

# Modelaje de la viruta en el proceso de maquinado

Primera parte.

F. Eugenio López Guerrero, Miguel Ruiz, Rafael Colás Ortiz \*

## Abstract

*A survey on machinability has been done, first to understand the process, and then to optimize and improve it under a particular criterion. In a machine-tool system, the role of the NC-code is critical, as it concerns not only the tool paths but also the cutting values. The optimal code is determined not only by the machine's control, but also the geometric conditions and the materials involved both in the tool and part to be machined.*

*This first article presents a method to study the relationship between the parameters of the NC-code by means of a mathematical model. Experimental results allowing the validation of the method are presented.*

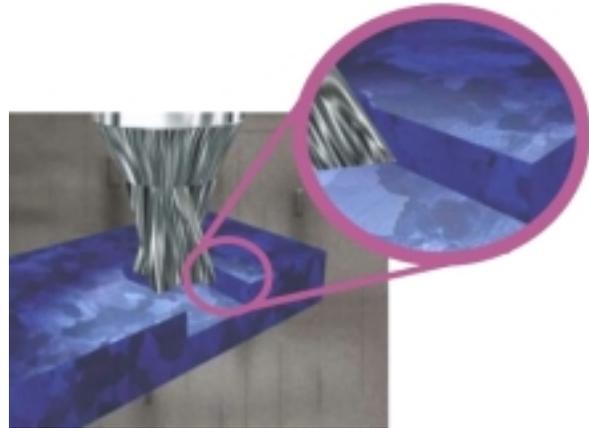
**Keywords:** geometric modeling, machining, machinability, CNC.

## INTRODUCCIÓN

La forma y dimensión de la viruta obtenida por el proceso de maquinado refleja la calidad con la que fue hecho el proceso.<sup>1</sup>

El análisis ortogonal<sup>2</sup> es la forma básica de estudio en el campo del maquinado. El objeto de estudio es la formación de la viruta al momento del corte de la herramienta (ver figura 1). Algunos estudios consideran diferentes ángulos de ataque<sup>3</sup> y disposiciones geométricas que determinan el espesor de la viruta y, en consecuencia, el trabajo efectuado, el acabado, tiempos y costos del proceso.

El análisis ortogonal supone que la viruta se comporta como un cuerpo rígido que se mantiene en equilibrio por la acción de las fuerzas que se transmiten a través de la zona de contacto entre la viruta y la herramienta a través del plano de corte. La base de la teoría fue la suposición de que el



Esquema mostrando el proceso de corte a modelar.

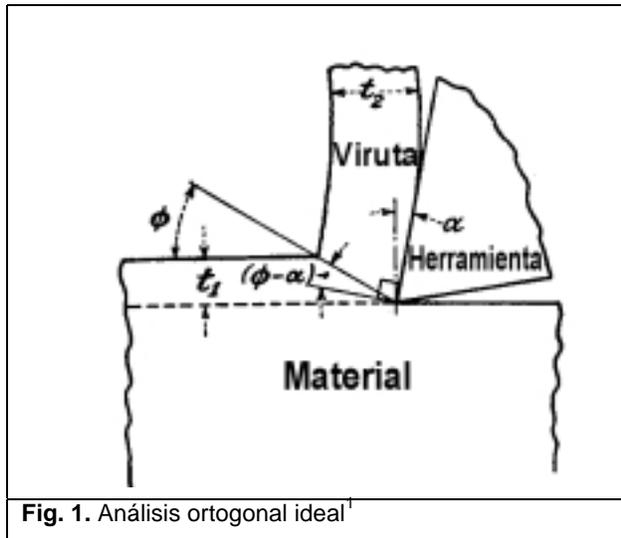
ángulo de corte  $\phi$  toma un valor tal que minimiza el trabajo de corte requerido.

## OBJETIVOS

Los objetivos que el presente trabajo tiene son: a) observar el proceso de corte de una aleación de aluminio comercial bajo condiciones particulares y b) validar por medio de experimentos un modelo propuesto como mejora del análisis ortogonal convencional del proceso de maquinado. Se espera poder establecer relaciones entre dicho modelo y las propiedades del material y de esta manera inferir resultados en situaciones de maquinado que puedan mejorarse.

A continuación se muestra cómo alcanzar ambos objetivos. Trabajos posteriores deberán establecer las condiciones que permitan la aplicación de este método a nivel industrial.

\* Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica UANL, México

Fig. 1. Análisis ortogonal ideal<sup>1</sup>

### ANÁLISIS ORTOGONAL

Los tipos generales de la viruta según la Asociación Americana de Ingenieros en Herramientas<sup>1</sup> son tres:

1. Segmentos individuales que en algunos casos se adhieren unos a otros.
2. Viruta sin fractura, formada por deformación continua del metal.
3. Similar al tipo 2, excepto que la herramienta presenta una masa del metal formado por adherencia como resultado del deslizamiento de la viruta en la cara de la herramienta.

La relación que existe entre la profundidad de corte y el ancho de la viruta tipo 2 es.<sup>4</sup>

$$\tan(\phi) := \frac{r \cdot \cos(\alpha)}{1 - r \cdot \sin(\alpha)} \quad (1)$$

En donde  $r = t_1/t_2$  Ver figura 1.

Un análisis puntual<sup>5</sup> permite estimar los valores geométricos de espesor y longitud de viruta.

### REPRESENTACIÓN DE LA POSICIÓN DE LOS ÁLABES POR MEDIO DE CURVAS

Las condiciones geométricas del proceso de corte pueden representarse por medio de ecuaciones de posición y movimiento de los puntos de contacto de los filos de la herramienta sobre el material.<sup>5</sup> Estas ecuaciones determinan la cantidad de material que la herramienta arrancará. Los valores de las constantes de las ecuaciones de movimiento enmarcan una situación de corte en particular. En esta sección se plantean dichas ecuaciones utilizando valores de corte recomendados por fabricantes de herramientas.

Considerando el punto radial del filo de una herramienta giratoria que se traslada en un plano, la ecuación de movimiento puede ser descrita en forma paramétrica por medio de:

$$\begin{aligned} x(t) &= r \cos(t) + V_x \\ y(t) &= r \sin(t) + V_y \end{aligned} \quad (2)$$

en donde  $t$  es la variable independiente en un intervalo de  $0 < t < \pi$ .  $V_x$  y  $V_y$  son las componentes de la velocidad de corte programada  $V_c$ , que puede representarse en términos del avance  $F$ :

$$\begin{aligned} x(t) &:= r \cdot \cos(t) + \frac{F_x}{2\pi} \cdot t \\ y(t) &:= r \cdot \sin(t) + \frac{F_y}{2\pi} \cdot t \end{aligned} \quad (3)$$

La ecuación (3) se puede utilizar para calcular la posición de cada álabe de la herramienta, en donde existe un desfaseamiento entre ellos de:

$$\text{MAX}_t := \frac{2\pi}{N} \quad (4)$$

$$P := \begin{pmatrix} 0 & 10 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6a)$$

Siendo N el número de álabes de la herramienta.

Las ecuaciones resultantes son:

$$x_1(t) := r \cdot \cos(t) + \frac{F_x}{2\pi} \cdot t \quad (5a)$$

$$y_1(t) := r \cdot \sin(t) + \frac{F_y}{2\pi} \cdot t$$

para el primer álabe, y

$$x_2(t) := r \cdot \cos(t + \text{MAX}_t) + \frac{F_x}{2\pi} \cdot t \quad (5b)$$

$$y_2(t) := r \cdot \sin(t + \text{MAX}_t) + \frac{F_y}{2\pi} \cdot t$$

para el segundo.

### CONDICIONES TEÓRICAS DE MAQUINADO

Si se asume que la herramienta se moverá en línea recta entre dos puntos, los cálculos pueden simplificarse trasladando el origen del movimiento al primer punto y colocando el segundo en cualquiera de los ejes, como se muestra en (5a). Considerando la situación de maquinado con los datos de la tabla I para un recorrido entre los puntos del vector P:

En donde:

$$X := P \langle 0 \rangle \quad (6b)$$

$$Y := P \langle 1 \rangle$$

Las componentes de avance F se calculan con la distancia del recorrido D:

$$D := \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} \quad (7)$$

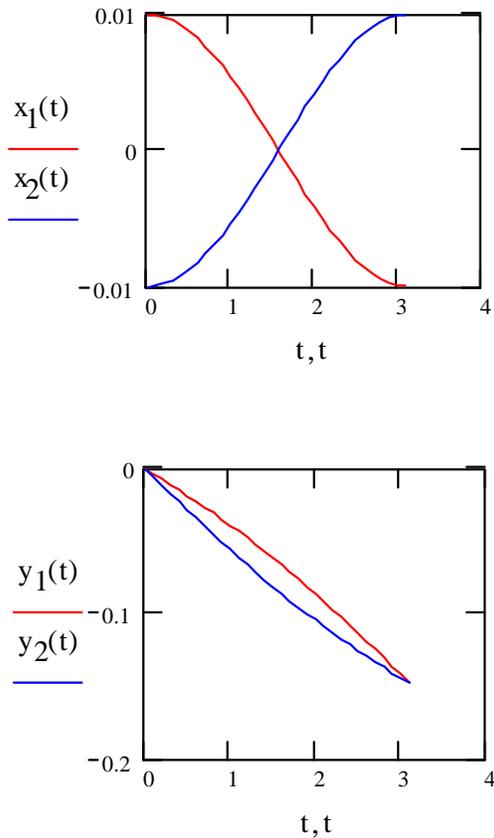
$$F_x := F \cdot \frac{(X_1 - X_0)}{D}$$

$$F_y := F \cdot \frac{(Y_1 - Y_0)}{D}$$

Las curvas de desplazamiento en relación de un álabe con respecto al otro en cada eje se muestran en la figura 2.

**Tabla I.-** Valores utilizados para los cálculos y los experimentos de maquinado

Número de álabes	N	2
Radio de la herramienta. (mm)	r	10
Velocidad de giro (rpm)	S	800
Avance (mm/min)	F	.3

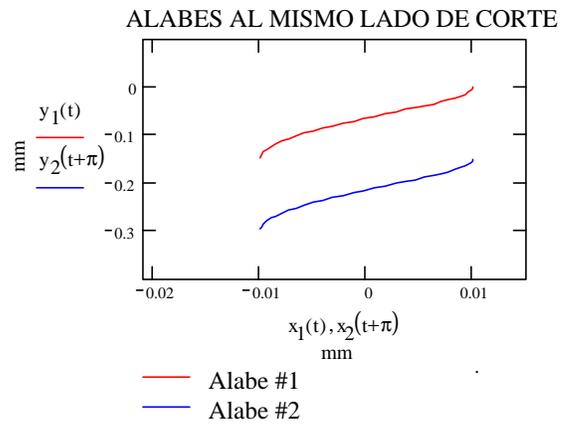


**Fig. 2.** Curvas de desfase para los álabes de la herramienta.<sup>4</sup>

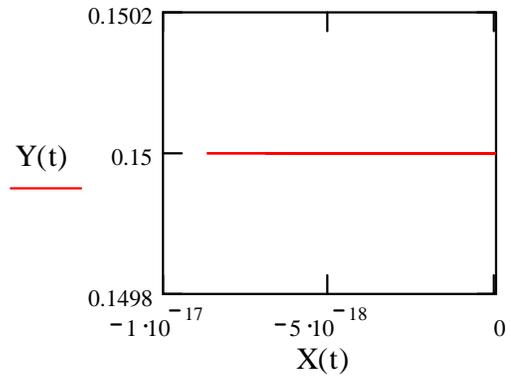
El valor de corte calculado para el espesor de la viruta está determinado por la diferencia posicional de cada eje:

$$\begin{aligned}
 Y(t) &:= y_1(t) - y_2(t + \pi) \\
 X(t) &:= x_1(t) - x_2(t + \pi)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Para el caso de los valores de maquinado de la tabla I, el resultado de la ecuación (8) está graficado en la figura 3. El eje X no presenta desfase, mientras que el eje Y presenta un espesor de 0.15 mm.



(a)



(b)

**Fig. 3.** Geometrías calculadas a) posición de cada álabe por ciclo, b) diferencia entre álabes en milímetros.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Caracterización del material utilizado en los ensayos.

El material usado en los experimentos fue un perfil forjado de aluminio comercial para maquinado cortado en piezas de 88.9 x 50.8 x 12.7 mm (3 ½ x 2 x ½ in). La preparación de las muestras se hizo para caracterizar el material y para la medición de los espesores de rebaba.

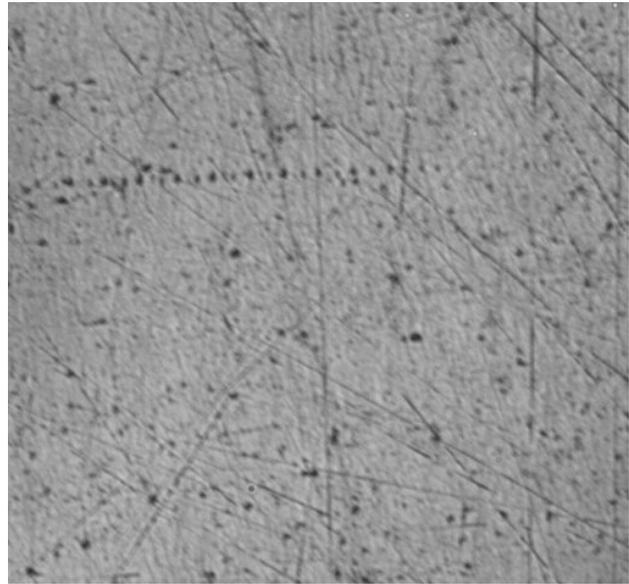
El análisis electroquímico permitió identificar al material como aluminio 6063 de acuerdo a las tablas del Manual de Aluminios de la ASM. Los datos del manual<sup>6</sup> y los valores producto del análisis se muestran en la tabla II.

La microscopía óptica (figura 4) reveló una matriz homogénea de aluminio con precipitados de Mg<sub>2</sub>Si<sup>6</sup>. La homogeneidad de la microestructura del material garantiza propiedades mecánicas macroscópicas relativamente isotrópicas y homogéneas,<sup>7</sup> lo que en el caso del proceso de maquinado es deseable.<sup>8</sup>

**Tabla II.** Comparación de los elementos químicos encontrados y los de la aleación 6063 (% peso)

Elemento químico	Aluminio ASM 6063	Análisis químico
Al	-	98.8
Si	0.2-0.6	0.48
Mg	0.45-0.9	0.497
Fe	0.35 max	0.167

El tratamiento térmico para los aluminios de la serie 6xxx determina el subgrupo correspondiente (T1 a T9, norma ANSI H35.1). Las designaciones de subgrupo T se aplican a productos térmicamente tratados.



**Fig. 4.** Micrografía de la muestra de aluminio utilizada en los experimentos.

La identificación del grupo T se hizo a través de ensayos de tensión. Los valores de estos ensayos se presentan en la tabla III y se comparan con los estándares<sup>6</sup> de la tabla IV.

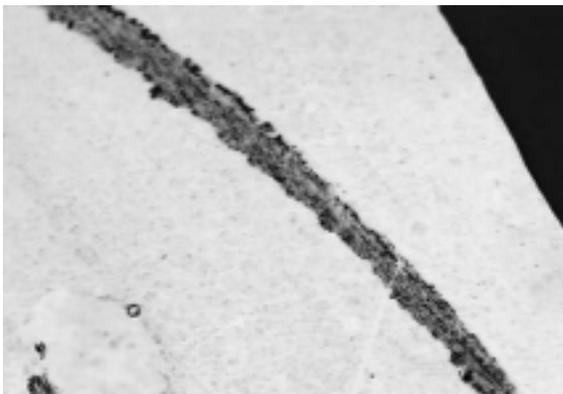
**Tabla III.** Valores resultantes de los ensayos de tensión

Ensayo No.	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo cedencia (MPa)	% Elongación
1	244	244	13
2	276	269	18
3	280	269	16
Promedio	266	260	15

**Tabla IV.** Propiedades mecánicas típicas de la aleación 6063 según la ASM

Tratamiento térmico	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo cedencia (MPa)	% Elongación
T1	152	90	20
T4	172	90	22
T5	186	145	12
T6	241	214	12
T83	255	241	9
T831	207	186	10
T832	290	269	12

Los resultados de las pruebas a tensión revelan que el material es una aleación de aluminio tipo 6063 con tratamiento térmico clase T83. Las aleaciones conteniendo magnesio y silicio, en las proporciones para formar el compuesto  $Mg_2Si$  tienen buena formabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión. La maquinabilidad es de suficiente a buena según la escala utilizada por la ASM. Este material es utilizado para tubería, rieles, muebles, extrusiones arquitectónicas, pisos, ventanas, puertas.

**Fig. 5.** Muestra de virutas bajo el microscopio óptico a 50x.

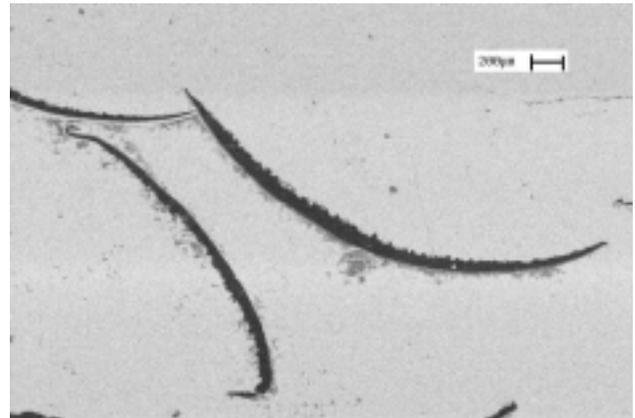
### Condiciones de maquinado.

Para los experimentos se maquinó la barra de aluminio con condiciones de corte fijas para los puntos de la ecuación (6a). El corte se hizo a 2.54 mm (0.1in). No se utilizó refrigerante. El resto de los valores de corte experimentales fueron los mismos que los usados en los cálculos teóricos (tabla I).

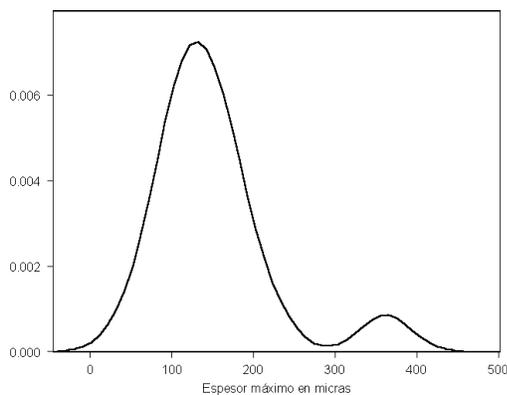
### RESULTADOS OBTENIDOS

Utilizando el microscopio óptico (figura 5), el microscopio de barrido electrónico (figura 6) y un programa computacional de análisis de imágenes digitales se obtuvieron los datos de ensayo de la figura 7. El promedio de espesor máximo es de 149.54 micrómetros, que es bastante aproximado al valor teórico calculado con el modelo propuesto en la figura 3; la desviación estándar es de 71.45.

Considerando un intervalo de confianza del 99.5% para un ensayo de 14 grados de libertad, las tablas estadísticas de  $t_{\alpha}$  arrojan un valor de 8.1061. La media calculada del universo está en el intervalo de 88.2 a 210.9 micrómetros.

**Fig. 6.** Imagen de virutas bajo el microscopio electrónico de barrido.

En la figura 6 se muestra la morfología de la viruta, observada utilizando un microscopio de barrido electrónico.



**Fig. 7.** Diagrama de densidad de frecuencias de los espesores máximos para las muestras de una misma situación de corte.

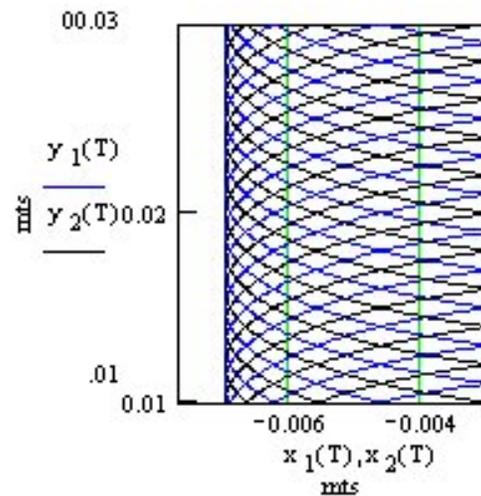
A través de las ecuaciones (8) es posible modelar las marcas de la herramienta en el material. La figura 8 muestra que las huellas de la herramienta son de la misma forma que las calculadas. La micrografía (b) no está a la misma escala que (a).

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y MEJORAS A DESARROLLAR

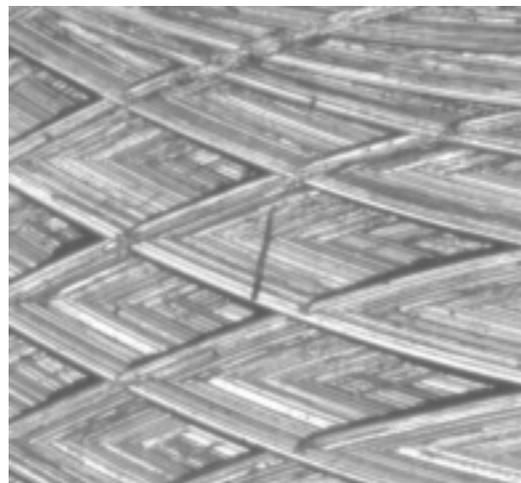
El estudio de la maquinabilidad debe contemplar algo más que las propiedades de maquinado de un material bajo un análisis ortogonal simple. El desarrollo de nuevas tecnologías, criterios de evaluación y complejidad de productos obligan a replantear el estudio del proceso de maquinado en forma integral.

Se ha demostrado que bajo condiciones de maquinado moderadas es posible determinar una

relación proporcional al espesor de la viruta de una manera simple. El presente trabajo no considera experimentos exhaustivos que permitan relacionar completamente la morfología con la situación de corte ni las propiedades de materiales.<sup>8</sup>



(a)



(b)

**Fig. 8.** Comparación de las huellas de la herramienta durante su trayectoria. a) teórico, b) experimental.

El ángulo de corte es calculable por medio de la relación trigonométrica que existe entre  $t_1$  y  $t_2$  de la figura 1. Un análisis posterior debe mostrar el efecto de la morfología en los extremos relacionada con la posición de los álabes en cada ciclo. Es conveniente validar los ángulos de salida para la viruta en la herramienta que determinan el arco de la viruta.

Es necesario considerar y validar la inferencia de la calidad del maquinado por medio de la características de la viruta tales como rugosidad y textura dentro del modelo propuesto. Sería útil comparar el presente modelo con el de corte ortogonal presente al inicio de este artículo.

### RECONOCIMIENTOS Y EQUIPO UTILIZADO

El presente trabajo fue realizado por los autores como parte de su proyecto de investigación en el Doctorado de Materiales FIME-UANL bajo el apoyo de PROMEP y PAICYT 2001 (contrato CA556-01), utilizando las instalaciones del Centro de Manufactura Integrada por Computadora y del Programa Doctoral de Materiales de la FIME UANL:

- Centro de Maquinado EMCO VMC 300.
- Licencia de software SurtCAM v6.1b
- Microscopio electrónico de barrido LEO Stereoscan 440, 30keV, hasta 300,000X equipado con espectrómetro de rayos X
- Microscopio óptico NIKON a 5X, 20X, 40X y 100X

Los autores agradecen la colaboración de los ingenieros Roberto Mireles, Francisco Delgado y Eleazar Sánchez de la Coordinación de Automatización y al Dr. Moisés Hinojosa del programa doctoral de materiales de FIME.

### REFERENCIAS

1. American Society of Tools Engineers. Tool Engineers Handbook. Mc Graw Hill, 1949.
2. Shaw, Milton. Metal cutting principles. Oxford University Press, 1984.
3. Stevenson, Robin and Stephenson, David. The effect of prior cutting conditions on the shear mechanics of orthogonal machining. The Minerals, Metals and Materials Society, 1996.
4. Groover, Mikell P. Fundamentals of Modern Manufacturing, Ed. Prentice Hall, 1996.
5. V. Chiles, S.C. Black and Arnold. Principios de Ingeniería de Manufactura. CECSA, 1999.
6. Metals Handbook 9th edition, vol 6 "Aluminium". ASM International, 1989.
7. Cavazos García, José Luis. Tratamiento térmico de una aleación de aluminio 6063. Tesis Doctoral FIME-UANL, 1998.
8. Metals Handbook 9th edition, vol 16 "Machining". ASM International, 1989.

### BIBLIOGRAFÍA

1. Degarmo, Paul E, Black, J.T. y Kohser, Ronald A. Materials and Process in Manufacturing. Ed. Prentice Hall, 1997.
2. Boothroyd, Geoffrey. fundamentos de corte de metales y de las Maquinas-Herramientas. Ed. Mc Graw-Hill Latinoamericana S.A. 1978.
3. Schaffer, Saxena, Antolovich, Sanders & Warner. Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería. Ed. CECSA, 1999.
4. Schey, John A. Introduction to manufacturing processes. Ed. Mc. Graw Hill, 1987.
5. Mangonon, Pat. The principles of materials selection for engineering design. Ed. Prentice Hall, 1999.