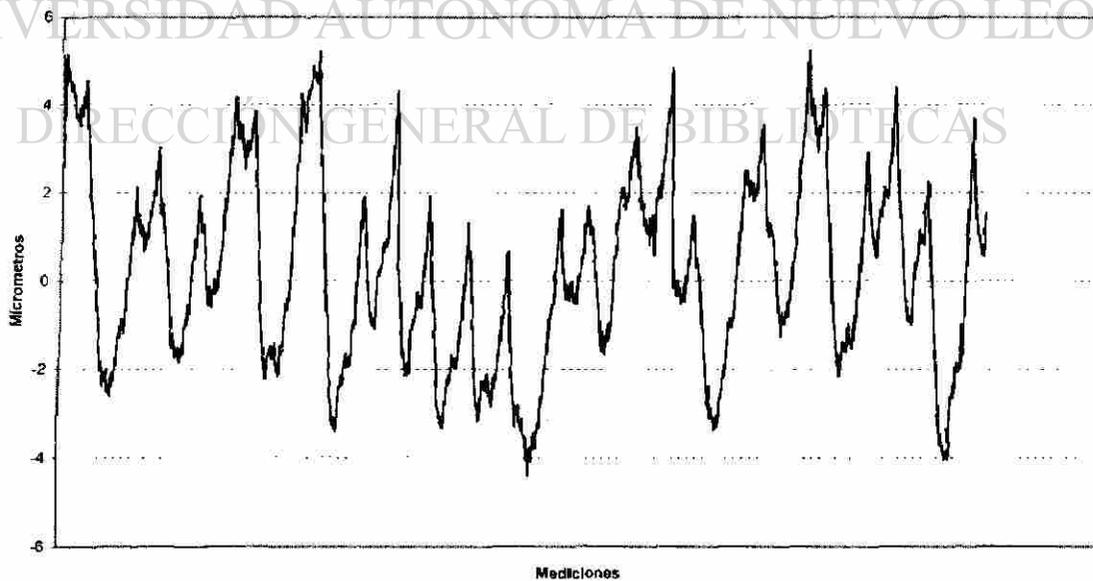


Figura 7.72 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev

Rugosidad S720 F0.20 Ra:1.80um B

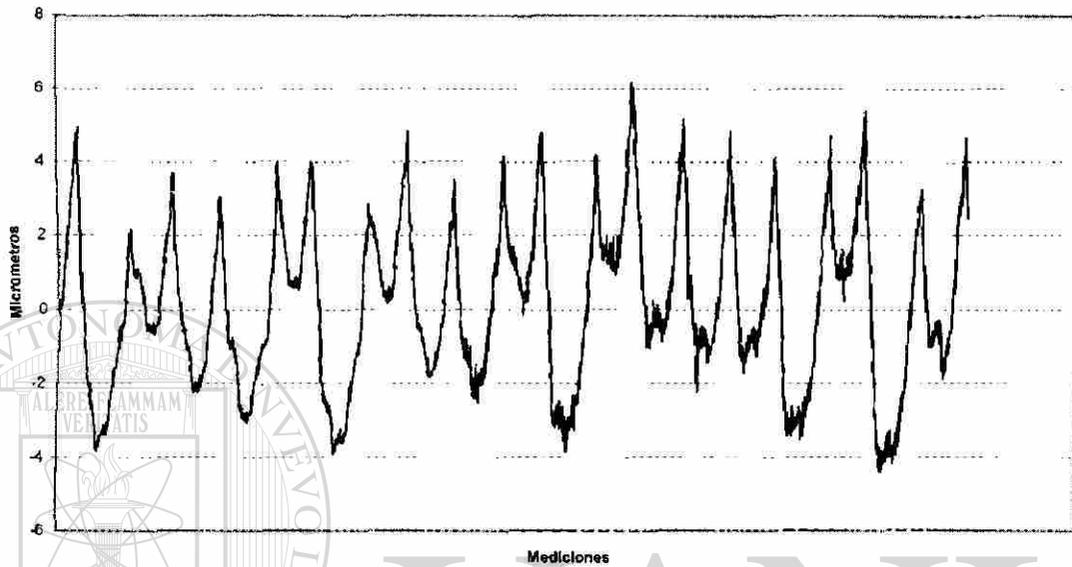


Figura 7.73 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev

Rugosidad S720 F0.25 Ra:2.30um B

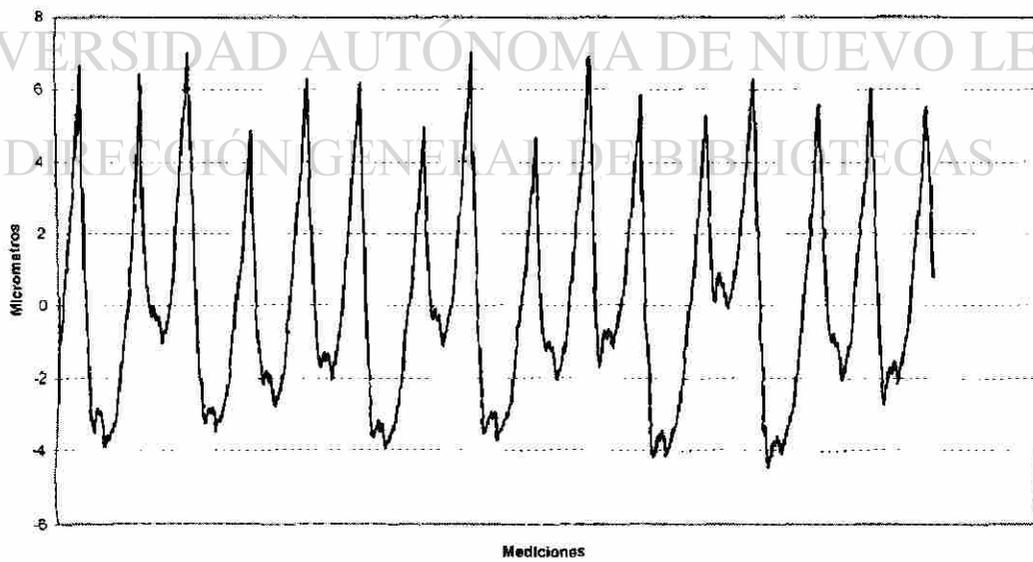


Figura 7.74 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev.

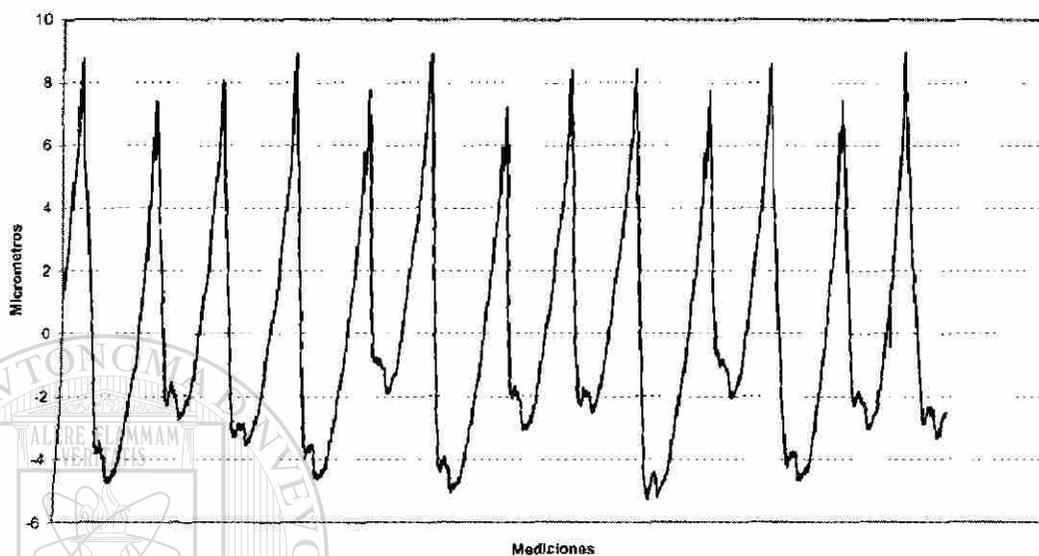
Rugosidad S720 F0.30 Ra:2.96um B

Figura 7.75 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev.

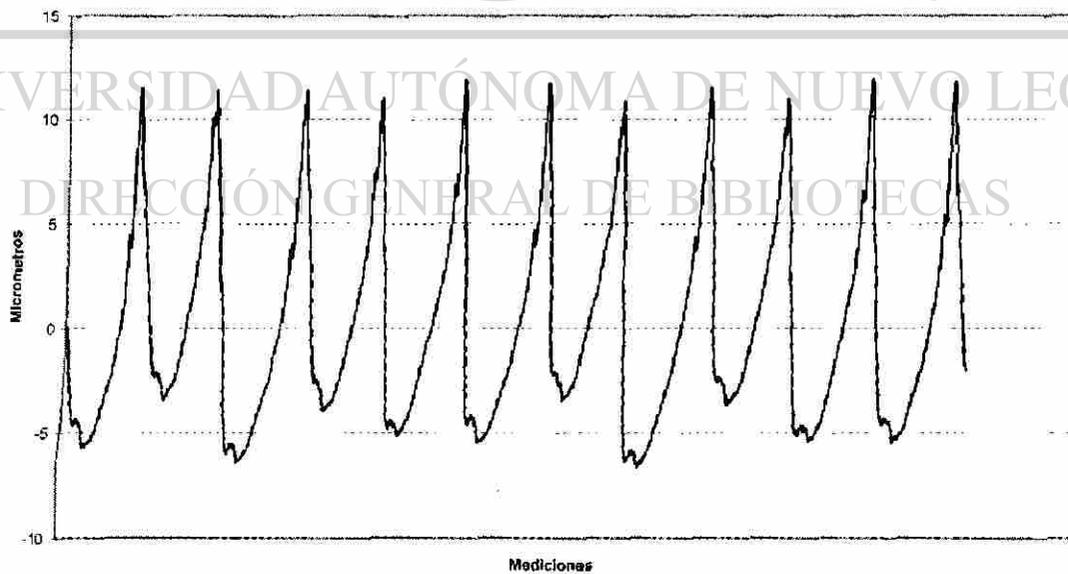
Rugosidad S720 F0.35 Ra:3.97um B

Figura 7.76 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev.

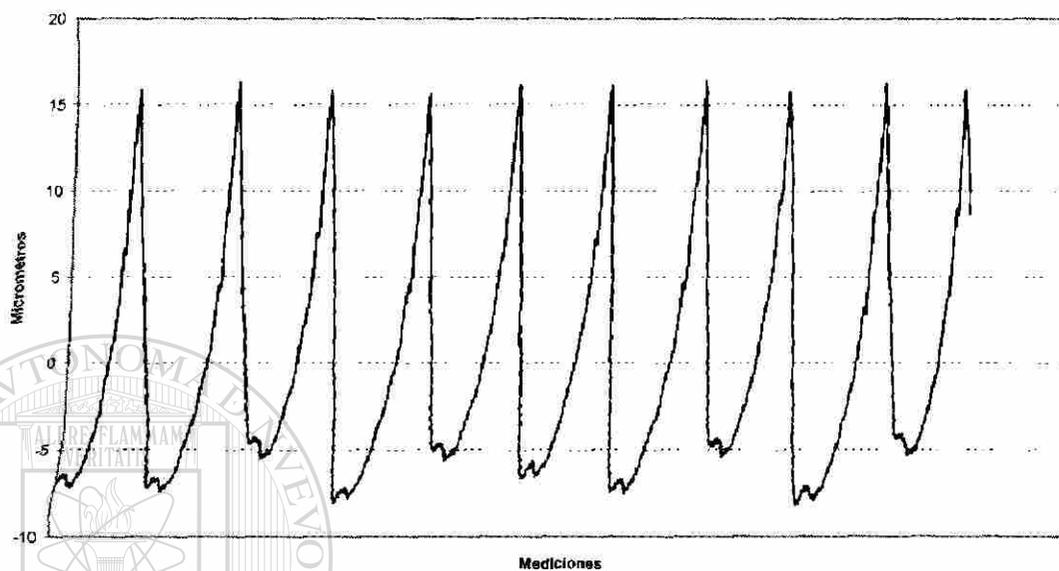
Rugosidad S720 F0.40 Ra:5.55um B

Figura 7.77 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev.

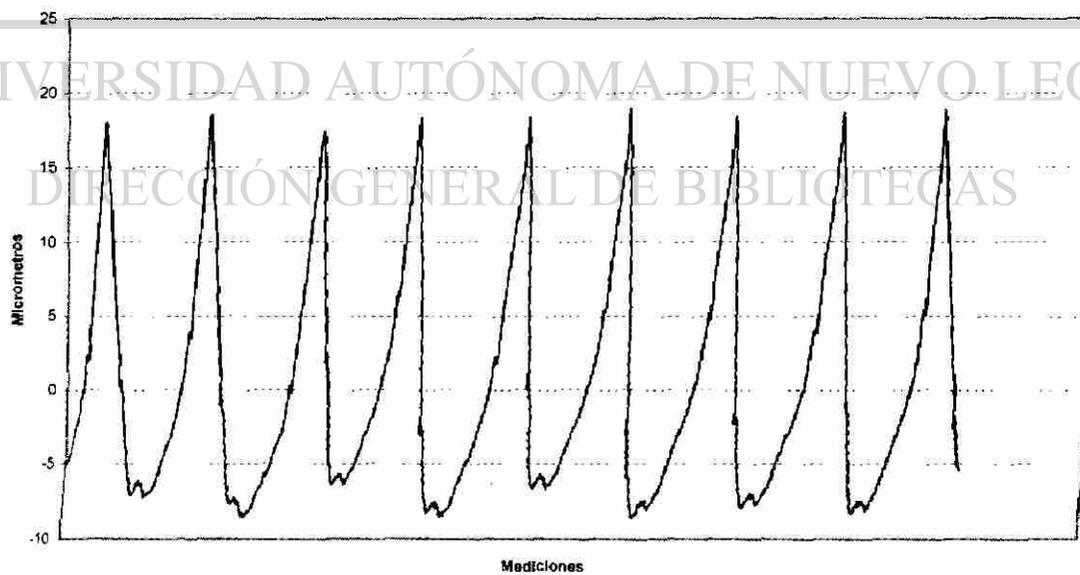
Rugosidad S720 F0.45 Ra:6.36um B

Figura 7.78 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev.

7.3.6 Resultado de rugosidad en Acero 4140 Recocido y Estirado en Frío con una velocidad de giro del husillo de 1000 RPM

Rugosidad S1000 F0.15 Ra:1.74um B

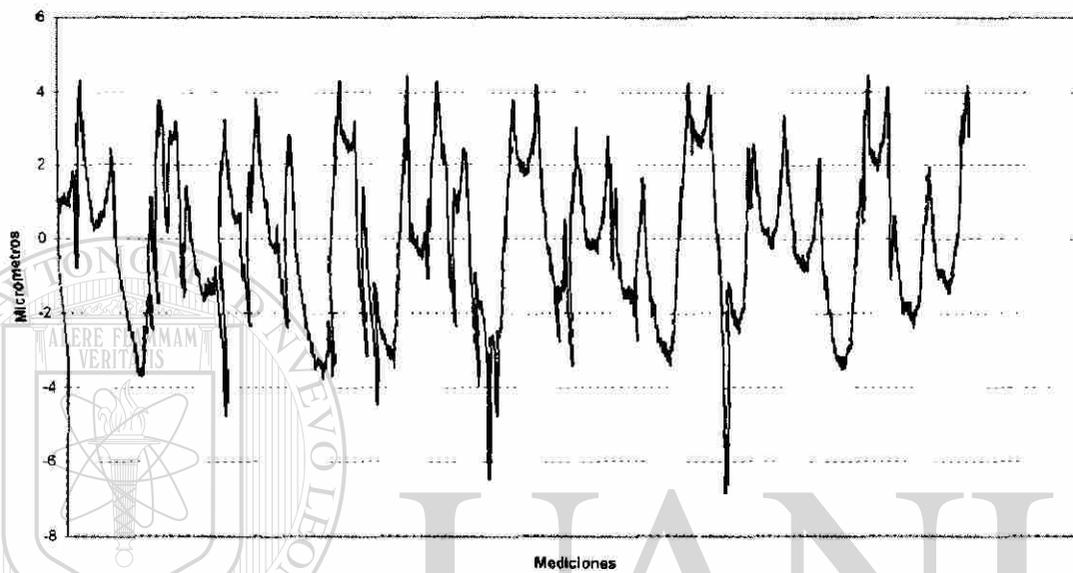


Figura 7.79 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev

Rugosidad S1000 F0.20 Ra:2.34um B

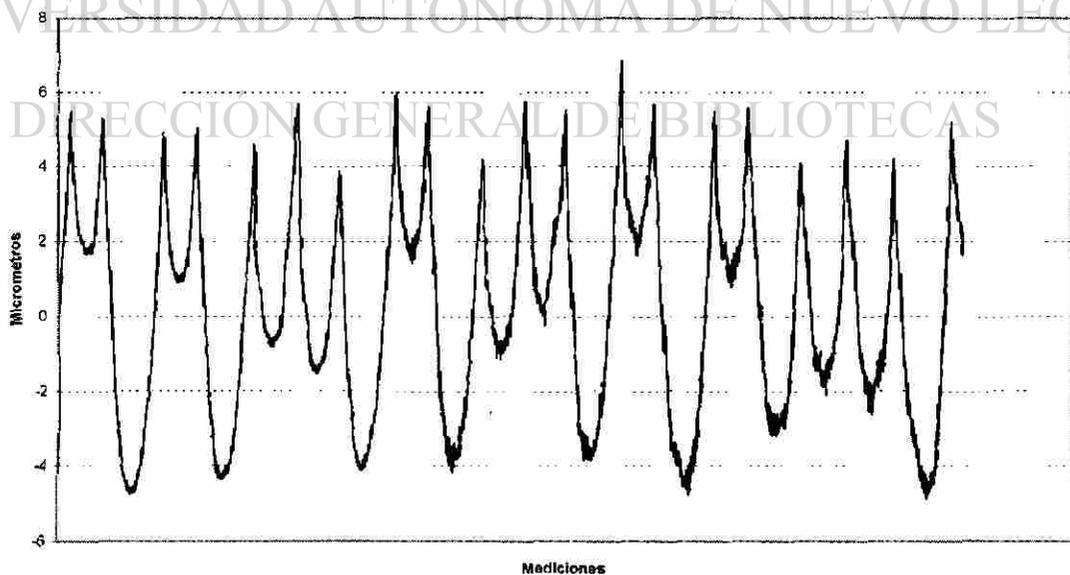


Figura 7.80 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev

Rugosidad S1000 F0.25 Ra:2.62um B

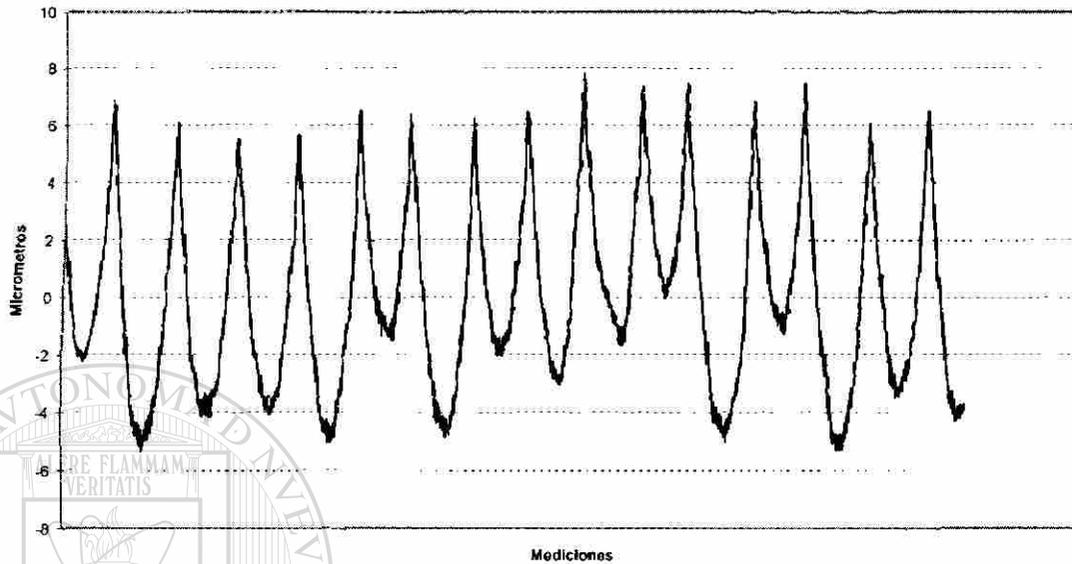


Figura 7.81 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev.

Rugosidad S1000 F0.30 Ra:3.41um B

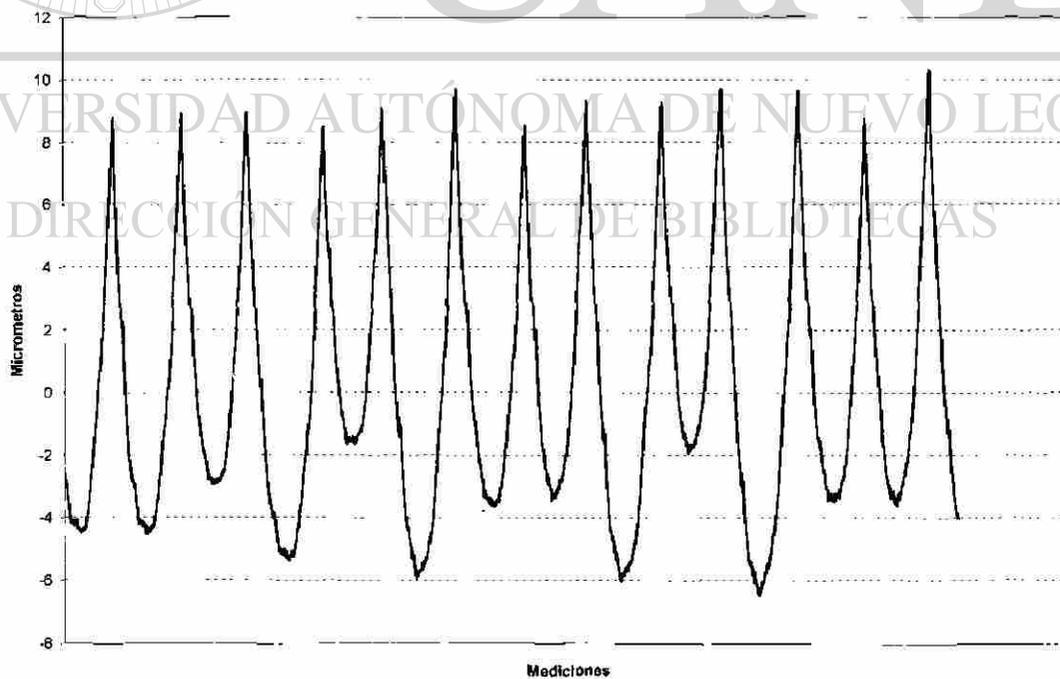


Figura 7.82 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev.

Rugosidad S1000 F0.35 Ra:4.52um B

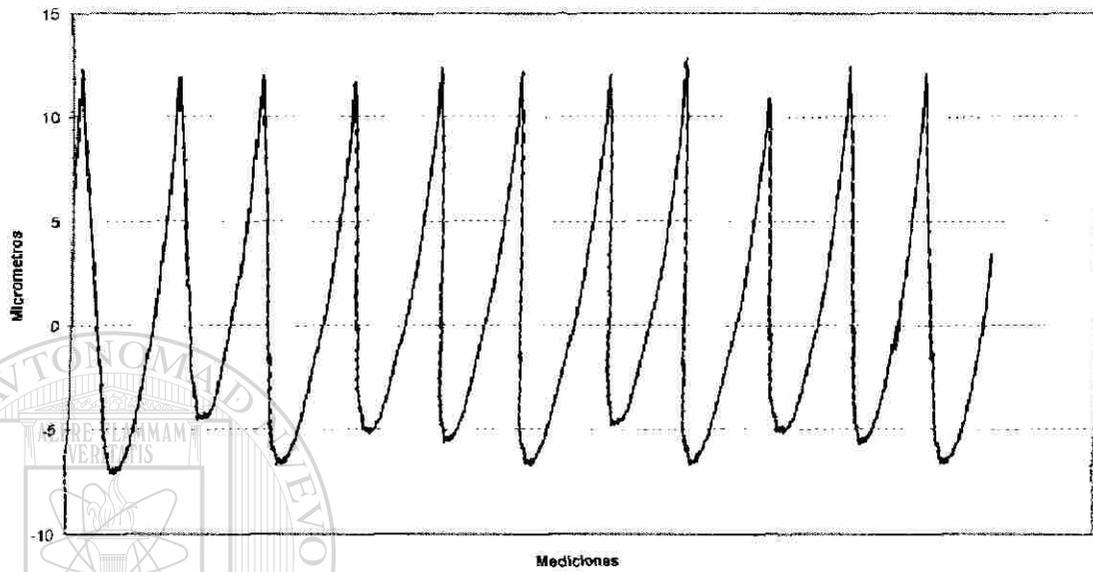


Figura 7.83 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev.

Rugosidad S1000 F0.40 Ra:5.69um B

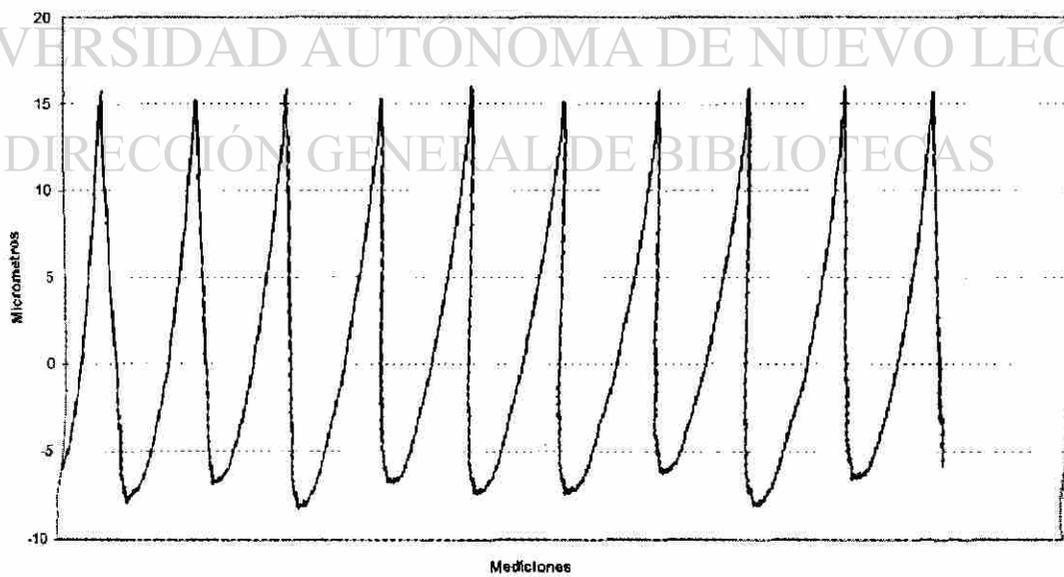


Figura 7.84 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev.

Rugosidad S1000 F0.45 Ra:6.79 B

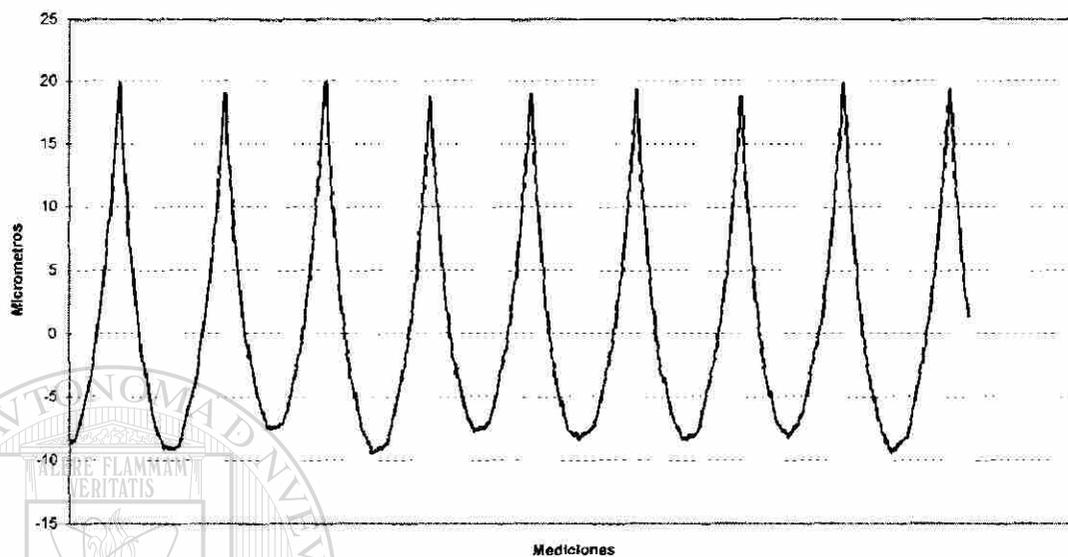


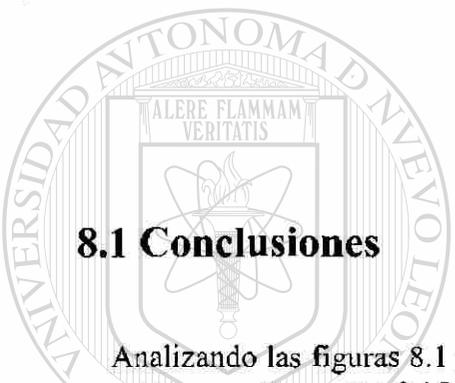
Figura 7.85 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev.

7.4 Discusión de los resultados de rugosidad

Como podemos observar en las gráficas anteriores, la rugosidad es el vivo retrato del paso de la herramienta sobre la pieza, esta se mantiene constante para cada velocidad y avance, esto es que las condiciones de corte son muy importantes para determinar la calidad superficial que se va a tener en la pieza.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



8.1 Conclusiones

Analizando las figuras 8.1 y 8.2 resultantes en el aluminio se puede observar que para avances pequeños como 0.15 mm/rev., la temperatura es más elevada que en avances (F) un poco mayores como 0.20 y 0.25 pero si el avance sigue aumentando la temperatura lo hace también, hasta llegar a un máximo y de ahí comienza a bajar nuevamente. El avance influye en la temperatura, pero la velocidad de corte es más impactante en ella, ya que si se observa las figuras 8.1 y 8.2 a la vez y se compara, la temperatura es más elevada cuando cambia la velocidad de corte a cuando se cambia el avance. En cambio en la rugosidad se observa es directamente proporcional al avance ya que como aumenta el avance aumenta la rugosidad, pero no es tan influenciada con la velocidad de corte ya que al incrementar la velocidad de corte es muy poca la variación que se presenta en la rugosidad.

En conclusión para el aluminio las condiciones de corte óptimas en cuanto a rugosidad y temperatura son un avance de 0.20mm/rev., la velocidad de corte no es muy crítica por lo que se recomendaría utilizar la más elevada de acuerdo a la capacidad de la máquina, para este estudio se recomienda la de 2500 RPM.

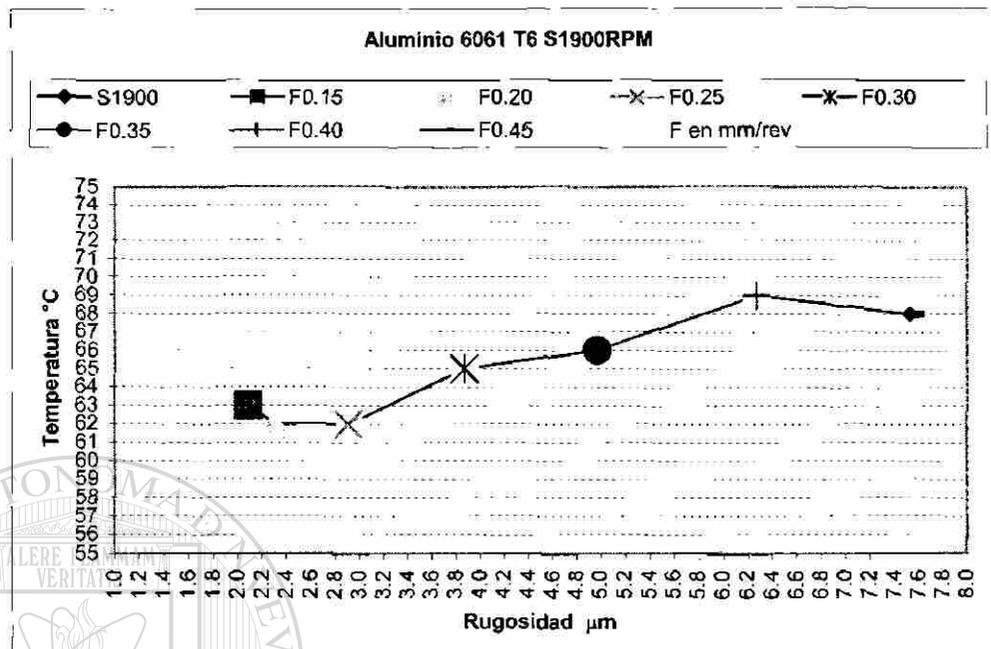


Figura 8.1 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el aluminio 6061T6 a una velocidad de corte de 1900 RPM

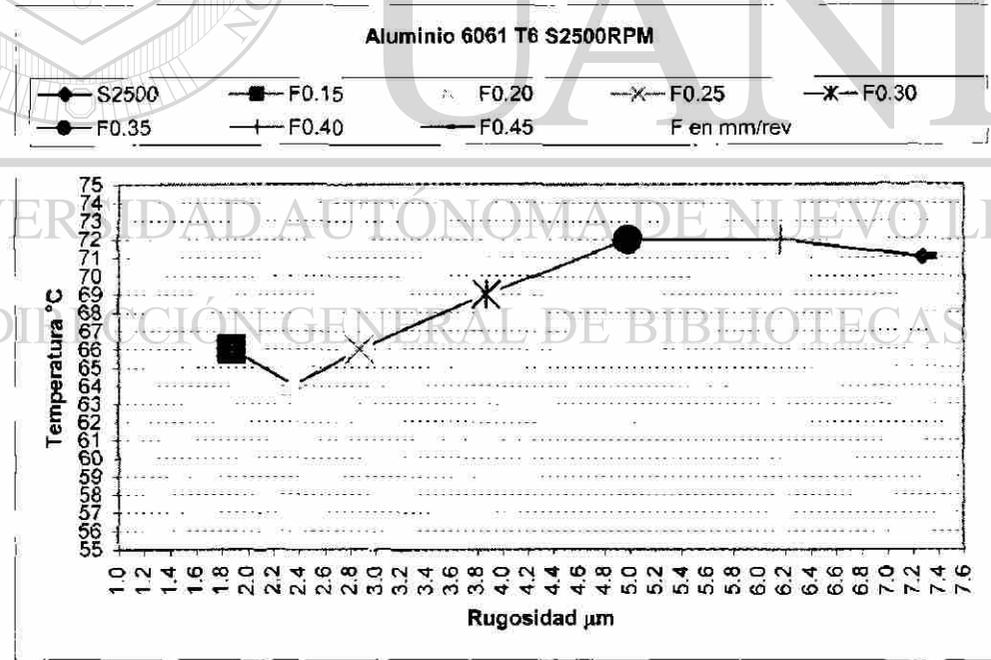


Figura 8.2 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el aluminio 6061T6 a una velocidad de corte de 2500 RPM

Analizando las figuras 8.3 y 8.4 resultantes en el acero 1018 se puede observar que para avances (F) pequeños como 0.15 y 0.20 mm/rev., la temperatura es más elevada cuando se tiene una velocidad de corte menor que en avances (F) un poco mayores

como 0.25, 0.30 y 0.35 pero si el avance sigue aumentando la temperatura lo hace también, además para velocidad de corte mayor como es 1600 RPM la temperatura se comporta de manera totalmente diferente en avances pequeños, ya que no se observa tan elevada como en el caso anterior. El avance influye en la temperatura, pero la velocidad de corte es más impactante en ella en avances pequeños, pero hablando de avances mayores no afecta significativamente, lo cual se puede comprobar al observar las figuras 8.3 y 8.4 a la vez y compararlas. En cambio la rugosidad se puede observar que es directamente proporcional al avance ya que al aumentar aumenta la rugosidad, pero también está influenciada con la velocidad de corte ya que al incrementar la velocidad la variación en la rugosidad disminuye.

En conclusión para el acero 1018 las condiciones de corte óptimas en cuanto a rugosidad y temperatura son un avance de 0.25mm/rev., la velocidad de corte según los estudios realizados se observó que es óptima entre más elevada, ya que el acabado superficial es mejor, aunque en la temperatura no influye, para este estudio la velocidad de corte es de 1600 RPM. En conclusión lo óptimo para el acero 1018 es aumentar la velocidad de corte como primera instancia y luego el avance.

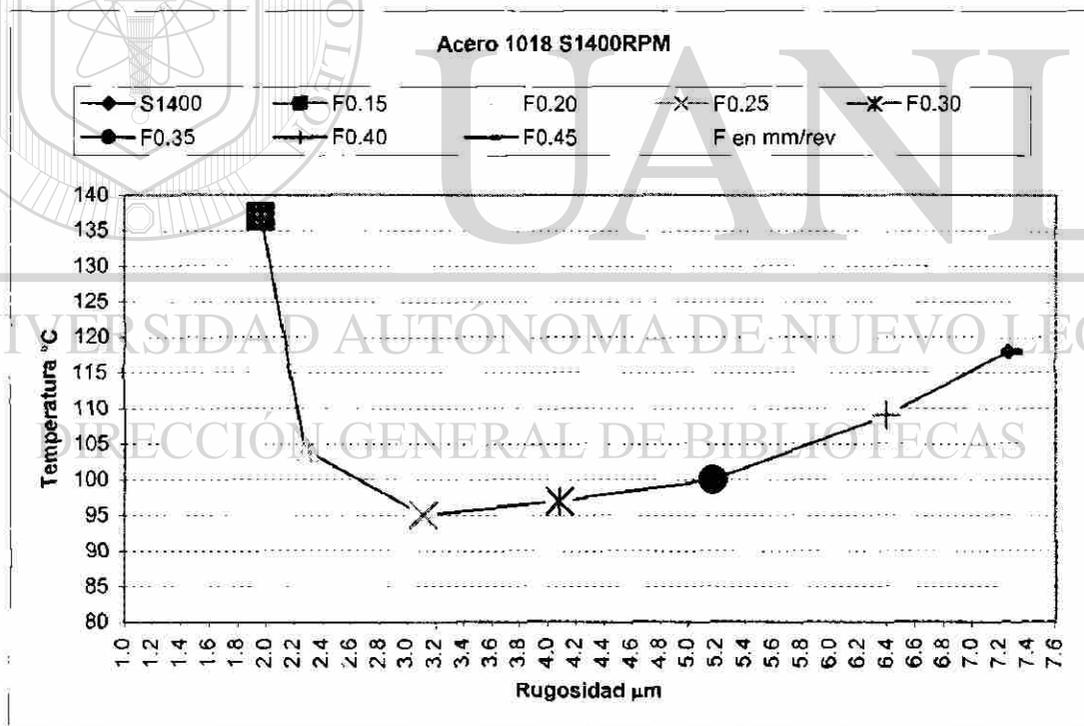


Figura 8.3 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 1018 a una velocidad de corte de 1400 RPM

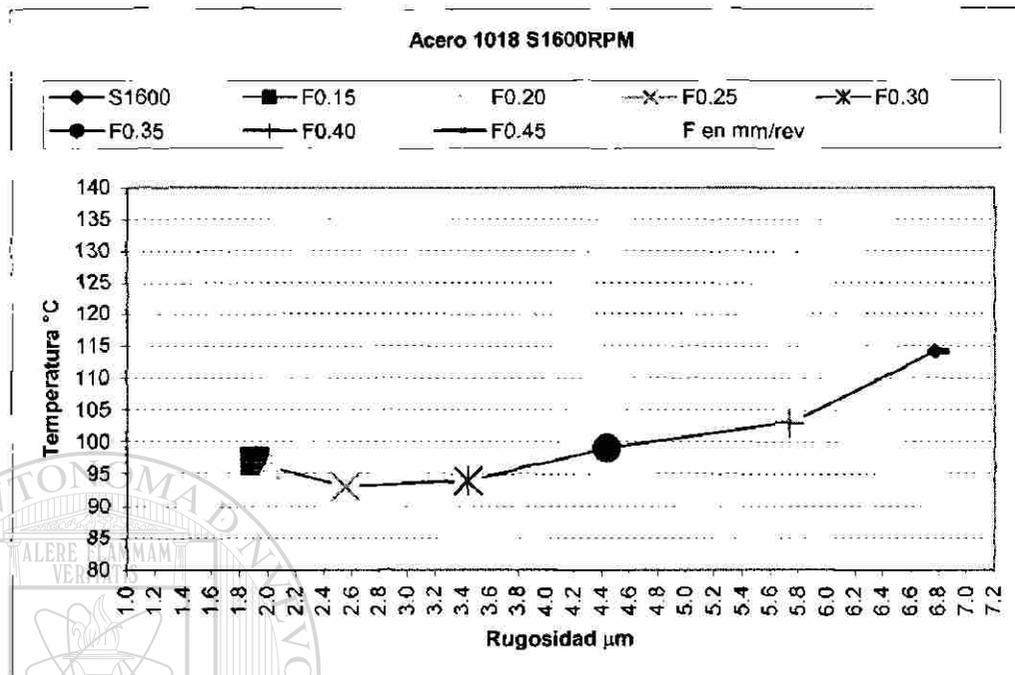


Figura 8.4 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 1018 a una velocidad de corte de 1600 RPM

Analizando las figuras 8.5 y 8.6 resultantes en el acero 4140 se puede observar que para la velocidad de corte 720 RPM, la temperatura de la operación va disminuyendo conforme el avance aumenta, hasta llegar a estabilizarse y volver a subir, en el avance más elevado que es el de 0.45mm/rev., lo cual también sucede al tener una velocidad de corte mayor como la de la figura 8.6, con excepción del avance 0.30, pero en cambio la rugosidad presenta un comportamiento inverso, aumentando conforme se va incrementando el avance de una manera más pronunciada. Con esto se puede concluir que el avance influye en la temperatura, pero la velocidad de corte es más impactante en ella en avances pequeños, pero hablando de avances grandes, beneficia ya que la temperatura disminuye, lo cual se puede comprobar al observar las figuras 8.5 y 8.6 y compararlas. En cambio la rugosidad como se puede observar es directamente proporcional al avance, pero también está influenciada con la velocidad de corte ya que al incrementar la velocidad de la variación la rugosidad lo hace también.

En conclusión para el acero 4140 las condiciones de corte óptimas en cuanto a rugosidad y temperatura van a depender de que se querrá cuidar si la temperatura o la rugosidad ya que al aumentar el avance aumenta la rugosidad, pero disminuye la temperatura de corte en la operación y viceversa.

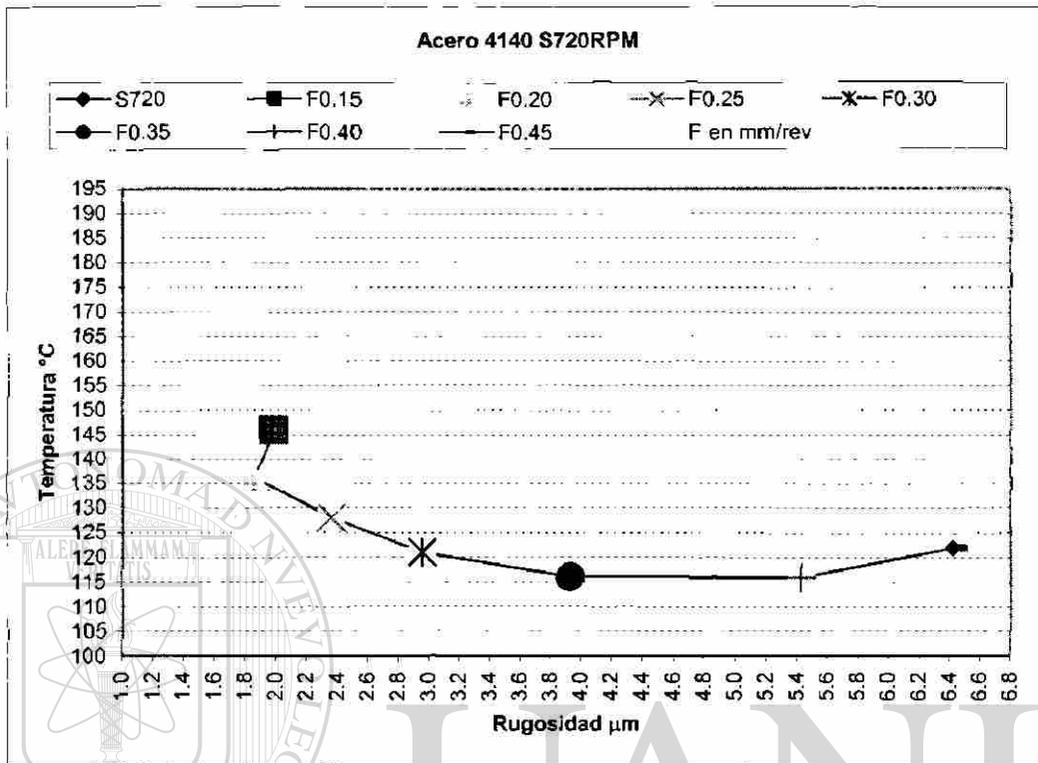


Figura 8.5 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 4140 a una velocidad de corte de 720 RPM

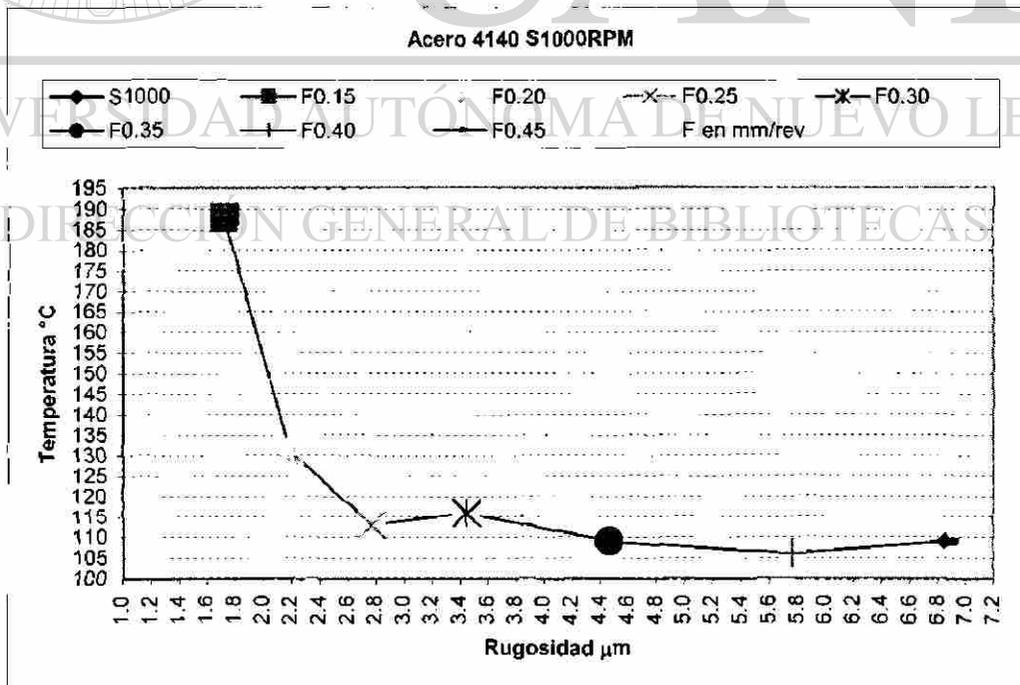
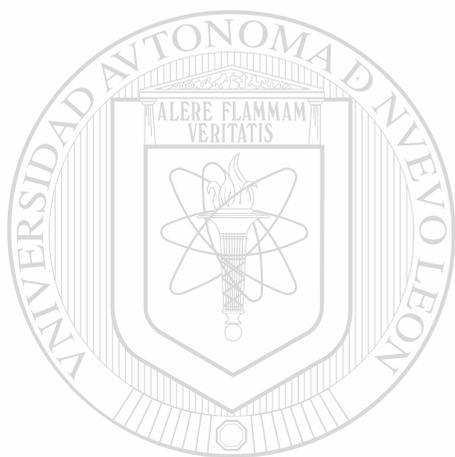


Figura 8.6 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 4140 a una velocidad de corte de 1000 RPM

8.2 Recomendaciones

Este experimento fue realizado bajo ciertas condiciones muy específicas, 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 en condiciones operativas diferentes 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, lubricante, profundidad de corte.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

REFERENCIAS

1. Procesos de Manufactura, versión SI, de B. H. Amstead. P Ostwald y M. Begeman. Editorial Continental. pp. 520 a 541
 2. Fundamentos de Manufactura Moderna de Mikell P. Groover. Editorial Prentice Hall. pp. 551
 3. Materials and Processes in Manufacturing 7th ed. de DeGarmo, E. P., Black, J.T., and Kohser, R.A., Editorial Macmillan Publishing Co., New York 1988,
 4. Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools of Boothroyd, G., and Knight, W. A., Editorial Marcek Dekker Inc. New York 1989
 5. Tool Wear and Tool Life of Cook, N. Editorial J. Engrg. For Industry, Vol. 95 November 1973 pp 931-938
 6. 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
 7. 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
-
8. Tool-Chip Interface Temperatures of Tigger, K. J. ASME Transactions, Vol. 71, No.2, February 1949
 9. Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond, Krar, S. F. and Ratterman, E. Mc Graw Hill, Inc., New York, 1990
 10. The History of Tools. Liebhold, P. Cutting Tool Engineer, June 1989. pp 137-138
 11. Machining Data Handbook 3rd ed., Vol. I and II. Metalcut Research Associates, Inc., Cincinnati, Ohio, 1980
 12. www.ing.puc.cl/icmcursos/procesos/apuntes/cap2
 13. Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4th ed. Drozda, T.J., and Wick, C. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Mich., 1983
 14. Short History of Machine Tools. M.I.T. Press, Cambridge, Mass, 1965
 15. History of Machine Tools. Steeds, W., A. Oxford University Press, London 1969

16. www.campus.fortunecity.com/duquensne/623/home/m.html
17. CNC Programming Handbook. Meter Smid.. Industrial Press, Inc
18. Procesos básicos de manufactura, de H. C. Kazanas, genn E. Backer, Thomas Gregor. Editorial Mc Graw Hill. pp 195 – 203
19. Principios de Ingeniería de Manufactura, de Stewart C. Black, Vic Chiles editorial. de la Compañía Editorial Mexicana pp 102 - 177 y 226 – 260
20. Metrología Dimensional. Ramón Zeleny Vázquez y Carlos González González. Mc. Graw Hill. pp 156
21. Metrología Dimensional. Ramón Zeleny Vázquez y Carlos González González. Mc. Graw Hill. pp 160
22. Metrología Dimensional. Ramón Seleny Vázquez y Carlos González González., McGraw-Hill. pp. 436.
23. Metrología Dimensional. Ramón Seleny Vázquez y Carlos González González., McGraw-Hill. pp 438.
24. Techincal data RTW catalogo 448860

LISTADO DE FIGURAS

FIGURAS	PÁGINAS
Figura 2.1 Rangos de velocidades de corte en función del material	5
Figura 2.2 Maquinado de contorno CNC	6
Figura 2.3 Maquinado de cara CNC	6
Figura 2.4 (a) Proceso de Torneado, (b) Herramienta de corte	8
Figura 2.5 Los tres procesos más comunes de maquinado	8
Figura 2.6 (a) Herramienta de punta sencilla, (b) Herramienta de múltiples filos cortantes	10
Figura 2.7 Condiciones de corte en el proceso de torneado	11
Figura 2.8 Corte Ortogonal: (a) Como un proceso tridimensional y (b) dos dimensiones en una vista lateral	15
Figura 2.9 Deformación cortante	15
Figura 2.10 Forma de la viruta	16
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	17
Figura 2.12 Temperatura contra velocidad de corte para varios materiales de trabajo	19
Figura 3.1 Falla por fractura en las herramientas de corte	20
Figura 3.2 Falla por temperatura en una herramienta	21
Figura 3.3 Falla por gradual de flanco (izquierdo) y de cráter (derecho)	21
Figura 3.4 Desgaste de la herramienta	22
Figura 3.5 Relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte	28
Figura 3.6 Curvas de desgaste de la herramienta para varias velocidades de corte	29
Figura 3.7 Vida de la herramienta	30
Figura 3.8 Tipos de virutas	36
Figura 3.9 Geometría de la herramienta de punta sencilla	37
Figura 3.10 Diseños de rompevirutas	38
Figura 3.11 Geometría de la herramienta	39
Figura 3.12 Pastillas para buriles de corte en torno	39
Figura 3.13 Superficies de ataque y ángulos	41
Figura 3.14 Ángulos de una herramienta de corte	42
Figura 3.15 Filos de la herramienta	42
Figura 4.1 Condiciones de corte en una pieza torneada	49
Figura 4.2 Principales operaciones vinculadas con el torneado	51
Figura 4.3 Herramientas monofilo utilizadas para el proceso de torneado	52
Figura 4.4 Porta-herramientas utilizados en el proceso de torneado.	52
Figura 4.5 Proceso de torneado	53
Figura 4.6 Material removido por unidad de tiempo	54
Figura 4.7 Muestra como obtener la energía requerida para remover el	

volumen unitario de material	56
Figura 4.8 Agujero interior de una pieza cilíndrica	56
Figura 4.9 Operación de refrentado	58
Figura 4.10 Operación de tronzado	58
Figura 4.11 Torno y sus partes	60
Figura 4.12 Mandril universal de 3 mordazas	61
Figura 4.13 Mandril de 4 mordazas	62
Figura 4.14 Mandril combinado de 6 mordazas	62
Figura 4.15 Métodos de sujeción de la pieza de trabajo al torno	63
Figura 4.16 Torno para herramientas	64
Figura 4.17 Torno revolver	64
Figura 4.18 Torno Mandril	65
Figura 4.19 Torno de barra automática	65
Figura 4.20 Torno de Control Numérico Computarizado	67
Figura 4.21 Tiempo de ciclo de la pieza en relación con la velocidad de corte	80
Figura 4.22 Costo de la pieza en relación con la velocidad de corte	81
Figura 5.1 Rangos de rugosidad superficial que pueden obtenerse mediante métodos comunes de producción	83
Figura 5.2 Lamina con diferentes acabados superficiales	83
Figura 5.3 Longitud que recorre el palpador durante la medición	84
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.	85
Figura 5.5 Curva P (perfil de rugosidad sin filtrar)	86
Figura 5.6 Curva R (perfil de rugosidad)	86
Figura 5.7 Muestra la línea media	87
Figura 5.8 Forma en la que se mide la rugosidad Ra	88
Figura 5.9 Picos y valles medidos de acuerdo a las normas JIS e ISO	89
Figura 5.10 muestra la manera de calcular Rz de acuerdo con la norma DIN	89
Figura 5.11 Muestra la manera de calcular Ry	90
Figura 5.12 Muestra el símbolo básico de rugosidad con las definiciones de cada parámetro	93
Figura 5.13 Símbolo de rugosidad más comúnmente utilizado	93
Figura 6.1 Termómetro infrarrojo RAYMX4PE.	95
Figura 6.2 Rugosímetro Mitutoyo SJ-301.	95
Figura 6.3 Okuma LB15 torno de dos-ejes de CNC	96
Figura 6.4 DNMG-432PG grado RC8025	96
Figura 6.5 DNMG-432GP grado CQ23	96
Figura 6.6 Aluminio 6061 T6	97
Figura 6.7 Acero 1018	97
Figura 6.8 Acero 4140	97
Figura 6.9 Dimensiones de la pieza	97
Figura 6.10 Termómetro infrarrojo montado en el torno apuntando sobre la herramienta	97
Figura 6.11 Avance y velocidad de corte utilizados para cada material en la prueba de maquinado	99
Figura 6.12 Palpador del rugosímetro sobre cada pieza maquinada	99

Figura 7.1 Obtención de temperatura con la pistola montada en el torno apuntando a la punta de la herramienta	100
Figura 7.2 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev.	101
Figura 7.3 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev.	101
Figura 7.4 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.	102
Figura 7.5 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.	102
Figura 7.6 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.	103
Figura 7.7 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.	103
Figura 7.8 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.	104
Figura 7.9 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev.	104
Figura 7.10 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev.	105
Figura 7.11 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.	105
Figura 7.12 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.	106
Figura 7.13 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.	106
Figura 7.14 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.	107
Figura 7.15 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.	107
Figura 7.16 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev.	108
Figura 7.17 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev.	108
Figura 7.18 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.	109
Figura 7.19 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.	109
Figura 7.20 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.	110
Figura 7.21 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.	110
Figura 7.22 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.	111
Figura 7.23 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev.	111
Figura 7.24 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev.	112
Figura 7.25 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.	112
Figura 7.26 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.	113
Figura 7.27 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.	113
Figura 7.28 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.	114
Figura 7.29 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.	114
Figura 7.30 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev.	115
Figura 7.31 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev.	115
Figura 7.32 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.	116
Figura 7.33 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.	116
Figura 7.34 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.	117
Figura 7.35 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.	117
Figura 7.36 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.	118
Figura 7.37 Resultados de temperatura para un avance de 0.15mm/rev.	118
Figura 7.38 Resultados de temperatura para un avance de 0.20 mm/rev.	119
Figura 7.39 Resultados de temperatura para un avance de 0.25 mm/rev.	119
Figura 7.40 Resultados de temperatura para un avance de 0.30 mm/rev.	120
Figura 7.41 Resultados de temperatura para un avance de 0.35 mm/rev.	120
Figura 7.42 Resultados de temperatura para un avance de 0.40 mm/rev.	121
Figura 7.43 Resultados de temperatura para un avance de 0.45 mm/rev.	121
Figura 7.44 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev. Aluminio 6061 T6 S1900RPM	122
Figura 7.45 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S1900RPM	123
Figura 7.46 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S1900RPM	123

Figura 7.47 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S1900RPM	124
Figura 7.48 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S1900RPM	124
Figura 7.49 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S1900RPM	125
Figura 7.50 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S1900RPM	125
Figura 7.51 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev. Aluminio 6061 T6 S2500RPM	126
Figura 7.52 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S2500RPM	126
Figura 7.53 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S2500RPM	127
Figura 7.54 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S2500RPM	127
Figura 7.55 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S2500RPM	128
Figura 7.56 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S2500RPM	128
Figura 7.57 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev. Aluminio 6061 T6 S2500RPM	129
Figura 7.58 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev. Acero 1018 S1400RPM	129
Figura 7.59 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev. Acero 1018 S1400RPM	130
Figura 7.60 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev. Acero 1018 S1400RPM	130
Figura 7.61 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev. Acero 1018 S1400RPM	131
Figura 7.62 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev. Acero 1018 S1400RPM	131
Figura 7.63 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev. Acero 1018 S1400RPM	132
Figura 7.64 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev. Acero 1018 S1400RPM	132
Figura 7.65 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev. Acero 1018 S1600RPM	133
Figura 7.66 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev. Acero 1018 S1600RPM	133
Figura 7.67 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev. Acero 1018 S1600RPM	134
Figura 7.68 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev. Acero 1018 S1600RPM	134
Figura 7.69 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev. Acero 1018 S1600RPM	135
Figura 7.70 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev. Acero 1018 S1600RPM	135
Figura 7.71 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev. Acero 1018 S1600RPM	136

Figura 7.72 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev. Acero 4140 S720 RPM	136
Figura 7.73 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev. Acero 4140 S720 RPM	137
Figura 7.74 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev. Acero 4140 S720 RPM	137
Figura 7.75 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev. Acero 4140 S720 RPM	138
Figura 7.76 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev. Acero 4140 S720 RPM	138
Figura 7.77 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev. Acero 4140 S720 RPM	139
Figura 7.78 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev. Acero 4140 S720 RPM	139
Figura 7.79 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.15mm/rev. Acero 4140 S1000 RPM	140
Figura 7.80 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.20 mm/rev. Acero 4140 S1000 RPM	140
Figura 7.81 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.25 mm/rev. Acero 4140 S1000 RPM	141
Figura 7.82 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.30 mm/rev. Acero 4140 S1000 RPM	141
Figura 7.83 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.35 mm/rev. Acero 4140 S1000 RPM	142
Figura 7.84 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.40 mm/rev. Acero 4140 S1000 RPM	142
Figura 7.85 Perfil de rugosidad en la pieza maquinada para un avance de 0.45 mm/rev. Acero 4140 S1000 RPM	143
Figura 8.1 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el aluminio 6061T6 a una velocidad de corte de 1900RPM	145
Figura 8.2 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el aluminio 6061T6 a una velocidad de corte de 2500RPM	145
Figura 8.3 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 1018 a una velocidad de corte de 1400RPM	146
Figura 8.4 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 1018 a una velocidad de corte de 1600RPM	147
Figura 8.5 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 4140 a una velocidad de corte de 720RPM	148
Figura 8.6 Relación de temperatura y rugosidad en cada avance, para el acero 4140 a una velocidad de corte de 1000RPM	148

LISTADO DE TABLAS

TABLAS	PÁGINAS
Tabla # 1 Máquinas-herramientas convencionales usadas para las tres operaciones comunes de maquinado.	13
Tabla # 2 Elementos de cada aleación con sus propiedades	32
Tabla # 3 Las herramientas y su utilización	33
Tabla # 4 Algunas herramientas y como se agrupan para su clasificación	35
Tabla # 5 Ángulos óptimos para las herramientas según el material a trabajar	43
Tabla # 6 Diferentes herramientas y la temperatura de trabajo según diseño.	44
Tabla # 7 Fluidos para corte	46
Tabla # 8 Características de los tornos	74
Tabla # 9 Clasificación de los tornos	75
Tabla # 10 Parámetros de rugosidad utilizados en diferentes países	88
Tabla # 11 Muestra las direcciones de marca producidas por el proceso de maquinado	91
Tabla # 12 Símbolos de rugosidad sin indicación adicional	92
Tabla # 13 Símbolos de rugosidad con indicación del principal criterio de rugosidad Ra	92
Tabla # 14 Símbolos de rugosidad con indicación adicional	92
Tabla # 15 Grado de rugosidad contra valor numérico	94

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



LISTADO DE ECUACIONES

ECUACIONES	PÁGINAS
1. Ecuación de remoción de material	11
2. Cálculo de la potencia	18
3. Cálculo de la temperatura en la interfase herramienta-viruta durante el maquinado	18
4. Cálculo de la temperatura medida en la interfase herramienta-viruta	19
5. Velocidad de rotación	48
6. Cambio de diámetro en la operación de maquinado	48
7. Cálculo del avance en el torneado	48
8. Tiempo de maquinado real	49
9. Tasa de remoción de material	49
10. Encaje axial para el cilindrado exterior	53
11. La velocidad de corte de la punta de la herramienta	54
12. Área de la superficie	54
13. Tiempo de maquinado	55
14. Cantidad de material total removida en la operación de maquinado	55
15. Cantidad de material total removida en la operación de maquinado	55
16. El espesor de viruta no deformada	55
17. Potencia necesaria para realizar la operación de maquinado	55
18. Material removido por unidad de tiempo	57
19. Tiempo de maquinado en el refrentado	57
20. Velocidad máxima de corte en el refrentado	57
21. Cantidad máxima de material removido por unidad de tiempo en el refrentado	57
22. Cantidad total de material removido en el refrentado	57
23. Potencia máxima necesaria para el refrentado	58
24. Cálculo del tiempo de cambio de la herramienta por parte	79
25. Cálculo del tiempo de maquinado en la operación de torneado recto	80
26. Cálculo de Rz de acuerdo a las normas JIS e ISO	89
27. Cálculo de Rz de acuerdo a la norma DIN	89

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 ±1°C (±1.5°F), lo que sea mayor, a 23°C ambiente. ±2°C (±4°F) para temp. Debajo de 0°C (32°F)
Repetibilidad	+0.5% de la lectura o ±1°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. Almacenajes/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	

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

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 μm (-200 a +150 μm).	
Material del estilógrafo	Diamante.	
Radio de la punta	5 μm .	2 μm .
Fuerza de medición	4mN (0.4g).	0.75mN (0.075gr).
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 (λ_c)	Longitud del muestreo (l)	λ_s	Intervalo de muestreo	Número de muestras por longitud	Número de longitudes de muestreo
0.08 mm.	0.08 mm.	2.5 μ m.	0.25 μ m.	320	1,3,5
0.25 mm.	0.25 mm.	2.5 μ m.	0.25 μ m.	1000	1,3,5
0.8 mm.	0.8 mm.	2.5 μ m.	0.5 μ m.	1600	1,3,5
2.5 mm.	2.5 mm.	8 μ m.	1.5 μ m.	1666	1,3,5
8 mm.	8 mm.	25 μ m.	5 μ m.	1600	1

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

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

A.2.6 Parámetros de rugosidad y rango de despliegue.

Parámetro	Rango de despliegue
R _a	0.01 a 100 μm.
R _q	
R _y	
R _z	
R _p	
R _k	
R _x	
W _x	
W _{te}	
AR	2 a 350 μm.
AW	
P _c	2.5 a 5000 cm ⁻¹
HSC	
S _m	2 a 4000 μm.
S	
m _r	0% a 100%
M _{r1}	
M _{r2}	
δ _c	-350 a 350 μm.
L ₀	0.1 a 99.999 mm.
A ₁	0 a 15000
A ₂	
Δ _a	0.01 a 100
Δ _d	
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 (λ_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 μm dependiendo del rango
350 μm (14000 μin)	0.4 μm .
100 μm (4000 μin)	0.1 μm .
50 μm (2000 μin)	0.05 μm .
10 μm (400 μin)	0.01 μm .

A.3 Torno OKUMA LB15.

A.3.1 Características técnicas.

Area de trabajo	
Recorrido longitudinal del carro (eje x)	254 mm.
Recorrido vertical del carro (eje z)	400 mm.
Volteo	101.6 mm.
Características	
Machine Type	LB15
Supply Voltage	220/440 V
Phase	3 Ph
Frecuency	60 Hz
Máxima presión para chuck (hidráulico)	335 lb/in ²
Máxima velocidad del husillo	4200 RPM
Capacidad de Torrete	12 herramientas
Amarre de la herramienta	Mecánico

GLOSARIO

Tornear	Es un proceso de maquinado en el cual una herramienta de punta sencilla remueve material de la superficie de una pieza de trabajo cilíndrica en rotación.
Torno	Es la máquina giratoria más común y más antigua, sujeta una pieza de metal o de madera y la hace girar mientras un útil de corte da forma al objeto.
MAV	Maquinado a Alta Velocidad.
CNC	Control Numérico Computarizado.
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.
CNA	Control Numérico Adaptativo.
RAM	Memoria de acceso aleatorio.
ROM	Memoria de solo lectura.
CAD	Diseño Asistido por Computadora.
CAM	Manufactura Asistida por Computadora.
MRR	Velocidad de remoción de material del proceso.
RPM	Revoluciones por minuto.
Avance	Movimiento lateral de la herramienta a través de la pieza de trabajo.
TiC	Carburo de titanio.
TiN	Nitruro de titanio.
Al ₂ O ₃	Óxido 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 ₃ N ₄	Nitruro de silicio.
Velocidad de corte	Es la velocidad con la que gira la pieza de trabajo.
Profundidad	Es la cantidad de material que penetra la herramienta sobre la pieza de trabajo.
WS	Acero de herramientas.
SS	Aceros de herramienta aleados.
HS	Metales duros aleados.

AUTOBIOGRAFÍA

Nacida el 4 de Agosto de 1975 en la Ciudad de Monterrey, N. L., hija del Sr. Rafael Escamilla Alanís y la Sra. Elsia Salazar de Escamilla. La primer hija de 4 en su familia, Indira Gary Escamilla Salazar cursó la Preparatoria # 20 en especialidad Técnica en Contabilidad, y la carrera de 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 Torno de Control Numérico Computarizado".

Su experiencia profesional comenzó en Fábricas Monterrey (FAMOSA) desarrollándose en el departamento de Ingeniería Industrial, de ahí pasó a la Compañía Motor Wheel de México como Ingeniero en Proyectos y a la par ingresó a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica como catedrático, en el 2000 ingresó a GE Medical Systems como Ingeniero de Desarrollo a Proveedores y un año después cambió al puesto de Líder de Proyectos, en esa fecha continuaba como catedrático en FIME, puesto que desempeña actualmente impartiendo las clases de Máquinas-Herramientas y Metrología y sus laboratorios, Ciencias del Ambiente. En Octubre de 2003 asume el puesto de Jefe de la Academia de Metrología.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS