

Fundamentos de manufactura moderna

Tercera edición

**Mc
Graw
Hill**

Mikell P. Groover

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

Materiales, procesos y sistemas
Tercera edición

Mikell P. Groover

Profesor de ingeniería industrial
y de sistemas
Lehigh University

Revisión técnica:

Ing. Antonio Barrientos Morales

*Académico de Ingeniería Mecánica
Universidad Iberoamericana, Ciudad de México*

Ing. Javier León Cárdenas

*Jefe de Ingeniería Mecánica
Universidad La Salle, campus Ciudad de México*

Ing. Rosendo Reyes Rosales

*Coordinador de Talleres y Laboratorios de Ingeniería
Universidad La Salle, campus Ciudad de México*



MÉXICO • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA
LISBOA • MADRID • NUEVA YORK • SAN JUAN • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUCKLAND • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI
SAN FRANCISCO • SINGAPUR • SAN LUIS • SIDNEY • TORONTO

Director Higher Education: Miguel Ángel Toledo Castellanos
Director editorial: Ricardo A. del Bosque Alayón
Editor sponsor: Pablo E. Roig Vázquez
Editora de desarrollo: Lorena Campa Rojas
Supervisor de producción: Zeferino García García

Traducción: Carlos Roberto Cordero Pedraza
Javier Enríquez Brito
Jesús Elmer Murrieta Murrieta

Diseño de portada: Círculodiseño

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

Tercera edición

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra,
por cualquier medio, sin la autorización escrita del editor.



**McGraw-Hill
Interamericana**

DERECHOS RESERVADOS © 2007 respecto a la tercera edición en español por
McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

A Subsidiary of *The McGraw-Hill Companies, Inc.*

Edificio Punta Santa Fe
Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A
Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe,
Delegación Álvaro Obregón
C.P. 01376, México, D. F.
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

ISBN-13: 978-970-10-6240-1

ISBN-10: 970-10-6240-X

Traducido de la tercera edición en inglés de la obra *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING. Materials, Processes and Systems*. Copyright © 2007 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

ISBN-10: 0-471-74485-9

ISBN-13: 978-0-471-74485-6

1234567890

0986543217

Impreso en México

Printed in Mexico

Parte VI

Procesos de remoción de material

21

TEORÍA DEL MAQUINADO DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 21.1 Panorama general de la tecnología del maquinado
- 21.2 Teoría de la formación de viruta en el maquinado de metales
 - 21.2.1 Modelo de corte ortogonal
 - 21.2.2 Formación real de la viruta
- 21.3 Relaciones de fuerza y la ecuación de Merchant
 - 21.3.1 Fuerzas en el corte de metales
 - 21.3.2 La ecuación de Merchant
- 21.4 Relaciones entre potencia y energía en el maquinado
- 21.5 Temperatura de corte
 - 21.5.1 Métodos analíticos para el cálculo de las temperaturas de corte
 - 21.5.2 Medición de la temperatura de corte

Los **procesos de remoción de material** son una familia de operaciones de formado (figura 1.4) en las que el material sobrante es removida de una pieza de trabajo inicial de tal manera que lo que queda es la forma final que se desea conseguir. El “árbol familiar” se muestra en la figura 21.1. La rama más importante de la familia es el **maquinado convencional**, en el que una herramienta aguda de corte se utiliza para cortar mecánicamente el material y así alcanzar la forma deseada. Los tres procesos principales de maquinado son el torneado, el taladrado y el fresado. Las “otras operaciones de maquinado” de la figura 21.1 incluyen el perfilado, el cepillado, el escariado y el aserrado. Este capítulo comienza con una cobertura del maquinado, el cual se prolonga hasta el capítulo 24.

Otro grupo de procesos de remoción de material es el **proceso abrasivo**, que de forma mecánica remueve el material mediante la acción de partículas abrasivas duras. Este grupo de procesos, dentro del cual se encuentra el molido, se estudia en el capítulo 25. Los “demás procesos abrasivos” de la figura 21.1 son afilado, fundido y superacabado. Por último, se encuentran los **procesos no tradicionales**, que utilizan otras formas de energía aparte de la herramienta de corte agudo o de partículas abrasivas para remover el material. Las formas de energía incluyen la mecánica, la electromecánica, la térmica y la química. Los procesos no tradicionales se estudian en el capítulo 26.

El **maquinado** es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una pieza de trabajo, de tal manera que el material remanente sea la forma de la pieza deseada. La acción predominante del corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar la viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie. El maquinado se aplica más frecuentemente para formar metales. El proceso se ilustra en el diagrama de la figura 21.2.

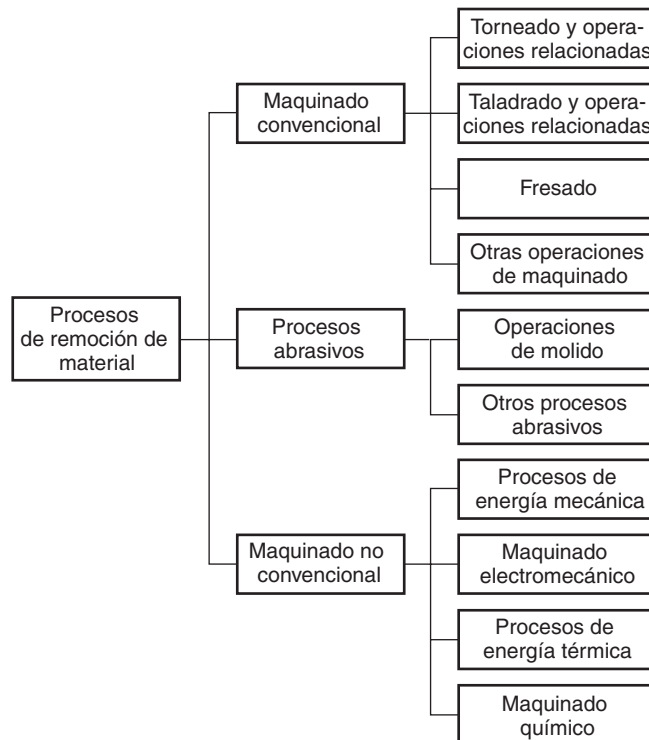
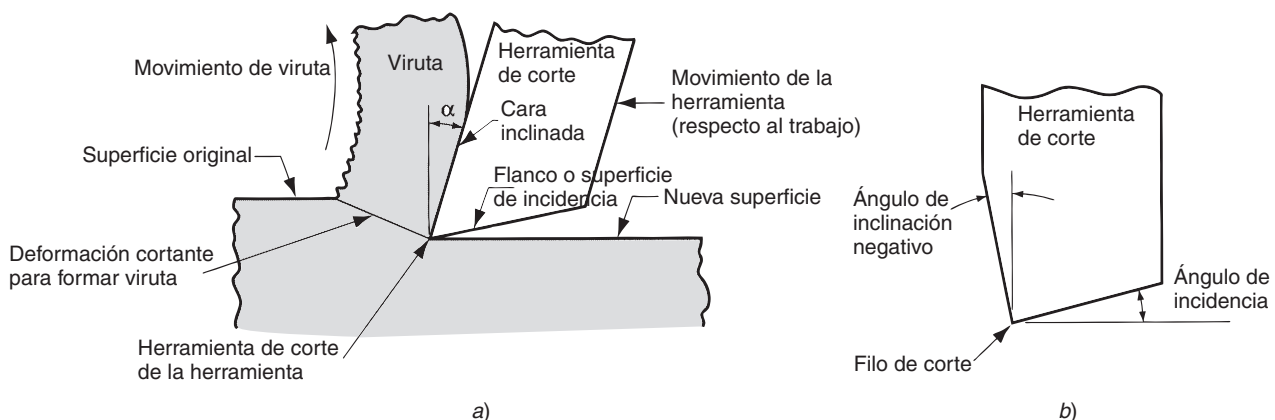


FIGURA 21.1 Clasificación de los procesos de remoción de material.

El maquinado es uno de los procesos de manufactura más importantes. La Revolución Industrial y el crecimiento de las economías basadas en la manufactura de todo el mundo se pueden describir en gran parte por el desarrollo de varias operaciones de maquinado (véase la nota histórica 22.1). Las siguientes razones explican la importancia de las operaciones de maquinado desde el punto de vista comercial y tecnológico.

- **Amplia gama de materiales de trabajo** 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. Las cerámicas presentan dificultades debido a su alta dureza y fragilidad; sin embargo, la mayoría de las cerámicas se pueden cortar exitosamente mediante procesos de maquinado abrasivo, analizados en el capítulo 25.

FIGURA 21.2 a) Sección transversal de proceso de maquinado. b) Herramienta con ángulo de inclinación negativo; compare con el ángulo de inclinación positivo en a).



- **Variedad de formas y características geométricas.** El maquinado se puede usar para generar cualquier forma geométrica regular, como superficies planas, agujeros redondos y cilindros. Mediante la introducción de variaciones en las trayectorias y formas de las herramientas, se puede crear formas geométricas irregulares, como cuerdas de tornillos y ranuras T. Combinando varias operaciones de maquinado en secuencia, se puede producir formas de complejidad y variedad ilimitada.
- **Precisión dimensional.** El maquinado puede producir dimensiones con tolerancias muy estrechas de menos de ± 0.025 mm (± 0.001 in). Es más preciso que muchos otros procesos.
- **Acabados superficiales de calidad.** El maquinado es capaz de crear acabados superficiales muy tersos que pueden llegar a ser mejores que 0.4 micras ($16 \mu\text{-in}$). Algunos procesos abrasivos pueden lograr mejores acabados aún.

Por otro lado, existen ciertas desventajas asociadas con el maquinado y otros procesos de remoción de material:

- **Desperdicio de material.** El maquinado es inherentemente un desperdicio de material. La viruta que se genera en la operación de maquinado es material de desperdicio. Aunque, en general, esta viruta puede reciclarse, en términos de la operación unitaria, el material que se remueve significa desperdicio.
- **Consumo de tiempo.** Una operación de maquinado, en general, toma más tiempo en formar una pieza determinada que los procesos de formado alternos como el fundido o el forjado.

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 pieza y el maquinado produce la forma final, las dimensiones y el acabado.

21.1 PANORAMA GENERAL DE LA TECNOLOGÍA DEL MAQUINADO

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 pieza de trabajo. Para realizar la operación, se requiere movimiento relativo entre la herramienta y el material de trabajo. Este movimiento relativo se logra en la mayoría de las operaciones de maquinado por medio de un movimiento primario, llamado la **velocidad de corte**, 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.

Tipos de operaciones de maquinado Hay muchas clases de operaciones de maquinado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta configuración geométrica y textura superficial. Se analizarán estas operaciones detalladamente en el capítulo 22; sin embargo, por ahora es apropiado identificar y definir los tres tipos más comunes: torneado, taladrado y fresado, que se ilustran en la figura 21.3.

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, como se ilustra en la figura 21.3a). El movimiento de velocidad del torneado lo proporciona la pieza 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 giratoria que tiene dos filos cortantes. La herramienta avanza en una dirección paralela a su eje de rotación dentro de la pieza de trabajo para formar el agujero redondo, como se

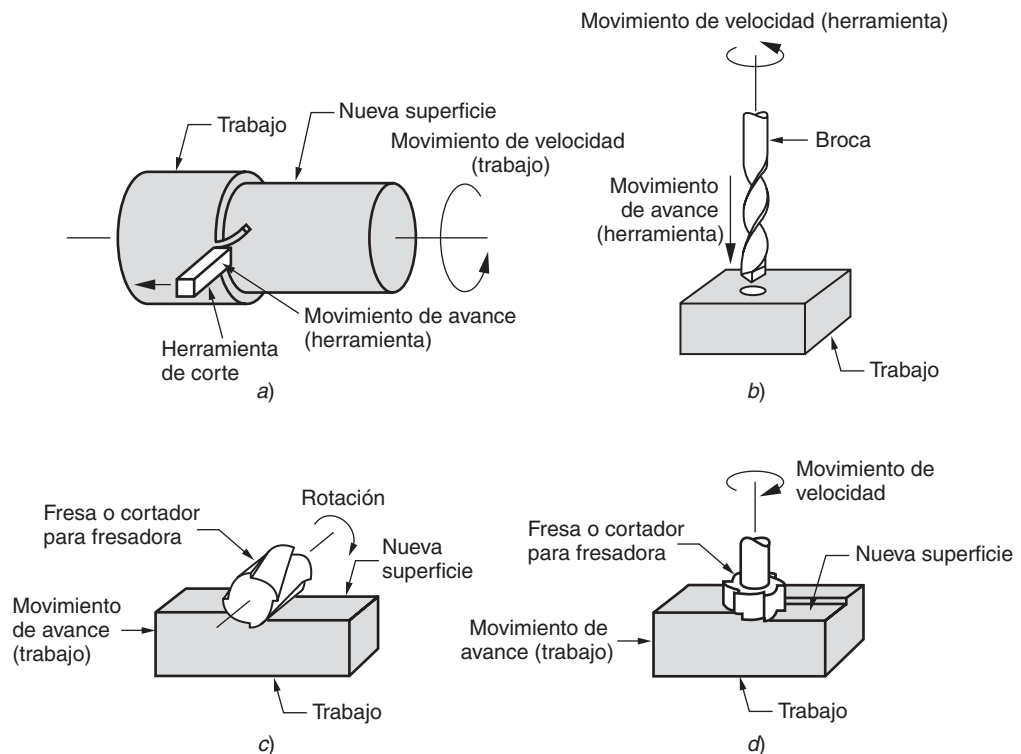


FIGURA 21.3 Los tres procesos más comunes de maquinado: a) torneado, b) taladrado y dos formas de fresado: c) fresado periférico y d) fresado de frente.

ilustra en la figura 21.3b). 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. Hay varias formas de fresado; las dos básicas son el fresado periférico y el fresado de frente, como se muestra en la figura 21.3c) y d).

Otras operaciones convencionales del maquinado son perfilado, cepillado, escariado y aserrado (sección 22.5). Asimismo, el esmerilado y operaciones abrasivas similares se incluyen con frecuencia en la categoría del maquinado. Estos procesos por lo común siguen las operaciones de maquinado convencional y se utilizan para lograr acabados superficiales superiores de la pieza de trabajo.

La herramienta de corte Una herramienta de corte tiene uno o más filos cortantes y está hecha de un material que es más duro que el material de trabajo. El filo cortante sirve para separar una viruta del material de trabajo, como se muestra en la figura 21.2. Ligadas al filo cortante hay dos superficies de la herramienta: la cara inclinada y el flanco o superficie de incidencia. La cara inclinada que dirige el flujo de la viruta resultante se orienta en cierto ángulo, llamado **ángulo de inclinación** α . El ángulo se mide respecto a un plano perpendicular a la superficie de trabajo. El ángulo de inclinación puede ser positivo, como en la figura 21.2a), o negativo, como en el inciso b). El flanco de la herramienta provee un claro entre la herramienta y la superficie del 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**.

En la práctica, la mayoría de las herramientas de corte tiene formas más complejas que las de la figura 21.2. Hay dos tipos básicos cuyos ejemplos se ilustran en la figura 21.4: a) herramientas de una sola punta 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. Además de las características de la herramienta que se muestran en la figura 21.2, hay una punta en la herramienta de la cual deriva su nombre la herramienta cortante. 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.

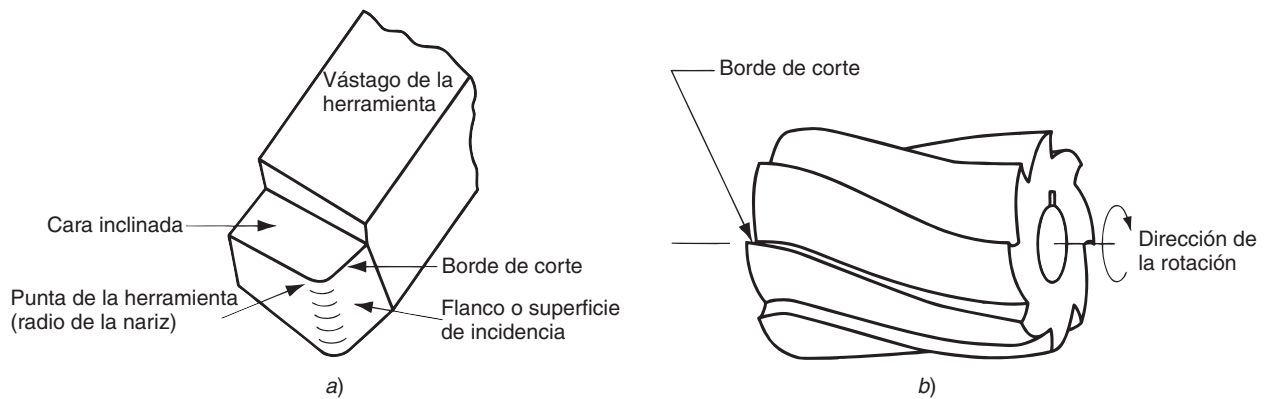


FIGURA 21.4 a) Una herramienta de una sola punta, que muestra la cara inclinada, el flanco y la punta, y b) una fresa helicoidal, representativa de las herramientas con bordes cortantes múltiples.

Las herramientas de múltiples filos cortantes tienen más de un borde de corte y generalmente realizan su movimiento respecto a la pieza de trabajo mediante rotación. El taladrado y el fresado usan herramientas rotatorias de múltiples filos cortantes. La figura 21.4b) muestra un cortador de fresado helicoidal utilizado en fresado periférico. Aunque la forma es bastante diferente de la herramienta de punta simple, muchos de los elementos de la forma son similares. Las herramientas de una sola punta y de múltiples filos cortantes y los materiales utilizados en ellos se estudian con más detalle en el capítulo 23.

Condiciones de corte Para realizar una operación de maquinado se requiere el movimiento relativo de la herramienta y el 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 dentro 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**. Éstas son las tres dimensiones del proceso de maquinado y, en ciertas operaciones (por ejemplo, la mayoría de las operaciones con herramientas de una punta), se puede usar su producto matemático para obtener la velocidad de remoción de material del proceso:

$$R_{MR} = vfd \quad (21.1)$$

donde R_{MR} = tasa de remoción de material, mm^3/s (in^3/min); v = velocidad de corte, m/s (ft/min), la cual debe convertirse a mm/s (in/min), f = avance, mm (in); y d = profundidad de corte, mm (in).

Las condiciones de corte para una operación de torneado se describen en la figura 21.5. Las unidades típicas usadas para la velocidad de corte son m/s (ft/min). El avance en torneado se expresa usualmente en mm/rev (in/rev) y la profundidad de corte se expresa en mm (in). 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 pieza 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 usan para completar la pieza 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 $0.4\text{--}1.25 \text{ mm/rev}$ ($0.015\text{--}0.050 \text{ in/rev}$) y profundidades típicas de $2.5\text{--}20 \text{ mm}$ ($0.100\text{--}0.750 \text{ in}$). Las operaciones de acabado se realizan a

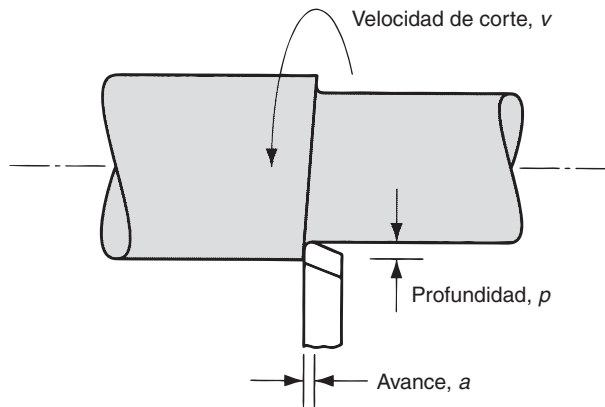


FIGURA 21.5 Velocidad de corte, avance y profundidad de corte de una operación de torneado.

bajas velocidades de avance y a bajas profundidades; avances de 0.125-0.4 mm (0.005-0.015 in/rev) y profundidades de 0.75-2.0 mm (0.030-0.075 in) son típicas. 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 de corte** en la operación de maquinado (los fluidos de corte se estudian en la sección 23.4). 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.

Máquinas herramienta Se usa una máquina herramienta para sostener la pieza de trabajo, poner en posición la herramienta respecto al trabajo y 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 piezas con gran precisión y repetitividad a tolerancias de 0.025 mm (0.001 in) 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 (capítulos 19 y 20).

Las máquinas herramientas usadas tradicionalmente para realizar el torneado, taladrado y fresado son los tornos, prensas taladradoras y máquinas fresadoras, respectivamente. Las máquinas herramienta convencionales las maneja usualmente un trabajador, quien carga y descarga las piezas de trabajo, cambia las herramientas de corte y establece las condiciones de corte. Muchas de las máquinas herramienta modernas están frecuentemente diseñadas para realizar sus procesos con un alto grado de automatización, conocido como control numérico por computadora (sección 38.1).

21.2 TEORÍA DE LA FORMACIÓN DE VIRUTA EN EL MAQUINADO DE METALES

La forma de la mayoría de las operaciones de maquinado práctico son algo complejas. Se dispone de un modelo simplificado del maquinado que desprecia muchas de las complejidades geométricas y describe la mecánica de los procesos con buena precisión; se llama modelo de corte **ortogonal**, figura 21.6. Aun cuando un proceso real de maquinado es tridimensional, el modelo ortogonal tiene solamente dos dimensiones que juegan un papel activo en el análisis.

21.2.1 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

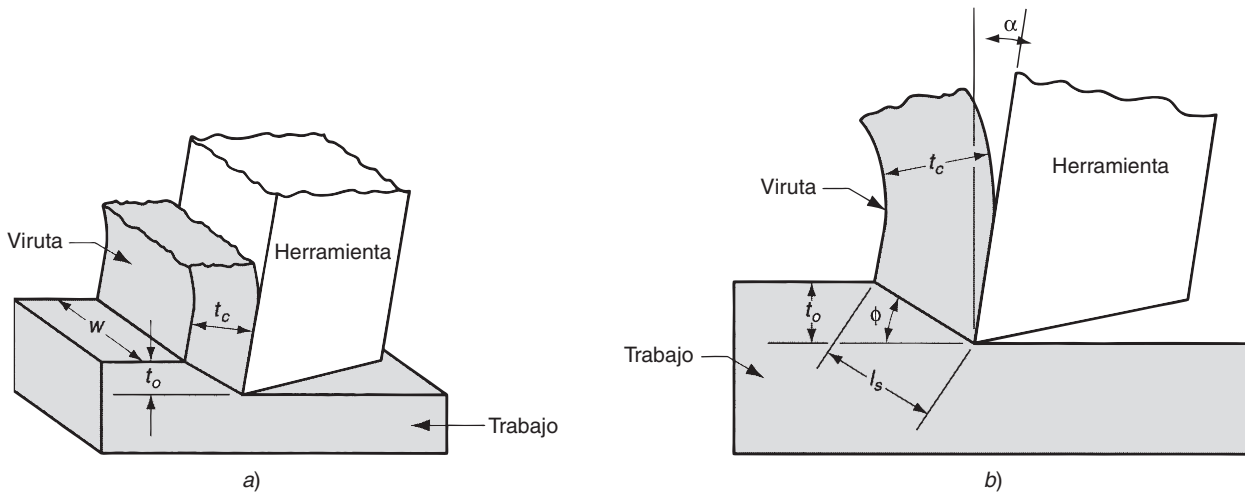


FIGURA 21.6 Corte ortogonal: a) como un proceso tridimensional y b) tal como se reduce a dos dimensiones en una vista lateral.

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. Solamente el borde afilado de corte de la herramienta hace que ocurra la falla del material; como resultado, la viruta se separa del material original. El material se deforma plásticamente a lo largo del plano de corte, donde el grueso de la energía mecánica se consume en el maquinado.

La herramienta para corte ortogonal tiene solamente dos elementos geométricos: 1) el ángulo de inclinación y 2) el ángulo del claro o de incidencia. Como se indicó previamente, el ángulo de inclinación α determina la dirección en la que fluye la viruta formada en la pieza 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_o . Al formarse la viruta a lo largo del plano de corte, incrementa su espesor a t_c . La relación de t_o a t_c se llama **relación del grueso de la viruta** (o simplemente **relación de viruta**) r .

$$r = \frac{t_o}{t_c} \quad (21.2)$$

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_o , el corte ortogonal tiene una dimensión de anchura w , como se muestra en la figura 21.6a), aun cuando esta dimensión no contribuya mucho al análisis en el corte ortogonal.

La forma del modelo de corte ortogonal permite establecer una relación importante entre el espesor de la viruta, el ángulo de inclinación y el ángulo del plano de corte. Sea l_s la longitud del plano de corte; se puede hacer la sustitución $t_o = l_s \sin \phi$ y $t_c = l_s \cos (\phi - \alpha)$. Entonces:

$$r = \frac{l_s \sin \phi}{l_s \cos (\phi - \alpha)} = \frac{\sin \phi}{\cos (\phi - \alpha)}$$

Lo anterior puede agruparse a fin de determinar el valor de ϕ :

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (21.3)$$

La deformación cortante que ocurre a lo largo del plano de corte puede estimarse al examinar la figura 21.7. El inciso a) de la figura muestra la deformación cortante aproxima-

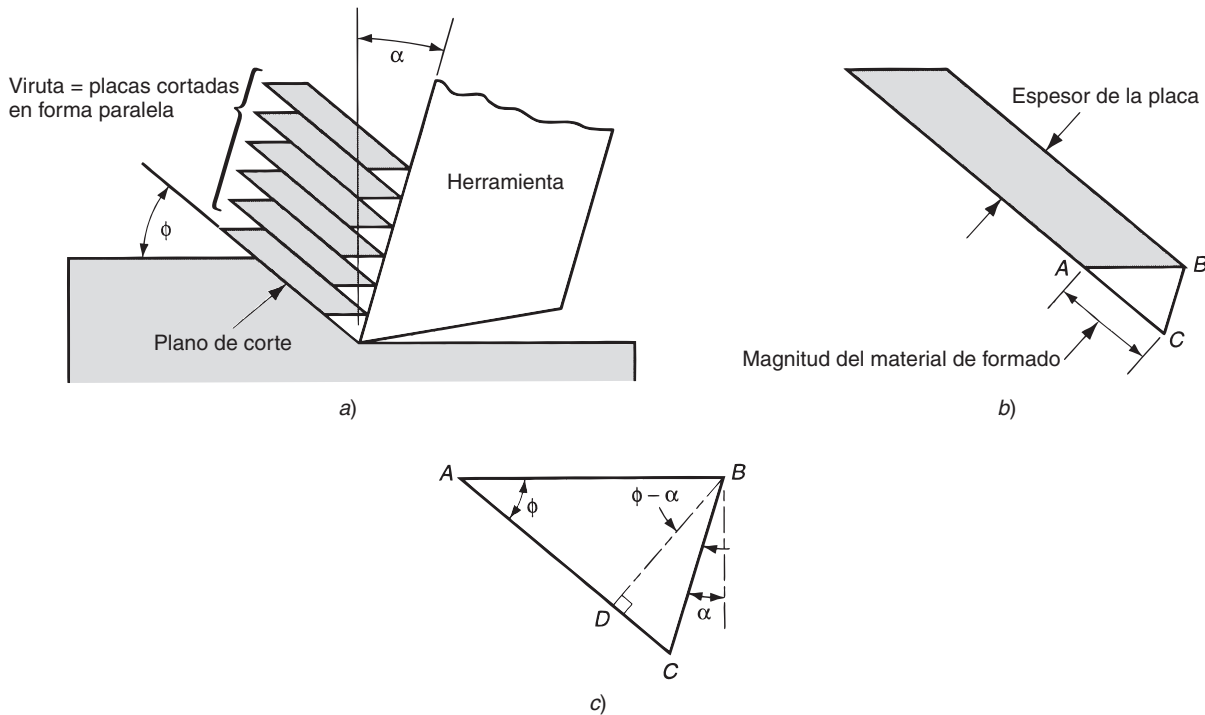


FIGURA 21.7 Deformación cortante durante la formación de viruta: a) formación de viruta representada como una serie de placas deslizándose una respecto a la otra b) una placa aislada para ilustrar la definición de la deformación cortante basada en este modelo de placa paralela y c) triángulo de deformación cortante usado para deducir la ecuación 21.4.

da, en la que una serie de placas paralelas se deslizan una contra otra para formar la viruta. De acuerdo con la definición de deformación cortante (sección 3.1.4), cada placa experimenta la deformación cortante mostrada en la figura 21.7b. Si se relaciona con el inciso c, esto se puede expresar como

$$\gamma = \frac{AC}{BD} = \frac{AD + DC}{BD}$$

la cual puede reducirse a la siguiente definición de deformación cortante para corte de metales:

$$\gamma = \tan(\phi - \alpha) + \cot \phi \quad (21.4)$$

EJEMPLO 21.1 Corte ortogonal

En una operación de maquinado que se aproxima al corte ortogonal, la herramienta de corte tiene un ángulo de inclinación $= 10^\circ$. El espesor de la viruta antes del corte $t_o = 0.50$ mm y el espesor de la viruta después del corte $t_c = 1.125$ in. Calcule el plano de corte y la deformación cortante en la operación.

Solución: La relación de espesor de la viruta puede determinarse de la ecuación 21.2:

$$r = \frac{0.50}{1.25} = 0.444$$

El ángulo del plano de corte está dado por la ecuación 21.3:

$$\tan \phi = \frac{0.444 \cos 10}{1 - 0.444 \sin 10} = 0.4738$$

$$\phi = 25.4$$

Por último, la deformación cortante se calcula de la ecuación 21.4:

$$\gamma = \tan(25.4 - 10) + \cot 25.4$$

$$\gamma = 0.275 + 2.111 = 2.386$$



21.2.2 Formación real de la viruta

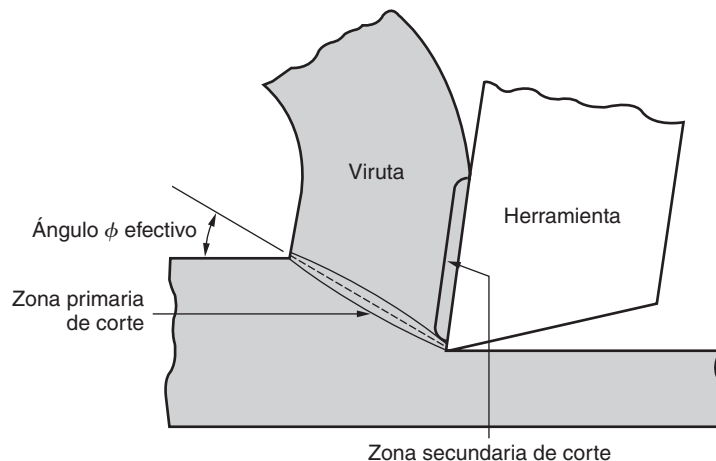
Se debe observar que hay diferencias entre el modelo ortogonal y el proceso de maquinado real. En primer lugar, el proceso de deformación cortante no ocurre a lo largo de un plano, sino dentro de una zona. Si el corte tuviera lugar a través de un plano de espesor cero, ello implicaría que la acción de corte debería ocurrir instantáneamente al pasar a través de un 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. Éste es el modelo más realista del proceso de deformación al corte en maquinado y se ilustra en la figura 21.8. 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.

En segundo lugar, además de la deformación al corte que ocurre en la zona de corte, se presenta otra acción de corte en la viruta después de haber sido formada. Este corte adicional se conoce 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 la herramienta. Su defecto aumenta con el incremento de la fricción entre la herramienta y la viruta. Las zonas de corte primario y secundario se pueden ver en la figura 21.8.

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 cuatro tipos básicos de viruta, los cuales se ilustran en la figura 21.9:

- 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 (a veces los segmentos están unidos sin cohesión). 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 pequeños, se forman virutas largas y continuas. 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

FIGURA 21.8 Visión más realista de la formación de viruta, en la que se muestra 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.



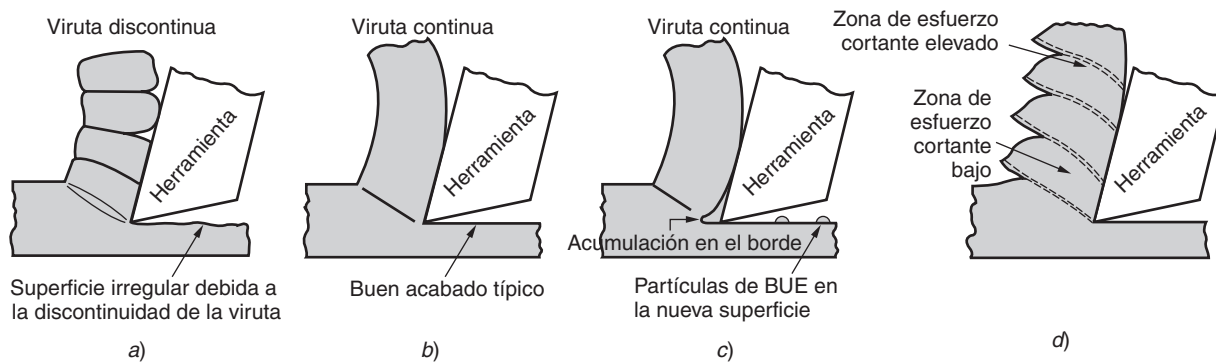


FIGURA 21.9 Cuatro tipos de formación de viruta en el corte de metales: a) discontinua, b) continua, c) continua con acumulación en el borde y d) dentada.

la formación de virutas continuas. Virutas continuas y largas (como en el torneado) pueden generar problemas respecto al desecho de viruta o enredarse alrededor de la herramienta. Para solucionar estos problemas, las herramientas de torneado a menudo están equipadas con separadores de viruta (sección 2.3.3.1).

- c) **Viruta continua con acumulación en el borde.** Cuando se maquinan materiales dúctiles a velocidades bajas o medias de corte, 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 cerca del filo cortante. Esta formación se llama acumulación en el borde (BUE). La formación de BUE es de naturaleza cíclica; se forma y crece, luego se vuelve inestable y se rompe. Gran parte de la acumulación de BUE se la lleva la viruta, a veces llevándose porciones de la cara inclinada de la herramienta con ella, lo cual reduce el tiempo de vida útil de la herramienta de corte. Sin embargo, algunas porciones del BUE pueden incorporarse a la superficie de trabajo recién formada, ocasionando que la superficie se vuelva rugosa.

Los tipos de viruta anteriormente mencionados originalmente los clasificó Ernst a finales de la década de 1930 [12]. Desde entonces, los metales disponibles utilizados en maquinado, herramientas de corte y velocidades de corte han aumentado y se puede identificar un cuarto tipo:

- d) **Viruta dentada** (el término **corte localizado** se utiliza también para este cuarto tipo de viruta). Estas virutas son semicontinuas en el sentido de que poseen una apariencia de diente de sierra que se produce por una formación cíclica de viruta de alta resistencia alternativa al corte seguida de una baja resistencia al corte. Este cuarto tipo de viruta está asociado más cercanamente con ciertos metales difíciles de maquinar, tales como las aleaciones de titanio, superaleaciones a base de níquel y aceros inoxidables austénicos cuando se maquinan a velocidad de corte elevadas. Sin embargo, dicho fenómeno también sucede en metales de trabajo comunes (por ejemplo, aceros) cuando éstos se cortan a altas velocidades [12].¹

21.3 RELACIONES DE FUERZA Y LA ECUACIÓN DE MERCHANT

Se puede definir varias fuerzas respecto al modelo de corte ortogonal. Con base en estas fuerzas, se puede definir el esfuerzo cortante, el coeficiente de fricción y algunas otras relaciones.

¹Una descripción más completa del tipo de viruta dentada puede encontrarse en Trent & Wright [12], pp. 348-367.

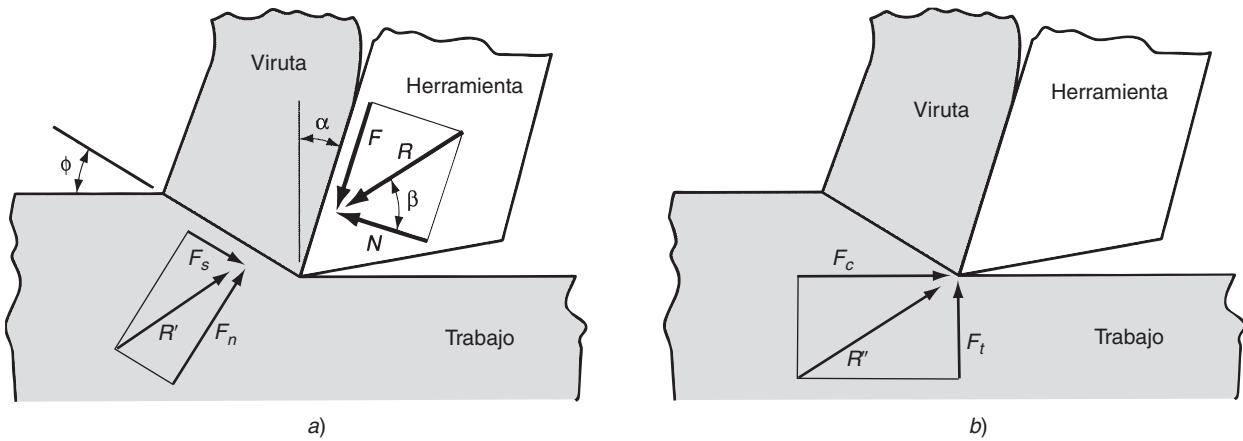


FIGURA 21.10 Fuerzas en el corte de metales: a) fuerzas que actúan sobre la viruta en el corte ortogonal y b) fuerzas que actúan sobre la herramienta y pueden medirse.

21.3.1 Fuerzas en el corte de metales

Considere las fuerzas que actúan en la viruta durante el corte ortogonal que se muestra en la figura 21.10a. Las fuerzas que la herramienta aplica contra la viruta se pueden separar en dos componentes mutuamente perpendiculares: fuerza de fricción y fuerza normal a la fricción. La **fuerza de fricción** F es la que resiste el flujo de la viruta a lo largo de la cara inclinada de la herramienta. La **fuerza normal a la fricción**, N , es perpendicular a la fuerza de fricción. Estos dos componentes se pueden utilizar para definir el coeficiente de fricción μ entre la herramienta y la viruta:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (21.5)$$

La fuerza de fricción y su fuerza normal se pueden sumar vectorialmente para formar una fuerza resultante R , la cual se orienta en un ángulo β , llamado ángulo de fricción. El ángulo de fricción se relaciona con el coeficiente de fricción de la manera siguiente:

$$\mu = \tan \beta \quad (21.6)$$

Además de las fuerzas de la herramienta que actúan sobre la viruta, el trabajo impone dos componentes de fuerza sobre la viruta: la fuerza cortante y la fuerza normal a la cortante. La **fuerza cortante** F_s es la fuerza que causa la deformación de corte que ocurre en el plano de corte, y la **fuerza normal a la cortante**, F_n , es normal a la fuerza cortante. Con base en la fuerza cortante se puede definir el esfuerzo cortante que actúa a lo largo del plano de corte entre el trabajo y la viruta:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (21.7)$$

donde A_s = área del plano de corte. Ésta se puede calcular como:

$$A_s = \frac{t_o w}{\sin \phi} \quad (21.8)$$

El esfuerzo cortante determinado por la ecuación 21.7 representa el nivel de esfuerzo requerido para realizar las operaciones de maquinado. Por lo tanto, este esfuerzo es igual a la resistencia cortante del material de trabajo ($\tau = S$) bajo las condiciones en las que ocurre el corte.

La suma vectorial de las dos fuerzas componentes F_s y F_n da por resultado la fuerza resultante R' . Para que las fuerzas que actúan sobre la viruta estén balanceadas, la resultante R' debe ser igual en magnitud, pero en dirección opuesta y colineal con la resultante R .

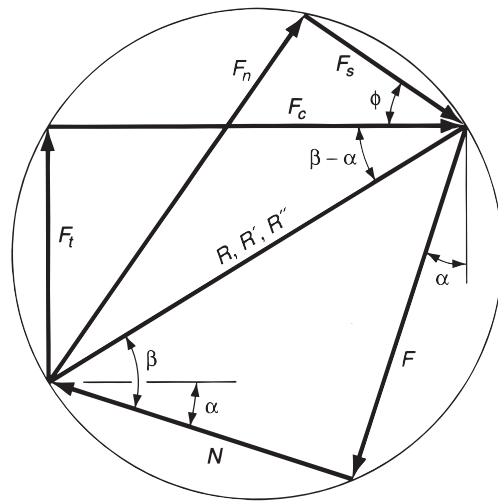


FIGURA 21.11 Diagrama de fuerzas en el que se muestran las relaciones geométricas entre F , N , F_s , F_c y F_t .

Ninguna de las cuatro fuerzas componentes F , N , F_s y F_n puede medirse directamente en una operación de maquinado, ya que las direcciones en las que están aplicadas varían en función a las diferentes formas de la herramienta y a las condiciones de corte. Sin embargo, es posible instrumentar en la herramienta de corte un dispositivo medidor de fuerzas llamado dinamómetro, de manera que se puedan medir directamente dos fuerzas componentes adicionales: fuerza de corte y fuerza de empuje. Estos dos componentes actúan sobre la herramienta: La **fuerza de corte** F_c que va en la dirección del corte, la misma dirección de la velocidad de corte v , y la **fuerza de empuje** F_p , es perpendicular a la fuerza de corte y está asociada con el espesor de la viruta antes del corte, t_o . La fuerza de corte y la fuerza de empuje se muestran en la figura 21.10b) junto con la fuerza resultante R' . Las direcciones respectivas de estas fuerzas son conocidas, así que los transductores de fuerza en el dinamómetro pueden alinearse en concordancia.

Se puede deducir ecuaciones para relacionar las cuatro fuerzas componentes que no pueden medirse con las dos fuerzas que pueden medirse. Utilizando el diagrama de fuerzas de la figura 21.11, se puede deducir las relaciones trigonométricas siguientes:

$$F = F_c \sen \alpha + F_t \cos \alpha \quad (21.9)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sen \alpha \quad (21.10)$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sen \phi \quad (21.11)$$

$$F_n = F_c \sen \phi + F_t \cos \phi \quad (21.12)$$

Si la fuerza de corte y la fuerza de empuje son conocidas, se puede usar estas cuatro ecuaciones para calcular estimaciones de la fuerza cortante, la fuerza de fricción y la fuerza normal a la de fricción, y con base en estos estimados se puede determinar el esfuerzo cortante y el coeficiente de fricción.

Se puede observar que en el caso especial del corte ortogonal, cuando el ángulo inclinado $\alpha = 0$, las ecuaciones 21.9 y 21.10 se reducen a $F = F_t$ y $N = F_c$, respectivamente. Entonces en este caso especial, la fuerza de fricción y su fuerza normal podrían ser medidas de manera directa por el dinamómetro.

EJEMPLO 21.2 Esfuerzo cortante en maquinado

En el ejemplo 21.1 suponga que la fuerza de corte y la fuerza de empuje se miden durante una operación de corte ortogonal con valores de $F_c = 1\,559\text{ N}$ y $F_t = 1\,271\text{ N}$. El ancho de la operación de corte ortogonal es $w = 3.0\text{ mm}$. Con base en estos datos, determine la resistencia al corte del material de trabajo.

Solución: A partir del ejemplo 21.1, el ángulo inclinado $\alpha = 10^\circ$ y el ángulo del plano de corte $\phi = 25.4^\circ$. La fuerza cortante se puede calcular de la ecuación 21.11:

$$F_s = 1\,559 \cos 25.4 - 1\,271 \sin 25.4 = 863 \text{ N}$$

El área del plano de corte está determinada por la ecuación 21.8:

$$A_s = \frac{(0.5)(3.0)}{\sin 25.4} = 3.497 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, el esfuerzo cortante que iguala la resistencia al corte del material de trabajo es:

$$\tau = S = \frac{863}{3.497} = 247 \text{ N/mm}^2 = 247 \text{ MPa}$$

Este ejemplo demuestra que la fuerza de corte y la fuerza de empuje están relacionadas con la resistencia al corte del material. Las relaciones se pueden establecer en una forma más directa. Al recordar que en la ecuación 21.7 la fuerza de corte $F_s = S A_s$, entonces el diagrama de fuerzas de la figura 21.11 se puede utilizar para deducir las ecuaciones siguientes:

$$F_c = \frac{S t_o w \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} = \frac{F_s \cos(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (21.13)$$

y

$$F_t = \frac{S t_o w \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} = \frac{F_s \sin(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (21.14)$$

Estas ecuaciones permiten estimar la fuerza de corte y las fuerzas de empuje en una operación de corte ortogonal, si se conoce la resistencia al corte del material de trabajo.

21.3.2 La ecuación de Merchant

Eugene Merchant dedujo una relación importante en el corte de metal [9]. La deducción está basada en la suposición de corte ortogonal, pero en su validez general se extiende a operaciones de maquinado en tres dimensiones. Merchant empezó con la definición de esfuerzo cortante, expresado mediante la siguiente relación deducida de la combinación de las ecuaciones 21.7, 21.8 y 21.11:

$$\tau = \frac{F_c \cos \phi - F_s \sin \phi}{(t_o w / \sin \phi)} \quad (21.15)$$

Merchant pensó que entre los ángulos posibles que emanan del borde cortante de la herramienta donde puede ocurrir la deformación de corte, hay un ángulo ϕ que predomina. En este ángulo, el esfuerzo cortante es justamente igual a la resistencia al corte del material de trabajo, y por esta causa la deformación cortante ocurre en este ángulo. El esfuerzo cortante es menor que la resistencia al corte para todos los demás ángulos posibles, por tanto la formación de viruta no puede ocurrir en otros ángulos. En efecto, el material de trabajo seleccionará un ángulo del plano de corte que minimiza la energía. Dicho ángulo se puede determinar tomando la derivada del esfuerzo cortante S en la ecuación 21.15 respecto a ϕ , e igualando la derivada a cero. Despejando ϕ , se obtiene la relación llamada ecuación de Merchant:

$$\phi = 45 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (21.16)$$

Una de las suposiciones en que se basa la ecuación de Merchant es que la resistencia al corte del material de trabajo es una constante a la que no le afecta la velocidad de deformación, la temperatura y otros factores. Dado que estas suposiciones no corresponden a las operaciones prácticas de maquinado, la ecuación 21.16 debe considerarse más como

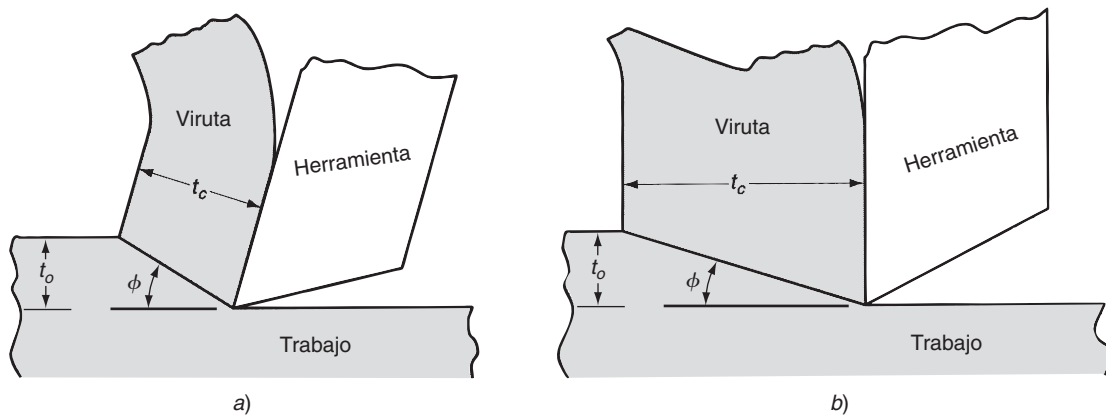


FIGURA 21.12 Efecto del ángulo del plano de corte ϕ ; a) a mayor ϕ , resulta una menor área del plano de corte; b) a menor ϕ , corresponde una mayor área del plano de corte. Note que el ángulo de inclinación es mayor en a), lo cual tiende a incrementar el ángulo cortante de acuerdo con la ecuación de Merchant.

una relación aproximada entre sus términos que un enunciado matemático preciso. No obstante, se considera su aplicación en el ejemplo siguiente.

EJEMPLO 21.3 Estimación del ángulo de fricción

Con los datos y resultados de los ejemplos anteriores, calcule: a) el ángulo de fricción usando la ecuación de Merchant y b) el coeficiente de fricción.

Solución: a) Del ejemplo 21.1, $\alpha = 10^\circ$ y $\phi = 25.4^\circ$. Al reacomodar la ecuación 21.16, el ángulo de fricción se puede estimar como sigue:

$$\beta = 2(45) + 10 - 2(25.4) = 49.2^\circ$$

b) El coeficiente de fricción está determinado por la ecuación 21.6:

$$\mu = \tan 49.2 = 1.16$$

Lecciones basadas en la ecuación de Merchant El valor real de la ecuación de Merchant radica en que define la relación general entre el ángulo de inclinación, la fricción herramienta-viruta y el ángulo del plano de corte. El ángulo del plano de corte puede incrementarse 1) aumentando el ángulo de inclinación y 2) disminuyendo el ángulo de fricción (o coeficiente de fricción) entre la herramienta y la viruta. El ángulo de inclinación puede incrementarse diseñando la herramienta adecuadamente y el ángulo de fricción puede reducirse utilizando un fluido lubricante de corte.

La importancia de incrementar el ángulo del plano de corte se puede apreciar en la figura 21.12. Si todos los otros factores permanecen constantes, un mayor ángulo del plano de corte significa una menor área de corte. Como la resistencia al corte se aplica a través de esta área, la fuerza de corte requerida para formar la viruta decrecerá cuando el área del plano de corte disminuya. Un ángulo más alto del plano de corte da como resultado energías y temperaturas de corte más bajas. Éstas son dos buenas razones para tratar de hacer el ángulo del plano de corte tan grande como sea posible durante el maquinado.

Aproximación al torneado por corte ortogonal El modelo ortogonal se puede usar para aproximar el torneado y algunas otras operaciones de maquinado con una punta, mientras el avance en estas operaciones sea menor respecto a la profundidad de corte. De esta manera la mayoría del corte tendrá lugar en la dirección del avance, y el corte en la nariz de la herramienta será despreciable. La figura 21.13 indica la conversión de una situación de corte a la otra.

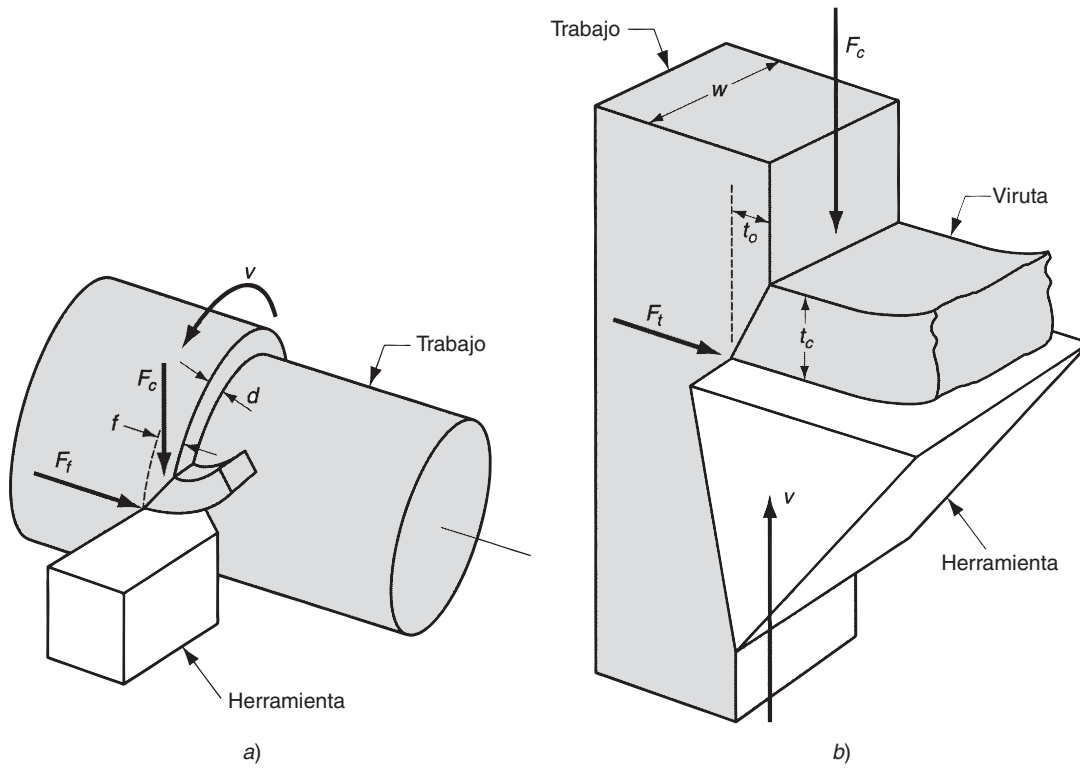


FIGURA 21.13 Aproximación del torneado por el modelo ortogonal: a) torneado y b) el corte ortogonal correspondiente.

TABLA 21.1 Clave de conversión: operación de torneado contra corte ortogonal.

Operación de torneado	Modelo de corte ortogonal
Avance $f =$	Espesor de la viruta antes del corte t_o
Profundidad $d =$	Ancho del corte w
Velocidad de corte $v =$	Velocidad de corte v
Fuerza de corte $F_c =$	Fuerza de corte F_c
Fuerza de avance $F_f =$	Fuerza de empuje F_t

La interpretación de las condiciones de corte es diferente en los dos casos. En el corte ortogonal, el espesor de la viruta antes del corte t_o corresponde al avance f en el torneado y el ancho de corte w corresponde a la profundidad de corte d en el torneado. Además, la fuerza de empuje F_t en el modelo ortogonal corresponde a la fuerza de avance F_f en torneado. La velocidad de corte y la fuerza de corte tienen la misma interpretación en los dos casos. La tabla 21.1 resume las conversiones.

21.4 RELACIONES ENTRE POTENCIA Y ENERGÍA EN EL MAQUINADO

Una operación de producción en maquinado requiere potencia. La fuerza de corte en una operación de maquinado puede exceder 1 000 N (algunos cientos de libras), como lo sugiere el ejemplo 21.2. Las velocidades típicas de corte son de varios cientos de metros

por minuto. El producto de la fuerza cortante y la velocidad dan la potencia (energía por unidad de tiempo) requerida para ejecutar la operación de maquinado:

$$P_c = F_c v \quad (21.17)$$

donde P_c = potencia de corte, N-m/s o W (ft-lb/min); F_c = fuerza de corte, N (lb); y v = velocidad de corte, m/s (ft/min). Las unidades en el sistema acostumbrado en Estados Unidos pueden convertirse a caballos de fuerza dividiendo ft-lb/min entre 33 000. De aquí que:

$$HP_c = \frac{F_c v}{33\,000} \quad (21.18)$$

donde, HP_c = potencia de corte en caballos de fuerza, hp. 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.

$$P_g = \frac{P_c}{E} \quad \text{o} \quad HP_g = \frac{HP_c}{E} \quad (21.19)$$

donde P_g = potencia bruta del motor de la máquina herramienta en W; HP_g = caballos de fuerza brutos; y E = eficiencia mecánica de la máquina herramienta. El valor típico de E para máquinas herramientas es de aproximadamente 90%.

Muchas veces es útil convertir la potencia en potencia por unidad de volumen de corte del metal. A ésta se le llama **potencia unitaria**, P_u (o **caballos de fuerza unitarios**, HP_u), y se define como:

$$P_u = \frac{P_c}{R_{MR}} \quad \text{o} \quad HP_u = \frac{HP_c}{R_{MR}} \quad (21.20)$$

donde R_{MR} = tasa de remoción del material, mm³/s (in³/min). La tasa de remoción de material se puede calcular como el producto de $v t_o w$. Ésta es la ecuación 21.1, usando las conversiones de la tabla 21.1. La potencia unitaria también se conoce como la **energía específica**, U .

$$U = P_u = \frac{P_c}{R_{MR}} = \frac{F_c v}{v t_o w} = \frac{F_c}{t_o w} \quad (21.21)$$

Las unidades para la energía específica son típicamente N-m/mm³ (in-lb/in³). Sin embargo, la última expresión en la ecuación 21.21 sugiere que las unidades puedan reducirse a N-m/mm³ o J/mm³ (in-lb/in³).

EJEMPLO 21.4 Relaciones de potencia en maquinado

Continuando con los ejemplos anteriores, se determinarán la potencia de corte y la energía específica requerida para desempeñar el proceso de maquinado si la velocidad de corte = 100 m/min. Al resumir los datos y los resultados de los ejemplos anteriores, $t_o = 0.50$ mm, $w = 3.0$ mm, $F_c = 1\,557$ N.

Solución: A partir de la ecuación 21.18, la potencia de la operación es

$$P_c = (1557 \text{ N})(100 \text{ m/min}) = 155\,700 \text{ N-m/min} = 155\,700 \text{ J/min} = 2\,595 \text{ J/s} = 2\,595 \text{ W}$$

La energía específica se calcula a partir de la ecuación 21.21:

$$U = \frac{155\,700}{100(10^3)(3.0)(0.5)} = \frac{155\,700}{150\,000} = 1.038 \text{ N-m/mm}^3$$

La potencia unitaria y la energía específica proporcionan una medida útil de cuánta potencia (o energía) se requiere para remover una pulgada cúbica de metal durante el maquinado. Utilizando dicha medida, es posible comparar los diferentes materiales de trabajo en términos de sus requerimientos de potencia y energía. La tabla 21.2 representa un listado de los valores de los caballos de fuerza unitarios y de la energía específica para algunos materiales de trabajo determinados.

TABLA 21.2 Valores de los caballos de fuerza unitarios y energía específica para materiales de trabajo seleccionados usando herramientas de corte afiladas, y espesor de la viruta antes del corte $t_o = 0.25$ mm (0.010 in).

Material	Dureza Brinell	Energía específica U o potencia unitaria P_u		Caballos de fuerza unitaria en HP_u hp/(in ³ /min)
		N-m/mm ³	in-lb/in ³	
Acero al carbono	150-200	1.6	240 000	0.6
	201-250	2.2	320 000	0.8
	251-300	2.8	400 000	1.0
Aceros aleados	200-250	2.2	320 000	0.8
	251-300	2.8	400 000	1.0
	301-350	3.6	520 000	1.3
	351-400	4.4	640 000	1.6
Hierros fundidos	125-175	1.1	160 000	0.4
	175-250	1.6	240 000	0.6
Acero inoxidable	150-250	2.8	400 000	1.0
Aluminio	50-100	0.7	100 000	0.25
Aleaciones de aluminio	100-150	0.8	120 000	0.3
Latón	100-150	2.2	320 000	0.8
Bronce	100-150	2.2	320 000	0.8
Aleaciones de magnesio	50-100	0.4	60 000	0.15

Datos recopilados de [5], [7], [10] y otras fuentes.

Los valores de la tabla 21.2 se basan en dos suposiciones: 1) la herramienta de corte está afilada y 2) el espesor de viruta antes del corte $t_o = 0.25$ mm (0.010 in). Si no se satisfacen estas suposiciones, se tiene que hacer algunos ajustes. En una herramienta desgastada la potencia requerida para desempeñar el corte es más grande, y esto se refleja en valores de caballos de fuerza unitarios y energía específica más grande. Como una guía aproximada, los valores en la tabla deben multiplicarse por un factor entre 1.00 y 1.25, dependiendo del grado de uso de la herramienta. Para herramientas afiladas el factor es 1.00. Para herramientas casi completamente usadas en operaciones de acabado el factor es alrededor de 1.10, y para herramientas casi completamente usadas en operaciones de desbaste primario el factor es de 1.25.

El espesor de la viruta antes del corte t_o afecta también los valores de los caballos de fuerza unitarios y de la energía específica. Al reducirse t_o , aumentan los requerimientos de la potencia unitaria. A esta relación se le llama algunas veces el *efecto de tamaño*. Por ejemplo en el esmerilado, donde las virutas son extremadamente pequeñas en comparación con muchas otras operaciones de maquinado, se requieren valores muy altos de energía específica. Los valores de U y HP_u en la tabla 21.2 se pueden usar aun para estimar los caballos de fuerza unitarios y energía, en situaciones donde t_o no sea igual a 0.25 mm (0.010 in), mediante un factor de corrección que considere cualquier diferencia en el espesor de la viruta antes del corte. La figura 21.14 proporciona los valores de este factor de corrección en función a t_o . Los caballos de fuerza unitarios y la energía específica de la tabla 21.2 deben multiplicarse por el factor apropiado de corrección cuando t_o sea diferente a 0.25 mm (0.010 in).

Debe hacerse notar que, además del afilado de la herramienta y el efecto de tamaño, otros factores influyen también en los valores de los caballos de fuerza unitarios y de la energía específica para una operación dada. Estos otros factores incluyen el ángulo de inclinación, la velocidad de corte y el fluido de corte. Al aumentar el ángulo de inclinación o la velocidad de corte, o al añadir un fluido de corte, los valores de U y HP_u se reducen ligeramente. Para los efectos de este libro, en los ejercicios que se encuentran al final del capítulo se puede ignorar los efectos de estos factores adicionales.

La distribución de la energía de corte entre la herramienta, el trabajo y la viruta varían con la velocidad de corte, como se indica en la figura 21.15. A velocidades bajas, una porción significativa de la energía total se absorbe en la herramienta. Sin embargo, a velocidades más elevadas (y a niveles de energía más altos), el movimiento rápido de la viruta

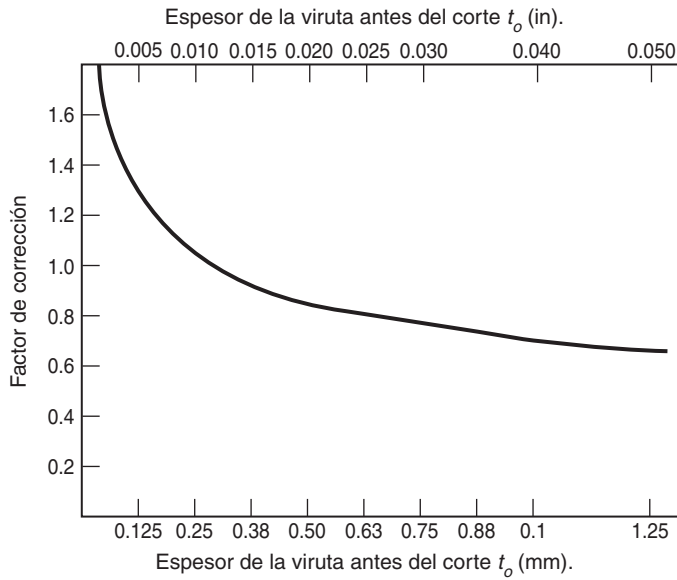
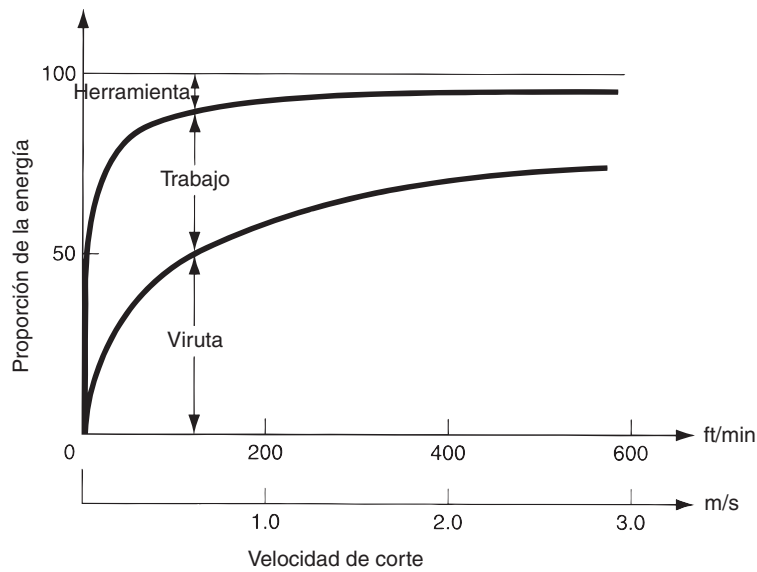


FIGURA 21.14 Factor de corrección para los caballos de fuerza unitarios en hp y la energía específica cuando los valores del espesor de la viruta antes del corte t_o son diferentes de 0.25 mm (0.010 in.).

FIGURA 21.15 Distribución típica de la energía total de corte entre la herramienta, el trabajo y la viruta en función de la velocidad de corte. (Basada en datos de [8]).



a través de la cara inclinada de la herramienta ofrece menos oportunidad a que el calor generado en la zona primaria de corte sea conducido a través de la interfaz herramienta-viruta hacia la herramienta. De aquí que, la proporción de energía total absorbida por la herramienta se reduce y la mayor parte se la lleva la viruta.

21.5 TEMPERATURA DE CORTE

Casi toda la energía que se consume en el maquinado (aproximadamente 98%) es convertida en calor. Este calor puede hacer que las temperaturas sean muy altas en la interfaz herramienta-viruta; arriba de los 600 °C (1 100 °F) es muy común. La energía restante (alrededor de 2%) se retiene como energía elástica en la viruta.

Las temperaturas de corte son importantes debido a que las elevadas temperaturas 1) reducen la vida útil de la herramienta, 2) generan viruta caliente que representa grandes riesgos para el operador y 3) pueden producir imprecisiones en las dimensiones de la pieza de trabajo debidas a la expansión térmica del material de trabajo. En esta sección, se analizan los métodos para el cálculo y medición de temperatura en las operaciones de maquinado.

21.5.1 Métodos analíticos para el cálculo de la temperatura de corte

Existen varios métodos analíticos para estimar la temperatura de corte. Las referencias [1], [3], [8] y [14], presentan algunos de ellos. Se describe el método de Cook [3]. Este método se dedujo 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 interfaz herramienta-viruta durante el maquinado:

$$\Delta T = \frac{0.4U}{\rho C} \left(\frac{vt_o}{K} \right)^{0.333} \quad (21.22)$$

donde ΔT = aumento de la temperatura media en la interfaz herramienta-viruta, °C (°F); U = energía específica en la operación, N-m/mm³ o J/mm³ (in-lb/in³); v = velocidad de corte, m/s (in/s); t_o = espesor de la viruta antes del corte, m (in); ρC = calor específico volumétrico del material de trabajo, J/mm³-°C (in-lb/in³-°F); K = difusividad térmica del material de trabajo, m²/s (in²/s).

EJEMPLO 21.5 Temperatura de corte

Para la energía específica obtenida en el ejemplo 21.4, calcule el incremento en la temperatura por encima de la temperatura ambiente de 20 °C. Utilice los datos proporcionados en los ejemplos anteriores en este capítulo: $v = 100$ m/min, $t_o = 0.50$ mm. Además, el calor específico volumétrico para el material de trabajo = $3.0 (10^{-3})$ J/mm³-°C y la difusividad térmica = $50(10^{-6})$ m²/s (= 50 mm²/s).

Solución: La velocidad de corte debe convertirse a las unidades de mm/s: $v = (100 \text{ m/min})(10^3 \text{ mm/m})/(60 \text{ s/min}) = 1667 \text{ mm/s}$. La ecuación 21.22 se puede usar ahora para calcular el aumento de la temperatura media:

$$\Delta T = \frac{0.4(1.038)}{3.0(10^{-3})} \text{°C} \left(\frac{1667(0.5)}{50} \right)^{0.333} = (138.4)(2.552) = 353 \text{°C}$$

Al añadir esta temperatura al ambiente, la temperatura de corte resultante es $20 + 353 = 373 \text{°C}$. ■

21.5.2 Medición de la temperatura de corte

Se han creado métodos experimentales para la medición de temperaturas en maquinado. La técnica de medición más frecuentemente usada es el **termopar herramienta-viruta**. Este termopar toma la herramienta y la viruta como dos metales diferentes que forman una junta de termopar. Al conectar apropiadamente las terminales eléctricas a la herramienta y a la pieza de trabajo (que está conectada a la viruta), se puede monitorear la diferencia de potencial generado por la interfaz herramienta-viruta durante el corte mediante un potenciómetro registrador u otro dispositivo de adquisición de datos apropiado. La salida de voltaje resultante del termopar herramienta-viruta (medido en mV) se puede convertir al valor de temperatura correspondiente mediante ecuaciones de calibración para la combinación particular herramienta-trabajo.

Los investigadores han utilizado el termopar herramienta-viruta para estudiar la relación entre la temperatura y las condiciones de corte como velocidad y avance. Trigger

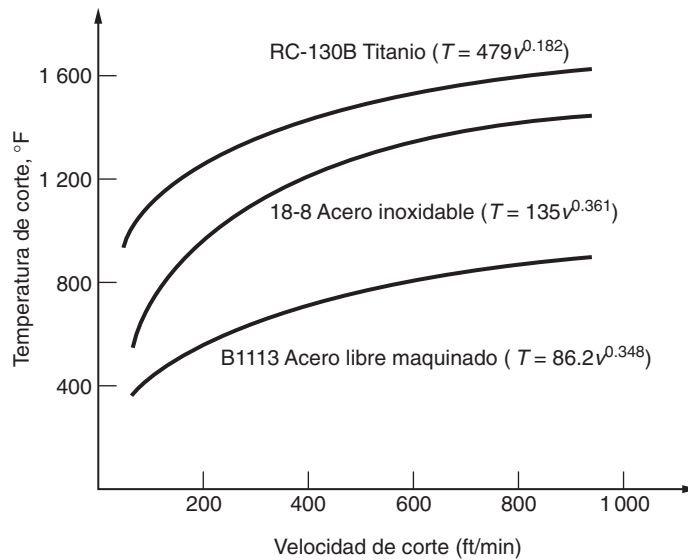


FIGURA 21.16
Temperaturas de corte
medidas experimentalmente
y graficadas contra la
velocidad para tres
materiales de trabajo; se
muestra conformidad con la
ecuación 21.23. (Basada en
datos de [8]).²

[13] determinó la relación entre velocidad y temperatura y obtuvo la siguiente fórmula general:

$$T = K v^m \quad (21.23)$$

donde T = temperatura medida en la interfaz herramienta-viruta y v = velocidad de corte. Los parámetros K y m dependen de las condiciones de corte (diferentes a v) y del material de trabajo. En la figura 21.16 se muestran las gráficas de la temperatura contra la velocidad de corte para varios materiales de trabajo, con ecuaciones similares a la ecuación 21.23 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. Los resultados empíricos tienden a apoyar la validez general de la ecuación de Cook, ecuación 21.22.

REFERENCIAS

- [1] Boothroyd, G. y Knight, W.A., *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, 2a. ed., Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1989.
- [2] Chao, B. T., y Trigger, K. J., "Temperature Distribution at the Tool-Chip Interface in Metal Cutting", *ASME Transactions*, vol. 77, octubre de 1955, pp. 1107-1121.
- [3] Cook, N., "Tool Wear and Tool Life", *ASME Transactions, J. Engrg. for Industry*, Vol. 95, noviembre de 1973, pp. 931-938.
- [4] DeGarmo, E.P., Black, J.T. y Kohser, R.A., *Materials and Processes in Manufacturing*, 9a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.
- [5] Drozda, T.J. y Wick, C. (eds.). *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., Vol. I: *Machining*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1983.
- [6] Kalpakjian, S. y Schmid, R., *Manufacturing Processes form Engineering Materials*, 4a. ed., Prentice Hall/Pearson, Upper Saddle River, N.J., 2003.
- [7] Lindberg, R. A., *Processes and Materials of Manufacture*, 4a. ed., Allyn and Bacon, Inc., Boston, Mass., 1990.
- [8] Loewen, E. G. y Shaw, M. C., "On the Analysis of Cutting Tool Temperatures", *ASME Transactions*, Vol. 76, núm. 2, febrero de 1954, pp. 217-225.
- [9] Merchant, M. E., "Mechanics of the Metal Cutting Process: II. Plasticity Conditions on Orthogonal Cutting". *Journal of applied Physics*, Vol. 16 junio de 1945, pp. 318-324.
- [10] Schey, J.A., *Introduction to Manufacturing Processes*, 3a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.

²Las unidades reportadas en el artículo ASME de Loewen y Shaw [8] fueron °F para temperaturas de corte y ft/min para la velocidad de corte. Se ha conservado esas unidades en las gráficas y ecuaciones de la figura.

- [11] Shaw, M.C., *Metal Cutting Principles*, 2a. ed., Oxford University Press, Inc., Oxford, Inglaterra, 2005.
- [12] Trent, E. M. y Wright, P. K., *Metal Cutting*, 4a. ed., Butterworth Heinemann, Boston, Mass., 2000.
- [13] Trigger, K. J., "Progress Report No. 2 on Tool-Chip Interface Temperatures", *ASME Transactions*, Vol. 71, núm. 2, febrero de 1949, pp. 163-174.
- [14] Trigger, K. J. y Chao, B. T., "An Analytical Evaluations of Metal Cutting Temperatures", *ASME Transactions*, Vol. 73, núm. 1, enero de 1951, pp. 57-68.

PREGUNTAS DE REPASO

- 21.1. ¿Cuáles son las tres categorías básicas de procesos de remoción de material?
- 21.2. ¿En qué se distingue el maquinado de otros procesos de manufactura?
- 21.3. Identifique algunas de las razones por la que el maquinado es comercial y tecnológicamente importante.
- 21.4. Mencione los tres procesos de maquinado más comunes.
- 21.5. ¿Cuáles son las dos categorías básicas de herramientas de corte en maquinado? Dé dos ejemplos de operaciones de maquinado que use cada uno de los tipos de herramientas.
- 21.6. Identifique los parámetros de una operación de maquinado que se incluyen en el conjunto de las condiciones de corte.
- 21.7. Defina la diferencia entre las operaciones de desbaste primario y las de acabado en maquinado.
- 21.8. ¿Qué es una máquina herramienta?
- 21.9. ¿Qué es una operación de corte ortogonal?
- 21.10. ¿Por qué es útil el modelo de corte ortogonal en el análisis del maquinado metálico?
- 21.11. Mencione y describa brevemente los cuatro tipos de viruta que se producen en el corte de metales.
- 21.12. Identifique las cuatro fuerzas que actúan sobre la viruta en el modelo de corte metálico ortogonal, pero que no pueden medirse directamente en una operación.
- 21.13. Identifique las dos fuerzas que pueden medirse en el modelo de corte metálico ortogonal.
- 21.14. ¿Cuál es la relación entre el coeficiente de fricción y el ángulo de fricción en el modelo de corte ortogonal?
- 21.15. Describa con palabras qué dice la ecuación de Merchant.
- 21.16. ¿Cómo es la potencia requerida en una operación de corte en relación con la fuerza de corte?
- 21.17. ¿Qué es la energía específica en el maquinado de metales?
- 21.18. ¿Qué significa el término efecto de tamaño en el corte de metales?
- 21.19. ¿Qué es un termopar herramienta-viruta?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 17 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

- 21.1. ¿Cuál de los procesos de manufactura siguientes se clasifica como procesos de remoción de material? (dos respuestas correctas): a) colado, b) estirado, c) extrusión, d) forjado, e) molido, f) maquinado, g) moldeado, h) prensado e i) rechazado.
- 21.2. ¿La máquina herramienta "torno" se utiliza para realizar cuál de las siguientes operaciones de manufactura?: a) escariado, b) taladrado, c) aplanado, d) fresado o e) torneado.
- 21.3. ¿Con cuál de las formas geométricas siguientes está la operación de taladrado más íntimamente relacionada?: a) cilindro externo, b) plano liso, c) agujero redondo, d) cuerdas de tornillo o e) esfera.
- 21.4. Si las condiciones de corte en una operación de torneado son velocidad de corte = 300 ft/min, avance = 0.010 in/rev y profundidad de corte = 0.100 in, ¿cuál de las siguientes es la tasa de remoción de material?: a) 0.025 in³/min, b) 0.3 in³/min, c) 3.0 in³/min, o d) 3.6 in³/min.
- 21.5. ¿Una operación de desbaste primario involucra generalmente a cuál de las siguientes combinaciones de condiciones de corte?: a) alta v , f y d ; b) alta v , baja f y d ; c) baja v , alta f y d , o d) baja v , f y d , donde v = velocidad de corte, f = avance y d = profundidad.
- 21.6. ¿Cuáles de las siguientes son las características del modelo de corte ortogonal? (tres respuestas mejores): a) se utiliza un filo de corte circular, b) se utiliza una herramienta de corte múltiple, c) se utiliza una herramienta de una sola punta, d) solamente dos dimensiones juegan un papel activo en el análisis, e) el filo de corte es paralelo a la dirección de la velocidad de corte, f) el filo del corte es perpendicular a la dirección de la velocidad del corte y g)

los dos elementos de la forma de la herramienta son los ángulos de inclinación y de relieve.

- 21.7. ¿Cuál de las siguientes es la relación de espesor de viruta?: a) t_o/t_c , b) t_o/t_e , c) f/d o d) t_o/w , donde t_c = espesor de la viruta después del corte, t_o = espesor de la viruta antes del corte, f = avance, d = profundidad y w = ancho del corte.
- 21.8. ¿Cuál de los cuatro tipos de viruta se podría esperar en una operación de torneado conducida a baja velocidad de corte sobre un material de trabajo frágil? a) continua, b) continua con acumulación en el filo, c) discontinua, o d) dentada.
- 21.9. De acuerdo con la ecuación de Merchant, ¿cuál de los siguientes resultados podría tener un incremento en el ángulo de inclinación, si los otros factores permanecen igual (dos mejores respuestas): a) disminución en el ángulo de fricción, b) disminución de los requerimientos de potencia, c) disminución en el ángulo del plano de corte, d) incremento en el temperatura de corte, e) incremento en el ángulo del plano de corte?

- 21.10. Al usar el modelo de corte ortogonal para aproximar una operación de torneado, ¿el espesor de la viruta antes del corte t_o corresponde a cuál de los siguientes condiciones del torneado? a) profundidad de corte d , b) avance f o c) velocidad v .
- 21.11. ¿Cuál de los siguientes metales podría tener generalmente los caballos de fuerza unitarios más bajos en una operación de maquinado? a) aluminio, b) latón, c) hierro fundido o d) acero.
- 21.12. ¿Para cuál de los siguientes valores de espesor de viruta antes del corte t_o esperaría usted que fuera más grande la energía específica? a) 0.010 in. b) 0.025 in. c) 0.12 mm o d) 0.50 mm.
- 21.13. ¿Cuál de las siguientes condiciones de corte tiene un efecto mayor en la temperatura de corte? a) avance o b) velocidad?

PROBLEMAS

Formación de viruta y fuerzas de maquinado

- 21.1. En una operación ortogonal de corte, la herramienta tiene un ángulo de inclinación de 15° . El espesor de la viruta antes del corte es de 0.30 mm y el corte produce un espesor de viruta deformada de 0.65 mm. Calcule a) el ángulo del plano de corte y b) la deformación cortante para la operación.
- 21.2. En el problema 21.1, suponga que el ángulo de inclinación cambiara a $\alpha = 0^\circ$. Suponiendo que el ángulo de fricción permaneciera igual, determine a) el ángulo plano de corte, b) el espesor de la viruta y c) la deformación cortante para la operación.
- 21.3. En una operación de corte ortogonal, la herramienta de 0.250 in de ancho tiene un ángulo de inclinación de 5° . El torno se configura para que el espesor de la viruta antes del corte sea de 0.010 in. Después del corte, el espesor de la viruta deformada se mide y tiene un valor de 0.027 in. Calcule a) el ángulo del plano de corte y b) la deformación cortante para la operación.
- 21.4. En una operación de torneado, la velocidad de la aguja se configura para proporcionar una velocidad de corte de 1.8 m/s. El avance y profundidad del corte son 0.30 mm y 2.6 mm, respectivamente. El ángulo de inclinación de la herramienta es de 8° . Después del corte, el espesor de la viruta deformada es de 0.49 mm. Determine a) el ángulo plano de corte, b) la deformación cortante y c) la velocidad de remoción del material. Utilice el modelo de corte ortogonal como una aproximación del proceso de torneado.
- 21.5. La fuerza de corte y la fuerza de empuje en una operación de corte ortogonal son 1 470 N y 1 589 N, respectivamente. El ángulo de inclinación es de 5° , el ancho del corte es de 5.0 mm, el espesor de la viruta antes del corte es de 0.6 y la relación de espesor de la viruta es de 0.38. Determine a) la resistencia cortante del material de trabajo y b) el coeficiente de fricción en la operación.
- 21.6. La fuerza de corte y la fuerza de empuje se han medido en una operación de corte ortogonal y son de 300 lb y 291 lb, respectivamente. El ángulo de inclinación es de 10° , el ancho de corte de 0.200 in, el espesor de la viruta antes del corte de 0.015 y la relación de espesor de la viruta de 0.4. Determine a) la resistencia al corte del material de trabajo y b) el coeficiente de fricción de la operación.
- 21.7. Una operación de corte ortogonal se realiza usando un ángulo de inclinación de 15° , espesor de la viruta antes del corte de 0.012 in y ancho del corte de 0.100 in. La relación de espesor de la viruta medida después del corte es de 0.55. Determine a) el espesor de la viruta después del corte, b) el ángulo de corte, c) el ángulo de fricción, d) el coeficiente de fricción y e) la deformación cortante.
- 21.8. La operación de corte ortogonal descrita en el problema 21.7 involucra un material de trabajo cuya resistencia al corte es de 40 000 lb/in². Con base en sus respuestas al problema anterior, calcule a) la fuerza cortante, b) la fuerza de corte, c) la fuerza de empuje y d) la fuerza de fricción.
- 21.9. En una operación de corte ortogonal, el ángulo de inclinación es de -5° , el espesor de la viruta antes del corte es de 0.2 mm y el ancho del corte es de 4.0 mm. La relación de viruta es de 0.4. Determine a) el espesor de la viruta después del corte, b) el ángulo de corte, c) el ángulo de fricción, d) el coeficiente de fricción y e) la deformación cortante.
- 21.10. La resistencia al corte de cierto material de trabajo es de 50 000 lb/in². Una operación de corte ortogonal se realiza utilizando una herramienta con un ángulo de inclinación de 20° con las siguientes condiciones de corte: velocidad de 100 ft/min, espesor de la viruta antes del corte de 0.015 in y ancho del corte de 0.150 in. La relación de espesor de la viruta resultante es de 0.50. Determine a) el ángulo del pla-

- no de corte, *b*) la fuerza cortante, *c*) la fuerza de corte y la fuerza de empuje y *d*) la fuerza de fricción.
- 21.11. Repite el problema 21.10 excepto porque el ángulo de inclinación se modificó a -5° y la relación de espesor de la viruta resultante es de 0.35.
- 21.12. Una barra de acero de carbono de 7.64 in de diámetro tiene una resistencia a la tensión de 65 000 lb/in² y una resistencia al corte de 45 000 lb/in². El diámetro se reduce utilizando una operación de torneado a una velocidad de corte de 400 ft/min. El avance es de 0.011 in/rev y la profundidad de corte es de 0.120 in. El ángulo de inclinación de la herramienta en la dirección del flujo de la viruta es de 13° . Las condiciones de corte dan como resultado una relación de viruta de 0.52. Utilizando el modelo ortogonal como una aproximación al torneado, determine *a*) el ángulo del plano de corte, *b*) la fuerza de corte, *c*) la fuerza cortante y la fuerza de avance, y *d*) el coeficiente de fricción entre la herramienta y la viruta.
- 21.13. Acero al bajo carbono con una resistencia a la tensión de 300 MPa y una resistencia al corte de 220 MPa se corta en una operación de torneado con una velocidad de corte de 3.0 m/s. El avance es de 0.20 mm/rev y la profundidad del corte es de 3.0 mm. El ángulo de inclinación de la herramienta es de 5° en la dirección del flujo de la viruta. La relación de viruta resultante es de 0.45. Utilizando el modelo ortogonal como una aproximación al torneado, determine *a*) el ángulo del plano de corte, *b*) la fuerza de corte, *c*) la fuerza cortante y la fuerza de avance.
- 21.14. Una operación de torneado se hace con un ángulo de inclinación de 10° , un avance de 0.010 in/rev y una profundidad de corte de 0.100 in. Se sabe que la resistencia al corte del material de trabajo es de 50 000 lb/in² y la relación de espesor de la viruta medida después del corte es de 0.40. Determine la fuerza de corte y la fuerza del avance. Use el modelo ortogonal de corte como una aproximación del proceso de torneado.
- 21.15. Demuestre cómo la ecuación 21.3 se deduce de la definición de la relación de viruta, ecuación 21.2 y figura 21.5*b*).
- 21.16. Demuestre cómo la ecuación 21.4 se deduce a partir de la figura 21.6.
- 21.17. Deduzca las ecuaciones de fuerza para F , N , F_s y F_n (ecuaciones 21.9 a 21.12 en el texto), utilizando el diagrama de fuerzas de la figura 21.11.

Potencia y energía en maquinado

- 21.18. En una operación de torneado de acero inoxidable con una dureza de 200 HB, la velocidad de corte de 200 m/min, el avance de 0.25 mm/rev y la profundidad del corte de 7.5 mm, ¿cuánta potencia consumirá el torno para llevar a cabo esta operación si su eficiencia mecánica es de 90%? Utilice la tabla 21.2 para obtener el valor de energía específico apropiado.
- 21.19. En el problema anterior, calcule los requerimientos de potencia del torno si el avance es de 0.50 mm/rev.
- 21.20. En una operación de torneado con aluminio, las condiciones de corte son las siguientes: velocidad de corte de 900 ft/min, avance de 0.020 in/rev y profundidad de corte de 0.250 in. ¿Cuántos caballos de fuerza requiere el motor si el torno tiene una eficiencia mecánica = 87%? Utilice la tabla 21.2 para obtener el valor de caballos de fuerza unitaria apropiado.
- 21.21. En una operación de maquinado con acero simple al carbono cuya dureza de Brinell es de 275 HB, la velocidad de corte se configura a 200 m/min y la profundidad de corte es de 6.0 mm. El motor del torno consume 25 kW y su eficiencia mecánica es de 90%. Utilizando el valor de energía específica apropiada de la tabla 21.2, determine el avance máximo que se puede obtener en esta operación.
- 21.22. Se va a llevar a cabo una operación de torneado en un torno de 20 hp que tiene una eficiencia de 87%. El corte de desbaste primario se hace sobre una aleación de acero cuya dureza está en el rango de 325 a 335 HB. La velocidad de corte es de 375 ft/min. El avance es de 0.030 in/rev y la profundidad de corte es de 0.150 in. Con base en estos valores, ¿puede llevarse a cabo este trabajo en un torno de 20 hp? Utilice la tabla 21.2 para obtener el valor de caballos de fuerza unitaria más apropiado.
- 21.23. Suponga que la velocidad de corte de los problemas 21.7 y 21.8 es de 200 ft/min. A partir de sus respuestas en estos problemas, encuentre *a*) los caballos de fuerza consumidos en la operación, *b*) la tasa de remoción del material en in³/min, *c*) los caballos de fuerza unitaria, hp-min/in³, *d*) la energía específica (in-lb/in³).
- 21.24. En el problema 21.12, el torno tiene una eficiencia mecánica de 0.83. Determine *a*) los caballos de fuerza consumidos por la operación de torneado, *b*) los caballos de fuerza que deben generarse por el torno y *c*) los caballos de fuerza unitaria y la energía específica para el material de trabajo en esta operación.
- 21.25. En una operación de torneado sobre un acero de bajo carbono (175 BHN), las condiciones de corte son: velocidad de corte de 400 ft/min, avance de 0.010 in/rev y profundidad de corte de 0.075 in. El torno tiene una eficiencia mecánica de 0.85. Con base en los valores de los caballos de fuerza unitaria de la tabla 21.2, determine *a*) los caballos de fuerza consumidos por la operación de torneado, *b*) los caballos de fuerza que debe generar el torno.
- 21.26. Repite el problema 21.25, excepto porque el avance es de 0.0075 in/rev y el material de trabajo es acero inoxidable (dureza Brinell = 240 HB).
- 21.27. Una operación de torneado se lleva a cabo en aluminio (100 BHN). Las condiciones de corte son las siguientes: velocidad de corte de 5.6 m/s, el avance de 0.25 mm/rev y la profundidad de corte de 2.0 mm. El torno tiene una eficiencia mecánica de 0.85. Con base en los valores de energía específica de la tabla 21.2 determine *a*) la potencia de corte y *b*) la potencia bruta en la operación de torneado, en Watts.
- 21.28. Resuelva el problema 21.27, pero con las modificaciones siguientes: velocidad de corte de 1.3 m/s, avance de 0.75 mm/rev y profundidad de 4.0 mm. Observe que a pesar de que la potencia usada en esta operación es prácticamente la misma que en el problema anterior, la velocidad de remoción de metal es aproximadamente 40% más grande.
- 21.29. Una operación de torneado se realiza en un torno corriente, usando una herramienta con un ángulo de inclinación igual a cero en la dirección del flujo de la viruta. El material de

trabajo es una aleación de acero con dureza Brinell de 325. El avance es de 0.015 in/rev, la profundidad de corte es de 0.125 in y la velocidad de corte es de 300 ft/min. Después del corte la relación del espesor de la viruta es de 0.45. *a)* Usando el valor aproximado de energía específica de la tabla 21.2, calcule los caballos de fuerza del motor si el torno tiene una eficiencia de 85%. *b)* Con base en los caballos de fuerza, calcule un estimado de la fuerza de corte para la operación de torneado. Use el modelo de corte ortogonal como una aproximación del proceso de torneado.

- 21.30. Un torno ejecuta una operación de torneado sobre una pieza de trabajo de 6 in de diámetro. La resistencia al corte del

trabajo es de 40 000 lb/in² y la resistencia a la tensión es de 60 000 libras/in². El ángulo de inclinación de la herramienta es de 6°. La máquina está configurada para que la velocidad de corte sea de 700 ft/min, el avance es de 0.015 in/rev y la profundidad es de 0.090 in. El espesor de la viruta después de corte es de 0.025 in. Determine: *a)* los caballos de fuerza que requiere la operación, *b)* los caballos de fuerza unitaria de este material bajo estas condiciones, y *c)* los caballos de fuerza unitaria listada en la tabla 21.2 para una t_o de 0.010 in. Utilice el modelo de corte ortogonal como una aproximación del proceso de torneado.

Temperatura de corte

- 21.31. Se lleva a cabo un corte ortogonal en un metal cuyo calor específico volumétrico es de 1.0 J/g·°C, una densidad de 2.9 g/cm³ y una difusividad térmica de 0.8 cm²/s. Se utilizan las condiciones de corte siguientes: la velocidad de corte es de 4.5 m/s, el espesor de la viruta sin cortar es de 0.25 mm y el ancho del corte es de 2.2 mm. La fuerza de corte tiene un valor de 1170 N. Utilizando la ecuación de Cook, determine la temperatura de corte si la temperatura ambiente es de 22 °C.

- 21.32. Considere una operación de torneado llevada a cabo sobre acero cuya dureza es de 225 HB a una velocidad de 3.0 m/s, un avance de 0.25 mm y una profundidad de 4.0 mm. Utilizando los valores de las propiedades térmicas que se encuentran en las tablas y definiciones de la sección 4.1 y el valor de la energía específica apropiada de la tabla 21.2, calcule un estimado de la temperatura de corte utilizando la ecuación de Cook. Suponga que la temperatura ambiente es de 20 °C.

- 21.33. Una operación de corte ortogonal se lleva a cabo con un cierto metal cuyo calor específico volumétrico es de 110 in-lb/in³-°F, y una difusividad térmica de 0.140 in²/s. Se utilizan las condiciones de corte siguientes: velocidad de corte de 350 ft/min, espesor de la viruta antes del corte de 0.008 in y ancho del corte de 0.100 in. La fuerza de corte es de 200 lb. Utilizando la ecuación de Cook, determine la temperatura de corte si la temperatura ambiente es de 70 °F.

- 21.34. Se desea estimar la temperatura de corte de una aleación de acero cuya dureza es de 240 Brinell. Utilice el valor de energía específica apropiado de la tabla 21.2 y calcule la temperatura de corte por medio de la ecuación de Cook de una operación de torneado en la que se utilizan las con-

diciones de corte siguientes: la velocidad de corte es de 500 ft/min, el avance es de 0.005 in/rev y la profundidad de corte es de 0.070 in. El material de trabajo tiene un calor específico volumétrico de 210 in-lb/in³-°F y una difusividad térmica de 0.16 in²/s. Suponga que la temperatura ambiente es de 88 °F.

- 21.35. Una operación de maquinado ortogonal remueve metal a 1.8 in³/min. La fuerza de corte en el proceso es de 300 lb. El material de trabajo tiene una difusividad térmica de 0.18 in²/s y un calor específico volumétrico de 124 in-lb/in³-°F. Si el avance $f = t_o = 0.010$ in y el ancho del corte es de 0.100 in, utilice la fórmula de Cook para calcular la temperatura de corte en la operación dado que la temperatura ambiente es de 70 °F.

- 21.36. Una operación de torneado utiliza una velocidad de corte de 200 m/min, un avance de 0.25 mm/rev y una profundidad de corte de 4.00 mm. La difusividad térmica del material de trabajo es de 20 mm²/s y el calor específico volumétrico es de 3.5 (10⁻³) J/mm³-°C. Si un termo-acoplador herramienta-viruta mide 700 °C de incremento de temperatura arriba de la temperatura ambiente (20 °C), determine la energía específica del material de trabajo para esta operación.

- 21.37. Durante un operación de torneado, se utilizó un termo-acoplador herramienta-viruta para medir la temperatura de corte. Se obtuvieron los datos de temperatura siguientes durante los cortes a tres diferentes velocidades de corte (el avance y la profundidad se mantuvieron constantes): 1) $v = 100$ m/min, $T = 505$ °C, 2) $v = 130$ m/min, $T = 552$ °C, 3) $v = 160$ m/min, $T = 592$ °C. Determine una ecuación para la temperatura en función de la velocidad de corte que esté en la forma de la ecuación de Trigger, ecuación 21.23.

22

OPERACIONES DE MAQUINADO Y MÁQUINAS HERRAMIENTA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 22.1 Torneado y operaciones afines
 - 22.1.1 Condiciones de corte en el torneado
 - 22.1.2 Operaciones relacionadas con el torneado
 - 22.1.3 El torno mecánico
 - 22.1.4 Otros tornos y máquinas de torneado
 - 22.1.5 Máquinas perforadoras
- 22.2 Taladrado y operaciones afines
 - 22.2.1 Condiciones de corte en el taladrado
 - 22.2.2 Operaciones relacionadas con el taladrado
 - 22.2.3 Prensas taladradoras
- 22.3 Fresado
 - 22.3.1 Tipos de operaciones de fresado
 - 22.3.2 Condiciones de corte en fresado
 - 22.3.3 Máquinas fresadoras
- 22.4 Centros de maquinado y centros de torneado
- 22.5 Otras operaciones de maquinado
 - 22.5.1 Perfilado y cepillado
 - 22.5.2 Escariado
 - 22.5.3 Aserrado
- 22.6 Maquinado de alta velocidad

El maquinado es el más versátil y preciso de todos los procesos de manufactura por su capacidad de producir una diversidad de piezas y características geométricas (por ejemplo, roscas de tornillos, dientes de engrane, superficies lisas). La fundición también puede producir una variedad de formas, pero carece de la precisión y exactitud del maquinado. En este capítulo, se describen las operaciones de maquinado y las máquinas herramienta utilizadas para llevarlas a cabo. La nota histórica 22.1 proporciona una breve historia de la evolución de la tecnología de las máquinas-herramienta.

Para introducir el tema en este capítulo, se ofrece un panorama acerca de la creación de la configuración geométrica de las piezas mediante el maquinado. Las piezas maquinadas se clasifican en rotacionales y no rotacionales (figura 22.1). Una pieza de trabajo

Nota histórica 22.1 Tecnología de las máquinas herramienta.

La remoción de material como un medio de manufactura se remonta a los tiempos prehistóricos cuando los seres humanos aprendieron a tallar la madera y esculpir piedras para hacer implementos de caza y labranza. Hay evidencias arqueológicas de que los antiguos egipcios usaron mecanismos rotatorios de palos y cuerdas para taladrar agujeros.

La aparición de las máquinas herramienta modernas se relaciona estrechamente con la Revolución Industrial. Cuando James Watt diseñó su máquina de vapor en Inglaterra alrededor de 1763, uno de los problemas técnicos que enfrentó fue hacer la perforación del cilindro lo suficientemente preciso para prevenir que el vapor se escapara alrededor del pistón. John Wilkinson construyó una máquina perforadora con una rueda movida por agua alrededor de 1775, la cual permitió a Watt construir su máquina de vapor. Esta máquina perforadora se reconoce frecuentemente como la primera máquina herramienta.

Otro inglés, Henry Maudsley, inventó el primer torno cortador de tornillos alrededor de 1800. Aunque se había usado el torno de madera por muchos siglos, la máquina de Maudsley adicionó una herramienta deslizante mecanizada,

con la cual se pudieron desempeñar operaciones de avance y roscado con mucha mayor precisión que por cualquier medio anterior.

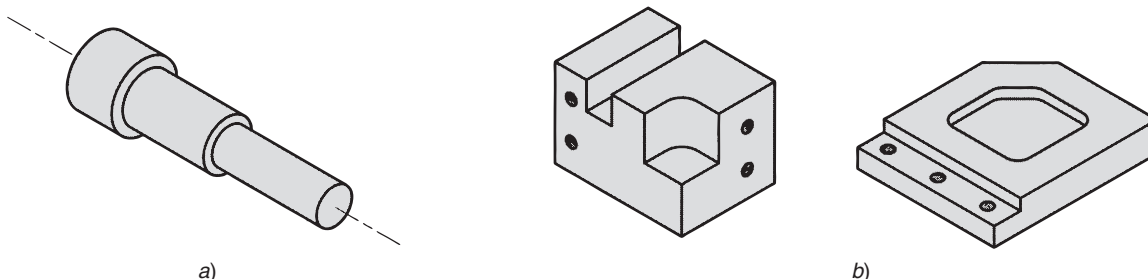
A Eli Withney se le acredita la invención de la primera máquina fresadora en Estados Unidos, alrededor de 1818. El desarrollo del cepillo y el perfilador ocurrió en Inglaterra entre 1800 y 1835, como respuesta a la necesidad de hacer componentes destinados a la máquina de vapor, al equipo textil y a otras máquinas asociadas con la Revolución Industrial. La prensa taladradora mecanizada fue inventada por James Nasmyth alrededor de 1846, la cual permitió taladrar agujeros de precisión en el metal.

La mayoría de las máquinas convencionales de perforado, tornos, máquinas fresadoras, cepillos, perfiladoras y prensas taladradoras usadas hoy en día tienen el mismo diseño básico que las versiones antiguas, creadas durante los dos últimos siglos. Los centros modernos de maquinado, que son máquinas herramienta capaces de ejecutar más de un tipo de operación de corte, se introdujeron en la década de 1950, después de que se inventó el control numérico (nota histórica 39.1).

rotacional tiene la forma de cilindro o disco. En la operación característica que produce estas formas, una herramienta de corte elimina material de una pieza de trabajo giratoria. Los ejemplos incluyen el torneado y el perforado. El taladro se relaciona estrechamente, sólo que en la mayoría de las operaciones de taladrado se crea una forma cilíndrica interna y la herramienta es la que gira (en lugar del trabajo). Una pieza de trabajo **no rotacional** (también llamada **prismática**) es una pieza en forma de bloque o placa, como se ilustra en la figura 22.1b). Esta forma se logra por movimientos lineales de la pieza de trabajo combinada con movimientos lineales o rotatorios de la herramienta. Las operaciones en esta categoría incluyen fresado, perfilado, cepillado y aserrado.

Cada operación de maquinado produce una forma característica debido a dos factores: 1) los movimientos relativos entre la herramienta y la pieza de trabajo y 2) la forma de la herramienta de corte. Estas operaciones se clasifican según la forma de la pieza creada, ya sea por generación o por formado. En la **generación**, la forma de la pieza de trabajo está determinada por la trayectoria del avance de la herramienta de corte. La trayectoria seguida por la herramienta durante su movimiento de avance se imparte a la superficie de trabajo a fin de crear la forma. Los ejemplos de generación de formas de trabajo en

FIGURA 22.1 Las piezas maquinadas se clasifican en: a) rotacionales o b) no rotacionales. Aquí se muestran como bloques y piezas planas.



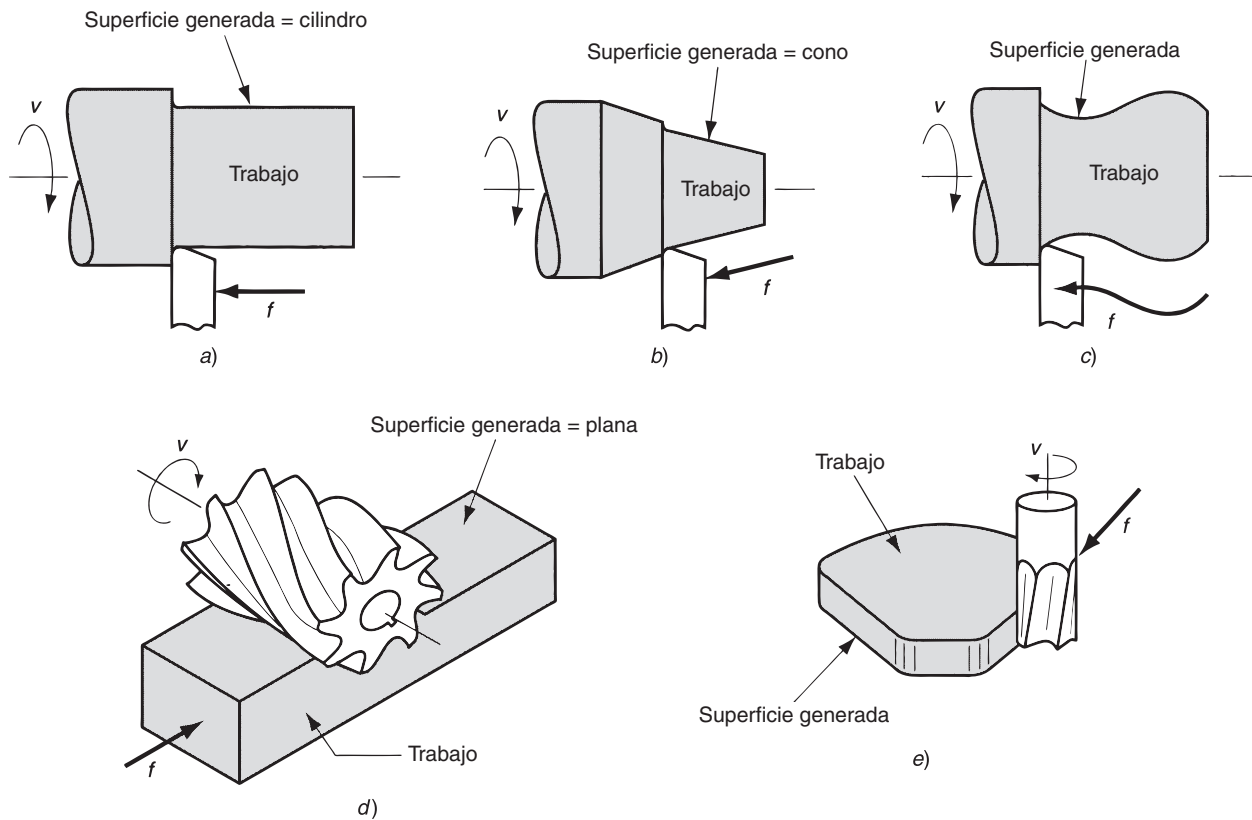


FIGURA 22.2 Generación de formas en maquinado: a) torneado recto, b) torneado ahusado, c) torneado de contornos, d) fresado plano y e) fresado perfilado.

maquinado incluyen el torneado recto, el torneado ahusado, el torneado de contornos, el fresado periférico y el fresado de perfiles, todos ellos ilustrados en la figura 22.2. En cada una de estas operaciones la remoción de material se realiza por el movimiento de la velocidad en la operación, pero la forma de la pieza se determina por el movimiento de avance. La trayectoria de avance puede involucrar variaciones en la profundidad o el ancho de corte durante la operación. Por ejemplo, en el torneado de contorno y las operaciones de fresado de perfiles que se muestran en la figura, el movimiento de avance produce cambios en la profundidad y el ancho, respectivamente, conforme el corte prosigue.

En el **formado**, la herramienta de corte forma la configuración geométrica de la pieza. En efecto, el filo de corte de la herramienta tiene el reverso de la forma a producir en la superficie de la pieza. El torneado de formas, el taladrado y el escariado son ejemplos de este caso. En estas operaciones, ilustradas en la figura 22.3, la herramienta de corte imparte su forma al trabajo a fin de crear la forma de la pieza. Las condiciones de corte en el formado incluyen generalmente el movimiento primario de velocidad combinado con un movimiento de avance que se dirige directamente hacia el trabajo. La profundidad de corte en esta categoría de maquinado se refiere a la penetración final dentro del trabajo una vez que termina el movimiento de avance.

El formado y la generación se combinan algunas veces en una operación, como se ilustra en la figura 22.4 para el corte de roscas sobre un torno y el tallado de ranuras en una fresadora. En el corte de roscas la forma puntiaguda de la herramienta de corte determina la forma de las cuerdas, pero la gran velocidad de avance genera las cuerdas. En el ranurado (también llamado fresado de ranura), el ancho del cortador determina el ancho de la rendija, pero el movimiento de avance crea la ranura.

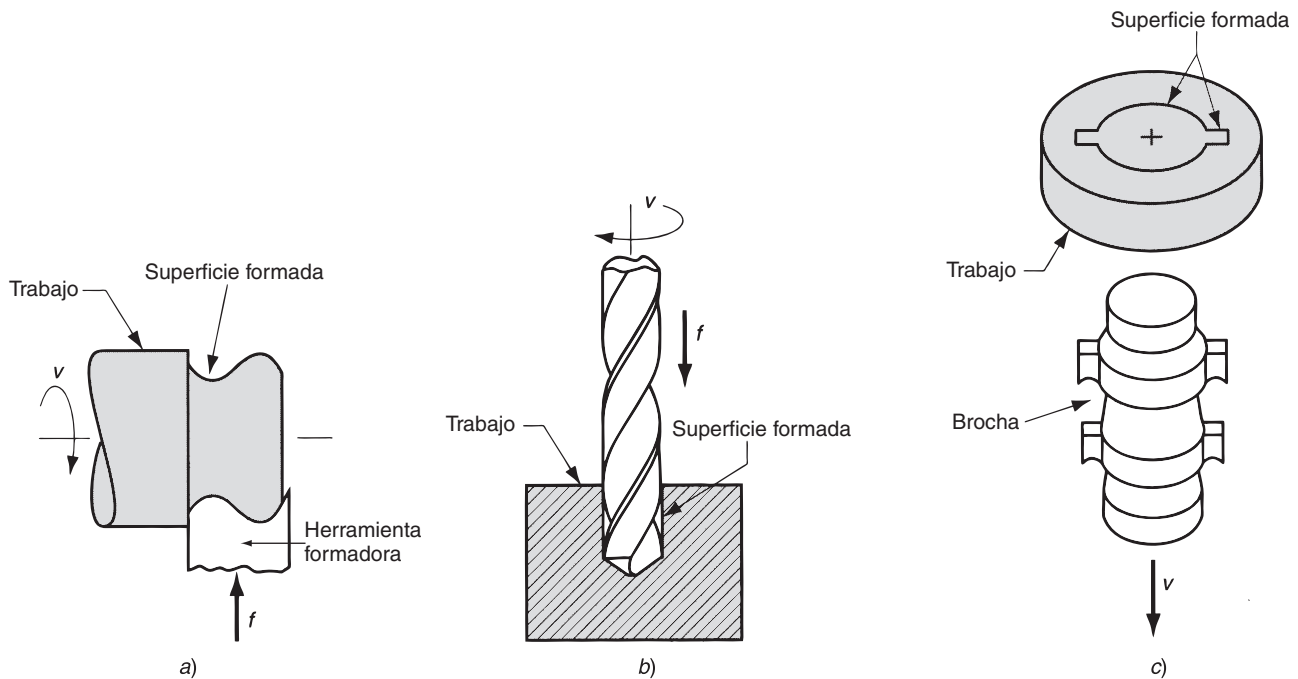


FIGURA 22.3 Creación de formas en maquinado: a) torneado de formas, b) taladrado y c) brochado.

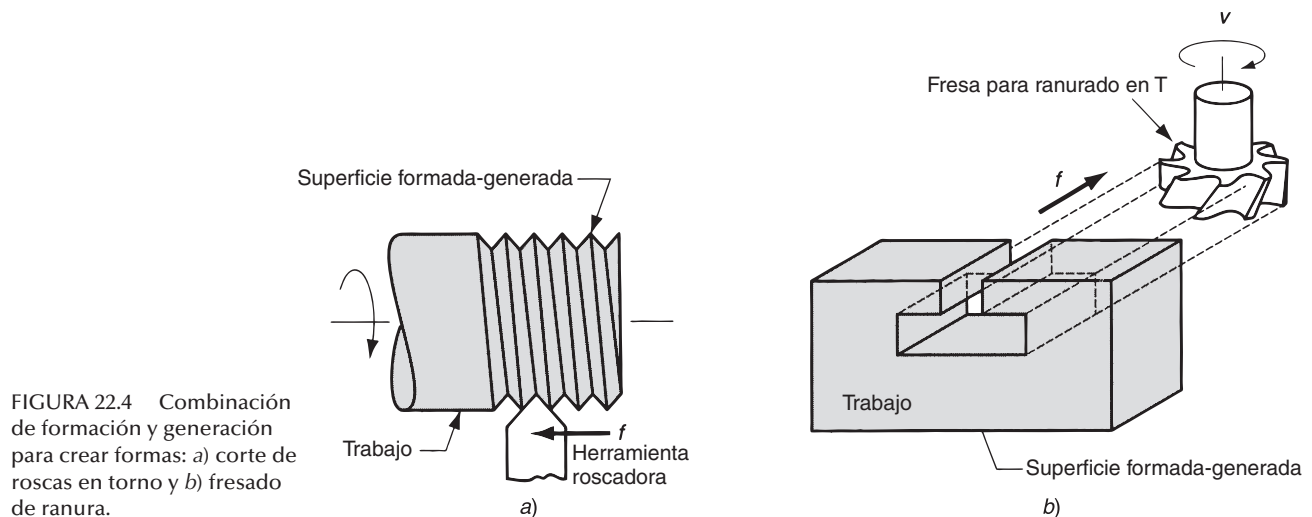


FIGURA 22.4 Combinación de formación y generación para crear formas: a) corte de roscas en torno y b) fresado de ranura.

22.1 TORNEADO Y OPERACIONES AFINES

El **torneado** es un proceso de maquinado en el cual una herramienta de una sola punta 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, como se ilustra en las figuras 21.3a), 21.5 y 22.5. El torneado se lleva a cabo tradicionalmente en una

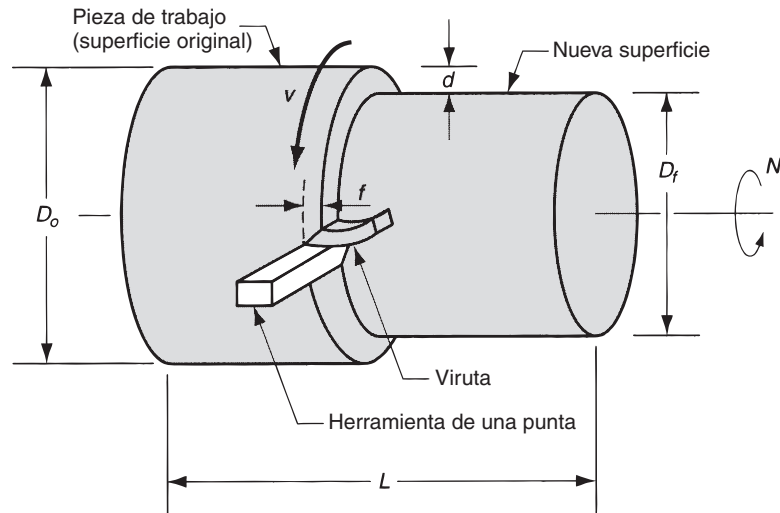


FIGURA 22.5 Operación de torneado.

máquina herramienta llamada **torno**, la cual suministra la potencia para tornear la pieza a una velocidad de rotación determinada con avance de la herramienta y profundidad de corte especificados.

22.1.1 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

$$N = \frac{v}{\pi D_o} \quad (22.1)$$

donde N = velocidad de rotación, rev/min; v = velocidad de corte, m/min (ft/min); y D_o = diámetro original de la pieza, m (ft).

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 :

$$D_f = D_o - 2d \quad (22.2)$$

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

$$f_r = Nf \quad (22.3)$$

donde f_r = velocidad de avance, mm/min (in/min); y f = avance, mm/rev (in/rev).

El tiempo para maquinarse una pieza de trabajo cilíndrica de un extremo a otro está dado por

$$T_m = \frac{L}{f_r} \quad (22.4)$$

donde T_m = tiempo de maquinado en min; y L = longitud de la pieza cilíndrica en mm (in). Un cálculo más directo del tiempo de maquinado lo proporciona la ecuación siguiente:

$$T_m = \frac{\pi D_o L}{f v} \quad (22.5)$$

donde D_o = diámetro del trabajo, mm (in); L = longitud de la pieza de trabajo, mm (in); f = avance, mm/rev (in/rev); y v = velocidad de corte, mm/min (in/min). Como práctica general, 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 sobrerrecorrido de la herramienta.

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

$$R_{MR} = v f d \quad (22.6)$$

donde R_{MR} = velocidad de remoción de material, mm³/min (in³/min). En esta ecuación las unidades de f se expresan simplemente como mm (in), ignorando el efecto de la rotación del torneado. Asimismo, se debe tomar las medidas necesarias para asegurarse de que las unidades de la velocidad sean consistentes con las de f y d .

22.1.2 Operaciones relacionadas con el torneado

Además del torneado, se puede realizar una gran variedad de operaciones de maquinado en un torno. En la figura 22.6 se ilustran las siguientes:

- a) **Careado.** La herramienta se alimenta radialmente sobre el extremo del trabajo rotatorio para crear una superficie plana.
- 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.
- 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 pieza torneada.
- 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.
- 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 “chaflan”.
- 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 pieza. A esta operación se le llama algunas veces **partición**.
- g) **Roscado.** Una herramienta puntiaguda avanza linealmente a través de la superficie externa de la pieza 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.
- 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 pieza.
- 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.
- j) **Moleteado.** Ésta 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.

Las herramientas de una sola punta (sección 23.3.1) 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 una sola punta. Una operación de roscado se ejecuta usando una herramienta plana sencilla, diseñada con la

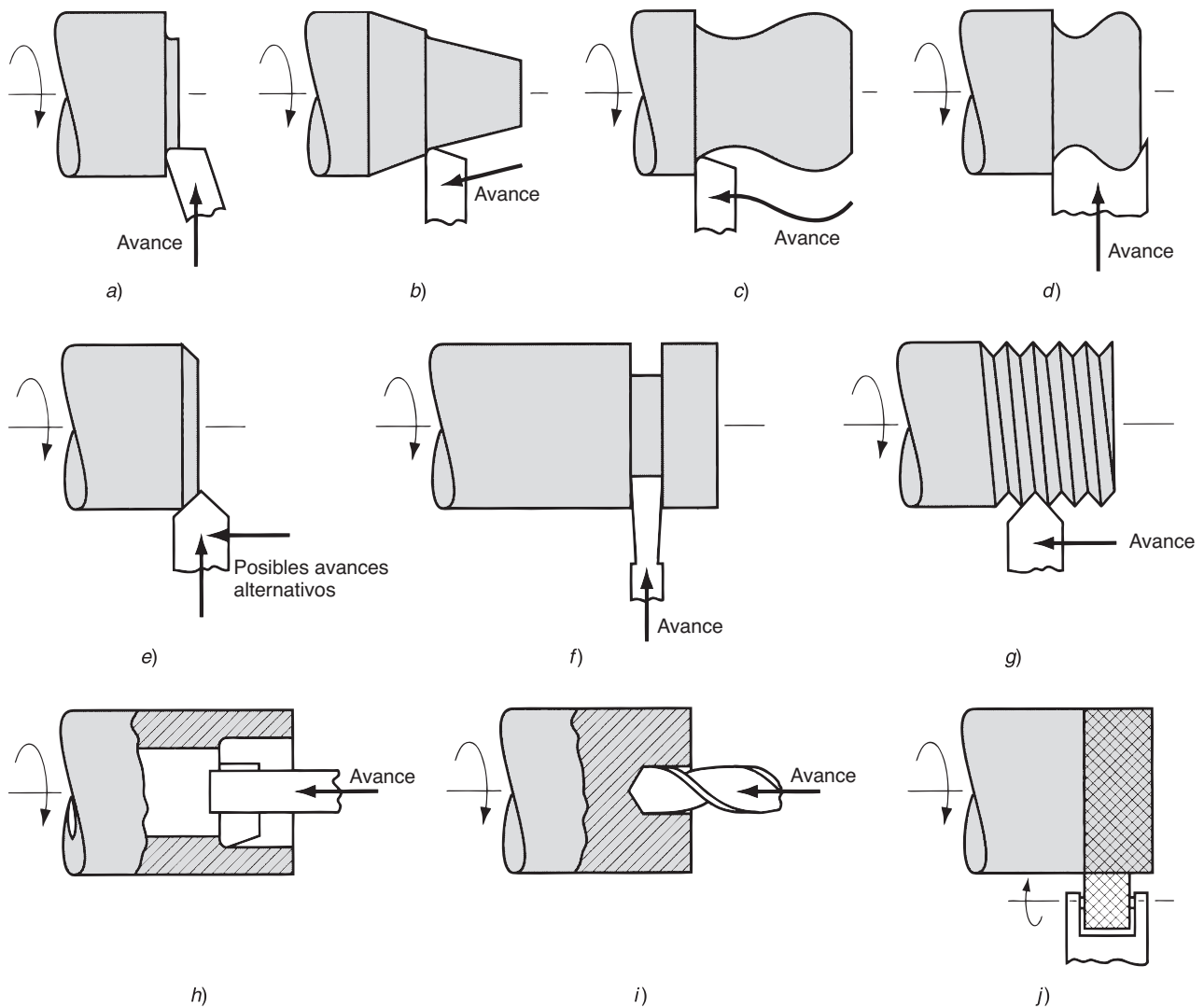


FIGURA 22.6 Otras operaciones diferentes al torneado que se realizan en un torno: a) careado, b) torneado ahusado, c) torneado de contornos, d) torneado de formas, e) achaflanado, f) tronzado, g) roscado, h) perforado, i) taladrado y j) moleteado.

forma de la cuerda a producir. Ciertas operaciones requieren herramientas diferentes a las de una sola punta. 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 pieza de trabajo. Una herramienta de tronzado es básicamente una herramienta de forma. El taladrado se realiza mediante una broca (sección 23.3.2). 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 contra la superficie de la pieza rotatoria con la presión suficiente para imprimir el patrón sobre la superficie de trabajo.

22.1.3 El torno mecánico

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

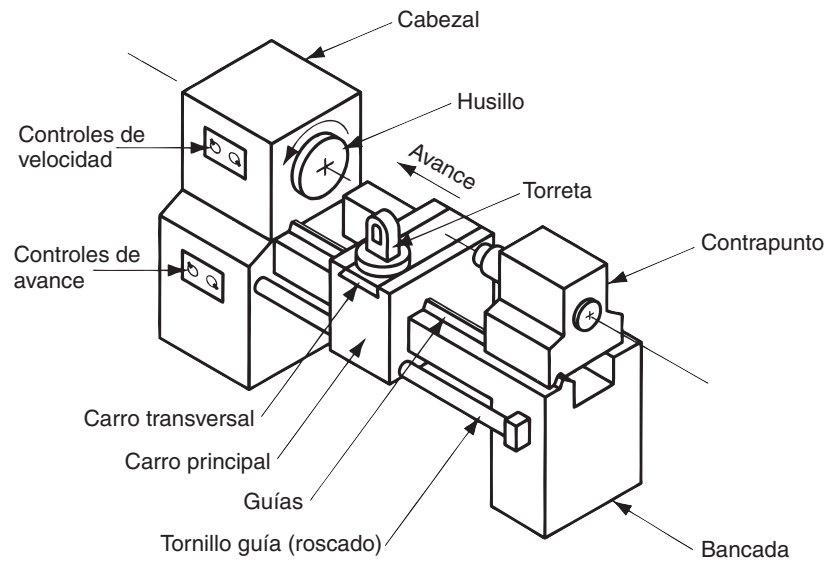


FIGURA 22.7 Diagrama de un torno mecánico, en que se indican sus componentes principales.

Tecnología del torno mecánico. La figura 22.7 es un diagrama de un torno mecánico en el que se muestran sus componentes principales. El **cabezal** contiene la unidad de transmisión que mueve el husillo que hace girar al trabajo. Opuesta al cabezal está el **contrapunto**, en el cual se monta un centro para sostener el otro extremo de la pieza de trabajo.

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 respecto al eje del husillo. Las guías se construyen sobre la **bancada** del torno que provee un armazón rígido para la máquina herramienta.

El carro se mueve por medio de un tornillo guía 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. 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.

El torno mecánico convencional y la mayoría de otras máquinas descritas en esta sección son **máquinas de torneado 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 el volteo y la máxima distancia admisible entre centros. El **volteo** es el diámetro máximo de la pieza de trabajo que puede girar 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 pieza 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. Por ejemplo, un torno de 350 mm × 1.2 m (14 in × 48 in) indica que el volteo es de 350 mm (14 in) y la máxima distancia entre centros es de 1.2 m (48 in).

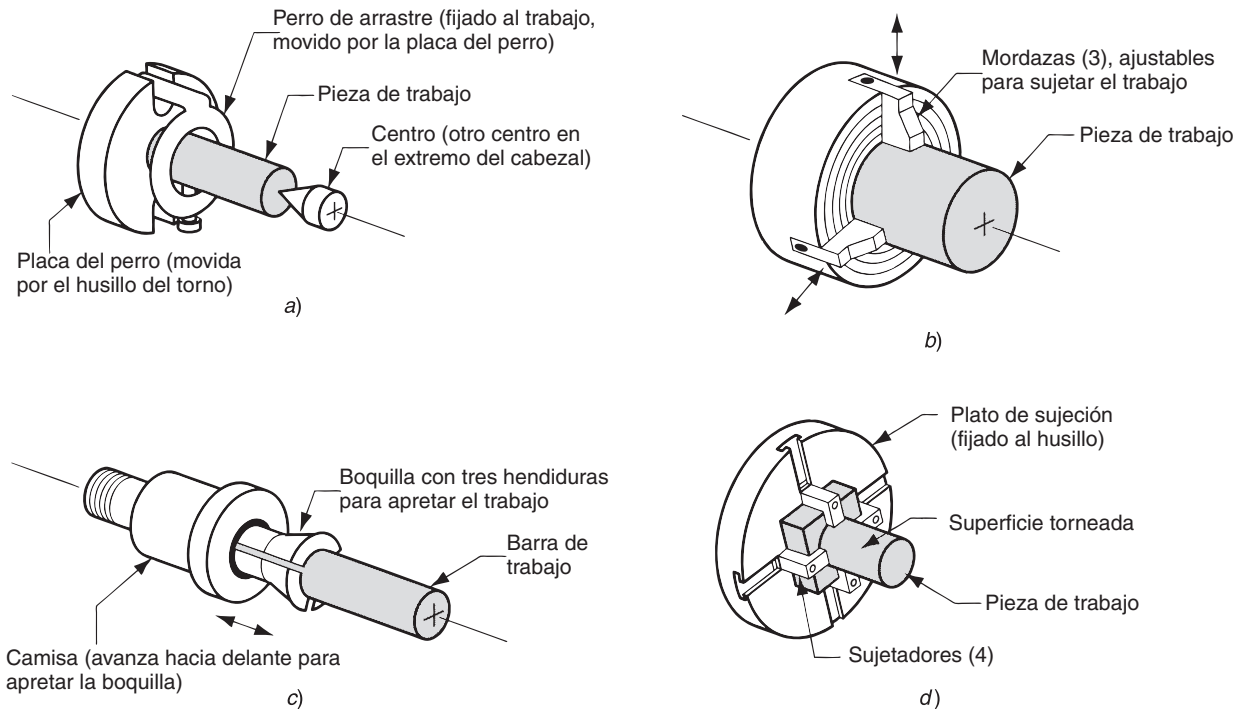


FIGURA 22.8 Cuatro métodos para sujetar el trabajo en un torno: a) montaje del trabajo entre centros usando un perro de arrastre, b) mandril de tres mordazas, c) boquilla y d) plato de sujeción para piezas de trabajo no cilíndricas.

Métodos de sujeción del trabajo al torno Se usan cuatro métodos comunes para sujetar las piezas de trabajo en el torneado, que a su vez consisten en varios mecanismos para sujetar el trabajo, centrarlo y mantenerlo en posición sobre el eje del husillo y hacerlo girar. Los métodos se ilustran en la figura 22.8 y son: a) montura de trabajo entre centros, b) mandril, c) boquilla y d) plato de sujeción.

La sujeción de trabajo **entre centros** se refiere al uso de dos centros, uno en el cabezal y el otro en el contrapunto, como se muestra en la figura 22.8a). Este método es apropiado para piezas 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 del trabajo. El centro del contrapunto puede ser un centro "vivo" o un centro "muerto". Un **centro vivo** gira en un cojinete del contrapunto, de manera que no hay rotación relativa entre el trabajo 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 de la punta. 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**, figura 22.8b), tiene varios diseños, con tres o cuatro mordazas para sostener la pieza cilíndrica sobre su diámetro exterior. Las mordazas se diseñan frecuentemente para sostener también el diámetro interior de una pieza tubular. Un mandril **autocentrante** 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 piezas con baja relación entre la longitud y el diámetro, la sujeción

de la pieza 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.

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 22.8c). 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, 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**, figura 22.8d), es un dispositivo para sujetar el trabajo que se fija al husillo del torno y se usa para sostener piezas con formas irregulares. Debido a su forma irregular, estas piezas 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 pieza.

22.1.4 Otros tornos y máquinas de torneado

Además de los tornos mecánicos, se han inventado 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 y 6) el torno controlado numéricamente.

El torno para herramientas y el torno de velocidad están íntimamente 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 principal ni carro 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.

Un 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 remplazado 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.

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

Una máquina de barra es similar al torno de mandril, excepto porque 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, una operación de corte retira la

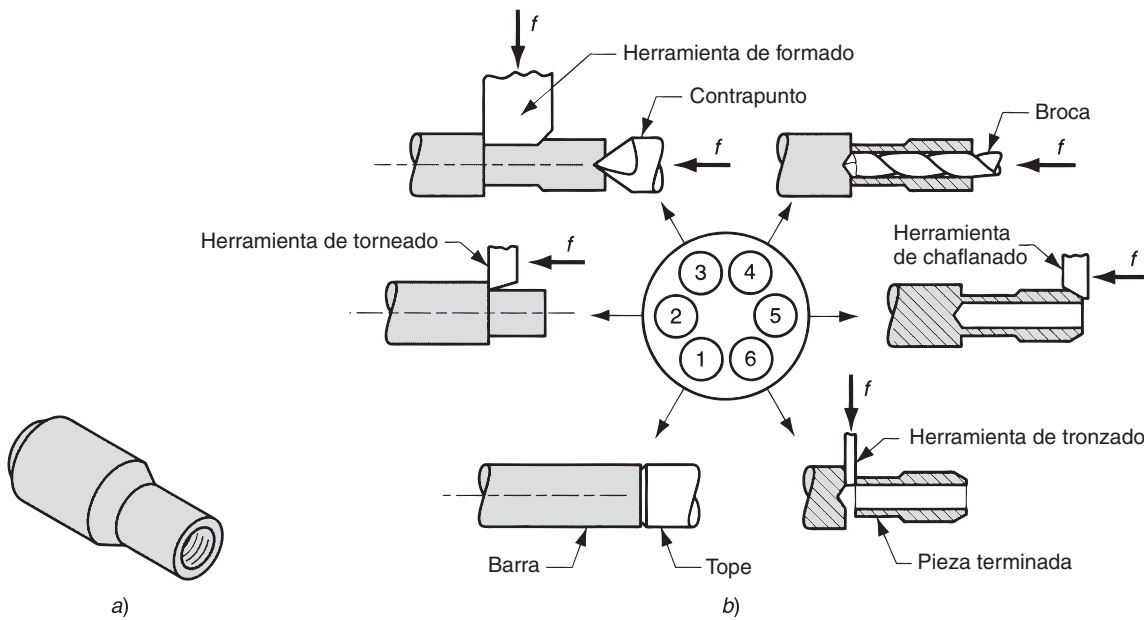


FIGURA 22.9 a) Tipo de pieza producida en una máquina de barras automática de seis husillos y b) secuencia de operaciones para producir la pieza: 1) avance del material hasta el tope, 2) torneado del diámetro principal, 3) formado del segundo diámetro y centrado, 4) taladrado, 5) achaflanado y 6) tronzado.

pieza torneada. La barra se corre entonces hacia delante para presentar nuevo material para la 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 de este tipo de máquinas es la producción de tornillos y piezas similares de artículos de ferretería. A menudo se usa el término **máquina automática de tornillos** para las máquinas que se usan en estas aplicaciones.

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 usar solamente una herramienta de corte a la vez por cada pieza 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 piezas se pueden maquinar simultáneamente por muchas herramientas. Por ejemplo, una máquina de barras automática de seis husillos puede cortar seis piezas al mismo tiempo, como se muestra en la figura 22.9. Al final de cada ciclo de maquinado, los husillos (incluidas las boquillas y las barras de trabajo) se corren a la posición siguiente. En la figura, cada pieza debe ser cortada en forma secuencial por cinco juegos de herramientas de corte que toman seis ciclos de maquinado (la posición 1 es para avanzar la barra a una “tope”). Con este arreglo, cada pieza se completa al final de cada ciclo. Como resultado, una máquina automática para tornillos con seis husillos tiene la velocidad más alta de producción que cualquier máquina de torneado.

La secuenciación y la actuación de los movimientos en las máquinas para tornillos y de mandril se han controlado tradicionalmente por medio de levas y otros dispositivos mecánicos. La forma moderna es el **control numérico computarizado (CNC)**, en el que las operaciones de la máquina herramienta son controlados por un “programa de instrucciones” (sección 39.1.4). El CNC es un medio sofisticado y muy versátil para controlar los dispositivos mecánicos, que ha conducido a la creación de máquinas herramienta capaces de ciclos de maquinado y formas geométricas más complejas y a niveles más altos de operación automática que las máquinas para tornillos convencionales y las máquinas de mandril.

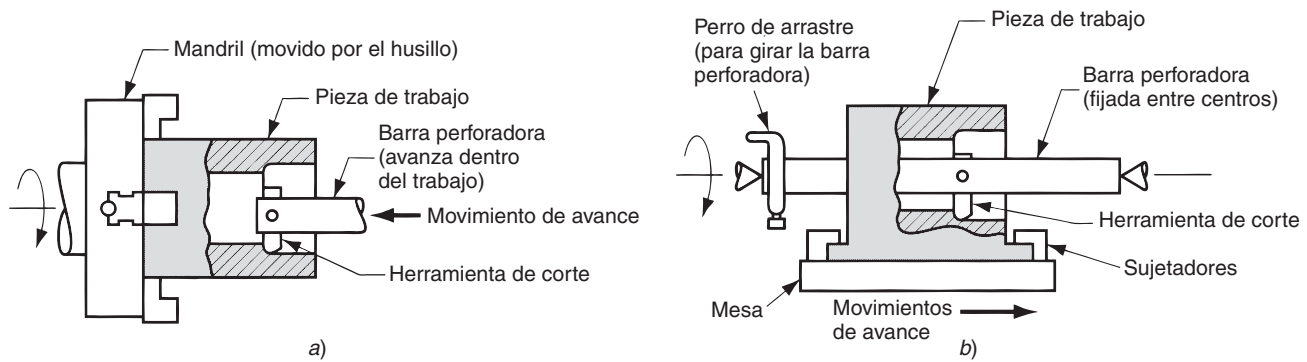


FIGURA 22.10 Dos formas de perforado horizontal: a) una barra perforadora avanza dentro de una pieza de trabajo rotatoria y b) el trabajo avanza frente a una barra perforadora rotatoria.

El torno de CNC es un ejemplo de estas máquinas de torneado, y es especialmente útil para operaciones de torneado en contorno con tolerancias de trabajo estrechas. En la actualidad, casi todas las máquinas de barras y tornos de mandril se implementan con CNC.

22.1.5 Máquinas perforadoras

El perforado es similar al torneado. Usa una herramienta de una sola punta contra una pieza de trabajo en rotación. La diferencia es que el perforado se realiza en el diámetro interior de un agujero existente, en lugar de en el diámetro exterior de un cilindro existente. En efecto, el perforado es una operación de torneado interno. Las máquinas herramienta usadas para realizar las operaciones de perforado se llaman **máquinas perforadoras** (también **molinos perforadores**). Se podría esperar que las máquinas perforadoras tuvieran características comunes con las máquinas de torneado; ciertamente, como se indicó antes, los tornos se usan algunas veces para realizar el perforado.

Las máquinas perforadoras pueden ser horizontales o verticales. La designación se refiere a la orientación del eje de rotación del husillo de la máquina o de la pieza de trabajo. En una operación de **perforado horizontal**, la disposición se puede arreglar en cualquiera de dos formas. En la primera, el trabajo se fija a un husillo giratorio y la herramienta a una barra volada que la haga avanzar dentro del trabajo, como se ilustra en la figura 22.10a). La máquina que perfora en esta disposición debe ser muy rígida para evitar la deflexión y la vibración durante el corte. Para lograr alta rigidez, las barras perforadoras se hacen frecuentemente de carburo cementado, cuyo módulo de elasticidad se aproxima a 620×10^3 MPa (90×10^6 lb/in²). La figura 22.11 muestra una barra perforadora de carburo.

En la segunda disposición posible la herramienta se monta a una barra perforadora, la cual se soporta y gira entre sus centros. El trabajo se sujeta a un mecanismo de alimentación que lo pasa frente a la herramienta. Esta disposición, figura 22.10b), se puede usar para realizar una operación de perforado en un torno convencional.

Una **máquina de perforado vertical** (VBM por sus siglas en inglés) se usa para piezas pesadas de trabajo con diámetros grandes; por lo general el diámetro de la pieza de trabajo es más grande que su longitud. Como se muestra en la figura 22.12, la pieza se monta en una mesa de trabajo que gira respecto a la base de la máquina. Hay mesas de trabajo hasta de 40 pies de diámetro. La máquina perforadora típica puede poner en posición y hacer avanzar varias herramientas de corte simultáneamente. Las herramientas se montan en cabezales de herramientas que pueden avanzar horizontal y verticalmente respecto a la mesa de trabajo. Uno o dos cabezales se montan horizontalmente en un carril transversal y se ensamblan en el bastidor de herramientas de la máquina por encima de la mesa de trabajo. Las herramientas de corte montadas por encima del trabajo se pueden usar para carear y perforar. Además de las herramientas sobre el carril transversal, se pueden montar

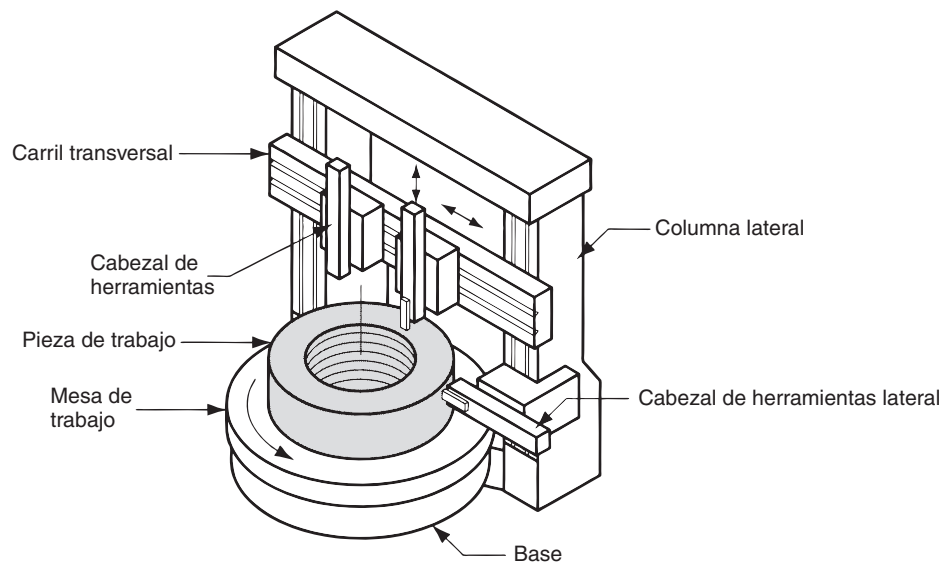


FIGURA 22.11 Barra perforadora hecha de carburo cementado (WC-Co) que usa insertos intercambiables de carburo cementado (cortesía de Kennametal Inc.).

uno o dos cabezales adicionales en las columnas laterales del bastidor para permitir el torneado en el diámetro exterior del trabajo.

Las cabezas portaherramientas usadas en una máquina de perforado vertical incluyen frecuentemente torretas para acomodar varias herramientas de corte. Esto hace difícil distinguir entre esta máquina y un *torno revólver vertical* (VTL por sus siglas en inglés). Algunos constructores de máquinas herramienta especifican que los VTL se usan para diámetros de trabajo de hasta 2.5 m (100 in), mientras que las VBM se usan para diámetros más grandes [6]. Las máquinas de perforado vertical también se aplican frecuentemente a trabajos especializados, mientras que los tornos revólver verticales se usan para la producción por lotes.

FIGURA 22.12 Máquina perforadora vertical.



22.2 TALADRADO Y OPERACIONES AFINES

El taladrado, figura 21.3b), es una operación de maquinado que se usa para crear agujeros redondos en una pieza de trabajo. Esto contrasta con el perforado descrito previamente, el cual solamente puede usarse para agrandar un agujero existente. El taladrado se realiza por lo general con una herramienta cilíndrica rotatoria, llamada **broca** (descrita en la sección 23.3.2), que tiene dos bordes cortantes en su extremo. La broca avanza dentro de la pieza de trabajo estacionaria para formar un agujero cuyo diámetro está determinado por el diámetro de la broca. El taladrado se realiza en una **prensa taladradora**, aunque otras máquinas herramienta puedan ejecutar esta operación.

22.2.1 Condiciones de corte en el taladrado

La velocidad de corte en una operación de taladrado es la velocidad superficial en el diámetro exterior de la broca. Se especifica de esta forma por conveniencia, aunque casi todo el corte se realiza realmente a las velocidades más bajas cercanas al eje de rotación. Para fijar la velocidad deseada de corte en taladrado, es necesario determinar la velocidad de rotación de la broca por su diámetro. Si N representa las rev/min del husillo, entonces:

$$N = \frac{v}{\pi D} \quad (22.7)$$

donde v = velocidad de corte, mm/min (in/min); y D = diámetro de la broca, mm (in). En algunas operaciones de taladrado, la superficie de la pieza gira sobre una herramienta en reposo, pero se aplica la misma fórmula.

En el taladrado, el avance f se especifica en mm/rev (in/rev). Las velocidades recomendadas son aproximadamente proporcionales al diámetro de la broca; los avances más altos se logran con brocas de diámetro grande. Como generalmente existen dos bordes de corte en la punta de la broca, el espesor de la viruta no cortada (carga de viruta) que se toma en cada borde de corte es la mitad del avance. El avance puede convertirse a velocidad de avance si se utiliza la misma ecuación que en el torneado:

$$f_r = Nf \quad (22.8)$$

donde f_r = velocidad de avance, mm/min (in/min).

Los agujeros taladrados pueden ser agujeros completos o agujeros ciegos, figura 22.13. En los **agujeros pasados**, la broca sale en el lado opuesto del trabajo; en los **agujeros ciegos** no es así. El tiempo de maquinado requerido para taladrar un agujero pasado se puede determinar con la fórmula siguiente:

$$T_m = \frac{t + A}{f_r} \quad (22.9)$$

donde T_m = tiempo de maquinado (taladrado), min; t = espesor del trabajo, mm (in); f_r = velocidad de avance, mm/min (in/min); A = tolerancia de aproximación que toma en cuenta el ángulo de la punta de la broca, y representa la distancia que la broca debe avanzar dentro del trabajo antes de alcanzar el diámetro completo, figura 22.10a). Dicha tolerancia está determinada por

$$A = 0.5D \tan \left(90 - \frac{\theta}{2} \right) \quad (22.10)$$

donde A = tolerancia de aproximación, mm (in); y θ = ángulo de la punta de la broca.

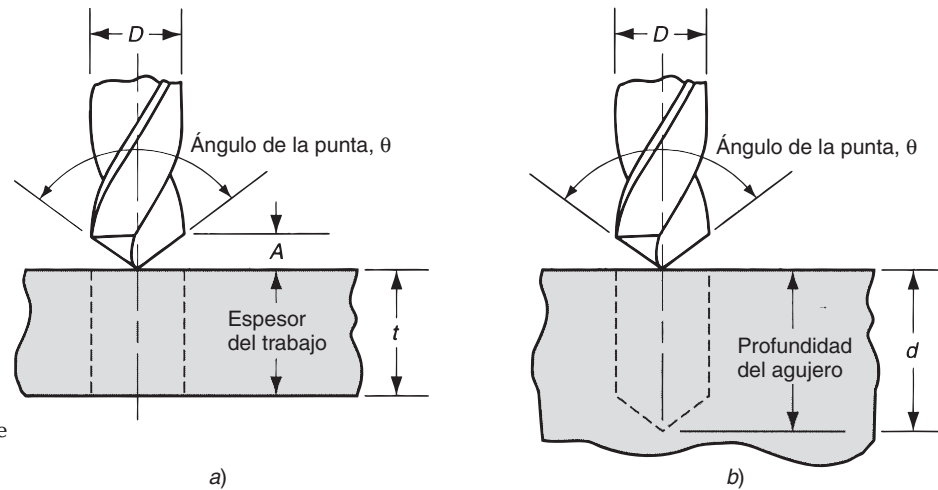


FIGURA 22.13 Dos tipos de agujeros: a) agujero pasado y b) agujero ciego.

En un agujero ciego la profundidad d se define como la distancia entre la superficie de trabajo y la “punta” del agujero, figura 22.13b). Por esta definición, el ángulo de tolerancia de la punta de la broca no afecta el tiempo para taladrar el agujero. Entonces, el tiempo de maquinado para un agujero ciego está dado por:

$$T_m = \frac{d}{f_r} \quad (22.11)$$

La velocidad de remoción de metal en el taladrado se determina como el producto de la sección transversal de la broca y la velocidad de avance:

$$R_{MR} = \frac{\pi D^2 f_r}{4} \quad (22.12)$$

Esta ecuación es válida solamente después de que la broca alcance el diámetro completo y excluye la aproximación de la broca al trabajo.

22.2.2 Operaciones relacionadas con el taladrado

Varias operaciones se relacionan con el taladrado. Dichas operaciones se muestran en la figura 22.14 y se describen en esta sección. La mayoría de las operaciones son posteriores al taladrado. Primero debe hacerse un agujero por taladrado y después modificarse por alguna de estas operaciones. El centrado y el refrentado son excepciones a esta regla. Todas las operaciones usan herramientas rotatorias.

- Escariado.** Se usa para agrandar ligeramente un agujero, suministrar una mejor tolerancia en su diámetro y mejorar su acabado superficial. La herramienta se llama *escariador* y, por lo general, tiene ranuras rectas.
- Roscado interior.** Esta operación se realiza por medio de un *machuelo* y se usa para cortar una rosca interior en un agujero existente.
- Abocardado.** En el abocardado se produce un agujero escalonado en el cual un diámetro más grande sigue a un diámetro más pequeño parcialmente dentro del agujero. Se usa un agujero abocardado para asentar las cabezas de los pernos dentro de un agujero, de manera que no sobresalgan de la superficie.
- Avellanado.** Es una operación similar al abocardado salvo que el escalón en el agujero tiene forma de cono para tornillos y pernos de cabeza plana.

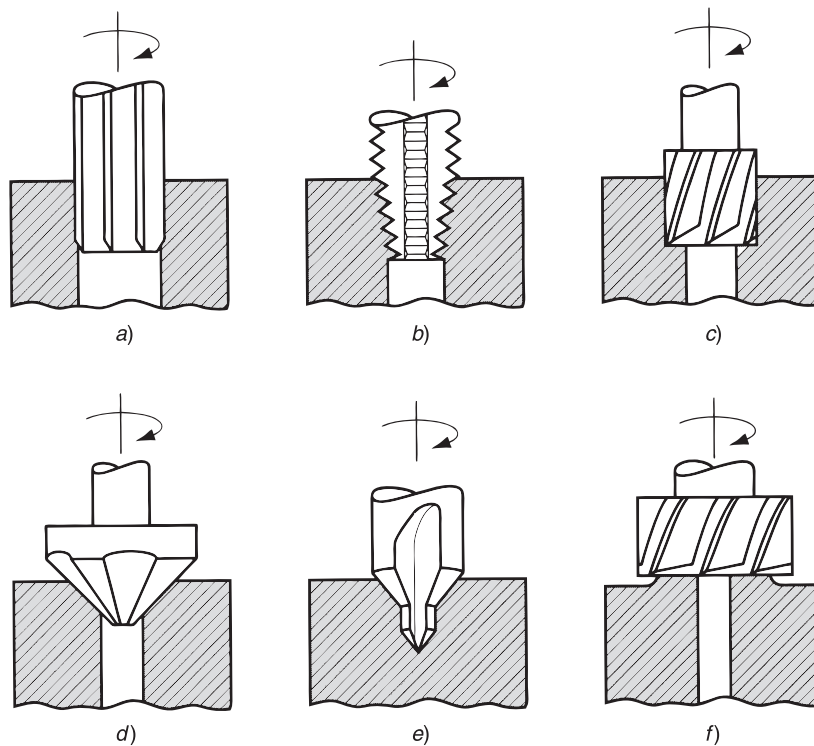


FIGURA 22.14 Operaciones de maquinado relacionadas con el taladrado: a) escariado, b) roscado interior, c) abocardado, d) avellanado, e) centrado y f) refrentado.

- e) **Centrado.** También llamado taladrado central, esta operación taladra un agujero inicial para establecer con precisión el lugar donde se taladrará el siguiente agujero. La herramienta se llama **broca de centros**.
- f) **Refrentado.** Es una operación similar al fresado que se usa para suministrar una superficie maquinada plana en la pieza de trabajo en un área localizada.

22.2.3 Prensas taladradoras

La prensa taladradora o taladro es la máquina estándar para taladrar. Hay varios tipos de prensas taladradoras, de las cuales la básica es la vertical, figura 22.15. El **taladro vertical** se mantiene sobre el piso y está formado por una mesa para sostener la pieza de trabajo, un cabezal de taladro con un husillo mecanizado para la broca, y una base y columna para soporte. Una prensa similar, pero más pequeña, es el **taladro de banco**, el cual se monta sobre una mesa o un banco en lugar de pararse sobre el piso.

El **taladro radial**, figura 22.16, es una prensa taladradora grande diseñada para cortar agujeros en piezas grandes. Tiene un brazo radial a lo largo del cual se puede mover y ajustarse el cabezal del taladro. Por tanto, el cabezal puede ponerse en posición a lo largo del brazo en lugares que son significativamente distantes de la columna, lo cual permite acomodar piezas de trabajo grandes.

El **taladro múltiple** es una prensa taladradora que consiste básicamente en una serie de dos a seis taladros verticales conectados en un arreglo en línea. Cada husillo se acciona y opera en forma independiente, pero comparten una mesa de trabajo común, de manera que se pueden realizar operaciones relacionadas de taladrado en serie (por ejemplo, centrado, taladrado, escariado y roscado interior) deslizando simplemente la pieza de trabajo sobre la mesa de trabajo de un husillo al siguiente. Una máquina relacionada es el **taladro de husillos múltiples**, en la cual están conectados varios husillos para taladrar múltiples agujeros simultáneamente en una pieza de trabajo.

Existen además las **prensas taladradoras de control numérico** para controlar el posicionado de los agujeros en las piezas de trabajo. Estas prensas taladradoras están frecuentemente

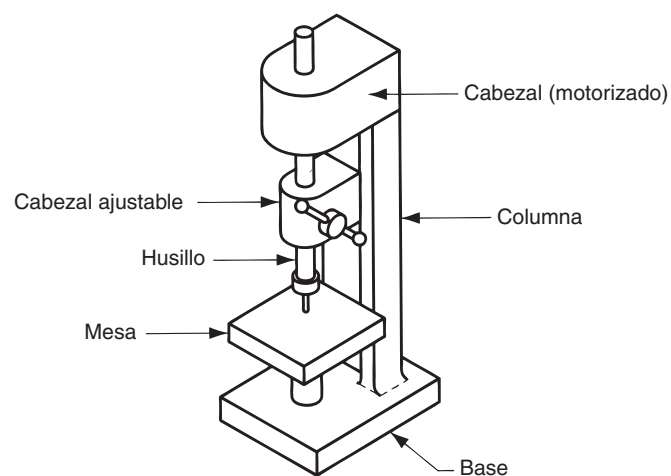
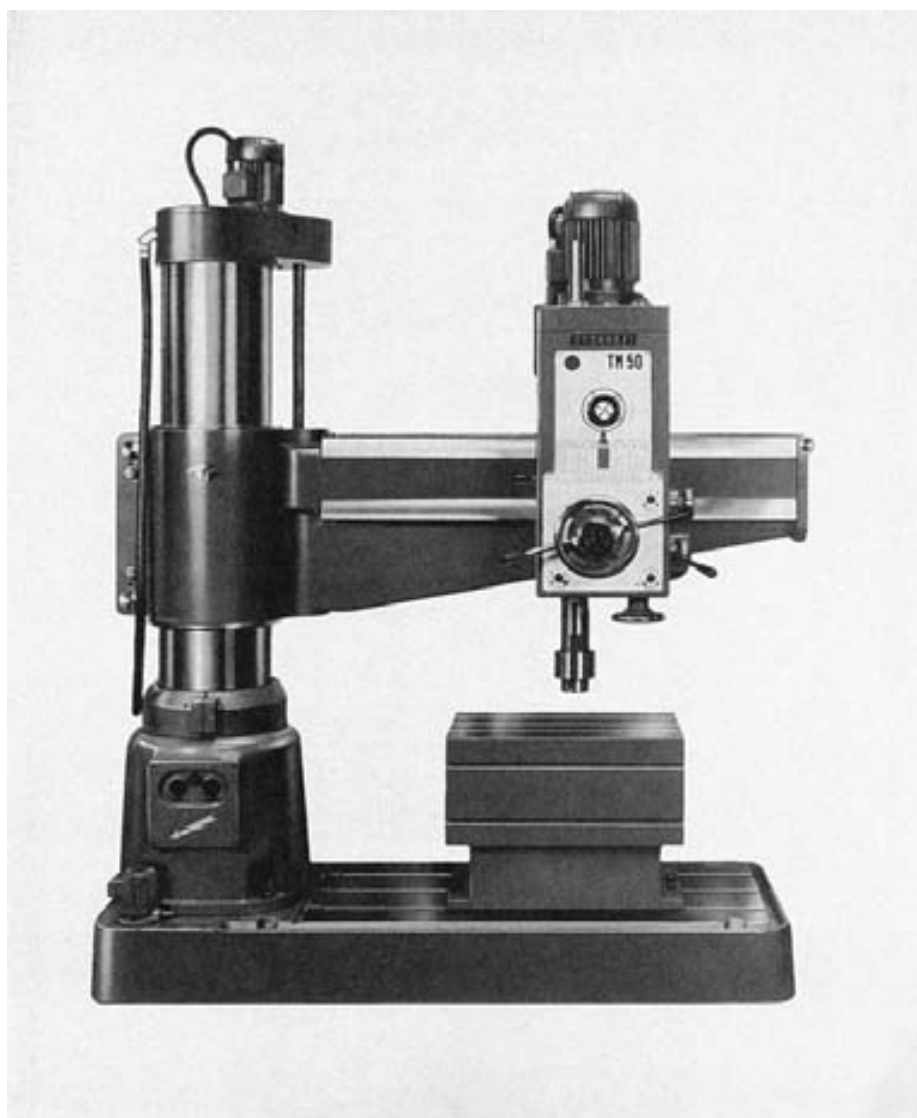


FIGURA 22.15 Prensa taladradora vertical.

FIGURA 22.16 Prensa taladradora radial (cortesía de Willis Machinery and Tools).



equipadas con torretas para sostener herramientas múltiples, que pueden seleccionarse bajo control de un programa de control numérico. Se usa el término **taladro revólver** de control numérico para este tipo de máquinas.

La sujeción del trabajo en una prensa taladradora se logra fijando la pieza de trabajo en un tornillo de banco, sujetador o guía. Un **tornillo de banco** es un dispositivo de sujeción de propósito general que posee dos mordazas que aprietan el trabajo en posición. Un **sujetador** es un dispositivo que fija el trabajo diseñado por lo general específicamente para la pieza de trabajo particular. El sujetador puede diseñarse para lograr mayor precisión en el posicionado de la pieza respecto a la operación de la máquina, mayores velocidades de proyección y mayor conveniencia para el operador. Una **guía** es un dispositivo sujetador del trabajo que se diseña también especialmente para la pieza de trabajo. La característica distintiva entre la guía y el sujetador es que la guía suministra un medio para guiar la herramienta durante la operación de taladrado. Un sujetador no posee esta característica de guía. Una guía que se usa para taladrado se llama **guía de taladro**.

22.3 FRESADO

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

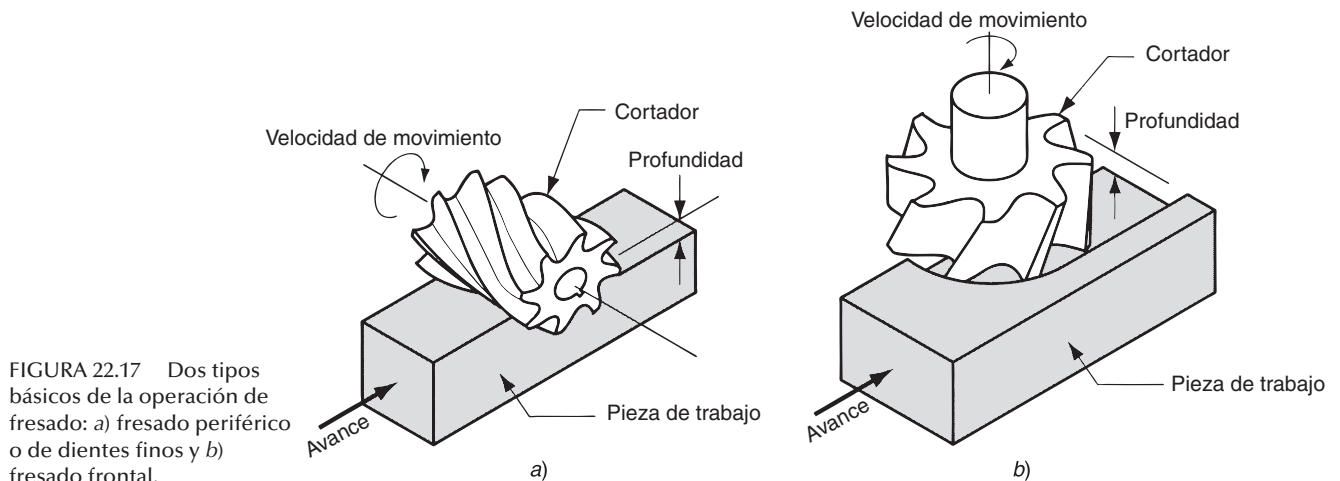
La forma geométrica creada por el fresado es una superficie plana. Se pueden crear otras formas mediante la trayectoria de la herramienta de corte o la forma de dicha herramienta. Debido a la variedad de formas posibles y a sus altas velocidades de producción, el fresado es una de las operaciones de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

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

22.3.1 Tipos de operaciones de fresado

Hay dos tipos básicos de operaciones de fresado, como se muestra en la figura 22.17: *a)* fresado periférico y *b)* fresado frontal.

Fresado periférico En el **fresado periférico**, también llamado **fresado plano**, el eje de la herramienta es paralelo a la superficie que se está maquinando y la operación se realiza por los bordes de corte en la periferia exterior del cortador. En la figura 22.18 se muestran varios tipos de fresado periférico: *a)* **fresado de placa**, la forma básica de fresado periférico en la cual el ancho de la fresa se extiende más allá de la pieza de trabajo en ambos lados; *b)* **ranurado**, también llamado **fresado de ranuras**, en el cual el ancho de la fresa es menor que el ancho de la pieza de trabajo, creando una ranura en el trabajo; cuando la fresa es muy



delgada se puede usar esta operación para tallar ranuras angostas o para cortar una pieza de trabajo en dos, llamado **fresado aserrado**; c) **fresado lateral**, en el cual la fresa maquina el lado de una pieza de trabajo; y d) **fresado paralelo simultáneo**, el cual es el mismo que el fresado natural, excepto porque el corte tiene lugar en ambos lados del trabajo.

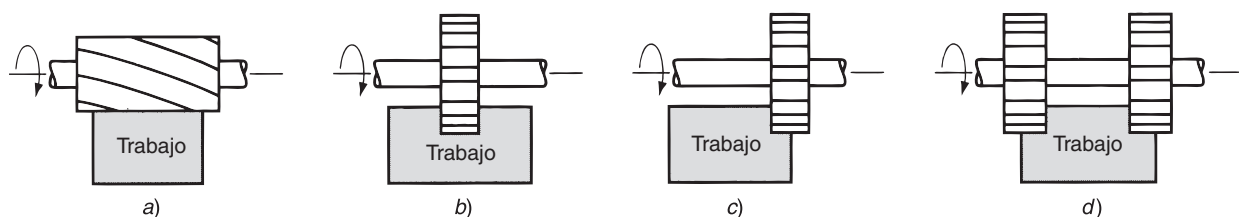
En el fresado periférico hay dos direcciones opuestas de rotación que puede tener la fresa respecto al trabajo. Estas direcciones distinguen dos formas de fresado: fresado ascendente y fresado descendente, que se ilustran en la figura 22.19. En el **fresado ascendente**, también llamado **fresado convencional**, la dirección del movimiento de los dientes de la fresa es opuesto a la dirección de avance cuando los dientes cortan el trabajo. Es decir, cortan “contra el avance”. En el **fresado descendente**, también llamado **fresado tipo escalamiento**, la dirección del movimiento de la fresa es la misma que la dirección de avance cuando los dientes cortan el trabajo. Es un fresado “con el avance”.

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

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

Fresado en la cara o fresado frontal En el **fresado frontal**, el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta cortando las orillas, tanto en el

FIGURA 22.18 Fresado periférico: a) fresado de placa, b) ranurado, c) fresado lateral y d) fresado paralelo simultáneo.



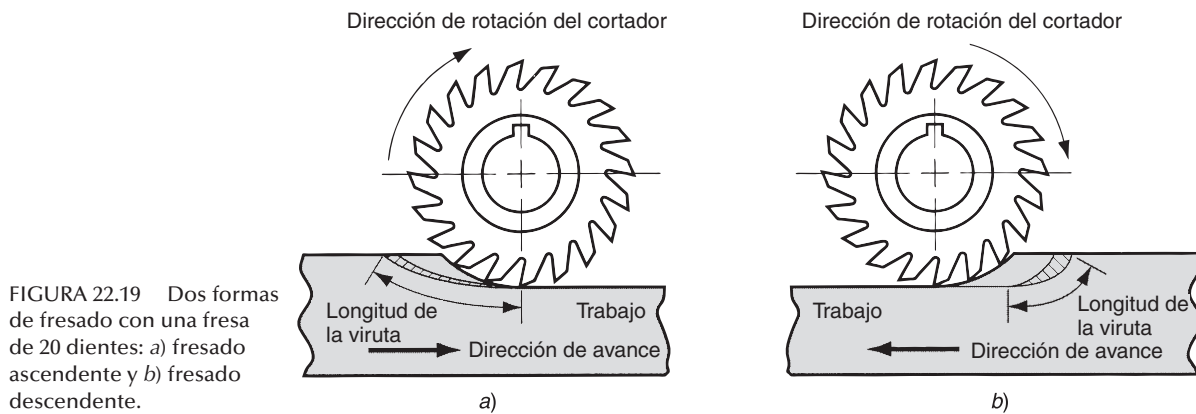


FIGURA 22.19 Dos formas de fresado con una fresa de 20 dientes: a) fresado ascendente y b) fresado descendente.

extremo como fuera de la periferia de la fresa. De igual manera que en el fresado periférico, también en el fresado frontal existen diversas formas; varias de ellas se ilustran en la figura 22.20: a) **fresado frontal convencional**, en el que el diámetro de la fresa es más grande que el ancho de la pieza de trabajo, de tal manera que la fresa sobrepasa al trabajo en ambos lados; b) **fresado frontal parcial**, en el que la fresa sobrepasa al trabajo solamente en un lado; c) **fresado terminal**, en el cual el diámetro de la fresa es menor que el ancho del trabajo, de manera que se corta una ranura dentro de la pieza; d) **fresado de perfiles** es una forma de fresado terminal en el cual se corta una pieza plana de la periferia; e) **fresado de cavidades**, otra forma de fresado terminal usada para fresar cavidades poco profundas en piezas planas; f) **fresado de contorno superficial**, en el cual una fresa con punta de bola (en lugar de una fresa cuadrada) se hace avanzar hacia delante y hacia atrás, y hacia un lado y otro del trabajo, a lo largo de una trayectoria curvilínea a pequeños intervalos para crear una superficie tridimensional. Se requiere el mismo control básico para maquinarse los contornos de moldes y troqueles en cuyo caso esta operación se llama **tallado o contorneado de troqueles**.

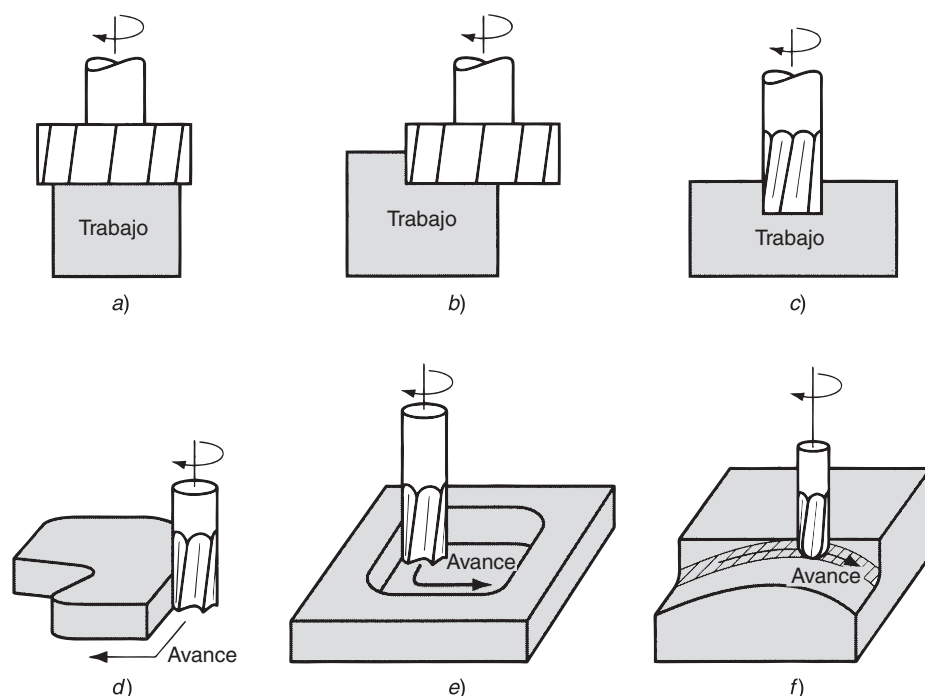
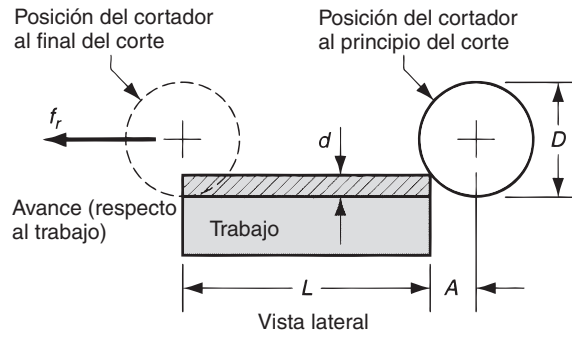


FIGURA 22.20 Fresado frontal: a) fresado frontal convencional, b) fresado frontal parcial, c) fresado terminal, d) fresado de perfiles, e) fresado de cavidades y f) fresado de contorno superficial.

FIGURA 22.21 Fresado de placa (periférico) que muestra la entrada de la fresa en la pieza de trabajo.



22.3.2 Condiciones de corte en fresado

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

$$N = \frac{v}{\pi D} \quad (22.13)$$

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

$$f_r = N n_t f \quad (22.14)$$

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

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

$$R_{MR} = w d f_r \quad (22.15)$$

Esto ignora la entrada inicial de la fresa antes de su enganche completo. La ecuación 22.15 se puede aplicar al fresado terminal, fresado lateral, fresado frontal y otras operaciones de fresado, haciendo los ajustes apropiados en el cálculo del área de la sección recta del corte.

El tiempo requerido para fresar una pieza de trabajo de longitud L debe tomar en cuenta la distancia de aproximación requerida para enganchar completamente la fresa. Se considera primero el caso del fresado de una plancha, figura 22.21. Para determinar el tiempo de ejecución de una operación de fresado de la plancha, la distancia de aproximación A para alcanzar la velocidad de corte completo se determina mediante

$$A = \sqrt{d(D-d)} \quad (22.16)$$

donde d = profundidad de corte, mm (in); y D = diámetro de la fresa, mm (in). El tiempo para fresar la pieza de trabajo T_m es por tanto,

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \quad (22.17)$$

Para el fresado frontal se acostumbra dejar para la aproximación la distancia A más una distancia O , de recorrido adicional. Hay dos casos posibles, como se muestra en la figura 22.22. En ambos casos, $A = O$. El primer caso es cuando la fresa se centra sobre

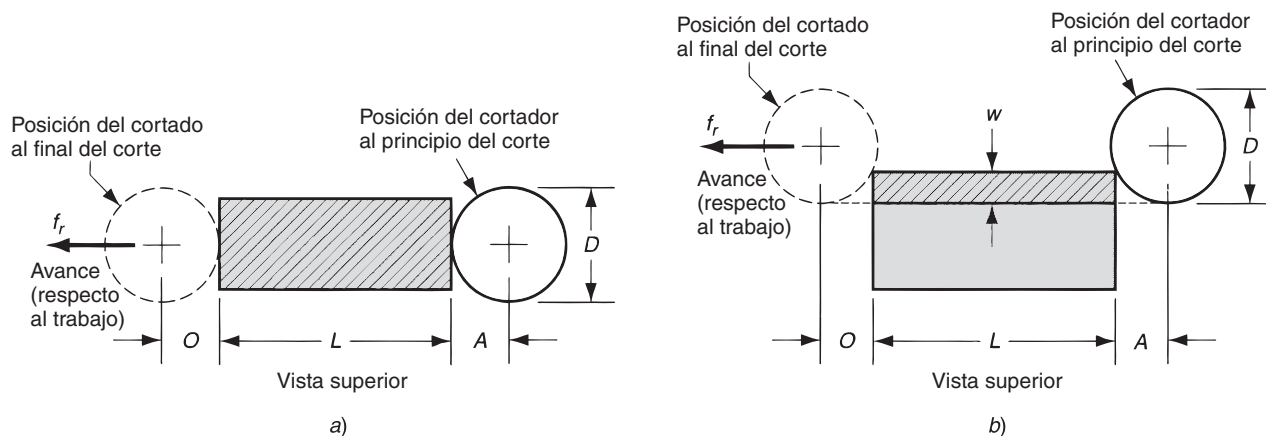


FIGURA 22.22 Fresado frontal en el que se muestran las distancias de aproximación y de recorrido adicional para dos casos: a) cuando el fresador está centrado sobre la pieza de trabajo y b) cuando el cortador está desplazado hacia un lado del trabajo.

la pieza de trabajo rectangular. En la figura 22.22a) es evidente que A y O son iguales a la mitad del diámetro del cortador.

Esto es,

$$A = O = \frac{D}{2} \quad (22.18)$$

donde D = diámetro de la fresa, mm (in).

El segundo caso es cuando la fresa sobresale a uno de los lados del trabajo, como se muestra en la figura 22.22b). En este caso, las distancias de aproximación y la distancia adicional están dadas por

$$A = O = \sqrt{w(D - w)} \quad (22.19)$$

donde w = ancho del corte, mm (in). Por tanto, el tiempo de maquinado en cada caso está dado por,

$$T_m = \frac{L + 2A}{f_r} \quad (22.20)$$

22.3.3 Máquinas fresadoras

Las máquinas fresadoras deben tener un husillo rotatorio para el cortador y una mesa para sujetar, poner en posición y hacer avanzar la pieza de trabajo. Varios diseños de máquinas herramienta satisfacen estos requerimientos. Para empezar, las máquinas fresadoras se pueden clasificar en horizontales o verticales. Una **máquina fresadora horizontal** tiene un husillo horizontal, y este diseño es adecuado para realizar el fresado periférico (por ejemplo, fresado de planchas, ranurado, y fresado lateral y paralelo simultáneos) sobre piezas de trabajo que tienen forma aproximadamente cúbica. Una **máquina fresadora vertical** tiene un husillo vertical, y esta orientación es adecuada para fresado frontal, fresado terminal, fresado de contorno de superficies y tallado de matrices sobre piezas de trabajo relativamente planas.

Aparte de la orientación del husillo, las máquinas fresadoras se clasifican dentro de los siguientes tipos: 1) rodilla y columna, 2) tipo bancada, 3) tipo cepillo, 4) fresas trazadoras y 5) máquinas fresadoras CNC.

La **máquina fresadora de codo y columna (de consola)** es la máquina herramienta básica para fresado. Deriva su nombre del hecho de que sus dos principales componentes son una **columna** que soporta el husillo y un **codo** (se parece a un codo humano) que soporta la mesa de trabajo. Se puede disponer de máquinas horizontales o verticales, como se ilustra

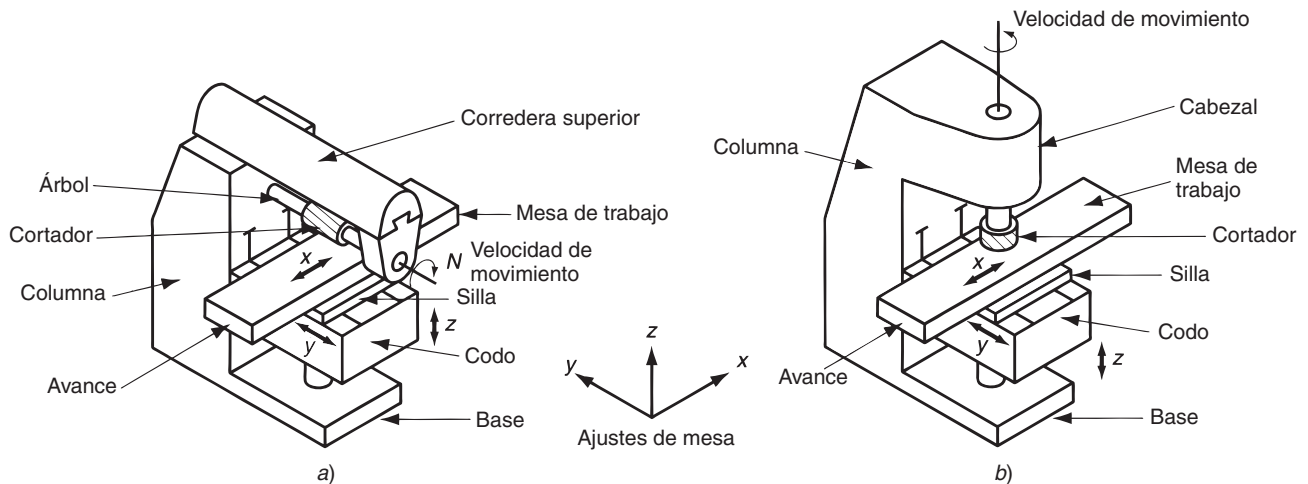


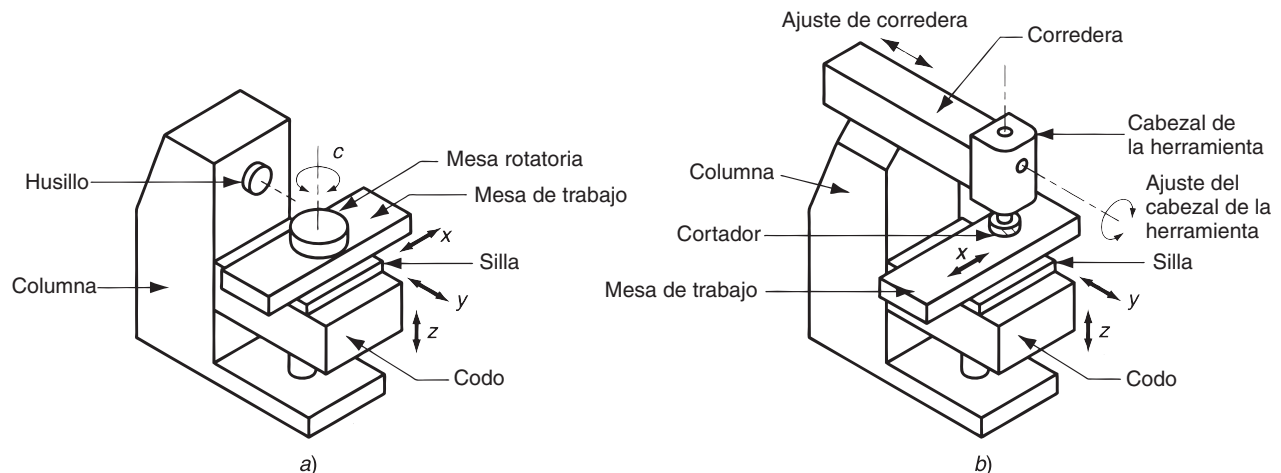
FIGURA 22.23 Dos tipos básicos de máquina fresadora de codo y columna: a) horizontal y b) vertical.

en la figura 22.23. En la versión horizontal, un árbol soporta por lo general a la fresa. El **árbol** es básicamente una flecha que sostiene el cortador y se acciona mediante el husillo principal. En las máquinas horizontales se provee un brazo para sostener el árbol. En las máquinas de codo y columna verticales los cortadores se pueden montar directamente en el husillo principal.

Una característica de las máquinas fresadoras de codo y columna que las hace tan versátiles es la capacidad de la mesa de trabajo para hacer avanzar el trabajo en cualquiera de los tres ejes x , y o z . La mesa de trabajo se puede mover en la dirección x , la silla se puede mover en la dirección y , y el codo se puede mover verticalmente para lograr el movimiento z .

Se puede identificar dos máquinas especiales de codo y columna. Una es la máquina fresadora **universal**, figura 22.24a), la cual tiene una mesa que se puede girar en un plano horizontal (respecto a un eje vertical) a cualquier ángulo especificado. Esto facilita el corte de formas helicoidales y angulares sobre las piezas de trabajo. Otra máquina especial es la **fresadora con corredera**, figura 22.24b), en la cual el cabezal de la herramienta que contiene el husillo se localiza sobre el extremo de una corredera horizontal; la corredera se puede ajustar hacia dentro y hacia fuera sobre la mesa de trabajo para dirigir la fresa hacia el trabajo. El cabezal de la herramienta se puede girar también para lograr una orientación

FIGURA 22.24 Tipos especiales de máquinas fresadoras de codo y columna: a) universal (se omiten la corredera superior, el árbol y el cortador, para mayor claridad) y b) tipo corredera.



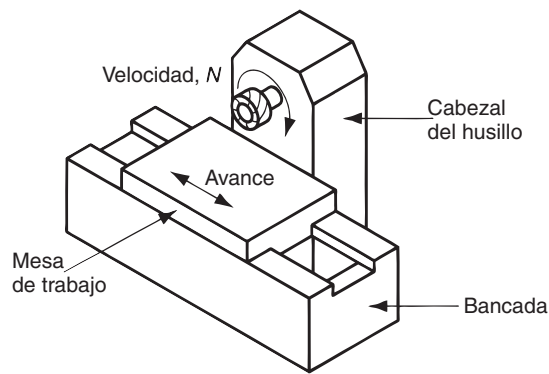


FIGURA 22.25 Máquina fresadora tipo cama simple de husillo horizontal.

angular de la fresa hacia el trabajo. Estas características aportan considerable versatilidad en el maquinado de varias formas de trabajo.

Las **fresadoras tipo bancada** se diseñan para la producción en masa. Están construidas con mayor rigidez que las máquinas de codo y columna, y permiten las velocidades de avance más críticas y las profundidades de corte que se necesitan para las altas velocidades de remoción de material. La construcción característica de las máquinas fresadoras tipo bancada se muestra en la figura 22.25. La mesa de trabajo está montada directamente a la bancada de la máquina herramienta en lugar del tipo menos rígido de rodilla y columna. Esta construcción limita el posible movimiento longitudinal de la mesa para pasar el trabajo por delante de la fresa. La fresa está montada en un cabezal de husillo que puede ajustarse verticalmente a lo largo de la columna de la máquina. Las máquinas de bancada con un solo husillo se llaman máquinas **simplex**, como se muestra en la figura 22.25, y están disponibles en modelos verticales u horizontales. Las fresadoras **duplex** usan dos cabezales de husillo, los cuales se posicionan por lo general horizontalmente sobre los lados opuestos de la bancada para realizar operaciones simultáneas durante un avance del trabajo. Las máquinas **triples** añaden un tercer husillo montado verticalmente sobre la bancada para darle mayor capacidad a la máquina.

Las **máquinas tipo cepillo** forman la categoría más grande de máquinas fresadoras. Su apariencia general y su construcción son las de un cepillo grande (figura 22.31); la diferencia es que en lugar del cepillado llevan a cabo el fresado. Por consiguiente, uno o más cabezales de fresado sustituyen a las herramientas de corte de una sola punta que se usan en los cepillos, y el movimiento del trabajo que pasa enfrente de la herramienta es un movimiento de velocidad de avance más que un movimiento de velocidad de corte. Las fresas tipo cepillo se construyen para maquinar piezas muy grandes. La mesa de trabajo y la cama de la máquina son pesadas y relativamente bajas, casi al ras del piso, y los cabezales fresadores se sostienen sobre una estructura puente que se extiende a través de la mesa.

La **fresa trazadora**, también llamada **fresa perfiladora**, está diseñada para reproducir una geometría irregular de la pieza creada sobre una plantilla. Una sonda trazadora controlada por avance manual o automático sigue la plantilla, mientras el cabezal de fresado duplica la trayectoria de la sonda para maquinar la forma deseada. Las máquinas trazadoras se pueden dividir en los siguientes tipos: 1) **trazado x-y**, en la cual la plantilla es una forma plana con un contorno que se perfila usando un control de dos ejes, 2) **trazado x-y-z**, en el cual la sonda sigue un patrón tridimensional usando un control de tres ejes.

Las fresadoras trazadoras se han usado para crear formas que no pueden ser generadas fácilmente por una acción de avance simple de la pieza de trabajo frente a la fresa. Sus aplicaciones incluyen el maquinado de moldes y troqueles. En años recientes, muchas aplicaciones que se hacían antes en fresas trazadoras se hacen ahora en máquinas fresadoras de control numérico computarizado (CNC).

Las **máquinas fresadoras CNC** son máquinas en las que la trayectoria de corte se controla por datos numéricos en lugar de plantillas físicas. Las máquinas fresadoras CNC están adaptadas especialmente para el fresado de perfiles, fresado de cavidades, fresado de contorno de superficies y operaciones de tallado de matrices, en las que se debe controlar simultáneamente dos o tres ejes de la mesa de trabajo. Normalmente se requiere el operador para cambiar las fresas y cargar y descargar las piezas de trabajo.

22.4 CENTROS DE MAQUINADO Y CENTROS DE TORNEADO

Un **centro de maquinado** es una máquina altamente automatizada capaz de realizar múltiples operaciones de maquinado en una instalación bajo CNC (control numérico computarizado) con la mínima intervención humana. Las operaciones típicas son aquellas que usan herramientas de corte rotatorio, como los cortadores y las brocas. Las siguientes características hacen de estos centros de maquinado una máquina productiva:

- **Cambio automático de herramientas.** Para cambiar de una operación de maquinado a la siguiente se debe cambiar las herramientas. Esto se hace en un centro de maquinado por medio de un programa de control numérico que controla a un cambiador automático de herramientas diseñado para intercambiar cortadores entre los husillos de la máquina y un **tambor de almacenamiento de herramientas**. Las capacidades de estos tambores fluctúan por lo general de 16 a 80 herramientas de corte.
- **Paletas transportadoras.** Algunos centros de maquinado están equipados con dos o más transportadoras de paletas que pueden transferir automáticamente la pieza de trabajo al husillo de la máquina. Con dos paletas, el operador puede descargar las piezas previamente maquinadas y cargar las siguientes, mientras la máquina herramienta se encarga de maquinar la pieza en turno. Esto reduce el tiempo no productivo en la máquina.
- **Posicionado automático de las piezas de trabajo.** Muchos centros de maquinado tienen más de tres ejes. Uno de los ejes adicionales se diseña frecuentemente como una mesa rotatoria para poner la pieza en posición, formando un ángulo específico respecto al husillo. La mesa rotatoria permite a la herramienta de corte desempeñar el maquinado en cuatro lados de la pieza en una sola instalación.

Los centros de maquinado se clasifican en horizontales, verticales o universales. La designación se refiere a la orientación de husillo. Los centros de maquinado horizontal (HMC por sus siglas en inglés) maquinan normalmente piezas de forma cúbica donde la herramienta de corte tiene acceso a los cuatro lados verticales del cubo. Los centros de maquinado vertical (VMC, por sus siglas en inglés) están adaptados para piezas planas en los cuales la herramienta puede maquinar la superficie superior. Los centros de maquinado universal tienen cabezales de trabajo que pueden girar los ejes del husillo a cualquier ángulo entre el vertical y el horizontal, como se ilustra en la figura 22.26.

El éxito de los centros de maquinado CNC ha conducido al desarrollo de centros de torneado CNC. Un **centro de torneado CNC** moderno, figura 22.27, es capaz de desempeñar varias operaciones de torneado y operaciones relacionadas, torneado de contorno y secuenciado automático de herramientas, todas bajo control computarizado. Además, los centros de torneado sofisticado pueden realizar 1) calibrado de piezas de trabajo (verificación de las dimensiones clave después del maquinado), 2) monitoreo de las herramientas (sensores que indican cuando las herramientas están desgastadas), 3) cambio automático de herramientas cuando se desgastan, y además 4) cambio automático de piezas de trabajo al final de cada ciclo [14].

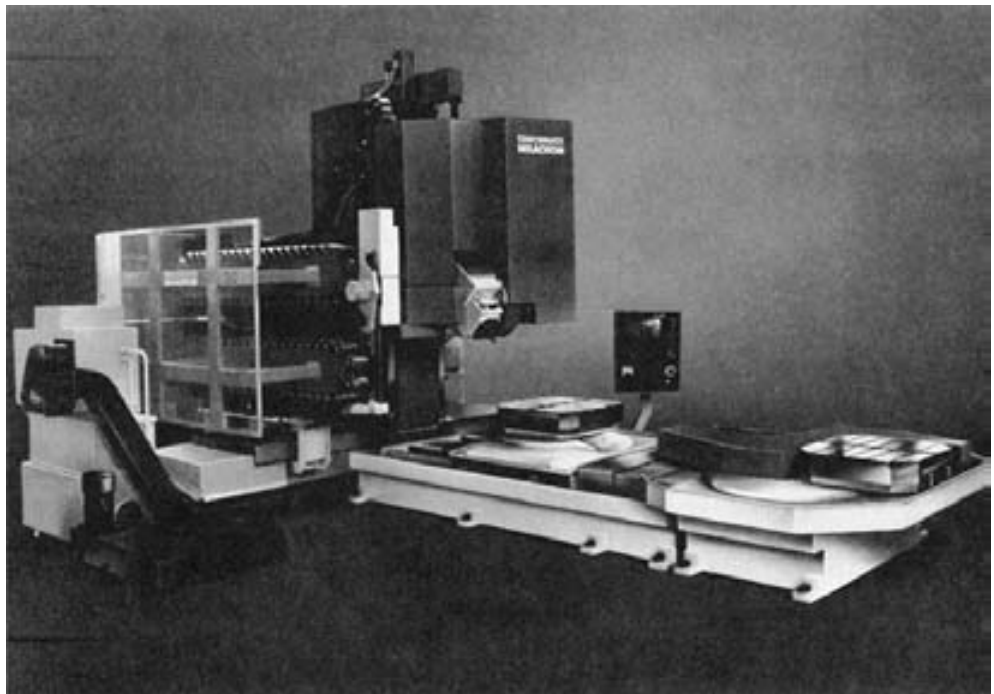


FIGURA 22.26 Centro de maquinado universal. La capacidad de orientar el cabezal de trabajo hace de ésta una máquina de cinco ejes (cortesía de Cincinnati Milacron).

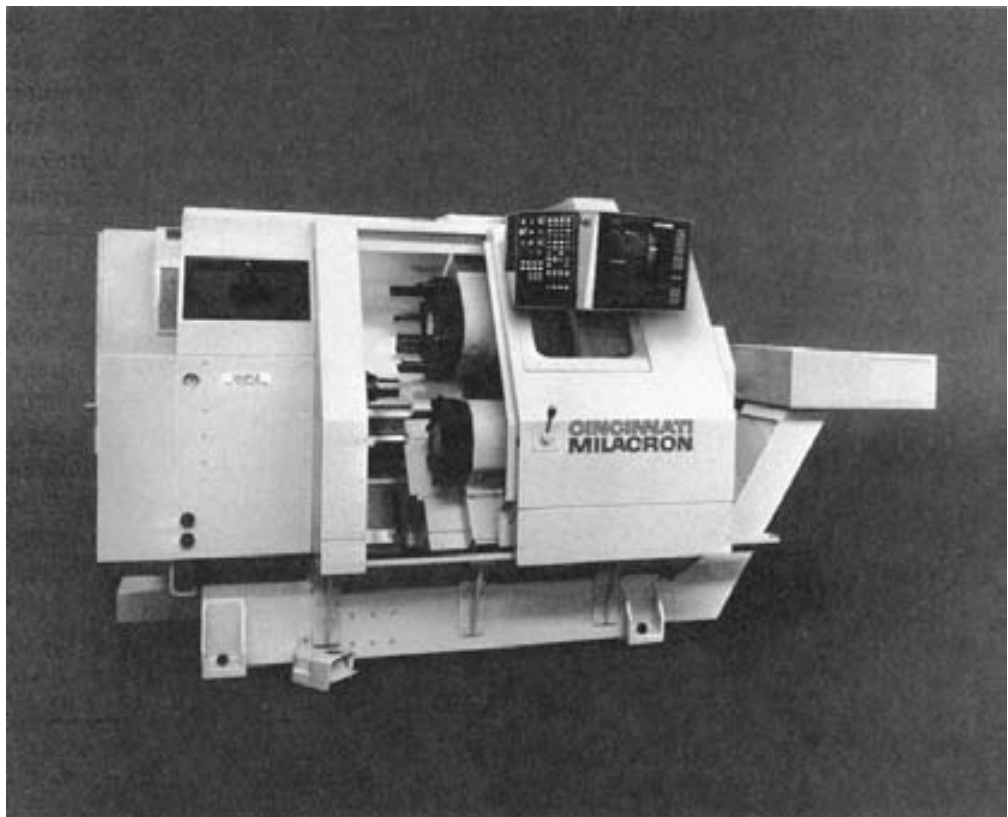


FIGURA 22.27 Centro de torneado de cuatro ejes y CNC (cortesía de Cincinnati Milacron).

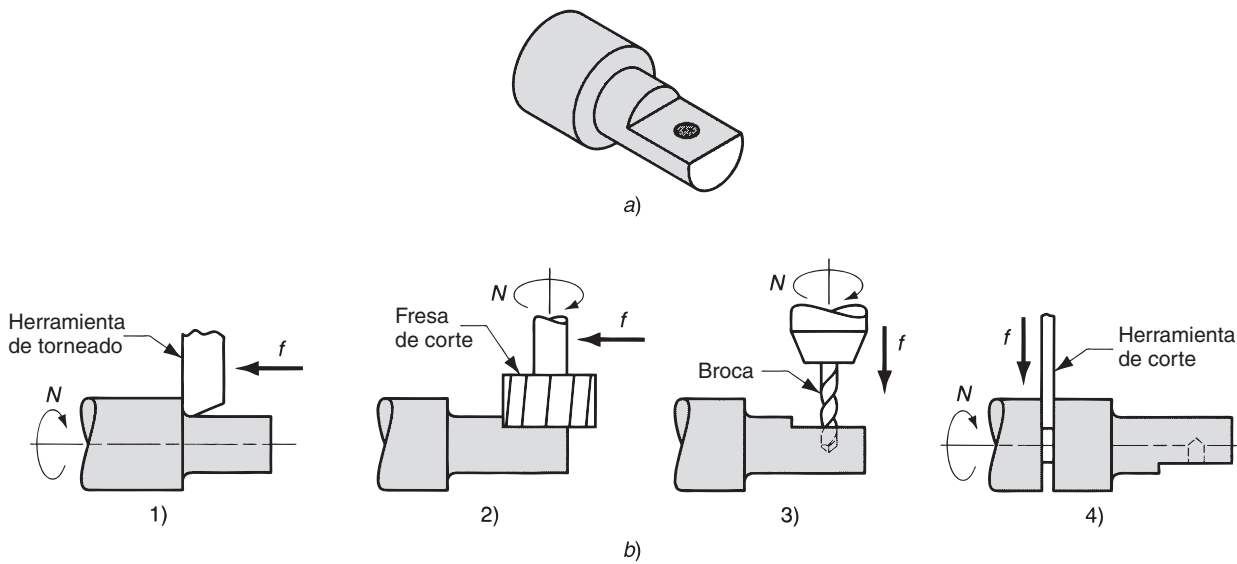


FIGURA 22.28 Operación de un centro de torneado y fresado: a) ejemplo de una pieza con superficies torneadas, fresadas y taladradas y b) secuencia de operaciones en un centro de torneado y fresado: 1) torneado de un segundo diámetro, 2) fresado plano en una posición angular programada de la pieza, 3) taladrado de un agujero con la pieza en la misma posición programada y 4) corte.

Otro tipo de máquina herramienta relacionada con los centros de maquinado y torneado es el **centro de torno y fresa CNC**. Esta máquina tiene la configuración natural de un centro de torneado, y además puede posicionar una pieza de trabajo cilíndrica en un ángulo específico, de manera que una herramienta rotatoria de corte (por ejemplo, una fresa) pueda maquinar formas en la superficie externa de la pieza, como se ilustra en la figura 22.28. Un centro ordinario de torneado no tiene la capacidad de parar la pieza de trabajo en una posición angular definida y no tiene husillos para herramientas rotatorias.

Los avances actuales en cuanto a la tecnología de las máquinas herramienta han llevado al centro de torneado y fresado un paso adelante, al integrar las facilidades adicionales en una sola máquina. Dichas capacidades incluyen: 1) la combinación de fresado, taladrado y torneado con las operaciones de esmerilado, soldado e inspección, todas ellas en una sola máquina herramienta; 2) el uso simultáneo de múltiples husillos, tanto en una sola pieza de trabajo o en dos diferentes; y 3) la automatización de la función de manejo de piezas al incorporar robots industriales a las máquinas [2], [20]. A menudo se utilizan los términos **máquinas multitareas** y **máquinas multifuncionales** para identificar estos productos.

22.5 OTRAS OPERACIONES DE MAQUINADO

Además del torneado, fresado y taladrado, se deben incluir otras operaciones de maquinado en este estudio: 1) perfilado y cepillado, 2) brochado y 3) aserrado.

22.5.1 Perfilado y cepillado

El perfilado y el cepillado son operaciones similares ambas incluyen el uso de una herramienta de corte de una sola punta movida linealmente respecto a la pieza de trabajo. En el perfilado y cepillado convencionales, se crea una superficie plana y recta. La diferencia entre las dos operaciones se ilustra en la figura 22.29. En el perfilado, el movimiento de velocidad se obtiene al mover la herramienta de corte, mientras que en el cepillado se logra con el movimiento de la pieza de trabajo.

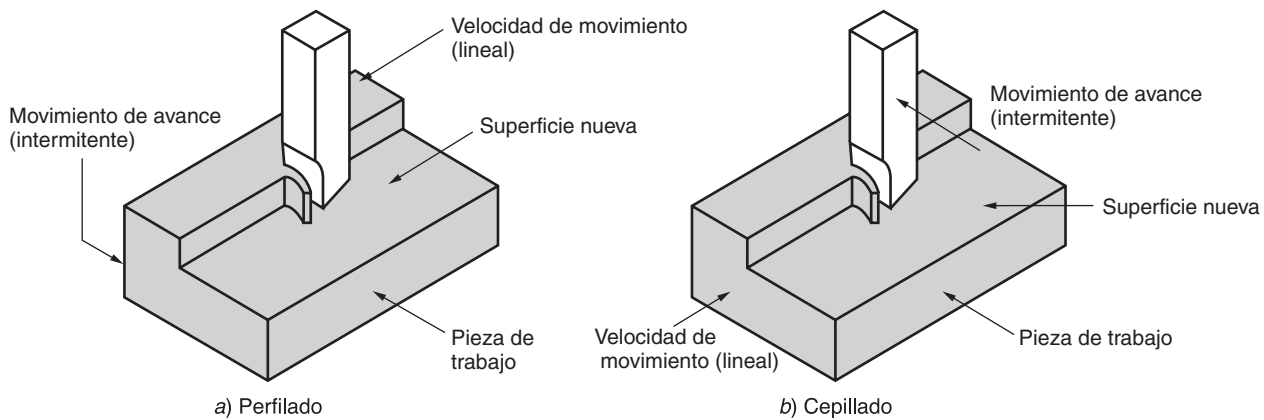
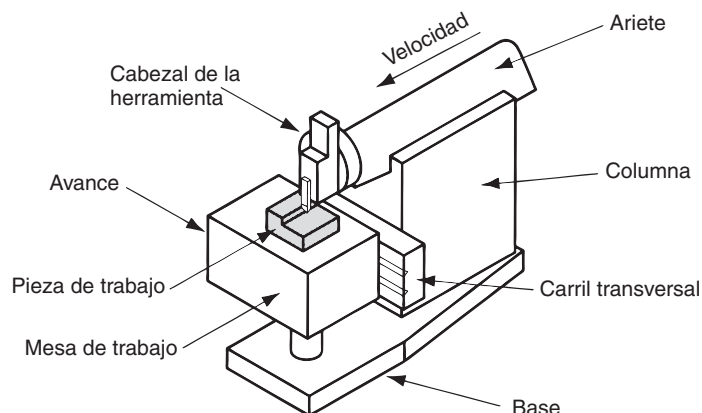


FIGURA 22.29 a) Perfilado y b) cepillado.

Las herramientas de corte usadas en el perfilado y cepillado son herramientas de una punta. A diferencia del torneado, en el perfilado y cepillado el corte se interrumpe, y sujeta a la herramienta a cargas de impacto a la entrada del trabajo. Además, estas máquinas herramienta están limitadas a bajas velocidades debido a su movimiento de vaivén. Estas condiciones dictan normalmente el uso de herramientas de corte de acero de alta velocidad.

Perfilado El perfilado se ejecuta en una máquina herramienta llamada *perfiladora*, figura 22.30. Los componentes de la perfiladora incluyen un *ariete* o *corredera* que se mueve respecto a la *columna* para proveer el movimiento de corte, y una mesa de trabajo que sujeta la pieza y realiza el movimiento de avance. El movimiento del ariete es una carrera hacia delante para lograr el corte y una carrera de regreso durante la cual la herramienta se eleva ligeramente para librar el trabajo, e inmediatamente se coloca en posición para el siguiente paso. Al completar cada carrera de retorno, la mesa de trabajo avanza lateralmente respecto al movimiento del ariete a fin de hacer avanzar la pieza. El avance se especifica en mm/carrera (in/carrera). El mecanismo de transmisión para la corredera puede ser hidráulico o mecánico. La transmisión hidráulica tiene mayor flexibilidad para ajustar la longitud de la carrera y una velocidad más uniforme durante la carrera hacia delante, pero es más costosa que una unidad de transmisión mecánica. Tanto la transmisión hidráulica como la mecánica están diseñadas para lograr mayores velocidades en la carrera de retorno (sin corte) que sobre el avance hacia delante (cortante); por consiguiente, una mayor proporción del tiempo se dedica al corte.

FIGURA 22.30
Componentes de una perfiladora.

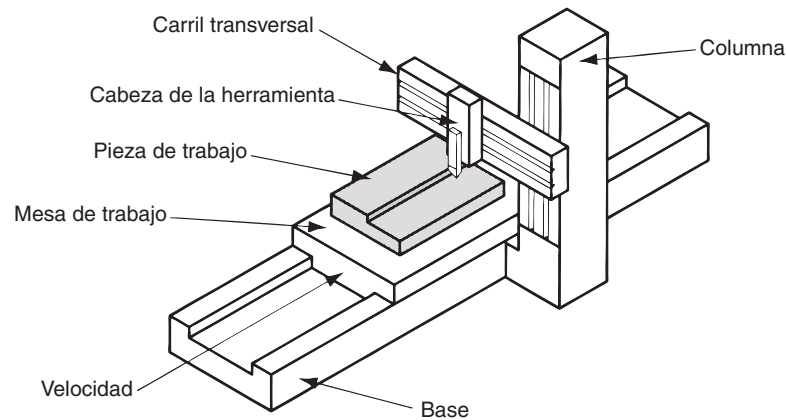


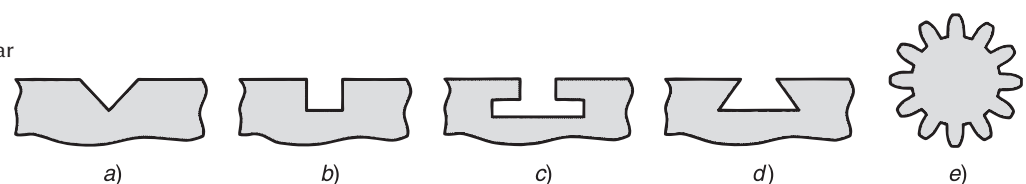
FIGURA 22.31 Cepillo de mesa abierto lateralmente.

Cepillado La máquina herramienta para cepillado se llama **cepillo**. La velocidad de corte se logra por medio de una mesa de trabajo oscilante que mueve la parte posterior de una herramienta de corte de una punta. La construcción y la capacidad de movimiento de un cepillo permiten el maquinado de piezas mucho más grandes que las de una perfiladora. Los cepillos se pueden clasificar como cepillos de mesa abiertos lateralmente o cepillos de doble columna. Los **cepillos de mesa abiertos lateralmente**, también conocidos como **cepillos de una columna**, figura 22.31, tienen una sola columna que soporta el riel transversal sobre el cual se mueve el cabezal de la herramienta. Se puede montar otro cabezal de herramienta que avanza a lo largo de la columna vertical. Los cabezales de herramienta múltiple permiten más de un corte en cada paso. Al completarse cada carrera, cada cabezal de corte se mueve respecto al riel transversal (o columna) para lograr un movimiento de avance intermitente. La configuración del cepillo de mesa abierto lateralmente permite maquinar piezas de trabajo muy anchas.

Un **cepillo de doble columna** tiene dos columnas, una a cada lado de la cama y mesa de trabajo. Las columnas sostienen el riel transversal, sobre el cual se montan uno o más cabezales de herramienta. Las dos columnas proporcionan una estructura más rígida para la operación; sin embargo, las dos columnas limitan el ancho del trabajo que se puede manejar en esta máquina.

El perfilado y cepillado se pueden usar para maquinar otras superficies diferentes a las planas. La restricción es que las superficies deben ser rectas. Esto permite el tallado de canales, ranuras, dientes de engranes y otras formas, como las ilustradas en la figura 22.32. Para cortar algunas de estas formas, es necesario especificar configuraciones geométricas especiales diferentes a las herramientas estándar de una punta. De hecho, las herramientas especiales para maquinado se usan algunas veces para este fin. Un ejemplo importante es el **formador de engranes**, un formador vertical diseñado especialmente para avance rotatorio y cabezal de herramienta sincronizada para generar los dientes de los engranes rectos o cilíndricos.

FIGURA 22.32 Tipos de perfiles que se pueden cortar por perfilado y cepillado: a) canal en V, b) canal cuadrado, c) ranura en T, d) ranura cola de milano y e) dientes de engrane.



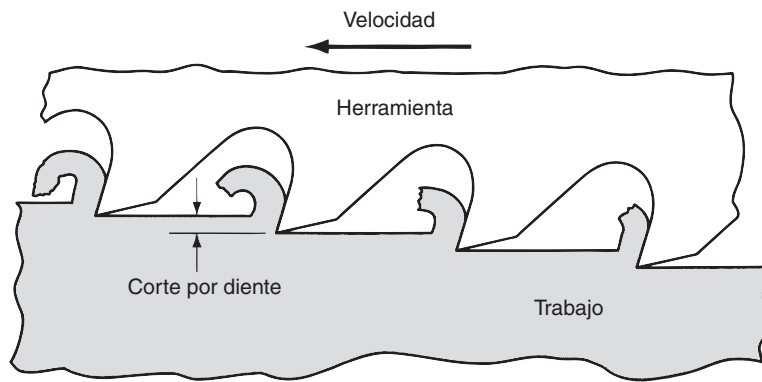


FIGURA 22.33 Operación de brochado.

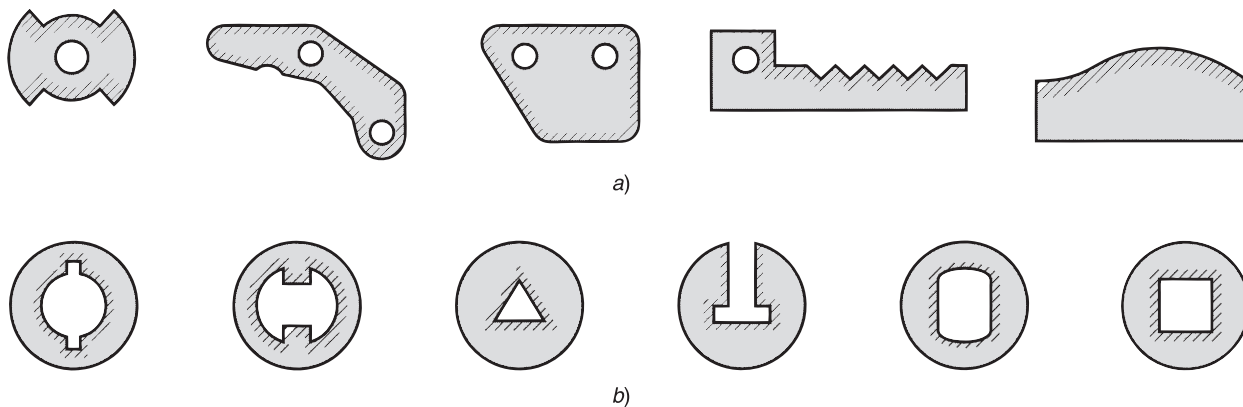
22.5.2 Brochado

El escariado se realiza usando una herramienta de corte de dientes múltiples que se mueve linealmente en relación con el trabajo en dirección al eje de la herramienta, como se muestra en la figura 22.33. La herramienta de corte se llama **brocha**, y la máquina herramienta se llama **máquina brochadora**. Éste es un método de maquinado altamente productivo en algunos trabajos que usan el brochado. Las ventajas incluyen buen acabado de la superficie, tolerancias estrechas y una gran variedad de formas posibles de trabajo. Debido a la complicada forma geométrica de la brocha y a que frecuentemente se diseña a la medida, la herramienta es costosa.

Hay dos tipos principales de brochado: externo (también llamado brochado de superficie) e interno. El **brochado externo** se ejecuta sobre la superficie externa del trabajo para crear ciertas formas de la sección transversal en la superficie. La figura 22.34a) muestra algunas posibles secciones transversales que pueden formarse por brochado externo. El **brochado interno** se ejecuta en la superficie interna de un agujero de la pieza. Por consiguiente, en la pieza de trabajo debe estar presente el agujero inicial, de manera que se pueda insertar la brocha al principio de la carrera de brochado. La figura 22.34b) indica algunas de las formas que pueden producirse por brochado interno.

La función básica de la **máquina brochadora** es suministrar un movimiento lineal y preciso de la herramienta que pasa delante de la posición del trabajo estacionario, pero hay varias formas en que esto puede hacerse. La mayoría de las máquinas brochadoras se puede clasificar como máquinas verticales u horizontales. La **máquina brochadora vertical** está diseñada para mover el brochado a lo largo de una trayectoria vertical, mientras que la **máquina brochadora horizontal** tiene una trayectoria horizontal. La mayoría de las máquinas de brochado jala la brocha por delante del trabajo. Sin embargo, hay excepciones para esta acción de tirado. Una de ellas es un tipo relativamente simple llamado **prensa de**

FIGURA 22.34 Formas de trabajo que se pueden cortar por: a) brochado externo y b) brochado interno. El achurado indica las superficies brochadas.



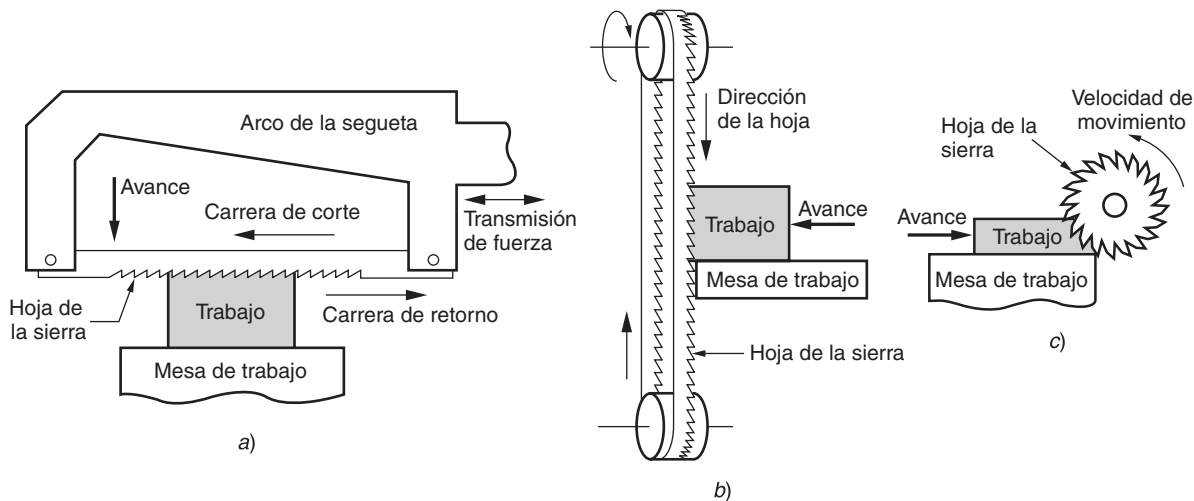


FIGURA 22.35 Tres tipos de operaciones de aserrado: a) con segueta motorizada, b) con sierra de cinta (vertical) y c) con sierra circular.

brochado que se usa solamente para el brochado interno, la cual empuja la herramienta a través de la pieza de trabajo. Otra excepción es la **máquina de brochado continuo**, en la cual se fija la pieza de trabajo a un transportador sin fin que se mueve delante de una brocha estacionaria. Debido a su operación continua, esta máquina se puede usar solamente para brochado superficial.

22.5.3 Aserrado

El aserrado es un proceso en el que se corta una hendidura angosta dentro de la pieza de trabajo por medio de una herramienta que tiene una serie de dientes estrechamente espaciados. El aserrado se usa normalmente para separar una pieza de trabajo en dos piezas o para cortar un trozo no deseado de la pieza. A estas operaciones se les llama frecuentemente operaciones de **separación**. El aserrado es un proceso importante de manufactura, ya que muchas fábricas requieren de operaciones de corte en algunos puntos de su secuencia de manufactura.

En la mayoría de las operaciones de aserrado el trabajo se mantiene estático y la **hoja de la sierra** se mueve respecto a él. Hay tres tipos básicos de aserrado, como se muestra en la figura 22.35, de acuerdo con el tipo de movimiento de la sierra: a) con segueta, b) con sierra de cinta y c) con sierra circular.

El **corte con segueta**, figura 22.35a), involucra un movimiento lineal de vaivén de la segueta contra el trabajo. Este método de aserrado se usa frecuentemente en operaciones de trozado. El corte se realiza solamente en la carrera hacia adelante de la segueta. Debido a esta acción de corte intermitente, el corte con segueta es por naturaleza menos eficiente que los otros métodos de aserrado, ya que los otros dos son continuos. Una **segueta** es una herramienta delgada y recta, con dientes cortantes en uno de sus bordes. El corte con segueta se puede hacer en forma mecánica o manual. La **segueta mecanizada** tiene un mecanismo de transmisión en el que la segueta opera a la velocidad deseada; también se aplica una velocidad dada de avance o presión de aserrado.

El **aserrado con cinta** implica un movimiento lineal continuo que utiliza una **sierra de cinta** hecha en forma de banda flexible sin fin con dientes en uno de sus bordes. La máquina aserradora es una **sierra de cinta**, que tiene un mecanismo de transmisión con poleas para mover y guiar continuamente la sierra de cinta delante del trabajo. Las sierras de cinta se clasifican en verticales u horizontales. La designación se refiere a la dirección del movimiento de la sierra de cinta durante el corte. Las sierras de cintas verticales se usan para cortar trozos y realizar otras operaciones, como el contorneado y el ranurado. El **calado** en una sierra de cinta implica el corte del perfil de una pieza perfilada de material plano. El **ranurado** es el corte de una ranura delgada dentro de la pieza, una operación para la cual

la sierra de cinta es adecuada. El contorneado y el ranurado son operaciones en las que el trabajo avanza dentro de la sierra de cinta.

Las máquinas verticales de sierra de cinta pueden operarse ya sea manualmente por un operador que guía y hace avanzar el trabajo manualmente sobre la sierra de cinta, o automáticamente, en la cual el trabajo avanza mecánicamente a través de la sierra. Algunas innovaciones recientes en el diseño de sierras de cinta han permitido el uso del CNC para realizar el contorneado de formas complejas. Algunos detalles de la operación de la sierra de cinta se ilustran en la figura 22.35b). Las sierras de cinta horizontales se usan normalmente en operaciones de corte como alternativas del corte con segueta mecanizada.

La **sierra circular**, figura 22.35c), usa una sierra circular giratoria para suministrar el movimiento continuo de la herramienta frente al trabajo. El corte con sierra circular se usa frecuentemente para cortar barras largas, tubos y formas similares a una longitud específica. La acción de corte es similar a una operación de fresado de ranuras, excepto porque la sierra circular es más delgada y contiene más dientes que una fresa ranuradora. Las máquinas de sierra circular tienen husillos motorizados que hacen girar la sierra y un mecanismo de avance que conduce la sierra giratoria dentro del trabajo.

Dos operaciones relacionadas con la sierra circular son el corte abrasivo y el aserrado por fricción. En el **corte abrasivo** se usa un disco abrasivo para ejecutar las operaciones de corte sobre materiales duros que serían difíciles de aserrar con una sierra convencional. En el **aserrado por fricción**, un disco de acero gira contra el trabajo a una velocidad muy alta y produce el calor de fricción necesario para ablandar el material lo suficiente y permitir la penetración del disco a través del trabajo. Las velocidades de corte en ambas operaciones son mucho más rápidas que las de la sierra circular.

22.6 MAQUINADO DE ALTA VELOCIDAD

Una tendencia muy constante a través de la historia del maquinado de metales ha sido el uso de velocidades de corte cada vez más elevadas. En años recientes, se ha presentado un gran interés en esta área debido a su potencial para alcanzar volúmenes de producción más elevados, tiempos y costos más reducidos y una mejor calidad de las piezas. En su definición más simple, el **maquinado a alta velocidad** (HSM) significa utilizar velocidades de corte que sean significativamente más elevadas que las utilizadas en las operaciones de maquinado convencional. En la tabla 22.1 se presenta algunos ejemplos de valores de velocidades de corte para corte convencional y de alta velocidad, de acuerdo con los datos recabados por Kennametal, Inc.¹

Se han creado otras definiciones de HSM para tratar con una amplia variedad de materiales de trabajo y para herramientas que se utilizan en el maquinado. Una definición popular de HSM es la **relación DN**, el diámetro de la broca (mm) multiplicado por la velocidad máxima del husillo (rev/min). En el maquinado de alta velocidad, la relación DN típica es entre 500 000 y 1 000 000. Esta definición permite que cojinetes de mayor diámetro se ubiquen dentro del rango de HSM, a pesar de que operen a velocidades rotacionales menores que los cojinetes más pequeños. Las velocidades de husillo HSM típicas se encuentran en el rango de entre 8 000 y 35 000 rpm, aunque algunos husillos en la actualidad están diseñados para girar a 100 000 rpm.

Otra definición de HSM se basa en el cociente de los caballos de fuerza y la velocidad máxima del husillo, también conocida como **relación hp/rpm**. Las máquinas herramienta convencionales usualmente tienen una relación hp/rpm más elevada que las máquinas equipadas para el maquinado a alta velocidad. Mediante esta medida, la línea divisoria entre el maquinado convencional y el HSM es de alrededor de 0.005 hp/rpm. Por lo tanto, el maquinado a alta velocidad incluye husillos de 50 hp capaces de girar a 10 000 rpm (0.005 hp/rpm) y husillos de 15 hp capaces de girar a 30 000 rpm (0.0005 hp/rpm).

Otras definiciones se enfocan en velocidades de producción más elevadas y tiempos más reducidos, en lugar de basarse en la funcionalidad de la velocidad del husillo. En este

¹Kennametal, Inc. es una fabricante líder en máquinas para corte.

TABLA 22.1 Tabla comparativa de las velocidades de corte utilizadas en el maquinado convencional versus el de alta velocidad para determinados materiales de trabajo.

Material de trabajo	Herramientas sólidas (fresas escariadoras, taladros) ^a				Herramientas indexables (molinos frontales) ^a			
	Velocidad convencional		Velocidad alta de corte		Velocidad convencional		Velocidad alta de corte	
	m/min	ft/min	m/min	ft/min	m/min	ft/min	m/min	ft/min
Aluminio	300+	1 000+	3 000+	10 000+	600+	2 000+	3 600+	12 000+
Acero fundido, suave	150	500	360	1 200	360	1 200	1 200	4 000
Acero fundido, dúctil	105	350	250	800	250	800	900	3 000
Acero, maquinado libre	105	350	360	1 200	360	1 200	600	2 000
Acero, aleación	75	250	250	800	210	700	360	1 200
Titanio	40	125	60	200	45	150	99	300

Fuente: Kennametal, Inc. [3].

^a Las herramientas sólidas están hechas de una pieza sólida, las herramientas indexables utilizan insertos indexables. Los materiales apropiados de las herramientas son el carburo cementado y el carburo con revestimiento de varios grados para todos los materiales, cerámicos para todos los materiales, herramientas de diamante policristalino para el aluminio, y nitrito de boro cúbico para aceros (véase la sección 23.2 para un estudio de estos materiales usados en las herramientas).

caso, entran en juego algunos factores importantes que no se refieren al corte, tales como velocidades de transferencia elevadas y cambios rápidos en las herramientas automáticas (tiempos de “viruta a viruta” de 7 segundos o menores).

Los requerimientos del maquinado de alta velocidad incluyen lo siguiente: 1) husillos de alta velocidad utilizando cojinetes diseñados para brindar una operación a elevadas rpm; 2) alta velocidad de avance, típicamente de alrededor de 50 m/min (2 000 in/min); 3) controles de movimiento CNC con características de “ver hacia delante” que le permitan al controlador ver cambios de dirección por venir y hacer ajustes a fin de evitar el bajo o sobre disparo respecto a la trayectoria deseada de la herramienta; 4) herramientas para el corte balanceado, sujetadores de herramientas y husillos para minimizar los efectos de la vibración; 5) sistemas de entrega de anticongelante que brinden presiones en orden de magnitud mayores que en el caso del maquinado convencional; y 6) sistemas de control y remoción de viruta que sean lo suficientemente eficaces para lidiar con altas velocidades de remoción de metal características del HSM. También son importantes los materiales para las herramientas de corte. Como se muestra en la tabla 22.1, diferentes materiales se utilizan en el maquinado a alta velocidad, los cuales se estudiarán en el capítulo siguiente.

Las aplicaciones de HSM parecen dividirse en tres categorías [3]. Una es en la industria aeronáutica, en compañías como Boeing, en las que componentes estructurales de gran longitud se maquina a partir de grandes bloques de aluminio. Se requiere de la remoción de mucho metal, en su mayoría a través de fresado. Las piezas resultantes se caracterizan por paredes delgadas y relaciones superficie-a-volumen elevadas, sin embargo, pueden fabricarse de una manera más rápida y confiable que bloques que estén formados por múltiples componentes y uniones remachadas. Una segunda categoría involucra el maquinado de aluminio mediante operaciones múltiples para fabricar una gran variedad de componentes para industrias como la automotriz, de cómputo y médica. Un gran número de operaciones de corte significa muchos cambios de herramienta, así como aceleraciones y desaceleraciones del maquinado. Por lo tanto, son de gran importancia en estas aplicaciones los cambios de herramienta rápidos así como el control de la trayectoria de la herramienta. La tercera categoría de las aplicaciones de HSM es en la industria del troquel y del molde, la cual fabrica formas complejas a partir de materiales rígidos. En este caso, el maquinado a alta velocidad involucra un gran trabajo de remoción de material para crear el molde o cavidad del troquel y de operaciones de terminado a fin de alcanzar acabados finos en las superficies.

REFERENCIAS

- | | |
|---|---|
| <p>[1] Aronson, R. B., “Spindles are the Key to HSM”, <i>Manufacturing Engineering</i>, octubre de 2004, pp. 67-80.</p> <p>[2] Aronson, R. B., “Multitalented Machine Tools”, <i>Manufacturing Engineering</i>, enero de 2005, pp. 65-75.</p> | <p>[3] Ashley, S., “High-speed Machining Goes Mainstream”, <i>Mechanical Engineering</i>, mayo de 1995, pp. 56-61.</p> <p>[4] Boston, O. W., <i>Metal Processing</i>, 2a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1951.</p> |
|---|---|

- [5] DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Kohser, R.A., **Materials and Processes in Manufacturing**, 9a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.
- [6] Drozda, T. J. y Wick, C. (eds.), **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**, 4a. ed., vol. I, **Machining**. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1983.
- [7] Eary, D. F. y Johnson, G. E., **Process Engineering: for Manufacturing**, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1962.
- [8] Hogan, B. J., “No Speed Limits”, **Manufacturing Engineering**, marzo de 1999, pp. 66-79.
- [9] Israelsson, J. y Piscopo S., “Machining Molds and Dies at High Speeds”, **Manufacturing Engineering**, marzo de 2000, pp. 148-157.
- [10] Kalpakjian, S. y Schmid, S. R., **Manufacturing Engineering and Technology**, 4a. ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2003.
- [11] Krar, S. F. y Ratterman, E., **Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond**, McGraw-Hill, Inc., Nueva York, 1990.
- [12] Lindberg, R. A., **Processes and Materials of Manufacture**, 4a. ed., Allyn and Bacon, Inc., Boston, 1990.
- [13] Marinac, D., “Smart Tool Paths for HSM”, **Manufacturing Engineering**, noviembre de 2000, pp. 44-50.
- [14] Mason, F. y Freeman, N. B., “Turning Centers Come of Age”. Special Report 773, **American Machinist**, febrero de 1985, pp. 97-116.
- [15] **Metals Handbook**, 9a. ed., vol. 16, **Machining**. ASM International, Materials Park, Ohio, 1989.
- [16] **Modern Metal Cutting**, AB Sandvik Coromant, Sandvik, Suecia, 1994.
- [17] Rolt, L. T. C., **A Short History of Machine Tools**, The M.I.T. Press, Cambridge, Mass. 1965.
- [18] Steeds, W., **A History of Machine Tools-1700-1910**, Oxford University Press, Cambridge, Londres, 1969.
- [19] Trent, E. M. y Wright, P. K., **Metal Cutting**, 4a. ed. Butterworth Heinemann, Boston, 2000.
- [20] Witkowski, M. y Binegeman, A., “The Case for Multiple Spindle HMCs”, **Manufacturing Engineering**, marzo de 2004, pp. 139-148.

PREGUNTAS DE REPASO

- 22.1. Describa las diferencias entre las piezas rotacionales y las piezas prismáticas en maquinado.
- 22.2. Distinga entre generación y formación, cuando se maquina la configuración geométrica de las piezas.
- 22.3. Dé dos ejemplos de operaciones de maquinado en las cuales se combinen la generación y el formado para crear la configuración geométrica de la pieza de trabajo.
- 22.4. Describa el proceso de torneado.
- 22.5. ¿Cuál es la diferencia entre el roscado exterior y el roscado interior?
- 22.6. ¿En qué difiere una operación de perforado de una operación de torneado?
- 22.7. ¿Qué significa la designación 12×36 in. en un torno?
- 22.8. Mencione las formas en que se puede sujetar una pieza de trabajo a un torno.
- 22.9. ¿Cuál es la diferencia entre un centro vivo y un centro muerto en el contexto de sujeción de trabajo en un torno?
- 22.10. ¿En qué se diferencia un torno revólver de un torno mecánico?
- 22.11. ¿Qué es un agujero ciego?
- 22.12. ¿Cuál es la característica que distingue a un taladro prensa radial?
- 22.13. ¿Cuál es la diferencia entre el fresado periférico y el fresado frontal?
- 22.14. Describa el fresado de perfiles.
- 22.15. ¿Qué es el fresado de cavidades?
- 22.16. Describa la diferencia entre el fresado ascendente y el fresado descendente.
- 22.17. ¿En qué difiere una máquina fresadora universal de una máquina convencional de codo y columna?
- 22.18. ¿Qué es un centro de maquinado?
- 22.19. ¿Cuál es la diferencia entre un centro de maquinado y un centro de torneado?
- 22.20. ¿Qué puede hacer un centro de torneado y fresado que no pueda hacer un centro convencional de torneado?
- 22.21. ¿En qué difieren el perfilado y el cepillado?
- 22.22. ¿Cuál es la diferencia entre el brochado interno y el brochado externo?
- 22.23. Identifique las tres formas básicas de la operación de aseo.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 17 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta

vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

- 22.1. ¿Cuál de los siguientes son ejemplos de generación de la configuración de la pieza de trabajo en maquinado, comparadas con el formado de dicha configuración? (hay dos respuestas correctas): *a)* brochado, *b)* torneado de contornos, *c)* taladrado y *d)* fresado de perfiles.
- 22.2. En una operación de torneado, el cambio en diámetro de la pieza de trabajo es igual a ¿cuál de los siguientes?: *a)* $1 \times$ profundidad de corte, *b)* $2 \times$ profundidad de corte, *c)* $1 \times$ avance o *d)* $2 \times$ avance.
- 22.3. ¿En cuáles de las operaciones de maquinado siguientes se puede utilizar un torno? (tres respuestas correctas): *a)* perforado, *b)* brochado, *c)* taladrado, *d)* fresado, *e)* cepillado y *f)* torneado.
- 22.4. ¿En cuál de las siguientes máquinas herramientas se lleva a cabo normalmente una operación de careado?: *a)* prensa taladradora, *b)* torno, *c)* máquina fresadora, *d)* cepillo o *e)* perfiladora.
- 22.5. El moleteado se ejecuta en un torno, pero es una operación de formado de metal más que una operación de remoción de metal: *a)* verdadero o *b)* falso.
- 22.6. ¿Cuál de las siguientes herramientas de corte se puede usar en un torno revólver?: *a)* brocha, *b)* herramienta de corte, *c)* broca, *d)* herramienta de torner de una punta o *e)* herramienta de roscado.
- 22.7. ¿Cuál de las siguientes máquinas de torner permite usar material de barras largo?: *a)* máquina de mandril, *b)* torno mecánico, *c)* máquina para tornillos, *d)* torno manual o *e)* torno revólver.
- 22.8. ¿Para cuál de las siguientes funciones se usa el escariado? (tres respuestas correctas): *a)* localizar exactamente la posición de un agujero, *b)* ensanchar un agujero taladrado, *c)* mejorar el acabado superficial en un agujero, *d)* mejorar la tolerancia del diámetro de un agujero y *e)* proveer una rosca interna.
- 22.9. ¿A cuál de las siguientes operaciones es más parecido el fresado terminal?: *a)* fresado frontal, *b)* fresado periférico, *c)* fresado plano o *d)* fresado de placa.
- 22.10. ¿Cuál de las siguientes es la máquina fresadora básica?: *a)* tipo bancada, *b)* de codo y columna, *c)* fresa de perfiles, *d)* fresadora de corredera y *e)* máquina fresadora universal.
- 22.11. Una operación de cepillado se describe mejor por una de las opciones siguientes: *a)* una herramienta de una sola punta se mueve linealmente pasando una pieza de trabajo estacionaria, *b)* una herramienta con múltiples dientes se mueve linealmente pasando una pieza de trabajo estacionaria, *c)* una pieza de trabajo se alimenta linealmente pasando una herramienta rotativa de corte o *d)* una pieza de trabajo se mueve linealmente pasando una herramienta de una sola punta.
- 22.12. ¿Cuál de las siguientes opciones describe mejor una operación de brochado?: *a)* una herramienta rotatoria se mueve pasando frente a una pieza de trabajo estacionaria, *b)* una herramienta con dientes múltiples se mueve linealmente pasando una pieza de trabajo estacionaria, *c)* una pieza de trabajo avanza frente a una herramienta rotatoria de corte o *d)* una pieza de trabajo se mueve linealmente frente a una herramienta estacionaria de una punta.

PROBLEMAS

Torneado y operaciones afines

- 22.1. Una pieza de trabajo cilíndrica de 200 mm de diámetro y 700 mm de largo se va a torner en un torno mecánico. Las condiciones de corte son las siguientes: velocidad de corte de 2.30 m/s, el avance de 0.32 mm/rev y la profundidad de corte de 1.80 mm. Determine: *a)* el tiempo de corte y *b)* la velocidad de remoción del metal.
- 22.2. En una operación de torneado, el operador ha establecido que se debe completar un solo paso en la pieza de trabajo cilíndrica en 5.0 min. La pieza tiene 400 mm de largo y 150 mm de diámetro. Utilizando un avance de 0.30 mm/rev y una profundidad de corte de 4.0 mm, ¿qué velocidad de corte deberá utilizarse para cumplir este tiempo de maquinado?
- 22.3. Una operación de careado se lleva a cabo en un torno mecánico. El diámetro de la pieza cilíndrica es de 6 in y el largo es de 15 in. El husillo se configura para girar a una velocidad de corte de 180 rev/min. La profundidad de corte es de 0.110 in y el avance es de 0.008 in/rev. Suponga que la herramienta de corte se mueve a partir del diámetro exterior de la pieza de trabajo a exactamente el centro a una velocidad constante. Determine: *a)* la velocidad de la herramienta a medida que se mueve desde el diámetro exterior hacia el centro y *b)* el tiempo de corte.
- 22.4. Una superficie roscada se va a torner en un torno automático. La pieza de trabajo tiene 750 mm de largo con diámetros mínimo y máximo de 100 mm y 200 mm en los extremos opuestos. Los controles automáticos en el torno permiten que la velocidad en la superficie se mantenga a un valor constante de 200 m/min, ajustando la velocidad rotacional en función del diámetro de la pieza de trabajo. El avance es igual a 0.25 mm/rev y la profundidad de corte de 3.0 mm. La forma rígida de la pieza ya se formó y esta operación será el corte final. Determine: *a)* el tiempo que se requiere para torner la rosca y *b)* las velocidades de rotación al comienzo y al final del corte.
- 22.5. En el trabajo de torneado de la rosca del problema anterior, suponga que el torno automático con control de velocidad superficial no está disponible y que se debe utilizar un torno convencional. Determine la velocidad rotacional que se requerirá para realizar el trabajo en exactamente el mismo tiempo que especificó en la respuesta del inciso *a)* de dicho problema.
- 22.6. Una barra de trabajo con un diámetro de 4.5 in y largo de 52 in está roscada en un torno mecánico y soportado en el extremo opuesto utilizando un centro vivo. Una pieza de 46.0 in de la longitud total se va a torner a un diámetro de 4.25

en un pase a una velocidad de 450 ft/min. La velocidad de remoción de material deberá ser de 6.75 in³/min. Determine: *a*) la profundidad de corte requerida, *b*) el avance requerido y *c*) el tiempo de corte.

- 22.7. Una barra de trabajo de 4.00 in de diámetro que tiene una longitud de 25 in se va a torneear a un diámetro de 3.50 in utilizando dos pases en un torno mecánico utilizando las condiciones de corte siguientes: velocidad de corte de 300 ft/min, avance de 0.015 in/rev y profundidad de corte de 0.125 in. La barra se mantendrá en un mandril y estará soportada en el extremo opuesto en un centro vivo. Con esta configuración de sujeción de trabajo, un extremo debe tornearse al diámetro; después la barra deberá invertirse para torneear el otro extremo. Utilizando una grúa que se encuentra disponible en el torno, el tiempo que se requiere para cargar y descargar la barra es de 5.0 min y el tiempo para invertir la barra es de 3.0 min. Por cada corte en el torno, se debe agregar una holgura a la longitud del corte para aproximación

y sobreviaje. La holgura total (aproximación más sobreviaje) es de 0.50 in. Determine el tiempo total del ciclo para completar esta operación de torneado.

- 22.8. El extremo de una pieza grande tubular se carea en una perforadora vertical. La pieza tiene un diámetro exterior de 38.0 in y un diámetro interior de 24 in. Si la operación de careado se ejecuta a una velocidad de rotación de 40.0 rev/min, el avance es de 0.015 in/rev y la profundidad de corte es de 0.180 in, determine *a*) tiempo de corte para completar la operación de careado y las velocidades de corte y de remoción de metal al principio y al final del corte.
- 22.9. Repita el problema 22.8, excepto porque los controles de la máquina herramienta operan a una velocidad de corte constante, ajustando continuamente la velocidad de rotación para posicionar la herramienta respecto al eje de rotación. La velocidad de rotación al principio de corte es de 40 rev/min, y a partir de este punto se incrementa continuamente para mantener una velocidad de corte constante.

Taladrado

- 22.10. Se ejecuta una operación de taladrado con una broca helicoidal de 12.7 mm de diámetro en una pieza de trabajo de acero. El agujero es un agujero ciego que tiene una profundidad de 60 mm y el ángulo de la punta es de 118°. La velocidad de corte es de 25 m/min y el avance es de 0.30 mm/rev. Determine: *a*) el tiempo de corte para completar la operación de taladrado y *b*) la velocidad de remoción de metal durante la operación después de que la broca del taladro haya alcanzado el diámetro correspondiente.
- 22.11. Un taladro de doble husillo simultáneamente perfora un agujero de ½ in y otro de ¾ de in mediante una pieza de trabajo de 1.0 in de ancho. Ambos taladros son de broca helicoidal con ángulos en la punta de 118°. La velocidad de corte para el material es de 230 ft/min. La velocidad de rotación de cada husillo puede configurarse de manera individual. La velocidad de avance de ambos agujeros debe configurarse al mismo valor, ya que los dos husillos bajan a la misma velocidad. La velocidad de avance se configura de tal manera que la velocidad total de remoción de metal no exceda 1.50 in³/min. Determine: *a*) la velocidad máxima de avance (in/min) que puede utilizarse, *b*) los avances individuales (in/rev) que resultan en cada agujero y *c*) el tiempo requerido para perforar los agujeros.
- 22.12. Una prensa taladradora de CN ejecuta una serie de agujeros completos en una placa gruesa de aluminio de 1.75 in, que es un componente de un intercambiador de calor. Cada agujero tiene ¾ de in de diámetro. Hay 100 agujeros en total

arreglados en una forma de matriz de 10 × 10, y la distancia entre los centros de los agujeros adyacentes (a lo largo del cuadro) es de 1.5 in. La velocidad de corte es de 300 ft/min, el avance de penetración (dirección z) es de 0.015 in/rev, la velocidad de corte es de 300 ft/min, el avance de penetración (dirección z) es de 0.015 in/rev y la velocidad de avance entre agujeros (plano x-y) es de 15.0 ft/min. Suponga que los movimientos x-y se hacen a una distancia de 0.05 in sobre la superficie de trabajo y que esta distancia debe incluirse en la velocidad de avance de penetración para cada agujero. Asimismo, la velocidad a la cual la broca se retira de cada agujero es dos veces la velocidad de avance de penetración. La broca tiene un ángulo de punta de 100°. Determine el tiempo requerido desde el principio del primer agujero hasta la terminación del último; suponga que se usará la secuencia de taladrado más eficiente para completar el trabajo.

- 22.13. Se usa una operación de taladrado para hacer un agujero de 9/64 in de diámetro a cierta profundidad. La ejecución de la operación toma 4.5 min de taladrado, usando un fluido refrigerante a alta presión en la punta de la broca. Las condiciones de corte incluyen una velocidad de husillo de 4 000 rev/min a un avance de 0.0017 in/rev. Para mejorar el acabado de la superficie en el agujero se ha decidido incrementar la velocidad en 20% y disminuir el avance en 25%. ¿Cuánto tiempo tomará ejecutar la operación de las nuevas condiciones de corte?

Fresado

- 22.14. Se ejecuta una operación de fresado periférico para acabar la superficie superior de una pieza de trabajo rectangular de 400 mm de largo por 60 mm de ancho. Se monta una fresa helicoidal de 80 mm de diámetro con cinco dientes, cuyo ancho de la pieza sobresale en ambos lados. La velocidad de corte es de 70 m/min, la carga de viruta es de 0.25 mm/diente

y la profundidad de corte es de 5.0 mm. Determine: *a*) el tiempo para hacer un paso a través de la superficie y *b*) la velocidad de remoción de metal durante el corte.

- 22.15. Se usa una operación de fresado frontal para maquinar 5 mm de la superficie superior de una pieza rectangular de aluminio de 300 mm de largo por 125 mm de ancho. El cortador tiene

cuatro dientes (insertos de carburo cementado) y 150 mm de diámetro. La velocidad de corte es de 2.8 m/s y la carga de viruta es de 0.27 mm/diente. Determine *a)* el tiempo para hacer un paso a través de la superficie y *b)* la velocidad de remoción del material durante el corte.

- 22.16. Se lleva a cabo una operación de fresado de placa para acabar la superficie superior de una pieza de trabajo rectangular de acero de 12.0 in de largo por 2.5 in de ancho. El cortador helicoidal de fresado, que tiene un diámetro de 3.5 in y 10 dientes, se configura para sobresalir un ancho de la pieza en ambos lados. La velocidad de corte es de 125 ft/min, la carga de viruta es de 0.008 in/diente y la profundidad del corte es de 0.300 in. Determine: *a)* el tiempo que lleva hacer un pase por la superficie y *b)* la velocidad máxima de remoción de metal durante el corte.
- 22.17. Se ejecuta una operación de fresado frontal para acabar la superficie superior de una pieza rectangular de acero de 12.0 in de largo por 2.0 in de ancho. La fresa tiene cuatro

dientes (insertos de carburo cementado) y 3.0 in de diámetro. Las condiciones de corte son: velocidad de corte de 500 ft/min, avance de 0.010 in/diente y profundidad de corte de 0.150 in. Determine: *a)* el tiempo necesario para hacer un pase por la superficie y *b)* la velocidad máxima de remoción del metal durante el corte.

- 22.18. Resuelva el problema anterior considerando que la pieza de trabajo tiene un ancho de 5.0 in y la fresa está desigual en un lado, por lo que el corte hecho por la fresa es de 1.0 de ancho.
- 22.19. Una operación de fresado frontal se utiliza para quitar 0.32 in del extremo de un cilindro que tiene un diámetro de 3.90 in. La fresa tiene un diámetro de 4 in y tiene cuatro dientes. La velocidad de corte es de 375 ft/min y la carga de viruta es de 0.006 in/diente. Determine: *a)* el tiempo de maquinado, *b)* la velocidad promedio de remoción de metal (considerando el tiempo total de maquinado) y *c)* la velocidad máxima de remoción de metal.

Otras operaciones

- 22.20. Se utiliza un formador para reducir el grosor de una pieza de 50 mm a 45 mm. La pieza está hecha de hierro forjado y tiene una resistencia a la tensión de 270 MPa y una dureza Brinell de 165 HB. Las dimensiones de la pieza al inicio son de 750 mm $\times$ 450 mm $\times$ 50 mm. La velocidad de corte es de 0.125 m/s y el avance es de 0.40 mm/pase. La corredera de formado opera hidráulicamente y tiene un tiempo de retorno de carrera de 50% el tiempo de corte. Se debe agregar 150 mm extra antes y después de la pieza para que se pueda llevar a cabo la aceleración y desaceleración. Suponiendo que la corredera se mueve paralelamente a la dimensión larga de la pieza, ¿cuánto tiempo le tomará a la máquina?
- 22.21. Un cepillo de lado abierto se va a utilizar para aplanar la superficie de una pieza de trabajo rectangular de 20.0 in $\times$ 45.0 in. La velocidad de corte es de 30 ft/min, el avance es de 0.015 in/pase y la profundidad de corte es de 0.250 in. La longitud de la carrera a través del trabajo debe configurarse de tal forma que se permitan 10 in al inicio y al final de la

carrera para efectos de aproximación y sobreviaje. La carrera de retorno, incluida la holgura para aceleración y desaceleración, le toma a la carrera hacia delante 60% del tiempo. La pieza de trabajo está hecha de acero con una resistencia a la tensión de 50 000 lb/in² y una dureza de Brinell de 110 HB. ¿Cuánto tiempo le tomará hacer su trabajo, suponiendo que la pieza está orientada de tal manera que el tiempo sea mínimo?

- 22.22. El maquinado de alta velocidad (HSM) se considera para producir la pieza de aluminio del problema 22.15. Todas las condiciones de corte permanecen iguales excepto la velocidad de corte y el tipo de inserto utilizado en la fresa. Suponga que la velocidad de corte estará en el límite que especifica la tabla 22.1. Determine: *a)* el nuevo tiempo para maquinar la pieza y *b)* la nueva velocidad de remoción del metal. *c)* ¿es esta pieza buena candidata para el maquinado a alta velocidad? Explique.

23

TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 23.1 Vida de las herramientas
 - 23.1.1 Desgaste de la herramienta
 - 23.1.2 Vida de las herramientas y la ecuación de Taylor
- 23.2 Materiales para herramientas
 - 23.2.1 Acero de alta velocidad y sus predecesores
 - 23.2.2 Aleación de fundición de cobalto
 - 23.2.3 Carburos cementados, cermets y carburos recubiertos
 - 23.2.4 Cerámicos
 - 23.2.5 Diamantes sintéticos y nitruro de boro cúbico
- 23.3 Configuración geométrica de las herramientas
 - 23.3.1 Configuración geométrica de las herramientas de una punta
 - 23.3.2 Herramientas de múltiples filos
- 23.4 Fluidos para corte
 - 23.4.1 Tipos de fluidos para corte
 - 23.4.2 Aplicación de los fluidos para corte

Las operaciones de maquinado se realizan usando 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 ocasiona falla de la herramienta, de cualquier manera hay una acción continua de desgaste de la herramienta de corte que la conduce finalmente a la falla.

La tecnología de las herramientas de corte tiene dos aspectos principales: ***el material de la herramienta*** y la ***configuración geométrica de la herramienta***. La primera se refiere al uso 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 configuración geométrica de la herramienta de corte para el material de la herramienta y para una operación dada. Éstos son los aspectos que se tratarán en este capítulo. Es conveniente empezar considerando la vida de las herramientas, ya que ésta es un prerrequisito en la revisión de varios temas sobre los materiales para herramientas. También se incluye una sección sobre los fluidos para corte al final de este capítulo, ya que éstos se usan frecuentemente en las operaciones de maquinado para prolongar la vida de las herramientas.

23.1 VIDA DE LAS HERRAMIENTAS

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.
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 de filo en el borde.
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 conforme la herramienta se deteriora demasiado y por último falla final de la herramienta en una manera similar a la falla por temperatura.

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 pieza. El daño se puede evitar si la selección de las condiciones de corte favorece el desgaste gradual de la herramienta y evita 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.

23.1.1 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 inclinación y en el flanco o superficie de incidencia. Por tanto, se puede distinguir dos tipos de desgaste principales de la herramienta: desgaste en cráter y desgaste del flanco, los cuales se ilustran en las figuras 23.1 y 23.2. Se utilizará una herramienta de una punta para explicar el desgaste y el mecanismo que lo causa. El

FIGURA 23.1 Diagrama de una herramienta desgastada que muestra los lugares principales y los tipos de desgaste que ocurren.

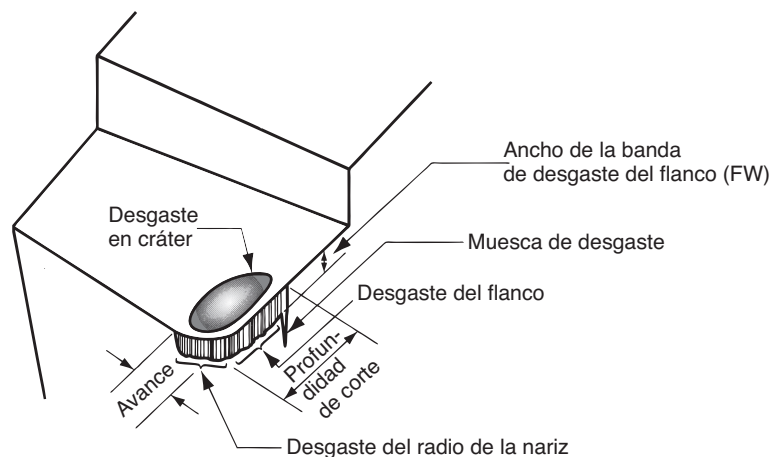
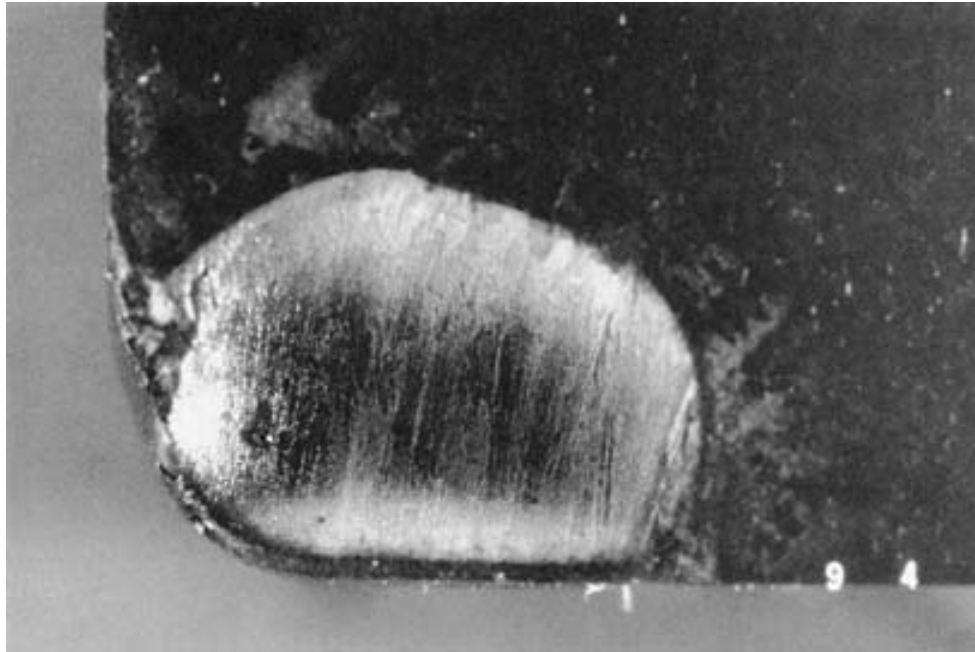
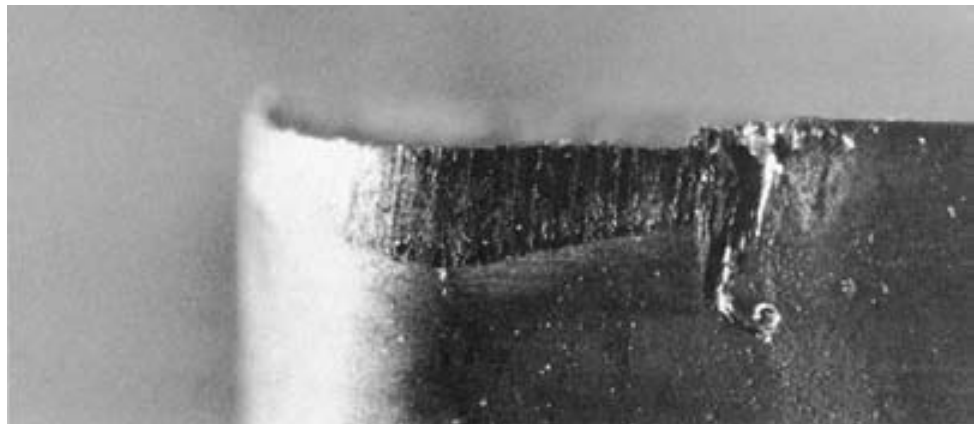


FIGURA 23.2 a) Desgaste en cráter y b) desgaste del flanco o superficie de incidencia en una herramienta de carburo cementado, como se ve a través de un microscopio de herramentista (cortesía del Laboratorio de Tecnología de Manufactura, Lehigh University, fotografía de J.C. Keefe).



a)



b)

desgaste en cráter, figura 23.2a), es una sección cóncava de la superficie de inclinación de la herramienta, formada por la acción de la viruta que se desliza contra la superficie. Los altos esfuerzos y temperaturas caracterizan a la interfaz 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**, figura 23.2b), ocurre en el flanco o superficie de relieve 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 a menudo la **banda de desgaste**.

Se puede 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 pieza de trabajo. A éste se le llama **desgaste de muesca**, y ocurre porque la superficie original del trabajo es más dura y abrasiva que el material interno, debido al endurecimiento por trabajo 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.

Los mecanismos que generan desgaste a nivel de las interfaces herramienta-viruta y herramienta-trabajo en el maquinado pueden resumirse como sigue:

- **Abrasión.** Ésta 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 de cráter, pero predomina en el desgaste del flanco.
- **Adhesión.** Cuando dos metales entran en contacto a alta presión y temperatura, ocurre la adhesión o soldado entre ellos. Estas condiciones están presentes entre la viruta y la superficie de inclinación 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.
- **Difusión.** La difusión es un intercambio de átomos a través de un límite de contacto entre dos materiales (sección 4.3). 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 de desgaste en cráter.
- **Reacciones químicas.** Las altas temperaturas y superficies limpias en la interfaz herramienta-viruta en el maquinado a altas velocidades puede dar como resultado reacciones químicas, en particular, la oxidación, en la superficie de inclinación de la herramienta. La capa oxidante, que es más suave que el material de la herramienta homóloga, es cortada, exponiendo el nuevo material a que soporte el proceso de reacción.
- **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.

La mayoría de estos mecanismos de desgaste se aceleran a velocidades de corte y temperatura más altas. Especialmente sensibles a la temperatura elevada son la difusión y la reacción química.

23.1.2 Vida de las herramientas y la ecuación de Taylor

A medida que el corte se realiza, los diferentes mecanismos de desgaste producen mayores niveles de desgaste en la herramienta de corte. La relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte se muestra en la figura 23.3. 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 de crecimiento del desgaste. La primera es el **periodo de rompimiento inicial** en el cual el borde cortante afilado

FIGURA 23.3 Desgaste de la herramienta en función del tiempo de corte. Se usa el desgaste de flanco (FW) como medida del desgaste de la herramienta. La curva del desgaste en cráter sigue una curva similar de crecimiento.

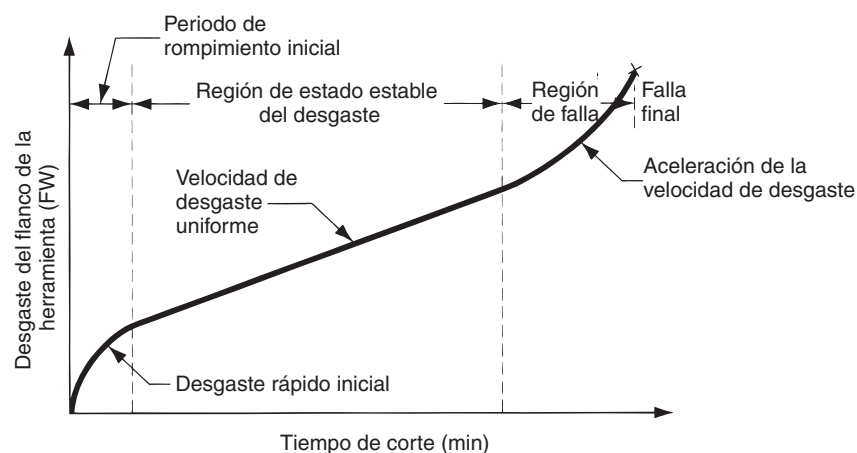
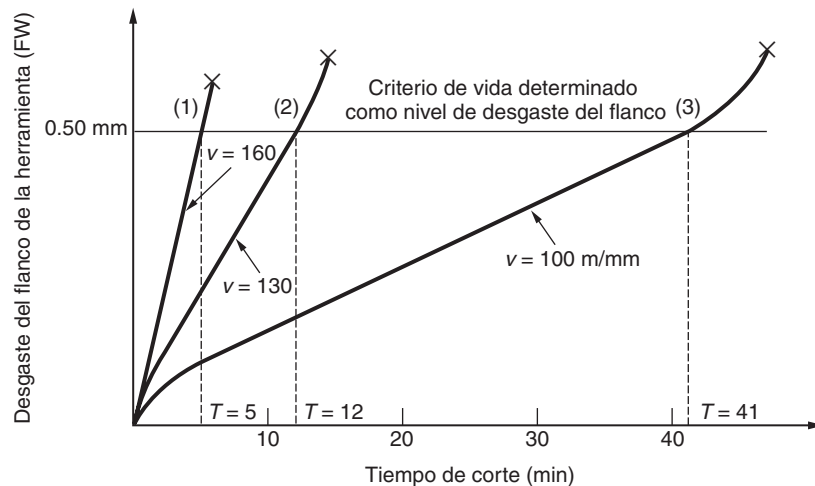


FIGURA 23.4 Efecto de la velocidad de corte sobre el desgaste de flanco (FW) o superficie de incidencia de la herramienta para tres velocidades de corte. Se dan valores hipotéticos de la velocidad de corte y de la vida de las herramientas para un criterio de vida de 0.050 in de desgaste de flanco.



se desgasta rápidamente al entrar en uso. Esta primera región se presenta 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 estado estable del desgaste**. En la figura esta región se representa como una función lineal del tiempo, aunque en el maquinado real también hay desviaciones de la línea recta. Por último, el desgaste alcanza un nivel donde la velocidad del desgaste 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 del desgaste de la herramienta). 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 aparece en la figura 23.4. Al aumentar las velocidades de corte se incrementa la velocidad de desgaste, alcanzándose el mismo nivel de desgaste en menos tiempo.

La **vida de la herramienta** se define como la longitud de tiempo de corte en el cual se puede usar la herramienta. Una forma de definir la vida de la herramienta consiste en permitir su operación hasta que ocurra una falla catastrófica. Esto se indica en la figura 23.4 por el final de cada curva de desgaste. Sin embargo, en producción, a menudo es inconveniente usar una herramienta hasta que ocurra esta falla, debido a las dificultades que acarrea el reafilado de la herramienta y a los problemas que ocasiona a la calidad de las piezas de trabajo. Como 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 0.5 mm (0.020 in), que en la gráfica de la figura se ilustra como una línea horizontal. Cuando cada una de las tres curvas de desgaste interseca la línea, se determina que la vida de las herramientas correspondientes ha terminado. Si los puntos de intersección se proyectan sobre el eje del tiempo, se puede identificar los valores de la vida de la herramienta, tal como se hace en la gráfica.

Ecuación de Taylor para la vida de las herramientas Si los valores de vida de las herramientas para las tres curvas de desgaste en la figura 23.4 se trazan en una gráfica log-log de velocidad de corte contra la vida de las herramientas, la relación resultante es una línea recta, como se muestra en la figura 23.5.¹

¹El lector puede observar en la figura 23.5 que se ha graficado la variable dependiente (vida de la herramienta) en el eje horizontal y la variable independiente (velocidad de corte) en el eje vertical. Aunque esto está en oposición con la convención de graficado normal, es la forma como se presenta a menudo la relación de Taylor para la vida de una herramienta.

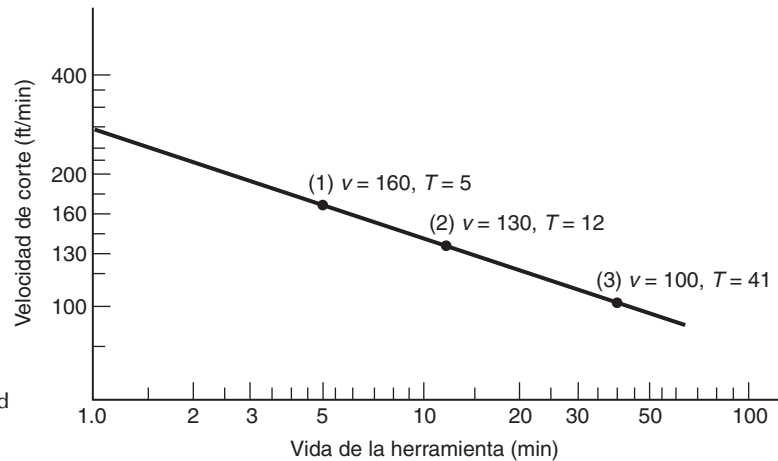


FIGURA 23.5 Gráfica en escala log-log de la velocidad de corte contra vida de la herramienta.

El descubrimiento de esta relación hacia el año 1900 se le atribuye a F.W. Taylor. Se puede expresar en forma de ecuación y se llama la ecuación de Taylor para la vida de una herramienta:

$$vT^n = C \quad (23.1)$$

donde v = velocidad de corte, m/min (ft/min), T = vida de la herramienta, min; y n y C son parámetros cuyos valores dependen del avance, de la profundidad de corte, del material de corte, de la herramienta (material en particular) y del criterio usado para la vida de la herramienta. El valor de n es una constante relativa para un material de herramienta determinado, mientras que C depende más del material de la herramienta, material de trabajo y de las condiciones de corte. En la sección 23.2 se tratarán estas relaciones respecto a diversos materiales de herramienta.

La ecuación 23.1 establece básicamente que las velocidades de corte más altas traen como consecuencia vidas más cortas para la herramienta. Al relacionar los parámetros n y C con la figura 23.5, n es la pendiente de la gráfica (expresada en términos lineales más que en la escala de los ejes) y C es la intersección sobre el eje de velocidad. C representa la velocidad de corte a la cual la herramienta duraría un minuto.

El problema con la ecuación 23.1 es que las unidades en el lado derecho de la ecuación no son consistentes con las unidades del lado izquierdo. Para hacer consistentes las unidades de la ecuación se debe expresar en la forma:

$$vT^n = C(T_{\text{ref}})^n \quad (23.2)$$

donde T_{ref} = un valor de referencia para C . El valor de T_{ref} es igual a un minuto cuando las unidades que se usan para v y T son m/min (ft/min) y minutos, respectivamente. La ventaja de la ecuación 23.2 se comprende cuando se desea usar la ecuación de Taylor con otras unidades; por ejemplo, si la velocidad de corte se expresara como m/s y la vida de la herramienta como segundos, en este caso T_{ref} podría ser = 60 s y C podría tener el mismo valor de velocidad que en la ecuación 23.1, aunque convertida a unidades de m/s. La pendiente n podría tener el mismo valor numérico que en la ecuación 23.1.

EJEMPLO 23.1 Ecuación de Taylor para la vida de la herramienta

Para determinar los valores de C y n en la gráfica de la figura 23.5, se seleccionan dos de los tres puntos sobre la curva y se resuelven las ecuaciones simultáneas mediante la forma de la ecuación 23.1.

Solución: Seleccionando los dos puntos extremos: $v = 160$ m/min, $T = 5$ min y $v = 100$ m/min, $T = 41$ min; se tiene que

$$\begin{aligned} 160(5)^n &= C \\ 100(41)^n &= C \end{aligned}$$

Si se igualan los lados izquierdos de cada ecuación,

$$160(5)^n = 100(41)^n$$

Si se toman los logaritmos naturales de cada término,

$$\begin{aligned}\ln(160) + n \ln(5) &= \ln(100) + n \ln(41) \\ 5.0752 + 1.6094 n &= 4.6052 + 3.7136 n \\ 0.4700 &= 2.1042 n \\ n &= \frac{0.4700}{2.1042} = 0.223\end{aligned}$$

Y se sustituye este valor de n en cualquier ecuación inicial, se obtiene el valor de C :

$$C = 160(5)^{0.223} = 229$$

o

$$C = 100(41)^{0.223} = 229$$

Por lo tanto, la ecuación de Taylor para la vida de las herramientas en los datos de la figura 23.5 es,

$$vT^{0.223} = 229$$

Se puede formular una versión aumentada de la ecuación 23.2 que incluya el efecto del avance, de la profundidad de corte y la dureza del material de trabajo:

$$vT^n f^m d^p H^q = KT_{\text{ref}}^n f_{\text{ref}}^m d_{\text{ref}}^p H_{\text{ref}}^q \quad (23.3)$$

donde f = avance, mm (in); d = profundidad de corte, mm (in); H = dureza, expresada en una escala apropiada de dureza; m , p y q son exponentes cuyos valores se determinan experimentalmente para las condiciones de la operación; K = una constante análoga a C en la ecuación 23.2; y f_{ref} , d_{ref} y H_{ref} son los valores de referencia para el avance, la profundidad de corte y la dureza. Los valores de m y p , los exponentes para la alimentación o avance y la profundidad son menores que 1.0. Esto demuestra los efectos más grandes de la velocidad de corte sobre la vida de la herramienta, ya que el exponente de v es 1.0. Después de la velocidad sigue en importancia el avance, y así m tiene un valor más grande que p . El exponente para endurecimiento por trabajo, q , también es menor que 1.0.

Existen dificultades para aplicar la ecuación 23.3 a una operación práctica de maquinado. Quizá la dificultad más grande sea la tremenda cantidad de datos de maquinado que se requieren para determinar los parámetros de la ecuación. Las variaciones en el material de trabajo y las condiciones de prueba causan también dificultades por la introducción de la variación estadística en los datos. La ecuación es válida para indicar la tendencia general de las variables, pero no es capaz de predecir con precisión la vida de la herramienta en el desempeño. Para reducir estos problemas generalmente se eliminan algunos de los términos, lo cual hace que esta ecuación sea más manejable. Por ejemplo, si se elimina la profundidad y la dureza, la ecuación 23.3 se reduce a la siguiente:

$$vT^n f^m = KT_{\text{ref}}^n f_{\text{ref}}^m \quad (23.4)$$

donde los términos tienen el mismo significado que antes, excepto porque la constante K tendrá una interpretación ligeramente diferente.

Criterios para la vida de la herramienta en producción Aunque el desgaste en el flanco es el criterio de la vida de la herramienta en el análisis de la ecuación de Taylor, este criterio no es práctico en una fábrica a causa de las dificultades y el tiempo requerido para medir el desgaste del flanco. A continuación se presentan nueve criterios para determinar la vida útil de la herramienta durante las operaciones de maquinado, pero algunos de ellos tienen carácter subjetivo:

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 medida por un wattímetro conectado a 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 piezas maquinadas.
9. Tiempo acumulado de corte, el cual es similar a la cuenta de piezas del punto anterior, excepto que se monitorea la longitud de tiempo que ha trabajado la herramienta. Esto es posible en las máquinas herramienta controladas por computadora, la cual se programa para registrar el tiempo total de corte de cada herramienta.

23.2 MATERIALES PARA HERRAMIENTAS

Se puede usar los tres modos de falla de la herramienta para identificar algunas de las propiedades importantes que deben poseer los materiales para herramientas:

- **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.
- **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.
- **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.

Los materiales de las herramientas de corte logran esta combinación de propiedades en varios grados. En esta sección se analizarán los siguientes materiales de herramientas de corte: 1) aceros de alta velocidad y sus predecesores, aceros simples al carbono y de baja aleación, 2) fundición de aleaciones de cobalto, 3) carburos cementados, cermets y carburos recubiertos, 4) cerámicas, 5) diamantes sintéticos y nitruro de boro cúbico. Antes de examinar estos materiales en forma individual, será útil un breve panorama y las técnicas de comparación. El desarrollo histórico de la mayoría de estos materiales se describe en la nota histórica 23.1. Desde el punto de vista comercial, los materiales para herramientas más importantes son los aceros de alta velocidad y los carburos cementados, cermets y carburos recubiertos. Estas dos categorías constituyen más de 90% de las herramientas de corte que se utilizan en las operaciones de maquinado.

La tabla 23.1 y la figura 23.6 presentan datos sobre las propiedades de varios materiales de herramientas. Las propiedades relacionadas con los requerimientos de una herramienta de corte son: dureza, tenacidad y dureza en caliente. La tabla 23.1 proporciona

Nota histórica 23.1 *Materiales para herramientas de corte.*

En 1800, Inglaterra encabezaba la Revolución Industrial y el hierro era el material más importante de esta revolución. Las mejores herramientas para cortar el hierro se hacían de fundición de acero por el proceso de crisol, inventado por B. Huntsman en 1742. La fundición de acero, cuyo contenido de carbono se sitúa entre el hierro forjado y el hierro colado, pudo ser endurecida por tratamiento térmico para maquinarse los otros metales. En 1868, R. Mushet descubrió que con una aleación de tungsteno, cercana a 7%, en un crisol de acero y con un rápido enfriamiento del material al aire después del tratamiento térmico, se obtenía un acero para herramienta endurecido. El acero para herramienta de Mushet era bastante superior a sus predecesores en el maquinado.

F. W. Taylor figura como personaje importante en la historia de las herramientas de corte. Alrededor de 1880, en Midvale Steele, en Filadelfia, y después en Bethlehem Steel en Bethlehem, Pensilvania, inició una serie de experimentos que duraron un cuarto de siglo y arrojaron conocimientos más amplios acerca de los procedimientos de corte de metales. Entre los desarrollos que resultaron de los trabajos de Taylor están los aceros de alta velocidad (HSS), una clase de aceros de herramienta de alta aleación que permitieron velocidades de corte sustancialmente más altas que las de las herramientas de corte anteriores. Los adelantos de Taylor tuvieron como resultado no solamente mejores aleaciones, sino refinamientos en los tratamientos térmicos. Las herramientas de los nuevos aceros permitieron duplicar las velocidades de corte del acero de Mushet y fueron casi cuatro veces mayores que las de los aceros fundidos simples al carbono.

El carburo de tungsteno (WC) se sintetizó por primera vez alrededor de 1890. Pasaron casi tres décadas para que se creara un material que fuera útil como herramienta de corte,

sinterizando el WC con un aglutinante metálico para formar los carburos cementados. Éstos se usaron por primera vez en el corte de metales a mediados de la década de 1920 en Alemania y a finales de la misma década en Estados Unidos (véase nota histórica 7.2). Las herramientas de corte de cermet basados en carburo de titanio se introdujeron por primera vez en la década de 1950, pero su importancia comercial data de los años setenta. Los primeros carburos recubiertos que consistían en un sustrato de WC-Co se usaron por primera vez alrededor de 1970. Los materiales recubiertos incluyen TiC, TiN y Al₂O₃. Los modernos carburos recubiertos tienen tres o más recubrimientos de éstos y otros materiales duros.

Los intentos de usar cerámicos de alúmina en el maquinado datan de principios del siglo xx en Europa. Su fragilidad impidió el éxito de estas primeras aplicaciones. Los refinamientos en su procesamiento a través de muchas décadas han tenido buenos resultados en el mejoramiento apropiado de estos materiales. El uso comercial de herramientas cerámicas de corte en Estados Unidos se remonta a mediados de la década de 1950.

Los primeros diamantes industriales los produjo la General Electric Company en 1954. Eran cristales sencillos de diamante y se aplicaron con cierto éxito en operaciones de esmerilado iniciadas hacia 1957. Se ha registrado una mayor aceptación de las herramientas de corte de diamante con el uso del diamante policristalino sinterizado (SPD por sus siglas en inglés), que data de los primeros años de la década de 1970. Un material similar para herramientas, el nitruro de boro cúbico, lo introdujo en 1969 la GE bajo la marca comercial Borazon.

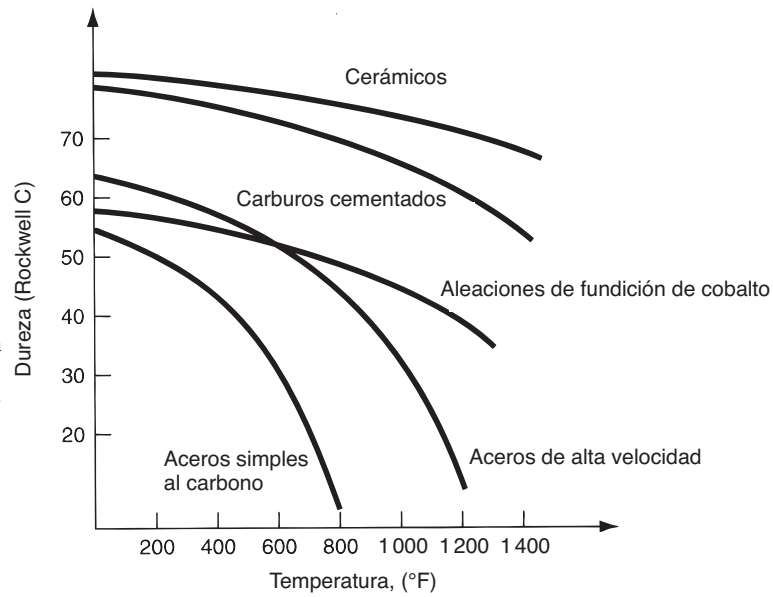
TABLA 23.1 Valores típicos de dureza a temperatura ambiente y resistencia a la ruptura transversal para varios materiales de herramienta.^a

Material	Dureza	Resistencia a la ruptura transversal	
		MPa	lb/in ²
Acero simple al carbono	60 HRC	5 200	750 000
Acero de alta velocidad	65 HRC	4 100	600 000
Aleación de fundición de cobalto	65 HRC	2 250	325 000
Carburo cementado (WC)			
Bajo contenido de Co	93 HRA, 1 800 HK	1 400	200 000
Alto contenido de Co	90 HRA, 1 700 HK	2 400	350 000
Cermet	2 400 HK	1 700	250 000
Alúmina	2 100 HK	400	60 000
Nitruro cúbico de boro	5 000 HK	700	100 000
Diamante policristalino	6 000 HK	1 000	150 000
Diamante natural	8 000 HK	1 500	215 000

Recopilada de [2], [7], [18] y otras fuentes.

^a Nota: Se intenta que los valores de la dureza y de TRS sean comparativos y típicos. Las variaciones en las propiedades resultan de diferencias en composición y procesamiento.

FIGURA 23.6 Relaciones típicas de dureza en caliente para materiales de herramienta seleccionados. Los aceros simples al carbono muestran una rápida pérdida de dureza conforme aumenta la temperatura. Los aceros de alta velocidad son sustancialmente mejores, mientras que los carburos cementados y los cerámicos son significativamente más duros a temperaturas elevadas.



una lista de durezas a temperatura ambiente y de resistencia a la ruptura transversal de algunos materiales seleccionados. La resistencia a la ruptura transversal (sección 3.1.3) es una propiedad que se usa para indicar la tenacidad de los materiales duros. La figura 23.6 muestra la dureza como una función de la temperatura para varios materiales de herramientas analizados en esta sección.

Además de comparar las propiedades de los materiales, es útil compararlos en términos de los parámetros n y C en la ecuación de Taylor para la vida de las herramientas. La invención de nuevos materiales para herramientas de corte ha incrementado en general los valores de estos dos parámetros. La tabla 23.2 proporciona una lista de valores representativos de n y C en la ecuación de Taylor para algunos materiales seleccionados de herramientas de corte.

El desarrollo cronológico de los materiales de herramienta ha seguido, en general, una trayectoria en la cual los nuevos materiales han permitido velocidades de corte cada vez más altas. La tabla 23.3 presenta una lista de materiales de herramientas de corte, junto con

TABLA 23.2 Valores representativos de n y C en la ecuación de la vida de las herramientas de Taylor, ecuación (23.1), para materiales seleccionados de herramienta.

Material de herramienta	n	C			
		Corte sin acero		Corte con acero	
		m/min	ft/min	m/min	ft/min
Acero para herramienta simple al carbono	0.1	70	(200)	20	60
Acero de alta velocidad	0.125	120	(350)	70	200
Carburo cementado	0.25	900	(2700)	500	1500
Cermet	0.25			600	2000
Carburo recubierto	0.25			700	2200
Cerámico	0.6			3000	10000

Recopilada de [2], [7] y otras fuentes.

Los valores de los parámetros son aproximados para torneado con avance = 0.25 mm/rev (0.010 in/rev) y profundidad = 2.5 mm (0.100 in). El corte sin acero se refiere a metales fáciles de maquinar, como aluminio, latón y hierro colado. El corte de acero se refiere al maquinado de acero suave (no endurecido). En la práctica se pueden encontrar variaciones significativas de estos valores.

TABLA 23.3 Materiales de herramientas de corte con sus datos aproximados de uso inicial y velocidades de corte permisibles.

Material de herramienta	Año de uso inicial	Velocidad permisible de corte ^a			
		Corte sin acero		Corte con acero	
		m/min	ft/min	m/min	ft/min
Acero para herramienta simple al carbono	1800	Debajo de 10	Debajo de 30	Debajo de 5	Debajo de 15
Acero de alta velocidad	1900	25-65	75-200	17-33	50-100
Aleaciones de fundición de cobalto	1915	50-200	150-600	33-100	100-300
Carburos cementados	1930	330-650	1 000-2 000	100-300	300-900
Cermets	1950			165-400	500-1 200
Cerámicos	1955			330-650	1 000-2 000
Diamantes sintéticos	1954, 1973	390-1 300	1 200-4 000		
Nitruro de boro cúbico	1969			500-800	1 500-2 500
Carburos recubiertos	1970			165-400	500-1 200

^aRecopilada de [7], [11], [17], [20] y otras fuentes.

sus años aproximados de introducción y la velocidad de corte máxima disponible. Se han registrado drásticos incrementos en la productividad del maquinado debido a los avances en la tecnología de materiales, como se indica en la tabla. En la práctica, las máquinas herramienta no siempre han ido al paso de la tecnología de las herramientas de corte. Las limitaciones en la potencia, en la rigidez de las máquinas herramienta, en los cojinetes de los husillos y el uso extendido de equipos viejos en la industria son factores que han influido en el desaprovechamiento de las posibilidades de las altas velocidades disponibles en las herramientas de corte.

23.2.1 Aceros de alta velocidad y sus predecesores

Antes de la invención del acero de alta velocidad, los únicos materiales para corte de metales eran el acero simple al carbono y el acero de Mushet. En la actualidad estos aceros se usan esporádicamente en las aplicaciones industriales del maquinado de metales. Los aceros simples al carbono que se usaban como herramientas de corte podían tratarse térmicamente para adquirir una dureza relativamente alta (Rockwell C 60), debido a su relativamente alto contenido de carbono. Sin embargo, a causa de los bajos niveles de aleación, tienen una dureza en caliente muy deficiente (figura 23.6), lo cual los hace inútiles en el corte de metales, excepto a velocidades demasiado bajas según los estándares actuales. El acero de Mushet ha sido desplazado por los avances en la metalurgia del acero.

Los aceros de alta velocidad (HSS, por sus siglas en inglés) son aceros de herramienta altamente aleados, capaces de mantener su dureza a elevadas temperaturas mejor que los aceros de baja aleación y alto contenido de carbono. Su buena dureza en caliente permite el uso de estas herramientas a velocidades de corte más altas. Al compararlos con los materiales para herramienta usados antes de su creación, se merecieron el nombre de “alta velocidad”. Se dispone de una amplia variedad de aceros de alta velocidad, pero se pueden dividir en dos tipos básicos: 1) tipo tungsteno, designados como grado-T por el American Iron and Steel Institute (AISI); y 2) tipo molibdeno, designados como grados M por el AISI.

Los **HSS tipo tungsteno** contienen tungsteno (W) como su principal ingrediente de aleación. Los elementos adicionales de aleación son el cromo (Cr) y el vanadio (V). Uno de los HSS originales y mejor conocidos es el grado T1 o acero de alta velocidad 18-4-1, el cual contiene 18% de W, 4% de Cr y 1% de V. **Los grados HSS molibdeno** contienen combinaciones de tungsteno y molibdeno (Mo), más los mismos elementos de aleación adicionales que los grados T. El cobalto (Co) se agrega a veces al HSS con el fin de mejorar su dureza en caliente. Desde luego, el acero de alta velocidad contiene carbono, el elemento

TABLA 23.4 Contenido típico y funciones de los elementos de aleación en acero de alta velocidad.

Elemento de aleación	Contenido típico en HSS, % en peso	Funciones en el acero de alta velocidad
Tungsteno	Tipo T HSS: 12-20 Tipo M HSS: 1.5-6	Incrementa la dureza en caliente Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros en HSS.
Molibdeno	Tipo T HSS: ningún tipo M HSS: 5-10	Incrementa la dureza en caliente Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros en HSS.
Cromo	3.75-4.5	Profundiza la templabilidad durante el tratamiento térmico Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros en HSS. Resistencia a la corrosión (efecto menor).
Vanadio	1-5	Se combina con el carbono para resistencia al desgaste. Retarda el crecimiento de los granos para mejor tenacidad
Cobalto	0-12	Incrementa la dureza en caliente
Carbono	0.75-1.5	Elemento principal de endurecimiento del acero Proporciona carbono disponible para formar carburos con otros elementos de aleación e incrementa la resistencia al desgaste.

común que tienen todos los aceros. El contenido y las funciones típicas de cada elemento aleado en HSS se listan en la tabla 23.4.

Desde el punto de vista comercial, el acero de alta velocidad es uno de los más importantes materiales de herramientas de corte que se usan en la actualidad, y a pesar de haberse introducido hace cerca de un siglo, es especialmente apropiado para aplicaciones que involucran herramientas de formas complicadas, como taladros, tarrajas, fresas y es-cariadores. Estas complejas herramientas son por lo general más fáciles y menos costosas de producir con HSS que con otros materiales de herramienta. Se pueden tratar térmicamente para que el filo de corte adquiera muy buena dureza (Rockwell C 65), a la vez que mantienen buena tenacidad en las porciones internas de la herramienta. Los buriles de acero de alta velocidad tienen mejor tenacidad que cualquiera de los materiales que poseen mayor dureza y no están fabricados con acero grado herramienta, pero se emplean para maquinado, como carburos cementados y cerámicos. Aun para herramientas de una punta, los aceros de alta velocidad son muy populares entre los maquinadores debido a la facilidad con que se puede tallar cualquier forma en la punta de la herramienta. A través de los años se han hecho algunas mejoras en la formulación metalúrgica de los HSS, por lo cual esta clase de materiales de herramienta permanece competitiva para muchas aplicaciones. Asimismo, las herramientas HSS, las brocas en particular, se recubren también frecuentemente con una delgada película de nitrato de titanio (TiN) para obtener una significativa mejoría en el desempeño de corte. El bombardeo con partículas y el chapeado iónico, ambos procesos de deposición física de vapor (sección 29.3), se usan generalmente para realizar estos recubrimientos en las herramientas de HSS.

23.2.2 Aleaciones de fundición de cobalto

Las herramientas de corte fabricadas con aleaciones de fundición de cobalto consisten de cobalto en 40 a 50%; cromo en 25 a 35%; y tungsteno, por lo general de 15 a 20%, con trazas de otros elementos. Estas herramientas se hacen a la forma deseada a través de fundición de moldes de grafito y después se esmerilan para darles el tamaño y afilado final. La resistencia al desgaste es mejor que la del acero de alta velocidad, pero no tanto como la de los carburos cementados. La tenacidad de las herramientas de fundición de cobalto es mejor que la de los carburos, pero no tan buena como la de los HSS. La dureza en caliente se sitúa también entre los dos materiales.

Como se puede esperar de sus propiedades, las aplicaciones de las herramientas de fundición de cobalto están generalmente entre las de los aceros de alta velocidad y las

de los carburos cementados. Son capaces de cortes burdos pesados a velocidades mayores que las de los HSS y avances mayores que la de los carburos. Los materiales de trabajo incluyen aceros de metales, así como materiales no metálicos como plásticos y grafito. En la actualidad, las herramientas de fundición de cobalto no son comercialmente tan importantes como los aceros de alta velocidad o los carburos cementados. Éstos se introdujeron alrededor de 1915 como un material de herramientas que podría permitir velocidades de corte más altas que los HSS; pero los carburos se desarrollaron posteriormente y probaron ser superiores a las aleaciones de fundición de cobalto en la mayoría de las situaciones de corte.

23.2.3 Carburos cementados, cermets y carburos recubiertos

Los **cermets** son compuestos de materiales **cerámicos** y **metálicos** (sección 9.2.1). Los carburos cementados se incluyen técnicamente dentro de esta definición; sin embargo, los cermets basados en WC-Co, incluidos WC-TiC-TaC-Co, se conocen como carburos (carburos cementados) de uso común. En la terminología de las herramientas de corte, el término **cermet** se aplica a los compuestos cerámico-metálicos que contienen TiC, TiN y otros materiales cerámicos, excepto el WC. Un avance en los materiales de corte involucra la aplicación de recubrimientos muy delgados a un sustrato de WC-Co. Estas herramientas se llaman carburos recubiertos. De esta manera se tienen tres materiales estrechamente relacionados que se analizarán en esta sección: 1) carburos cementados, 2) cermets y 3) carburos recubiertos.

Carburos cementados Los **carburos cementados** (también llamados **carburos sintetizados**) son una clase de materiales duros para herramienta formulados con carburo de tungsteno (WC), y manufacturados con técnicas de metalurgia de polvo (capítulo 16) en las que se utiliza el cobalto (Co) como aglutinante (secciones 7.3.2, 9.2.1, y 17.3.1). Además del WC, puede haber otros compuestos de carburo en la mezcla, como carburo de titanio (TiC) o carburo de tantalio (TaC).

Las primeras herramientas de corte de carburo cementado se hicieron de WC-Co (nota histórica 7.2) y se usaron para maquinar hierro colado y materiales sin acero a velocidades de corte más rápidas que las que eran posibles con los aceros de alta velocidad y las aleaciones de fundición de cobalto. Sin embargo, cuando se usaron directamente las herramientas WC-Co para maquinar acero, apareció el desgaste en cráter, que condujo a fallas prematuras en las herramientas. La fuerte afinidad química entre el acero y el WC-Co provoca un desgaste acelerado por adhesión y difusión en la interfaz herramienta-viruta para esta combinación trabajo-herramienta. En consecuencia, no se usaron efectivamente las herramientas fabricadas solamente con WC-Co para maquinar acero. Subsecuentemente se descubrió que las adiciones de carburo de titanio y carburo de tantalio a la mezcla de WC-Co retardaban de manera significativa la velocidad de desgaste en cráter al cortar acero. Estas nuevas herramientas con WC-TiC-TaC-Co se podían usar para el maquinado del acero. El resultado es que los carburos cementados se dividen en dos tipos básicos: 1) grados de corte para material que no incluyan el acero, los cuales consisten solamente en WC-Co y 2) grados de corte para acero con combinaciones de TiC y TaC añadidos al WC-Co.

Las propiedades generales de los dos tipos de carburos cementados son similares: 1) alta resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la tensión moderada; 2) alta dureza (90 a 95 HRA); 3) buena dureza en caliente; 4) buena resistencia al desgaste; 5) alta conductividad térmica; 6) alto módulo de elasticidad, con valores de E cercanos a 600×10^3 MPa (90×10^6 lb/in²) y 7) tenacidad más baja que los aceros de alta velocidad.

Los **grados de corte para materiales que no incluyen el acero** se refieren a aquellos carburos cementados que son apropiados para maquinar aluminio, latón, cobre, magnesio, titanio y otros metales no ferrosos; el hierro colado gris se incluye irregularmente en este grupo de materiales de trabajo. En los grados de corte de material no acerado, el tamaño de los granos y el contenido de cobalto son los factores que influyen en las propiedades del material de carburo cementado. El tamaño de grano típico que se encuentra en los carburos cementados convencionales varía entre 0.5 y 5 μm (20 y 200 $\mu\text{-in}$). Al incrementarse el tamaño del grano, disminuye la dureza y la dureza en caliente, pero aumenta la resistencia

TABLA 23.5 Los sistemas de clasificación de grado C de la ANSI para los carburos cementados.

Aplicación en el maquinado	Grados de corte no acerado	Grados de corte acerado	El cobalto y sus propiedades
Desbastado	C1	C5	Alto cobalto para máxima tenacidad
Propósito general	C2	C6	De medio a alto Co
Acabado	C3	C7	De medio a bajo Co.
Acabado de precisión	C4	C8	Bajo Co para máxima dureza
Materiales de trabajo	Latón, hierro colado	Carbono y aceros aleados	
Ingredientes típicos	WC-Co	WC-TiC-TaC-Co	

a la ruptura transversal.² El contenido de cobalto típico en carburos cementados que se utilizan en las herramientas de corte es de 3 a 12%. El efecto del contenido de cobalto sobre la dureza y la resistencia a la ruptura transversal se muestra en la figura 9.9. A medida que el contenido de cobalto se incrementa, la TRS mejora a expensas de la dureza y la resistencia al desgaste. Los carburos cementados con bajo porcentaje de contenido de cobalto (3% a 6%) tienen una alta dureza y baja TRS, mientras que los carburos con Co alto (6% a 12%) tienen una alta TRS y, sin embargo, baja dureza (tabla 23.1). De acuerdo con lo anterior, los carburos cementados con alto contenido de cobalto se usan en operaciones de maquinado burdo y cortes interrumpidos (como el fresado), mientras que los carburos con bajo contenido de cobalto (dureza y resistencia al desgaste más altas) se usan para cortes de acabado.

Los **grados de corte de acero** se usan para aleaciones de acero de bajo carbono, inoxidable y otras. Para estos grados de carburo, el carburo de titanio o el carburo de tantalio se sustituyen por algo de carburo de tungsteno. El TiC es el aditivo más popular en la mayoría de las aplicaciones. Se puede reemplazar típicamente de 10 a 25% de WC mediante combinaciones de TiC y TaC. Esta composición incrementa la resistencia al desgaste en cráter para el corte de acero, pero tiende a afectar adversamente la resistencia al desgaste del flanco o superficie de incidencia en aplicaciones de corte de materiales que no son aceros. Es por esto que se necesitan dos categorías básicas de carburo cementado.

Uno de los desarrollos más significativos en la tecnología de los carburos cementados en años recientes es el uso de tamaños de grano muy finos (tamaños del orden de submicras) de los diferentes ingredientes del carburo (WC, TiC y TaC). Aunque un tamaño pequeño de grano generalmente se asocia con una mayor dureza pero menor resistencia a la ruptura transversal, la disminución en la TRS se ve reducida o revertida con tamaños de partículas del orden de las submicras. Por lo tanto, estos carburos de grano extremadamente fino poseen una alta dureza combinada con una buena tenacidad.

Puesto que los dos tipos básicos de carburo cementado se introdujeron en las décadas de 1920 y 1930, la variedad y el número de materiales de ingeniería cada vez mayor ha complicado la selección de los carburos cementados más apropiados para una aplicación de maquinado particular. Para resolver el problema de la selección del grado, se han importado dos sistemas de clasificación: 1) el sistema de grados C de la ANSI,³ implementado en Estados Unidos alrededor del año 1942; y 2) el sistema ISO R513-1975(E), presentado por la International Organization of Standardization (ISO) aproximadamente en 1964. En el sistema de grados C, resumido en la tabla 23.5, los grados de maquinado de los carburos cementados se dividen en dos grupos básicos, correspondientes a las categorías de corte acerado y sin corte acerado. Dentro de cada grupo, hay cuatro niveles correspondientes al maquinado burdo, propósito general, acabado y acabado de precisión.

El sistema ISO R513-1975(E), titulado “Aplicación de los Carburos en el Maquinado mediante Remoción de Viruta”, clasifica todos los grados de maquinado de carburos cementados en tres grupos básicos, cada uno de los cuales con su propio código de letra y

²El efecto del tamaño del grano (GS) en la resistencia a la ruptura transversal (TRS) es más complicado que lo que se está reportando. Los datos en la literatura indican que el efecto de GS y TRS está influido por el contenido de cobalto. Con un bajo contenido de cobalto (< 10%), la TRS en realidad no aumenta a medida que GS aumenta; sin embargo, al aumentar el contenido de cobalto (> 10%) la TRS disminuye a medida que el GS se incrementa [3], [14].

³ANSI = American National Standards Institute.

TABLA 23.16 ISO R513-1975(E) “Aplicación de los carburos en el maquinado mediante remoción de viruta”

Grupo	Tipo de carburo	Materiales de trabajo	Número de esquema (Cobalto y sus propiedades)
P Azul	Altamente aleado TiC-TaC-Co	Acero, fundición de acero, hierro colado dúctil (metales ferrosos con virutas grandes)	(Bajo Co para dureza máxima) a P50 (Alto Co para tenacidad máxima)
M Amarillo	Aleado TaC-Co	Acero libre de corte, hierro colado gris, acero inoxidable austénico, superaleaciones.	M10 (Bajo Co para dureza máxima) a M40 (Alto Co para tenacidad máxima)
K Rojo	Directo WC-Co	Metales no férricos y aleaciones, hierro colado gris (metales ferrosos con virutas cortas), no metales.	K01 (Bajo Co para dureza máxima) a Alto Co para tenacidad máxima

color, como se muestra en la tabla 23.6. Dentro de cada grupo, los grados están numerados en una escala que va desde la dureza máxima a la tenacidad máxima. Los grados con mayor dureza se utilizan en operaciones de acabado (altas velocidades y profundidades y avances bajos), mientras que los grados con mayor tenacidad se utilizan en operaciones de maquinado burdo. El sistema de clasificación de la ISO también puede utilizarse para indicar aplicaciones para cermetes y carburos recubiertos.

Los dos sistemas tienen una correspondencia entre sí de la manera siguiente: Los grados C1 a C4 de la ANSI corresponden a los grados K de la ISO, pero en orden numérico inverso, y los grados C5 a C8 de la ANSI se traducen en los grados P de la ISO, pero, de nuevo, en orden numérico inverso.

Cermets Aunque los carburos cementados se clasifican técnicamente como compuestos cermetes, en la tecnología de herramientas de corte, el término *cermet* generalmente se reserva para las combinaciones de TiC, TiN y carbonitruro de titanio (TiCN), usando níquel y/o molibdeno como aglutinantes. Algunos de los compuestos químicos de los cermetes son más complejos (por ejemplo, cerámicos como Ta_xNb_yC y aglutinantes como MO_2C). Sin embargo, los cermetes excluyen compuestos metálicos que están basados principalmente en WC-Co. Las aplicaciones de los cermetes incluyen acabados a altas velocidades y semiterminado de aceros, aceros inoxidables y fundiciones de hierro. Estas herramientas permiten velocidades más altas, comparadas con las que permiten generalmente los carburos de grado corte de acero. Es normal que se usen menores avances y así se obtienen mejores superficies de acabado, eliminando muchas veces la necesidad del esmerilado.

Carburos recubiertos Alrededor de 1970 se crearon los carburos recubiertos; esto representó un avance significativo en la tecnología de herramientas de corte. Los *carburos recubiertos* son insertos de carburo cementado recubierto con una o más capas delgadas de un material resistente al desgaste, como carburo de titanio, nitruro de titanio u óxido de aluminio (Al_2O_3). El recubrimiento se aplica al sustrato por deposición química de vapor (sección 29.4) o deposición física de vapor (sección 29.3). El espesor del recubrimiento es solamente de 2.5 – 13 μm (0.0001-0.0005 in). Se ha observado que los recubrimientos más gruesos tienden a ser más frágiles y producen agrietamientos, desportilladuras y separación del sustrato.

La primera generación de carburos recubiertos tenía sólo una capa de recubrimiento (TiC, TiN o Al_2O_3) y este tipo de herramienta se encuentra todavía en uso. Más recientemente se han creado insertos recubiertos que consisten en múltiples capas. La primera capa se aplica a la base de WC-Co y consiste por lo general en TiN o TiCN debido a su buena adhesión y a su coeficiente de expansión térmica similar. Posteriormente se aplican capas adicionales de varias combinaciones de TiN, TiCN, Al_2O_3 y TiAlN.

Los carburos recubiertos se usan para maquinar hierro y acero fundidos en operaciones de torneado y fresado. Se aplican mejor a altas velocidades de corte en situaciones donde las fuerzas dinámicas y el choque térmico son mínimos. Si estas condiciones se vuelven demasiado severas como en algunas operaciones interrumpidas de corte, pueden ocurrir desportilladuras de los recubrimientos, ocasionando una falla prematura de la herramienta. En estas situaciones son preferibles los carburos sin recubrir y formulados para una mayor tenacidad. Cuando las herramientas de carburo recubierto se aplican correctamente,

permiten incrementar las velocidades permisibles de corte respecto a los carburos cementados no recubiertos.

El uso de las herramientas de carburo recubierto se está extendiendo a metales no ferrosos y aplicaciones no metálicas para mejorar la vida de la herramienta, así como para obtener velocidades de corte más altas. Se requieren diferentes materiales de recubrimiento, como el carburo de cromo (CrC), nitruro de circonio (ZrN) y diamante [10].

23.2.4 Cerámicos

Las herramientas de corte hechas de materiales cerámicos se usaron comercialmente por primera vez en Estados Unidos a mediados de la década de 1950, aunque su desarrollo y uso en Europa se remonta a principios de 1900. En la actualidad las herramientas de corte a base de materiales cerámicos están compuestas principalmente de **óxido de aluminio** (Al_2O_3) de grano fino, prensado y sinterizado a altas presiones y temperaturas sin aglutinante en forma de inserto (sección 17.2). El óxido de aluminio es por lo general muy puro (99% típicamente), aunque algunos fabricantes añaden otros óxidos, como óxido de circonio en pequeñas cantidades. Es importante usar polvos de alúmina muy finos en la producción de herramientas cerámicas y maximizar la densidad de la mezcla a través de la compactación a alta presión, a fin de mejorar la baja tenacidad del material.

Las herramientas de corte de óxido de aluminio tienen más éxito en el torneado a altas velocidades de fundiciones de hierro y acero. Dichas herramientas se pueden usar para operaciones de acabado en el torno en aceros endurecidos, donde las velocidades de corte son altas, y tanto el avance como la profundidad de corte son bajos, y se emplean instalaciones rígidas de trabajo. Muchas fallas por fractura prematura de herramientas cerámicas se deben a máquinas herramientas no rígidas, que sujetan a las herramientas a fuerza dinámicas. Cuando las herramientas cerámicas de corte se aplican apropiadamente, pueden usarse para obtener buen acabado en las superficies. No se recomiendan las herramientas cerámicas para operaciones interrumpidas de corte basto (por ejemplo, fresado basto) debido a su baja tenacidad. Además de las aplicaciones de los insertos de óxido de aluminio en operaciones de maquinado convencional, el Al_2O_3 se usa ampliamente como un abrasivo en esmerilado y otros procesos abrasivos (capítulo 25).

Otras herramientas cerámicas de corte disponibles comercialmente incluyen: nitruro de silicio (SiN), **sialon** (que consiste en nitruro de silicio y óxido de aluminio, $\text{SiN-Al}_2\text{O}_3$), óxido de aluminio y carburo de titanio ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) y óxido de aluminio reforzado con cristales simples de carburo de silicio. Estas herramientas se diseñan generalmente para aplicaciones especiales, las cuales están fuera del alcance de este libro.

23.2.5 Diamantes sintéticos y nitruro de boro cúbico

El diamante es el material más duro que se conoce (sección 7.6.1). Según algunas medidas de dureza, el diamante es cerca de tres o cuatro veces más duro que el carburo de tungsteno o que el óxido de aluminio. Como la alta dureza es una de las propiedades deseables de las herramientas de corte, es natural que se piense en los diamantes para aplicaciones de esmerilado y maquinado. Las herramientas de corte de diamante sintético se hacen con diamante policristalino sinterizado (SPD por sus siglas en inglés) y se remontan a los primeros años de la década de los setenta. El **diamante policristalino sinterizado** se fabrica mediante la sinterización de polvos finos de cristales de diamante granulado a altas temperaturas y presiones en la forma deseada; se usa poco o ningún aglutinante. Los cristales tienen una orientación aleatoria y esto añade considerable tenacidad a las herramientas de SPD, en relación con los cristales simples de diamante. Los insertos de herramientas se hacen de manera usual depositando una capa de SPD de aproximadamente 0.5 mm (0.020 in) de grueso sobre la superficie de una base de carburo cementado. También se han hecho insertos muy pequeños de SPD a 100%

Las aplicaciones de las herramientas de corte de diamante incluyen el maquinado a alta velocidad de metales no ferrosos y abrasivos no metálicos como fibras de vidrio,

grafito y madera. No es práctico maquinar el acero y otros metales ferrosos, así como las aleaciones basadas en níquel, con herramientas de SPD, debido a la afinidad química que existe entre estos metales y el carbono (el diamante, ante todo, es carbono).

Después del diamante, el material más duro conocido es el **nitruro de boro cúbico** (sección 7.3.3) y su fabricación en forma de herramientas de corte es básicamente la misma que se usa para el SPD, esto es, recubrimientos sobre insertos de WC-Co. El nitruro de boro cúbico (cuyo símbolo es CBN) no reacciona químicamente con el hierro y el níquel como lo hace el SPD; por tanto, las aplicaciones de herramientas recubiertas de CBN se aplican para maquinar acero y aleaciones basadas en níquel. Como es de imaginarse, las herramientas SPD y CBN son costosas, por consiguiente, sus aplicaciones deben justificar el costo de las herramientas adicionales.

23.3 CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DE LAS HERRAMIENTAS

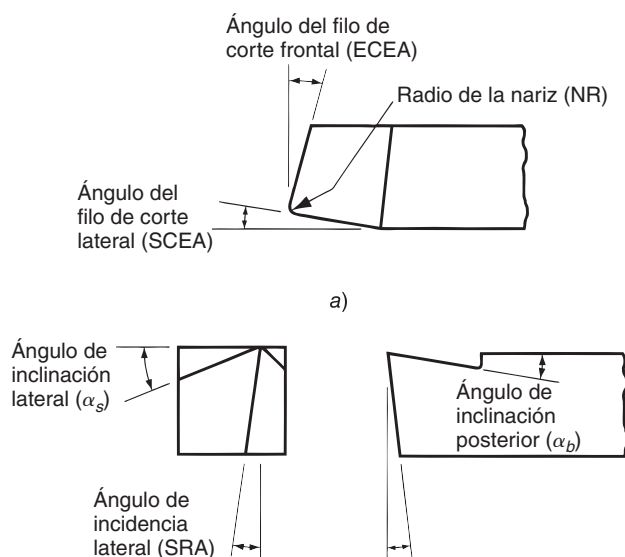
La herramienta de corte deben tener una forma apropiada para las aplicaciones de maquinado. Una forma importante de clasificar las herramientas de corte es atendiendo a los procesos de maquinado. De esta forma se tienen herramientas para torneado, herramientas para trozado, fresas, brocas, escariadores,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

Como se indica en la sección 21.1, las herramientas de corte se pueden dividir en dos categorías: de una punta y de bordes o múltiples filos cortantes. Las herramientas de una punta se usan en torneado, perforado, perfilado y cepillado. Las herramientas de bordes o múltiples filos cortantes se usan en taladro, rimado, roscado, fresado, escariado y aserrado. La mayoría de estas operaciones en la segunda categoría usan herramientas rotatorias. Muchos de los principios que se aplican a las herramientas de una punta se aplican también 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.

23.3.1 Configuración geométrica de las herramientas de una punta

La forma general de una herramienta de punta sencilla se ilustra en la figura 23.4a. Un diagrama más detallado se muestra en la figura 23.7.

FIGURA 23.7 a) Siete elementos de la configuración geométrica de una herramienta de una punta y b) la forma convencional de la herramienta que define los siete elementos.



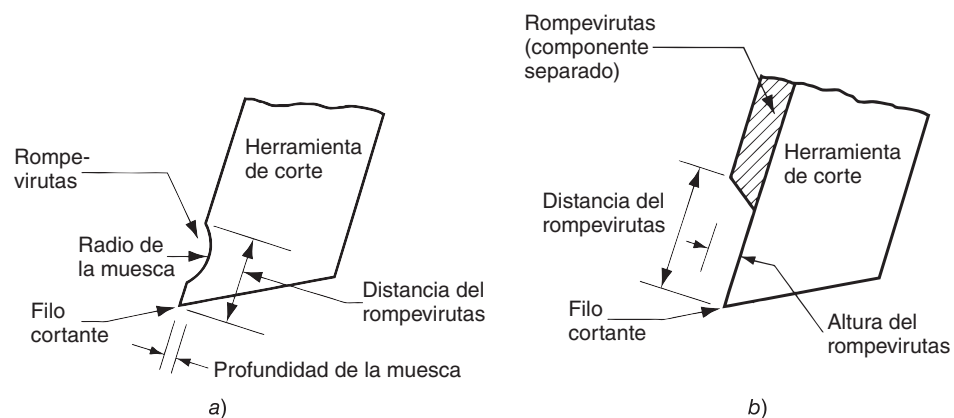
b) Firma de la herramienta: α_b , α_s , ERA, SRA, ECEA, SCEA, NR

Ya se ha considerado el ángulo de inclinación de una herramienta de corte como un parámetro. En una herramienta de una punta, la orientación de la superficie de inclinación se define por dos ángulos, el **ángulo de inclinación posterior** (α_p) y el **ángulo de inclinación lateral** (α_s). Estos dos ángulos tienen una influencia determinante en la dirección del flujo de la viruta sobre la cara o superficie de inclinación. La superficie del flanco o incidencia de la herramienta se define por el **ángulo de incidencia frontal** (ERA, por sus siglas en inglés) y el **ángulo de incidencia lateral** (SRA, por sus siglas en inglés). 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 una punta 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 de filo de corte lateral** (SCEA, por sus siglas en inglés) 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 pieza de trabajo. El **radio de la nariz** (NR por sus siglas en inglés) 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. Se volverá a tocar este punto de las superficies rugosas en el maquinado en la sección 24.2.2. El **ángulo de filo de corte frontal** (ECEA, por sus siglas en inglés) 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.

Para una herramienta de una punta hay siete elementos que definen su configuración geométrica. Cuando se especifican en el siguiente orden se llaman colectivamente la **firma de la configuración geométrica de la herramienta**: ángulo de inclinación posterior, ángulo de inclinación lateral, ángulo de incidencia frontal, ángulo de incidencia lateral, ángulo de filo de corte frontal, ángulo del filo de corte lateral y radio de la nariz. Por ejemplo, una herramienta de una punta que se usa en torneado debe tener la siguiente firma: 5, 5, 7, 7, 20, 15, 2/64 in.

Rompevirutas La eliminación de la viruta es un problema que se encuentra frecuentemente en torneado y otras operaciones continuas. Con frecuencia 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 pieza de trabajo, e interfieren con la operación automática del proceso de torneado. A menudo se usan **rompevirutas** junto con las herramientas de una punta; 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 una punta, como se ilustra en la figura 23.8: a) rompevirutas de muesca, diseñado dentro de la misma herramienta de corte; y b) rompevirutas tipo obstrucción, diseñado como un dispositivo adicional sobre la

FIGURA 23.8 Dos métodos para romper la viruta en las herramientas de una punta: a) tipo muesca y b) tipo obstrucción.



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

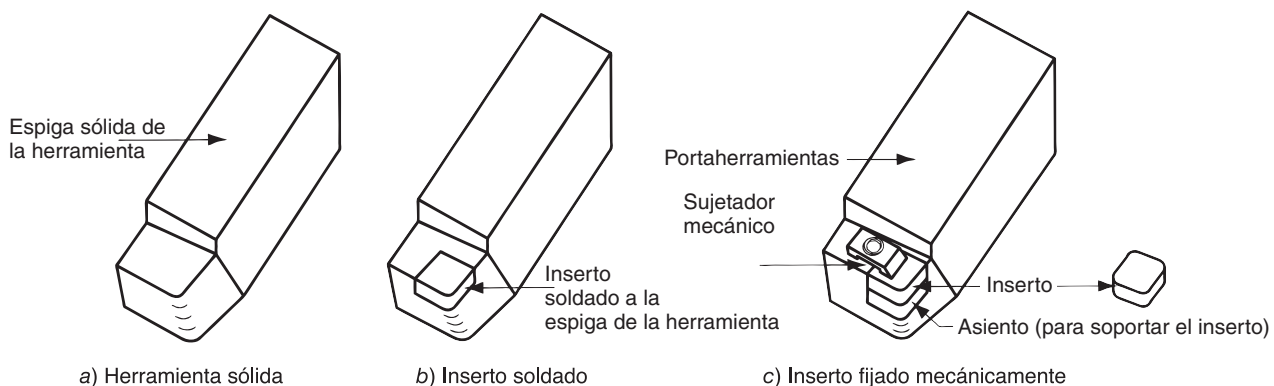
Efecto del material de la herramienta sobre la configuración geométrica de la herramienta En el estudio de la ecuación de Merchant (sección 21.3.2) se señaló que generalmente es deseable un ángulo de inclinación positivo para reducir las fuerzas de corte, la temperatura y el consumo de potencia. Las herramientas de corte de acero de alta velocidad se hacen casi siempre con ángulos positivos de inclinación, fluctuando típicamente entre $+5^\circ$ a $+20^\circ$. Los HSS tienen buena resistencia y tenacidad, de manera que las secciones más delgadas de la herramienta creadas por altos ángulos de inclinación positivos por lo general no causan problemas de fractura en las herramientas. Las herramientas de HSS se hacen predominantemente de una sola pieza. Se puede controlar el tratamiento térmico de los aceros de alta velocidad para suministrar un filo de corte duro; esto mantiene un núcleo interior tenaz.

Con la creación de materiales muy duros para herramientas (carburos cementados y cerámicas) se requirieron cambios en la configuración geométrica 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 respecto a su resistencia a la compresión y sus propiedades no pueden manipularse mediante tratamiento térmico como las de los HSS. Por último, el costo por peso unitario de estos materiales muy duros es más alto que el costo de los aceros de alta velocidad. 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 inclinación 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. Por ejemplo, los carburos cementados se usan con ángulos de inclinación típicos en la escala de -5° a $+10^\circ$. Los cerámicos tienen ángulos de inclinación que fluctúan entre -5° y -15° . Los ángulos de incidencia se hacen tan pequeños como sea posible (típicamente 5°) para darle al borde de corte tanto soporte como sea posible.

Otra diferencia es la forma en que se coloca el filo de corte de la herramienta en posición. Las formas alternas para sostener y presentar el filo de corte de una herramienta de una punta se ilustra en la figura 23.9. La configuración geométrica de una herramienta de acero de alta velocidad se talla sobre una espiga sólida, como se muestra en el inciso a de la figura. El costo más alto, las diferencias en las propiedades y los procesos de los materiales más duros para herramienta han dado lugar al uso de insertos soldados o adheridos mecánicamente a un portaherramientas. El inciso b muestra un inserto de carburo cementado soldado a una espiga de herramienta. La espiga está hecha de acero para herramienta a fin de proveer resistencia y tenacidad. El inciso c) ilustra un posible diseño para sostener mecánicamente un inserto en un portaherramientas. Se usa la sujeción mecánica para

FIGURA 23.9 Tres formas para sostener y presentar el borde de corte de una herramienta de una punta: a) herramienta sólida, típica de los HSS; b) inserto soldado, una forma de sostener un inserto de carburo cementado; y c) inserto fijo mecánicamente, usado para carburos cementados, cerámicos y otros materiales muy duros.



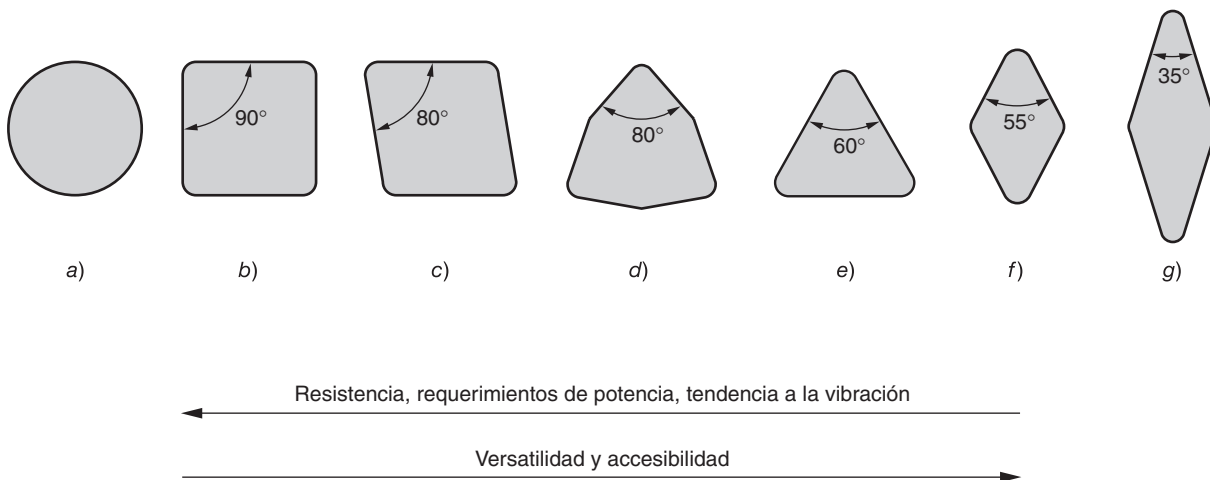


FIGURA 23.10 Formas comunes de insertos: a) redondos, b) cuadrados, c) rombos con dos ángulos de 80° , d) hexágono con tres ángulos de 80° , e) triángulo (equilátero), f) rombo con dos ángulos de 55° , g) rombo con dos ángulos de 35° . Asimismo, se muestran las características típicas de su configuración geométrica. La resistencia, los requerimientos de potencia y la tendencia a la vibración aumentan a medida que uno se desplaza a la izquierda; mientras que la versatilidad y la accesibilidad tienden a ser mejores con las configuraciones geométricas de la derecha.

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 portaherramientas. Cuando todos los filos se han gastado, se elimina y reemplaza el inserto.

Insertos Los insertos para las herramientas de corte se utilizan ampliamente en el maquinado debido a que son económicos y adaptables a muchos tipos diferentes de operaciones de maquinado: el torneado, perforado, roscado, fresado e incluso taladrado. Se encuentran disponibles en una gran variedad de formas y tamaños y se aplican en una extensa variedad de situaciones de corte, en la práctica. En la figura 23.9c) se muestra un inserto cuadrado. Otras formas comunes que se utilizan en las operaciones de torneado se muestran en la figura 23.10. En general, se debe seleccionar la punta con mayor ángulo debido a su resistencia y economía. Los insertos redondos poseen puntas con ángulos mayores (y radios de nariz también grandes) debido sólo a su forma. Los insertos con puntas con ángulos mayores son inherentemente más resistentes y con menor probabilidad de que se cincelen con viruta o se rompan durante el corte; sin embargo, requieren más potencia y también están más expuestos a vibraciones. La ventaja, desde el punto de vista económico, de los insertos redondos es que pueden ser indexados un gran número de veces para más cortes por inserto. Los insertos cuadrados presentan cuatro bordes de corte, las formas triangulares tienen tres, mientras que la de forma de rombo tiene solamente dos. El tener menor número de bordes representa una desventaja en costos. Si se puede utilizar ambos lados del inserto (por ejemplo, en la mayoría de las aplicaciones de ángulo de inclinación), entonces el número de bordes de corte se duplica. Las formas en rombo se utilizan (especialmente con ángulos muy cerrados) debido a su versatilidad y accesibilidad cuando se va a llevar a cabo una gran variedad de operaciones. Estas formas pueden colocarse más fácilmente en espacios confinados y se pueden utilizar no solamente en el torneado sino también en el careado, figura 22.6a), y en el torneado de contorno, figura 22.6c).

Los insertos no se fabrican por lo general con filos de corte perfectamente puntiagudos debido a que un filo puntiagudo es más débil y se fractura de manera más fácil, en especial para los materiales de herramientas muy duros, y frágiles para los que se hacen los insertos (carburos cementados, carburos recubiertos, cermets, cerámicas, CBN y diamante). Algún tipo de alteración de forma se lleva a menudo a cabo en el borde del corte a un nivel casi microscópico. El efecto de esta **preparación de borde** es aumentar la resistencia del

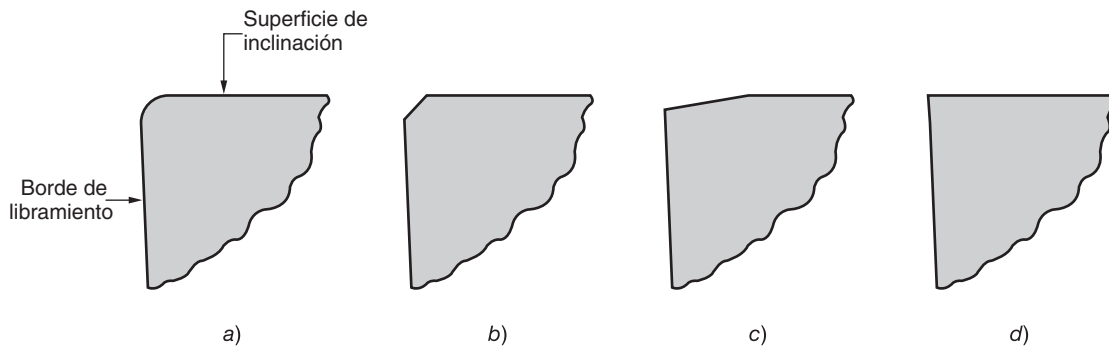


FIGURA 23.11 Tres tipos de preparación de borde que se aplican al borde de corte de un inserto: a) radio, b) biselado, c) aplanado y d) borde perfectamente puntiagudo (sin preparación de borde).

borde cortante, proporcionando una transición gradual entre el borde de seguridad y la cara de inclinación de la herramienta. En la figura 23.11 se muestran tres preparaciones de borde comunes: a) redondeo de radio o borde, también conocida como borde afilado, b) biselado y c) aplanado. Para efectos comparativos, en el inciso d) se muestra un borde de corte perfectamente puntiagudo. El radio en a) es típicamente de alrededor de 0.025 mm (0.001 in) y el aplanado en c) es de 15° o 20°. Las combinaciones de estas preparaciones de borde a menudo se aplican a un borde de corte simple a fin de maximizar el efecto de endurecimiento.

23.3.2 Herramientas de múltiples filos cortantes

La mayoría de las herramientas múltiples de filos cortantes se utilizan en operaciones de maquinado en las que la herramienta gira. Los ejemplos más significativos son el taladrado y el fresado. Por otro lado, algunas operaciones de escariado y aserrado (corte con segueta y con cinta) utilizan herramientas de múltiples filos cortantes que trabajan con un movimiento lineal. Otras operaciones de aserrado (aserrado circular) utilizan hojas de sierra giratorias.

Taladrado con barrenos espirales Se encuentran disponibles varias herramientas de corte para hacer agujeros; sin embargo, el **barreno espiral** es la más común de todas. Viene en diámetros que varían desde 0.15 mm (0.006 in) hasta 75 mm (3.0 in). Los barrenos espirales se utilizan ampliamente en la industria para realizar agujeros de manera rápida y económica.

En la figura 23.12 se muestra la configuración geométrica del barreno espiral estándar. El cuerpo del barreno tiene dos **estrias espirales** (la espiral le da su nombre al barreno espiral). El ángulo de las estrias espirales se llama **ángulo de la hélice**, cuyo valor típico es de alrededor de 30°. Mientras se lleva a cabo el taladrado, las estrias espirales actúan como pasadizos para la extracción de viruta del agujero. Aunque es deseable que las aperturas de las estrias sean grandes para proporcionar un espacio máximo para la viruta, el cuerpo del barreno debe estar soportado a lo largo de su longitud. Este soporte lo proporciona el **alma**, que es el grosor del barreno entre las estrias.

La punta del barreno espiral tiene una forma cónica. Un valor típico del **ángulo de la punta** es 118°. La punta puede estar diseñada de varias formas; sin embargo, el diseño más común es **borde de cincel**, como se muestra en la figura 23.12. Conectado al borde del cincel se encuentran dos bordes de corte (a menudo se les llama labios) que llevan a las estrias. La porción de cada estria adyacente al borde de corte actúa como la superficie de inclinación de la herramienta.

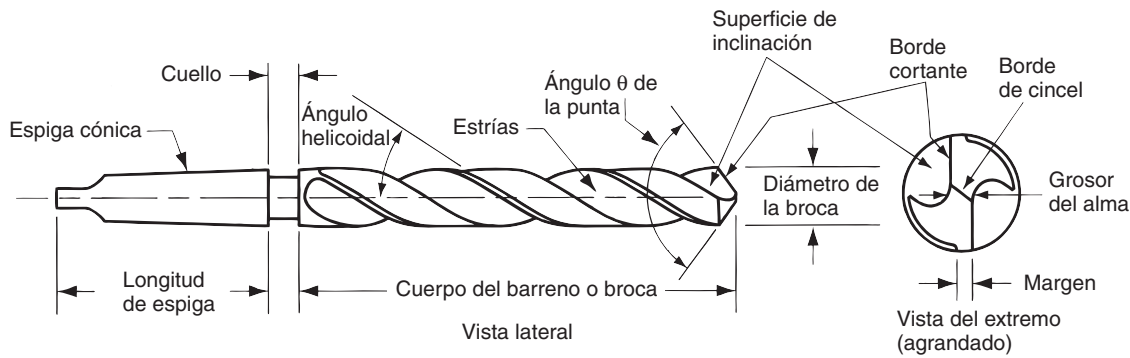


FIGURA 23.12 Configuración geométrica estándar de un barreno espiral.

La acción de corte del barreno espiral es compleja. El giro y avance de la broca trae como consecuencia un movimiento relativo entre los bordes de corte y la pieza de trabajo para formar la rebaba. La velocidad de corte a lo largo de cada borde de corte varía en función de la distancia a partir del eje de rotación. De acuerdo con esto, la eficiencia de la acción de corte varía; la más eficiente es en el diámetro externo de la broca y la menos eficiente, en el centro. De hecho, la velocidad relativa en la punta de la broca es cero, por lo que no se lleva a cabo ningún corte. En lugar de lo anterior, el borde del cincel de la punta de la broca empuja para fuera el material del centro conforme éste penetra en el agujero; se requiere una fuerza de empuje mayor para guiar al barreno espiral hacia delante en el agujero. Asimismo, al comienzo de la operación, el borde giratorio del cincel tiende a dispersarse sobre la superficie de la pieza de trabajo, provocando una pérdida en la precisión de la posición. Se ha inventado varios diseños de brocas alternos para resolver este problema.

La remoción de viruta puede representar un problema en el taladrado. La acción de corte se lleva a cabo dentro del agujero, y las estrías deben proporcionar suficiente espacio a través de la longitud de éste para permitir que la viruta pueda extraerse de él. A medida que se forma la viruta, es forzada a través de las estrías a salir a la superficie de trabajo. La fricción complica las cosas en dos formas. Además de la fricción usual en el corte de metales entre la viruta y la superficie de inclinación del borde de corte, la fricción también trae como consecuencia un tallado entre el diámetro exterior de la broca y el agujero que se está formando. Lo anterior incrementa la temperatura del taladro y del trabajo. Ponerle a la broca un fluido de corte para reducir la fricción y el calor es difícil, ya que la viruta se encuentra fluyendo en la dirección opuesta. Debido a la remoción de viruta y al calor, el uso de un barreno espiral se limita a una profundidad de agujero de cerca de cuatro veces su diámetro. Algunos barrenos espirales están diseñados con agujeros interiores a través de toda su longitud, por medio de los cuales el fluido puede bombearse al agujero cerca de la punta de la broca, entregando así el fluido directamente a la operación de corte. Un método alternativo con los barrenos con espirales que no cuentan con agujeros para fluido es utilizar un procedimiento “picoteado” durante la operación de perforado. En dicho procedimiento, el taladro es periódicamente removido del agujero con la finalidad de limpiar la viruta antes de proceder a hacer más profundo el agujero.

Los barrenos espirales se fabrican normalmente con acero de alta velocidad. La configuración geométrica de la broca se fabrica antes de someterla a tratamiento térmico, y después la capa exterior de la broca (bordes de corte y superficies de fricción) es endurecida mientras que retiene en núcleo interior que es relativamente tenaz. Se utiliza la operación de molido para afilar los bordes de corte y darle forma a la broca.

Centros de fresado La clasificación de los cortadores de fresado está íntimamente relacionada con las operaciones de fresado que se describieron en la sección 22.3.1. Los tipos principales de cortadores de fresado son los siguientes:

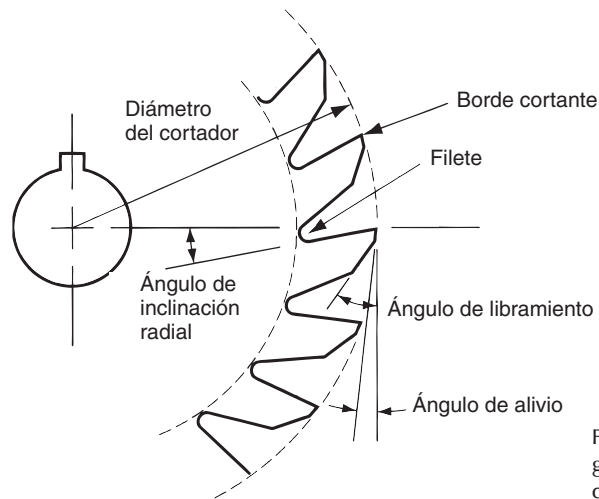
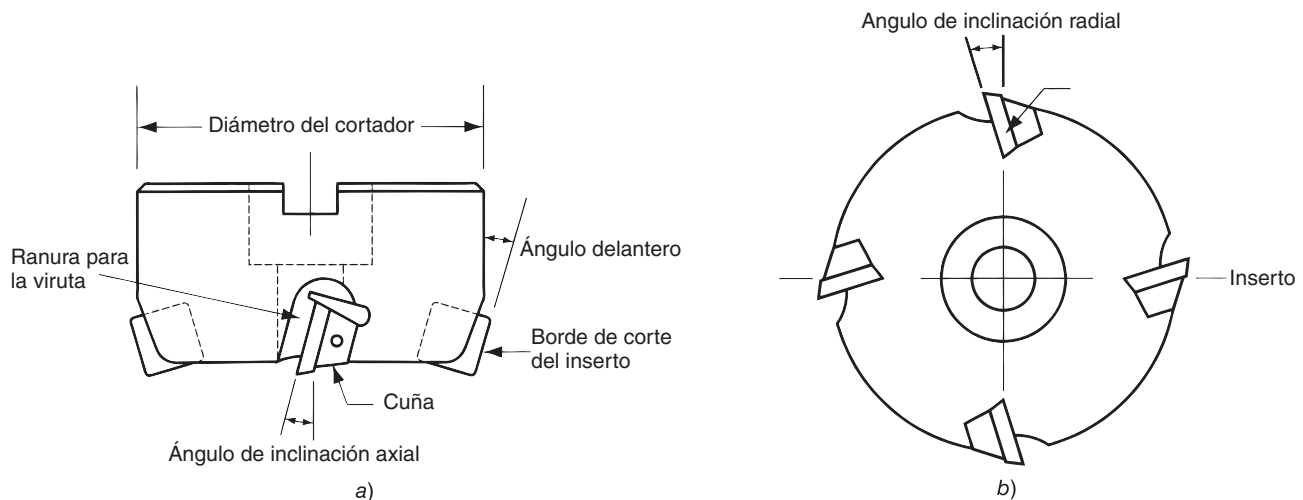


FIGURA 23.13 Elementos de la configuración geométrica de la herramienta de un cortador de fresado de 18 dientes.

- **Cortadores de fresado simples.** Se utilizan para el fresado periférico y de placas. Como lo indican las figuras 22.17a) y 22.18b), son en forma de cilindro con algunas hileras con dientes. Los bordes de corte están normalmente orientados a un ángulo helicoidal (como se muestra en la figura) para reducir el impacto a la entrada del trabajo, y estos cortadores se llaman **cortadores de fresado helicoidal**. En la figura 23.13 se muestran los elementos de la configuración geométrica de la herramienta de un cortador de fresado simple.
- **Cortadores de fresado de forma.** Son cortadores de fresado periférico en el que los bordes de corte tienen un perfil especial que se le impartirá al trabajo. Una aplicación importante es en la fabricación de engranes, en la que el cortador del fresado de forma se moldea para cortar las ranuras entre los dientes del engrane adyacente, por ende, dejando la forma de los dientes de engrane.
- **Cortadores de fresado frontal.** Están diseñados con dientes que cortan tanto en el lado lateral como en la periferia del cortador. Los cortadores de fresado frontal pueden fabricarse de HSS, como en la figura 22.17b), o estar diseñados para usar insertos de carburos cementados. La figura 23.14 muestra un cortador de fresado frontal de cuatro dientes que utiliza insertos.

FIGURA 23.14 Elementos de la configuración geométrica de un cortador de fresado frontal con cuatro dientes: a) vista lateral y b) vista superior.



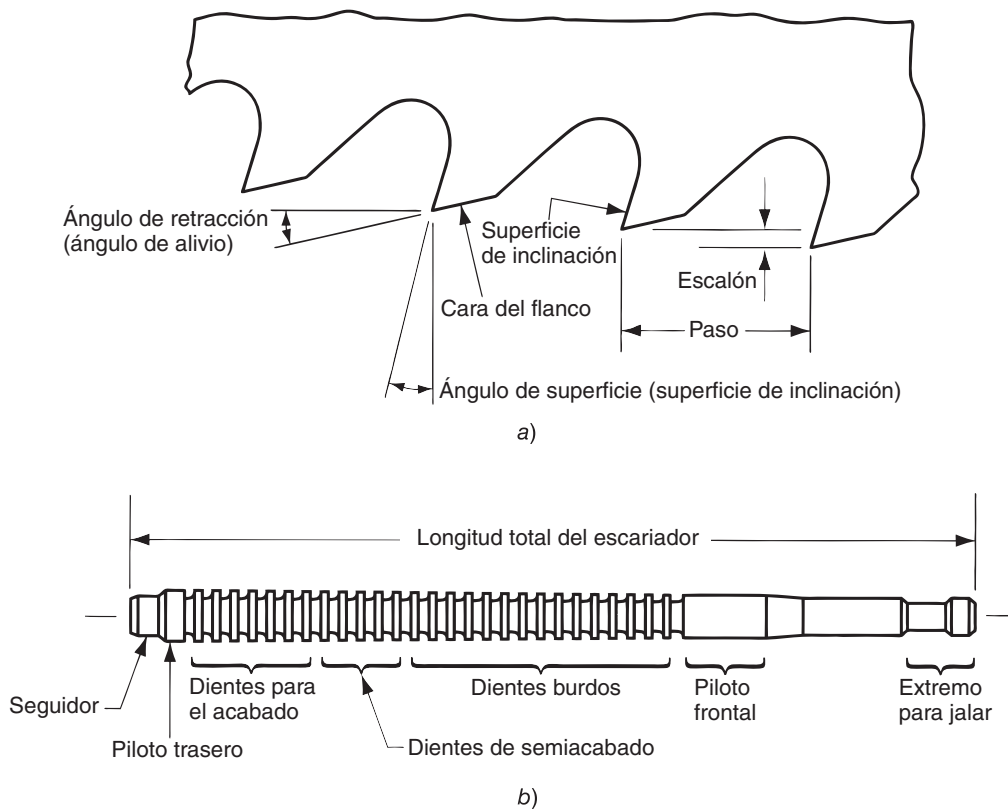


FIGURA 23.15 La brocha: a) terminología de la configuración geométrica de los dientes y b) una brocha típica utilizada en el brochado interior.

➤ **Cortadores de fresado terminal.** Como se muestra en la figura 22.20c), un cortador de fresado terminal tiene apariencia de una broca; sin embargo, una inspección más detallada muestra que está diseñado para el corte primario con sus dientes en la periferia en lugar de en sus extremos. (Una broca corta solamente en su extremo conforme penetra en el trabajo). Las fresadoras terminales están diseñadas con extremos cuadrados, extremos con radios y extremos en forma de bola. Las fresadoras terminales pueden utilizarse para fresado frontal, fresado de perfiles y embolsado, ranuras de corte, grabado, contorneado de superficies y avellanado del troquel.

Brochas La terminología y configuración geométrica de la brocha se muestra en la figura 23.15. La brocha consiste en una serie de dientes para corte a través de su longitud. El avance se logra mediante el espacio que existe entre dientes sucesivos en la brocha. Esta acción de avance es única en las operaciones de maquinado, puesto que la mayoría de las operaciones logran el avance mediante un movimiento relativo que se lleva a cabo en la herramienta o en el trabajo. Todo el material que se remueve en un solo pase de la brocha es el resultado acumulativo de todos los pasos de la herramienta. El movimiento acelerado se logra mediante el viaje lineal de la herramienta al pasar por la superficie de trabajo. La forma de la superficie de corte está determinada por el contorno de los bordes de corte en la brocha, particularmente, del borde cortante final. Debido a su complejidad geométrica y a las bajas velocidades utilizadas en el brochado, la mayoría de las brochas están hechas de HSS. En el brochado de cierto tipo de hierro para fundición, los bordes de corte son insertos de carburos cementados soldados o mecánicamente sujetos en su lugar en la herramienta de brochado.

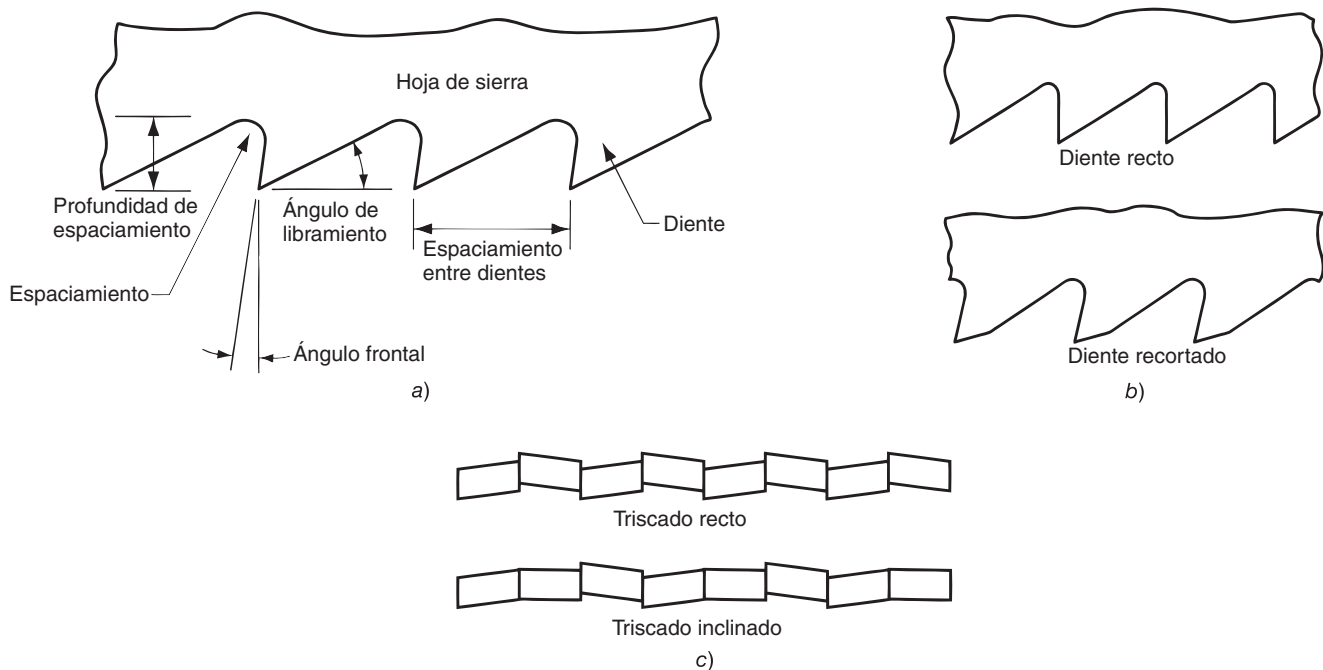


FIGURA 23.16 Características de las hojas de la sierra: a) nomenclatura de las configuraciones geométricas de la hoja de sierra, b) dos formas comunes de diente y c) dos tipos de triscado de dientes.

Hojas con sierra Para cada una de las tres operaciones de aserrado (sección 22.5.3), las hojas de la sierra tienen ciertas características comunes, incluyendo la forma de los dientes, el espaciado entre los mismos y su disposición, como se puede observar en la figura 23.16. La **forma de los dientes** tiene que ver con la configuración geométrica de cada diente de corte. El ángulo de inclinación, ángulo de espacio, espaciado entre dientes y otras características geométricas se muestran en la figura 23.16a). El **espaciado entre dientes** es la distancia entre dientes adyacentes de la sierra. Este parámetro determina el tamaño de los dientes y el espaciamiento entre dientes. El espaciamiento proporciona el espacio para la formación de la viruta por los dientes de corte adyacentes. Las diferentes formas de dientes son más o menos adecuadas para los diferentes materiales de trabajo y condiciones de corte. En la figura 23.16b) se muestran dos formas comúnmente utilizadas en corte con seguita y aserrado con cinta. La **disposición dentada (triscado)** permite que el corte por la hoja de la sierra sea más amplio que el ancho de la sierra misma; de otra forma la hoja se podría pegar en las paredes del corte hecho por la sierra. En la figura 23.16c) se muestran dos triscados comunes con sierra.

23.4 FLUIDOS PARA CORTE

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 y 2) fricción en las interfaces 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: lavado de las virutas (especialmente en esmerilado y fresado), reducción de la temperatura de la pieza de trabajo para un manejo más fácil, disminuir las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia, mejorar la estabilidad dimensional de la pieza de trabajo y optimizar el acabado superficial.

23.4.1 Tipos de fluidos para corte

Se dispone de varios fluidos para corte comerciales. Es conveniente analizarlos atendiendo primero a su función, para después clasificarlos por su composición química.

Funciones de los fluidos para corte De acuerdo con los dos principales problemas de los fluidos para corte, hay dos categorías generales: refrigerantes y lubricantes. Los **refrigerantes** son fluidos para corte diseñados para reducir los efectos del calor en las operaciones de maquinado. Tienen efecto limitado sobre la magnitud de energía calorífica generada durante el corte, pero extraen el calor que se genera; de esta manera se reduce la temperatura de la herramienta y de la pieza de trabajo, y ayuda a prolongar la vida de la herramienta de corte. La capacidad que tiene un fluido para corte de reducir la temperatura del maquinado depende de sus propiedades térmicas. El calor específico y la conductividad térmica son las propiedades más importantes (sección 4.2.1). El agua tiene un calor específico y una conductividad térmica relativamente mayores respecto a otros líquidos; por esta razón se utiliza como base de los fluidos para corte de tipo refrigerante. Estas propiedades le permiten al refrigerante extraer el calor de la operación, reduciendo así la temperatura de la herramienta de corte.

Los fluidos para corte tipo refrigerante parecen ser más efectivos a velocidades de corte relativamente altas, donde la generación del calor y las altas temperaturas son un problema. Son más efectivos en los materiales susceptibles a las fallas por temperatura, como los aceros de alta velocidad, y se usan frecuentemente en operaciones de torneado y fresado donde se genera calor en grandes cantidades. Por lo general, los refrigerantes son soluciones o emulsiones en agua debido a que ésta tiene propiedades térmicas ideales en estos fluidos para corte.

Los **lubricantes** son fluidos basados generalmente en aceite (por sus buenas propiedades lubricantes), formulados para reducir la fricción en las interfaces herramienta-viruta y herramienta-trabajo. Los fluidos lubricantes de corte operan por **lubricación de presión extrema**, una forma especial de lubricación que involucra la formación de una capa delgada de sales sólidas sobre la superficie caliente y limpia del material a través de reacciones químicas con el lubricante. Los compuestos de azufre, cloro y fósforo del lubricante causan la formación de estas capas superficiales, que actúan para separar las dos superficies metálicas (es decir, de la viruta y de la herramienta). Las películas de presión extrema son significativamente más efectivas para reducir la fricción en el corte de metales que en la lubricación convencional que se basa en la presencia de películas de líquidos entre las dos superficies.

Los fluidos para procesos de corte tipo lubricante son más efectivos a velocidades bajas de corte; tienden a perder su efectividad a altas velocidades (arriba de aproximadamente 120 m/min, 400 ft/min), debido a que el movimiento de la viruta a estas velocidades previene que el fluido para corte alcance la interfaz herramienta-viruta. Además de las altas temperaturas de corte que generan estas velocidades, los aceites se vaporizan antes de que puedan lubricar. Las operaciones de maquinado como el taladrado y el roscado se benefician por lo general de los lubricantes. En estas operaciones se retarda la formación de materiales acumulados en el filo de corte y se reduce el momento de torsión de la herramienta.

Aunque el propósito principal de un lubricante es reducir la fricción, también reduce la temperatura a través de varios mecanismos. En primer lugar, el calor específico y la conductividad térmica del lubricante ayudan a remover el calor de la operación, reduciendo por tanto la temperatura. En segundo lugar, debido a que se reduce la fricción, también se reduce el calor generado como resultado de la fricción. En tercer lugar, un coeficiente más bajo de fricción se traduce en un menor ángulo de fricción. De acuerdo con la ecuación de Merchant (ecuación 21.16), un menor ángulo de fricción ocasiona un aumento del ángulo del plano cortante; por consiguiente, la magnitud de la energía calorífica generada en la zona de corte se reduce. Hay un efecto típico de traslape entre los tipos de fluidos para corte. Los refrigerantes se formulan con ingredientes que ayudan a reducir la fricción. Y los lubricantes tienen propiedades térmicas, que aunque no son tan buenas como las del agua,

actúan para remover el calor de la operación de corte. Los fluidos para corte (refrigerantes y lubricantes) ponen de manifiesto su efecto en la ecuación de Taylor para la vida de la herramienta a través de valores más altos de C . Son típicos los incrementos de 10 a 40%. La pendiente n no se afecta significativamente.

Formulación química de los fluidos para corte Hay tres categorías básicas de fluidos para corte de acuerdo con su formulación química: 1) aceites para corte, 2) aceites emulsificados, 3) fluidos semiquímicos y 4) fluidos químicos. Todos estos fluidos para corte proporcionan funciones refrigerantes y lubricantes. Los aceites de corte son más eficientes como lubricantes, mientras que las otras tres categorías son más eficientes como refrigerantes, ya que están formados principalmente por agua.

Los **aceites para corte** son fluidos basados en aceites derivados del petróleo, de origen animal, marino o vegetal. Los aceites minerales (basados en petróleo) son los principales debido a su abundancia y generalmente por sus características lubricantes deseables. Para lograr la máxima capacidad de lubricación se combinan frecuentemente todos los tipos de aceite en un mismo fluido. También se mezclan aditivos químicos para incrementar las cualidades lubricantes. Estos aditivos contienen compuestos de azufre, cloro o fósforo y se diseñan para reaccionar químicamente con las superficies de la herramienta y de la viruta para formar películas sólidas (lubricación por presión extrema), que ayudan a evitar el contacto metal y metal.

Los **aceites emulsificados** son fluidos que forman suspensiones de pequeñas gotas de aceite en agua. El fluido se hace mezclando aceite (mineral por lo general) en agua, y se utiliza un agente emulsificante para promover la mezcla y estabilidad de la emulsión. Una relación típica entre agua y aceite es de 30:1. Se usan frecuentemente aditivos químicos basados en azufre, cloro y fósforo para promover la lubricación a presión extrema. Debido a que contienen aceite y agua, los aceites emulsificantes combinan las cualidades de lubricación y refrigeración en un solo fluido para corte.

Los **fluidos químicos** son sustancias químicas disueltas en agua, más que aceites en emulsión. Las sustancias químicas disueltas son compuestos de azufre, cloro o fósforo y agentes humectantes. Las sustancias químicas se destinan a suministrar algún grado de lubricación a la solución. Los fluidos químicos tienen buenas propiedades refrigerantes, pero sus cualidades lubricantes son menores que las de los otros tipos de fluidos. Los **fluidos semiquímicos** son fluidos químicos que contienen pequeñas cantidades de aceite emulsificado para incrementar las características lubricantes del fluido para corte. De hecho es una clase híbrida entre fluidos químicos y aceites emulsificantes.

23.4.2 Aplicación de los fluidos para corte

Los fluidos para corte se aplican a las operaciones de maquinado en varias formas. En esta sección se considera éstas técnicas de aplicación. Asimismo, se considera el problema de la contaminación del fluido para corte y qué medidas se pueden tomar para resolver este problema.

Métodos de aplicación El método más común es la **inundación**, llamada algunas veces enfriamiento por inundación, debido a que se usa generalmente con fluidos de enfriamiento. En este método se dirige una corriente constante de fluido hacia la interfaz herramienta-trabajo o herramienta-viruta de la operación de maquinado. Un segundo método consiste en la **aplicación de niebla**, usada principalmente en fluidos para corte basados en agua. En este método se dirige el fluido hacia la operación en forma de niebla acarreada a alta velocidad por una corriente de aire presurizado. La aplicación de niebla no es generalmente tan efectiva como la inundación de la herramienta de corte. Sin embargo, debido a la alta velocidad de la corriente de aire, la aplicación de niebla puede ser más efectiva para llevar el fluido de corte a áreas inaccesibles que no pueden ser alcanzadas por la inundación convencional.

Se usa la **aplicación manual** del fluido de corte por medio de una aceitera o brocha para aplicar lubricantes en operaciones de roscado, y otras donde las velocidades de corte son bajas y la fricción es un problema. La mayoría de los talleres de maquinado en producción prefieren generalmente no usar esta técnica debido a la variabilidad de su aplicación.

Filtración de los fluidos para corte y maquinado en seco Los fluidos para corte se contaminan al cabo del tiempo con una variedad de sustancias extrañas. Estos contaminantes incluyen aceites sucios (aceite de máquina, fluidos hidráulicos, etc.), basura (colillas de cigarro, alimentos, etc.), pequeñas virutas, hongos y bacterias. Además de causar malos olores y riesgos a la salud, los fluidos para corte contaminados no desempeñan sus funciones tan bien. Algunas alternativas para manejar este problema son las siguientes: 1) remplazar el fluido para corte a intervalos regulares y frecuentes (quizá dos veces por mes), 2) usar un sistema de filtración continuamente o en forma periódica para limpiar el fluido o 3) maquinar en seco, es decir, realizar el maquinado sin fluidos para corte. Debido al crecimiento de la conciencia ambiental y a la legislación asociada con la contaminación, la eliminación de los fluidos gastados se ha vuelto costosa y contraria al bienestar público general.

Se han instalado sistemas de filtración en numerosos talleres de máquinas para resolver los problemas de contaminación. Las ventajas de estos sistemas incluyen: 1) prolongación de la vida de los fluidos para corte entre cambios, en lugar de remplazar el fluido una o dos veces por mes, se han reportado vidas de refrigerantes hasta de un año; 2) se reducen los costos de disposición de los fluidos, ya que ésta es mucho menos frecuente cuando se usan filtros; 3) fluidos para corte más limpio para un mejor ambiente de trabajo y reducción de los riesgos contra la salud; 4) menor mantenimiento de las máquinas herramienta y 5) una vida más larga de las herramientas. Hay varios tipos de sistemas para filtrar los fluidos para corte. Para el lector interesado, en la referencia [20] se estudian los sistemas de filtrado y los beneficios que se obtienen al usarlos.

La tercera opción se llama **maquinado en seco**, lo que significa que no se utiliza ningún fluido para corte. El maquinado en seco evita los problemas asociados con la contaminación del fluido para corte, su desecho y filtración; sin embargo, puede presentar problemas por sí mismo: 1) sobrecalentar la herramienta, 2) operación a velocidades de corte y de producción más bajas para prolongar la vida de la herramienta y 3) adolecer de los beneficios de la remoción de viruta en el molido y el fresado. Los fabricantes de herramientas para corte han implantado ciertos grados de carburos y carburos con revestimiento para su uso en el maquinado en seco.

REFERENCIAS

- [1] Aronson, R. B., "Using High-Pressure Fluids", *Manufacturing Engineering*, junio de 2004, pp. 87-96.
- [2] Brierley, R. G. y Siekman, H. J., *Machining Principles and Cost Control*, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1964.
- [3] Carnes, R. y Maddock, G., "Tools Steel Selection" *Advanced, Materials & Processes*, junio de 2004, pp. 37-40.
- [4] Cook, N. H., "Tool Wear and Tool Life", *ASME Transactions, J. Engrg. For Industry*, vol. 95, noviembre de 1973, pp. 931-938.
- [5] Davis, J. R. (ed.), *ASM Specialty Handbook® Tool Materials*, ASM International, Materials Park, Ohio, 1995.
- [6] Destephani, J., "The Science of pCBN", *Manufacturing Engineering*, enero de 2005, pp. 53-62.
- [7] Drozda, T. J. y Wick, C. (eds.), *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol. I, *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, Dearbon, Mich., 1983.
- [8] Esford, D., "Ceramics Take a Turn", *Cutting Tool Engineering*, vol. 52, núm. 7, julio de 2000, pp. 40-46.
- [9] Graham, D., "Dry Out", *Cutting Tool Engineering*, vol. 52, núm. 3, marzo de 2000, pp. 56-65.
- [10] Koelsch, J. R., "Beyond Tin", *Manufacturing Engineering*, octubre de 1992, pp. 27-32.
- [11] Krar, S. F. y Ratterman, E., *Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond*, McGraw-Hill, Inc., Nueva York, 1990.
- [12] Liebholt, P., "The History of Tools", *Cutting Tool Engineer*, junio de 1989, pp. 137-138.
- [13] *Machining Data Handbook*, 3a. ed., vols. I y II. Metcut Research Associates, Inc., Cincinnati, Ohio, 1980.
- [14] *Metals Handbook*, 9a. ed., vol. 16, *Machining*, ASM International, Metals Park, Ohio, 1989.
- [15] *Modern Metal Cutting*, AB Sandvik Coromant, Sandvik, Suecia, 1994.
- [16] Nelson, A., "Treat Your Fluids Right", *Manufacturing Engineering*, junio de 2004, pp. 79-84.
- [17] Owen, J.V., "Are Cermets for Real?", *Manufacturing Engineering*, octubre de 1991, pp. 28-31.

- [18] Pfouts, W.R., "Cutting Edge Coatings", *Manufacturing Engineering*, julio de 2000, pp. 98-107.
- [19] Schey, J. A., *Introduction to Manufacturing Processes*, 3a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.
- [20] Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles*, 2a. ed., Oxford University Press, Inc., Oxford, Inglaterra, 2005.
- [21] Spitler, D. (ed.), *Fundamentals of Tool Design*, 5a. ed., Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 2003.
- [22] Tlusty, J., *Manufacturing Processes and Equipment*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2000.

PREGUNTAS DE REPASO

- 23.1. ¿Cuáles son los dos aspectos principales de la tecnología de herramientas de corte?
- 23.2. Mencione los tres modos de falla de la herramienta de maquinado.
- 23.3. ¿Cuáles son los dos principales lugares de una herramienta de corte donde ocurre el desgaste?
- 23.4. Identifique los mecanismos de desgaste de la herramienta de corte.
- 23.5. ¿Qué significa el parámetro C en la ecuación de vida de la herramienta de Taylor?
- 23.6. ¿Qué otras variables además de la velocidad de corte se incluyen en la versión aumentada de la ecuación de Taylor?
- 23.7. ¿Cuáles son algunos de los criterios de vida en la herramienta usados en las operaciones de maquinado en producción?
- 23.8. Identifique tres propiedades deseables de un material para herramienta de corte.
- 23.9. ¿Cuáles son los elementos principales de aleación de los aceros de alta velocidad?
- 23.10. ¿Cuál es la diferencia de ingredientes entre los carburos cementados grado corte de acero y grado corte de materiales que no son aceros?
- 23.11. Identifique algunos de los compuestos comunes que forman los recubrimientos delgados sobre la superficie de los insertos de carburo recubierto.
- 23.12. Mencione los siete elementos de la configuración geométrica de herramientas para una herramienta de corte de una punta.
- 23.13. ¿Por qué se diseñan generalmente las herramientas cerámicas de corte con ángulos de inclinación negativos?
- 23.14. Identifique las formas alternas para sujetar una herramienta de corte en su lugar durante el maquinado.
- 23.15. Mencione las dos categorías principales de fluidos para corte de acuerdo con su función.
- 23.16. Mencione los cuatro tipos principales de fluidos para corte de acuerdo con su composición química.
- 23.17. ¿Cuál es el principal mecanismo lubricante mediante el cual trabajan los fluidos para corte?
- 23.18. ¿Cuáles son los métodos de aplicación de los fluidos para corte en una operación de maquinado?
- 23.19. ¿Por qué los sistemas de filtrado de fluidos se hacen cada día más comunes y cuáles son sus ventajas?
- 23.20. El maquinado en seco está siendo evaluado en tiendas de máquinas debido a que presenta ciertos problemas inherentes en el uso de fluidos para corte. ¿Cuáles son los problemas asociados con el uso de fluidos para corte?
- 23.21. ¿Cuáles son algunos de los nuevos problemas que presenta el maquinado en seco?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 19 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

- 23.1. De las siguientes condiciones de corte, ¿cuál tiene el efecto mayor en el desgaste de la herramienta?: a) velocidad de corte, b) profundidad de corte o c) avance.
- 23.2. Como ingrediente de aleación en el acero de alta velocidad, ¿cuál de las siguientes funciones tiene el tungsteno? (dos mejores respuestas): a) forma carburos duros para resistir la abrasión, b) mejora la resistencia y la dureza, c) aumenta la resistencia a la corrosión, d) incrementa la dureza en caliente y e) aumenta la tenacidad.
- 23.3. ¿Cuáles son los siguientes ingredientes principales que contienen típicamente las aleaciones de fundición de cobalto? (tres respuestas mejores): a) aluminio, b) cobalto, c) cromo, d) níquel, e) acero y f) tungsteno.
- 23.4. ¿Cuál de los siguientes no es un ingrediente común de las herramientas de corte de carburo cementado? (dos respuestas correctas): a) Al_2O_3 , b) Co, c) CrC, d) TiC y e) WC.

- 23.5. ¿Cuál de los siguientes efectos sobre los carburos cementados WC-Co tiene un incremento en el contenido de cobalto? *a)* disminuye la dureza, *b)* disminuye la resistencia a la ruptura transversal, *c)* incrementa la dureza, *d)* incrementa la tenacidad y *e)* incrementa la resistencia al desgaste.
- 23.6. ¿Por cuáles de los siguientes ingredientes se caracterizan típicamente los grados de corte de acero de los carburos cementados? (tres respuestas correctas): *a)* Co, *b)* Fe, *c)* Mo, *d)* Ni, *e)* Ti y *f)* WC.
- 23.7. Si usted ha seleccionado un carburo cementado para una aplicación que involucra el acabado en torno de un acero, ¿qué grado C seleccionaría usted? (una mejor respuesta): *a)* C1, *b)* C3, *c)* C5 o *d)* C7.
- 23.8. ¿Cuál de los siguientes procesos se usa para proveer los recubrimientos delgados sobre la superficie de un inserto de carburo recubierto? (dos mejores respuestas): *a)* deposición química de vapor, *b)* galvanoplastia, *c)* deposición física de vapor, *d)* prensado y sinterizado y *e)* pintado con aerosol.
- 23.9. ¿Cuál de los siguientes materiales tiene una dureza más alta?: *a)* óxido de aluminio, *b)* nitruro de boro cúbico, *c)* acero de alta velocidad, *d)* carburo de titanio o *e)* carburo de tungsteno.
- 23.10. ¿Cuál de las siguientes son las dos funciones principales de un fluido para corte en maquinado? (dos mejores respuestas): *a)* mejorar el acabado superficial de la pieza de trabajo, *b)* reducir las fuerzas y la potencia, *c)* reducir la fricción en la interfaz herramienta-viruta, *d)* remover el calor de los procesos o *e)* lavado de la viruta.

PROBLEMAS

Vida de las herramientas y ecuación de Taylor

- 23.1. Los siguientes datos de desgaste de flanco se recopilaron en una serie de pruebas de torneado usando una herramienta de carburo recubierto sobre un acero endurecido a un avance de 0.30 mm/rev y una profundidad de 4.0 mm. A una velocidad de 125 m/min, un desgaste del flanco es de 0.12 mm a 1 min, 0.27 mm a 5 min, 0.45 mm a 11 min, 0.58 mm a 15 min, 0.73 a 20 min y 0.97 mm a 25 min. A una velocidad de 165 m/min, el desgaste del flanco es de 0.22 mm a 1 min, 0.47 mm a 5 min, 0.70 mm a 9 min, 0.80 mm a 11 min y 0.99 mm a 13 min. El último valor en cada caso es cuando se presenta una falla final de la herramienta. *a)* En un pedazo de papel lineal gráfico, grafique el desgaste del flanco en función del tiempo. Utilizando 0.75 mm de desgaste del flanco como un criterio para la falla de la herramienta, determine el periodo de vida de la herramienta a las dos velocidades de corte. *b)* En papel logarítmico natural, grafique los resultados a los que llegó en el inciso anterior. A partir de la gráfica, determine los valores de n y C en la ecuación de Taylor de la vida de la herramienta. *c)* A manera de comparación, calcule los valores de n y C en la ecuación de Taylor resolviendo las ecuaciones simultáneas. ¿Son los valores resultantes de n y C los mismos?
- 23.2. Resuelva el problema 23.1, considerando que el criterio del periodo de vida de la herramienta es de 0.50 mm de desgaste del flanco en lugar de 0.75 mm.
- 23.3. Se llevó a cabo una serie de pruebas de torneado utilizando una herramienta de carburo cementado y se obtuvieron, datos acerca del desgaste del flanco. El avance fue de 0.010 in/rev y la profundidad de 0.125 in. A una velocidad de 350 ft/min, el desgaste del flanco es de 0.005 in en 1 min, 0.008 in en 5 min, 0.012 in en 11 min, 0.0015 in en 15 min, 0.021 in en 20 min y 0.040 in en 25 min. A una velocidad de 450 ft/min, el desgaste del flanco es de 0.007 in en 1 min, 0.017 in en 5 min, 0.027 in en 9 min, 0.33 in en 11 min y 0.040 in en 13 min. El último valor en cada caso es cuando se presenta la falla final de la herramienta. *a)* En un pedazo de papel gráfico lineal, grafique el desgaste del flanco en función del tiempo. Utilizando 0.020 in de desgaste del flanco como criterio de la falla de la herramienta, determine los tiempos de vida para las dos velocidades de corte. *b)* En un pedazo de papel logarítmico natural, grafique los resultados que obtuvo en el inciso anterior. A partir de la gráfica, determine los valores de n y C en la ecuación de Taylor de la vida de la herramienta. *c)* A manera de comparación, calcule los valores de n y C en la ecuación de Taylor, resolviendo las ecuaciones simultáneas. ¿Son los valores resultantes de n y C los mismos?
- 23.4. Resuelva el problema 23.3, considerando que el criterio de desgaste de la vida de la herramienta es de 0.015 in de desgaste del flanco. ¿Qué velocidad de corte se debe utilizar para obtener un tiempo de vida de la herramienta de 20 min?
- 23.5. La prueba de la vida de la herramienta en un torno ha arrojado los datos siguientes: 1) a una velocidad de corte de 375 ft/min, la vida de la herramienta fue de 5.5 min; 2) a una velocidad de corte de 275 ft/min, la vida de la herramienta fue de 53 min. *a)* Determine los parámetros n y C en la ecuación de Taylor de vida de la herramienta. *b)* Basado en los valores de n y C , ¿cuál es el material probable de herramienta usado en esta operación? *c)* Usando su propia ecuación, calcule la vida de la herramienta que corresponde a una velocidad de corte de 300 ft/min. *d)* Calcule la velocidad de corte que corresponde a una vida de la herramienta $T = 10$ min.
- 23.6. Una prueba de vida de la herramienta en torneado arrojó los siguientes datos: *a)* cuando la velocidad de corte es de 100 m/min, la vida de la herramienta es de 10 min; 2) cuando la velocidad de corte es de 75 m/min, la vida de la herramienta es de 30 min. *a)* Determine los valores de n y C en la ecuación de Taylor de vida de la herramienta. Con base en su ecuación, calcule *b)* la vida de la herramienta a una velocidad de 110 m/min y *c)* la velocidad correspondiente a una vida de la herramienta de 15 min.
- 23.7. En una prueba de torneado resultó una vida de herramienta de 1 min a una velocidad de corte de 4.0 m/s y una vida de herramienta de 20 min a una velocidad de 2.0 m/s. *a)* Encuentre los valores de n y C en la ecuación de vida de la herramienta de Taylor. *b)* Proyecte la duración de la herramienta a una velocidad de 1.0 m/s.

- 23.8. Una pieza de trabajo de 15.0 in por 2.0 in se maquina en una operación de fresado frontal utilizando un cortador de 2.5 in de diámetro con un solo inserto de carburo. La máquina se configura para un avance de 0.010 in/diente y una profundidad de 0.20 in. Si la velocidad de corte es de 400 ft/min, la herramienta dura tres piezas. Si se utiliza una velocidad de corte de 200 ft/min, la herramienta dura 12 piezas. Determine la ecuación de Taylor de la vida de la herramienta.
- 23.9. En una operación de producción de torneado, la pieza de trabajo tiene 125 mm de diámetro y 300 mm de largo. Se usa una velocidad de avance de 0.225 mm/rev en la operación. Si se usa una velocidad de corte de 3.0 m/s la herramienta debe cambiarse cada cinco piezas de trabajo; pero si la velocidad de corte es de 2.0 m/s, la herramienta puede producir 25 piezas entre los cambios de herramienta. Determine la ecuación de vida de la herramienta de Taylor para este trabajo.
- 23.10. Para la gráfica de la vida de la herramienta de la figura 23.5, demuestre que el punto central de los datos ($v = 130$ m/min, $T = 12$ min) es consistente con la ecuación de Taylor determinada en el ejemplo 23.1.
- 23.11. En las gráficas de desgaste de la herramienta de la figura 23.4, se indica la falla completa de la herramienta de corte con una X a final de cada curva de desgaste. Usando el criterio de falla completa como criterio de vida de la herramienta en lugar de 0.050 mm de desgaste de flanco o superficie de incidencia, los datos resultantes son: 1) $v = 160$ m/min, $T = 5.75$ min; 2) $v = 130$ m/min, $T = 14.25$ min; y 3) $v = 100$ m/min, $T = 47$ min. Determine los parámetros n y C para estos datos en la ecuación de vida de la herramienta de Taylor.
- 23.12. La ecuación de Taylor para un cierto conjunto de condiciones de prueba es $vT^{0.25} = 1\,000$, donde se usan las unidades acostumbradas en Estados Unidos: ft/min para v y minutos para T . Convierta esta ecuación a la ecuación de Taylor equivalente en unidades del Sistema Internacional, donde v esté en m/s y T esté en segundos. Valide la ecuación métrica usando una vida de la herramienta de 16 min. Esto es, calcule la velocidad de corte correspondiente en ft/min y m/s usando las dos ecuaciones.
- 23.13. Se ejecuta una serie de pruebas de torneado para determinar los parámetros n , m y K en la versión aumentada de la ecuación de Taylor (ecuación 23.4). Los siguientes datos se obtuvieron durante la prueba: 1) velocidad de corte de 1.9 m/s, avance de 0.22 mm/rev, vida de la herramienta de 10 min; 2) velocidad de corte de 1.3 m/s, avance de 0.22 mm/rev, vida de la herramienta de 47 min; y 3) velocidad de corte de 1.9 m/s, avance de 0.32 mm/rev, vida de la herramienta de 8 min. a) Determine n , m y K . b) Utilizando su ecuación, calcule la vida de herramienta cuando la velocidad de corte es de 1.5 m/s y el avance es de 0.28 mm/rev.
- 23.14. La ecuación (23.4) en el texto relaciona la vida de herramienta con la velocidad y el avance. En una serie de pruebas de torneado que se condujeron con el fin de determinar los parámetros n , m y K , se recolectaron los datos siguientes: 1) $v = 400$ ft/min, $f = 0.010$ in/rev, $T = 10$ min; 2) $v = 300$ ft/min, $f = 0.010$ in/rev, $T = 35$ min; y 3) $v = 400$ ft/min, $f = 0.015$ in/rev, $T = 8$ min. Determine n , m y K . ¿Cuál es la interpretación física de la constante K ?
- 23.15. En la tabla 23.2, los valores de n y C se basan en una velocidad de avance de 0.25 mm/rev y una profundidad de corte de 2.5 mm. Determine cuántos milímetros cúbicos de acero podrían moverse por cada uno de los siguientes materiales de herramienta, si se requiriera una vida de la herramienta de 10 min en cada caso: a) acero simple al carbono, b) acero de alta velocidad, c) carburo cementado, d) cerámico.
- 23.16. Se ejecuta una operación de taladrado en la cual se taladran agujeros de 0.5 in de diámetro a través de placas de fundición de hierro que tienen 1.0 in de grueso. Se ha taladrado agujeros de muestra para determinar la vida de la herramienta a dos velocidades de corte. A 80 ft/min superficiales la herramienta duró exactamente 50 agujeros. A 120 ft/min superficiales la herramienta duró exactamente 5 agujeros. La velocidad de avance del taladro fue de 0.003 in/rev (ignore los efectos de la entrada y salida de la broca del agujero). Considere la profundidad del corte de exactamente 1.0 in, el cual corresponde al espesor de la placa. Determine los valores de n y C en la ecuación de Taylor con estos datos de muestra, en la cual la velocidad de corte v se exprese en ft/min y la vida de la herramienta T se exprese en minutos.
- 23.17. Se va a torneear el diámetro exterior de un cilindro fabricado de una aleación de titanio. El diámetro inicial es de 400 mm y la longitud de 1 100 mm. El avance es de 0.35 mm/rev y la profundidad de corte es de 2.5 mm. El corte se realizará con una herramienta de corte de carburo cementado cuyos parámetros de vida de herramienta de Taylor son: $n = 0.24$ y $C = 450$. Las unidades para la ecuación de Taylor son minutos para la vida de herramienta y m/min para la velocidad de corte. Calcule la velocidad de corte que permitirá que la vida de la herramienta sea exactamente igual al tiempo de corte para esta pieza.
- 23.18. Se va a torneear el diámetro exterior de un rodillo de una fresadora de rodillo de acero. En el pase final, el diámetro inicial es de 26.25 in y la longitud es de 48.0 in. Las condiciones de corte serán: avance de 0.0125 in/rev y la profundidad de corte de 0.125 in. Se utilizará una herramienta de corte de carburo cementado y los parámetros de la ecuación de vida de la herramienta de Taylor para esta configuración son: $n = 0.25$ y $C = 1\,300$. Las unidades de la ecuación de Taylor están en min para la vida de la herramienta y en ft/min para la velocidad de corte. Es recomendable que se opere a una velocidad de corte tal que la herramienta no necesite cambiarse durante el corte. Determine la velocidad de corte que hará que la vida de la herramienta sea igual al tiempo requerido para completar la operación de torneado.

Aplicaciones de las herramientas

- 23.19. Especifique el grado C o grados (C1 a C8 en la tabla 23.5) de ANSI del carburo cementado para cada una de las situaciones siguientes: a) torneado del diámetro de una flecha de

acero al alto carbono de 4.2 in a 3.5 in. b) fabricación de un pase final de fresado frontal utilizando una profundidad ligera de corte y un avance en una pieza de titanio. c) perforado

de los cilindros de una aleación de acero de un monoblock del motor de un automóvil antes del afilado y *d*) corte de las estrías a la entrada y a la salida de una válvula grande de latón.

- 23.20. Un cierto taller de maquinado utiliza cuatro grados de carburo cementado en sus operaciones. La composición química de estos grados son los siguientes: el grado 1 contiene 95% de WC y 5% de Co; el grado 2 contiene 82% de WC, 4% de Co y 14% de TiC; el grado 3 contiene 80% de WC, 10% de Co y 10% de TiC; y el grado 4 contiene 89% de WC y 11% de Co. *a*) ¿Qué grado se debe utilizar para el torneado final del acero no endurecido? *b*) ¿Qué grado deberá utilizarse para el fresado burdo del aluminio? *c*) ¿Qué grado deberá utilizarse para el torneado final del latón? *d*) ¿Cuál de los grados listados podría ser el adecuado para el maquinado de hierro colado? En cada caso, explique su recomendación.
- 23.21. Haga una lista del grupo ISO R513-1975(E) (la letra y el color están en la tabla 23.6) y diga si el número estaría hacia la parte más alta o más baja de los rangos para cada una de

las situaciones siguientes: *a*) fresado de la superficie de una junta de la cabeza de un cilindro de aluminio de un automóvil (la cabeza del cilindro tiene un agujero en cada cilindro y debe ser totalmente plano y parejo para coincidir con el bloque), *b*) el torneado burdo de una flecha de acero endurecido, *c*) fresado de un compuesto polimérico de fibra reforzada que requiera un acabado muy preciso y *d*) el fresado de una forma burda en un cubo hecho de acero antes de ser endurecido.

- 23.22. Una operación de torneado se lleva a cabo en una flecha de acero con un diámetro de 5.0 in y una longitud de 32 in. Una ranura o camino se ha fresado a través de toda su longitud. La operación de torneado reduce el diámetro de la flecha. Para cada uno de los materiales para herramienta siguientes, indique si es un candidato idóneo para utilizarse en la operación: *a*) acero simple al carbono, *b*) acero a alta velocidad, *c*) carburo cementado, *d*) cerámico y *e*) diamante policristalino sinterizado. Para cada material que no sea un buen candidato, proporcione una razón por la cual no lo es.

Fluidos para corte

- 23.23. En una operación de fresado sin uso de refrigerante, se utiliza una velocidad de corte de 500 ft/min. Las condiciones de corte actuales (secas) proporcionan los parámetros de la ecuación de vida de herramienta de Taylor de $n = 0.25$ y $C = 1\,300$ (ft/min). Cuando se utiliza un refrigerante en la operación, la velocidad de corte puede aumentar 20% y aún así conservar la misma vida de herramienta. Suponiendo que n no varía con la adición de refrigerante, ¿cuál es el cambio que resulta en el valor de C ?
- 23.24. En una operación de torneado que utiliza herramienta de acero de alta velocidad, la velocidad de corte es de 110 m/min. La ecuación de vida de herramienta de Taylor tiene como parámetros n de 0.140 y C de 150 (m/min) cuando la operación se hace en seco. Cuando se utiliza un refrigerante en la operación, el valor de C aumenta en 15%. Determine el aumento porcentual en la vida de herramienta que resulta si la velocidad de corte se mantiene a un valor de 110 m/min.
- 23.25. Una operación de producción de torneado en una pieza de trabajo de acero normalmente opera a una velocidad de corte de 125 ft/min utilizando herramientas de acero de alta

velocidad sin ningún fluido de corte. Los valores de n y C en la ecuación de Taylor los proporciona la tabla 23.2 del libro. Se ha observado que el uso de un fluido de corte tipo refrigerante hará que aumente la velocidad en 25 ft/min sin que esto tenga algún efecto en la vida de la herramienta. Si se puede suponer que el efecto del fluido de corte es simplemente un aumento de la constante C en 25, ¿cuál sería el aumento en la vida de la herramienta si la velocidad de corte original de 125 ft/min se utilizara en esta operación?

- 23.26. Se está usando un barreno espiral de acero de alta velocidad de 6.0 mm en una operación de taladrado sobre acero blando. El operador aplica un aceite para corte por medio de una brocha que lubrica la broca antes de cada agujero. Las condiciones de corte son velocidad = 25 m/min, avance = 0.10 mm/rev y profundidad de agujero = 40 mm. El encargado menciona que la “velocidad y el avance están de acuerdo con el manual” para este material de trabajo. Sin embargo, dice: “la viruta se aglomera en las estrías ocasionando calor por fricción y la broca falla prematuramente debido al sobrecalentamiento”. ¿Cuál es el problema? ¿Qué recomendaría usted para solucionarlo?

24

CONSIDERACIONES ECONÓMICAS Y PARA EL DISEÑO DEL PRODUCTO EN MAQUINADO

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 24.1 Maquinabilidad
- 24.2 Tolerancia y acabado superficial
 - 24.2.1 Tolerancias en maquinado
 - 24.2.2 Acabado superficial en maquinado
- 24.3 Selección de las condiciones de corte
 - 24.3.1 Selección del avance y de la profundidad de corte
 - 24.3.2 Optimización de la velocidad de corte
- 24.4 Consideraciones para el diseño del producto en maquinado

En este capítulo concluimos la cobertura de la tecnología tradicional de maquinado mediante el análisis de varios temas que aún no se abordan. El primer tema es la maquinabilidad, que se relaciona con las propiedades de los materiales de trabajo usados en el maquinado y cómo afectan estas propiedades al desempeño del maquinado. El segundo tema tiene que ver con las tolerancias y los acabados superficiales (capítulo 5) que pueden esperarse en los procesos de maquinado. En tercer lugar, se considera cómo seleccionar las condiciones de corte (velocidad, avance y profundidad de corte) en una operación de maquinado. Esta selección determina en gran medida el éxito económico de una operación dada. Por último, se proporcionan algunas directrices para los diseñadores de producto que deben tomarse en consideración al diseñar piezas que se producirán por medio de maquinado.

24.1 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 a menudo en el término “maquinabilidad”. Con **maquinabilidad** se denota la facilidad relativa con la que puede maquinarse un material (por lo general un metal) usando las herramientas y las condiciones de corte adecuadas.

Para evaluar la maquinabilidad se usan varios criterios; los más importantes son: 1) vida de la herramienta, 2) fuerzas y potencia, 3) acabado superficial y 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 sólo del material. El tipo de operación de maquinado, el trabajo de herramientas y las condiciones de corte son también factores importantes. Además, el criterio de maquinabilidad es una fuente de variación. Un material puede prolongar la vida de la herramienta mientras que otro puede proporcionar un mejor acabado superficial. Todos estos factores hacen difícil la evaluación de la maquinabilidad.

El ensayo de la maquinabilidad implica por lo general una comparación de materiales de trabajo. El desempeño en el maquinado de un material de prueba se mide en relación con el de un material base (estándar). Las medidas posibles de desempeño en la prueba 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 y 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 usa como estándar se le da un índice de maquinabilidad de 1.00. A menudo se usa el acero B1112 como material base en comparaciones de maquinabilidad. Los materiales más fáciles de maquinar que la base tienen índices mayores a 1.00 y los materiales que son más difíciles de maquinar tienen índices menores de 1.00. Los índices de maquinabilidad se expresan con frecuencia como porcentajes en lugar de números índices. En el siguiente ejemplo se ilustra cómo puede determinarse un índice de maquinabilidad usando un ensayo de la vida de la herramienta como base de comparación.

EJEMPLO 24.1 **Ensayo de** **maquinabilidad**

Se realiza una serie de pruebas para la vida de una herramienta en dos materiales de trabajo bajo condiciones idénticas de corte, donde se varía solamente la velocidad en el procedimiento de ensayo. El primer material, definido como material base, proporciona una ecuación de Taylor para la vida de la herramienta, $vT^{0.28} = 350$ y el otro material (material de prueba) tiene la ecuación de Taylor: $vT^{0.27} = 440$, donde la velocidad está en m/minutos y la vida de la herramienta se da en minutos. Determine el índice de maquinabilidad del material de prueba usando la velocidad de corte que proporciona una vida de la herramienta de 60 minutos como base de comparación. Esta velocidad se denota por v_{60} .

Solución: El material base tiene un índice de maquinabilidad = 1.0. Su valor v_{60} puede determinarse por medio de la ecuación de la vida de la herramienta de Taylor como sigue:

$$v_{60} = (350/60^{0.28}) = 111 \text{ m/minuto}$$

La velocidad de corte de la vida de la herramienta de 60 minutos para el material de prueba se determina en forma similar:

$$v_{60} = (440/60^{0.27}) = 146 \text{ m/minuto}$$

Por consiguiente, el índice de maquinabilidad puede calcularse como

$$\text{IM (para el material de prueba)} = \frac{146}{111} = 1.31 \text{ (o 131\%)} \quad \blacksquare$$

Muchos factores de materiales de trabajo 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 en lo que 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. Por supuesto, las resistencias a la cortante y a la tensión están correlacionadas. Al aumentar la resistencia del material, se incrementan las fuerzas de corte, la energía específica y la temperatura de corte, lo que hace 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 virutas y produce un deficiente acabado y problemas con la eliminación de las virutas. A menudo se usa el estirado en frío de las barras de bajo carbono para incrementar su dureza superficial y propiciar el rompimiento de las virutas 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 carbono tiene un efecto significativo sobre las propiedades del acero. Al incrementarse el carbono, 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. El manganeso y el níquel añaden resistencia y tenacidad al acero, los cuales reducen la maquinabilidad. Se puede 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 lo tanto, reducen las fuerzas, la temperatura y la formación de acumulación en el filo. 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**.

Existen relaciones similares para otros materiales de trabajo. La tabla 24.1 proporciona una lista de metales seleccionados junto con sus índices aproximados de maquinabilidad. Estos índices pretenden resumir el desempeño de los materiales en el maquinado.

TABLA 24.1 Valores aproximados del número de dureza Brinell e índices de maquinabilidad típicos para materiales de trabajo seleccionados.

Material de trabajo	Dureza Brinell	Índice de maquinabilidad ^a	Material de trabajo	Dureza Brinell	Índice de maquinabilidad ^a
Acero base: B1112	180-220	1.00	Acero de herramienta (no endurecido)	200-250	0.30
Acero al bajo carbono: C1008, C1010, C1015	130-170	0.50	Hierro colado		
			Suave	60	0.70
Acero al medio carbono: C1020, C1025, C1030	140-210	0.65	Dureza media	200	0.55
			Duro	230	0.40
Acero al alto carbono: C1040, C1045, C1050	180-230	0.55	Superalaleaciones		
			Inconel	240-260	0.30
Aceros aleados ^b			Inconel X	350-370	0.15
1320, 1330, 3130, 3140	170-230	0.55	Waspalloy	250-280	0.12
4130	180-200	0.65	Titanio		
4140	190-210	0.55	Puro	160	0.30
4340	200-230	0.45	Aleaciones	220-280	0.20
4340 (fundición)	250-300	0.25	Aluminio		
6120, 6130, 6140	180-230	0.50	2-S, 11-S, 17-S	suave	5.00 ^c
8620, 8630	190-200	0.60	Aleaciones de aluminio (suaves)	suave	2.00 ^d
B1113	170-220	1.35	Aleaciones de aluminio (duras)	duro	1.25 ^d
Aceros de libre maquinado	160-220	1.50	Cobre	suave	0.60
Acero inoxidable			Latón	suave	2.00 ^d
301, 302	170-190	0.50	Bronce	suave	0.65 ^d
304	160-170	0.40			
316, 317	190-200	0.35			
403	190-210	0.55			
416	190-210	0.90			

Los valores son promedios estimados basados en [1], [3], [4], [7] y otras fuentes. Los índices representan velocidades relativas de corte para una determinada vida de la herramienta (véase el ejemplo 24.1).

^aLos índices de maquinabilidad se expresan con frecuencia en porcentaje (número índice $\times$ 100%).

^bEsta lista de aceros aleados no es muy completa. Se ha tratado de incluir algunas de las aleaciones más comunes e indicar el rango de índices de maquinabilidad entre estos aceros.

^cLa maquinabilidad del aluminio varía ampliamente. Se expresa aquí como IM = 5.00, pero el rango probablemente va desde 3.00 hasta 10.00 o más.

^dLas aleaciones de aluminio, los bronce y los latones varían también significativamente en el rendimiento del maquinado. Diferentes grados tienen diferentes índices de maquinabilidad. En cada caso, se ha tratado de reducir la variación a un solo valor promedio para indicar el desempeño relativo con otros materiales de trabajo.

24.2 TOLERANCIAS Y ACABADO SUPERFICIAL

Las operaciones de maquinado se usan para producir piezas con formas definidas para las tolerancias y los acabados superficiales que especifica el diseñador del producto. En esta sección se examinarán estos aspectos de las tolerancias y los acabados superficiales en maquinado. En la tabla 24.2 se enlistan las tolerancias típicas y los acabados superficiales que pueden obtenerse en las diferentes operaciones de maquinado.

24.2.1 Tolerancias en maquinado

En cualquier proceso de manufactura existe variabilidad y las tolerancias se usan para establecer límites permisibles de esa variación (sección 5.1.1). Cuando las tolerancias son restringidas, a menudo se selecciona el maquinado, puesto que las operaciones de maquinado proporcionan una alta precisión respecto a otros procesos de formado. En la tabla 24.2 se indican las tolerancias comunes que pueden lograrse con la mayoría de los procesos de maquinado examinados en el capítulo 22. Es necesario mencionar que los valores en esta tabla representan condiciones ideales, aunque son fácilmente alcanzables en una fábrica moderna. Si la máquina herramienta es antigua o está gastada, la variabilidad en los procesos será más grande que la ideal y será difícil mantener estas tolerancias. Por otro lado, las nuevas máquinas herramienta pueden lograr tolerancias más estrechas que las enlistadas.

En general, las tolerancias más estrechas significan costos más altos. Por ejemplo, si el diseñador de producto especifica una tolerancia de ± 0.10 mm para el diámetro de un agujero de 6.0 mm, esta tolerancia podría lograrse por una operación de perforado, de acuerdo con la tabla 24.2. Sin embargo, si el diseñador especifica una tolerancia de ± 0.025 mm, entonces se necesitaría una operación adicional de rimado para satisfacer la precisión en este requerimiento. La relación general entre tolerancia y costo de manufactura se describe en la figura 44.1.

Con lo anterior no se sugiere que las tolerancias más holgadas sean siempre buenas. Con frecuencia sucede que las tolerancias más estrechas y la variabilidad más baja en el maquinado de componentes individuales conducen a menos problemas de ensamblado, durante la prueba final del producto, el uso en campo y en la aceptación del cliente. Aunque estos costos no son siempre tan fáciles de cuantificar como los costos directos de manufactura, de cualquier forma pueden ser significativos. Las tolerancias más estrechas

TABLA 24.2 Valores de tolerancias típicas y rugosidades superficiales (promedio aritmético) que pueden lograrse en operaciones de maquinado

Capacidad de tolerancia -Típica				Rugosidad superficial AA-Típica		Capacidad de tolerancia -Típica				Rugosidad superficial AA-Típica			
Operación de maquinado		mm	in	μm	μ-in	Operación de maquinado		mm	in	μm	μ-in		
Torneado, barrenado					0.8	32	Rimado					0.4	16
Diámetro D < 25 mm		± 0.025	± 0.001			Diámetro D < 12 mm		± 0.025	± 0.001				
25 mm < D < 50 mm		± 0.05	± 0.002			12 mm < D < 25 mm		± 0.05	± 0.002				
Diámetro D > 50 mm		± 0.075	± 0.003			Diámetro D > 25 mm		± 0.075	± 0.003				
Perforado*					0.8	32	Fresado					0.4	16
Diámetro D < 2.5 mm		± 0.05	± 0.002			Periférico		± 0.025	± 0.001				
2.5 mm < D < 6 mm		± 0.075	± 0.003			De frente		± 0.025	± 0.001				
6 mm < D < 12 mm		± 0.10	± 0.004			Terminal		± 0.05	± 0.002				
12 mm < D < 25 mm		± 0.125	± 0.005			Perfilado, ranurado		± 0.025	± 0.001	1.6	63		
Diámetro D > 25 mm		± 0.20	± 0.008			Cepillado		± 0.075	± 0.003	1.6	63		
Escariado		± 0.025	± 0.001	0.2	8	Aserrado		± 0.50	± 0.02	6.0	250		

*Las tolerancias típicas en perforado se expresan típicamente como tolerancias sesgadas bilaterales (por ejemplo $+0.010/-0.002$). Los valores en esta tabla se expresan como la tolerancia bilateral más cercana (por ejemplo, ± 0.006).

Recopiladas de diferentes fuentes, las cuales incluyen [4], [6], [7], [8], [12] y [16]

que obligan al fabricante a lograr mejor control sobre sus procesos de manufactura pueden conducir a menores costos totales de operación para la compañía en el largo plazo.

24.2.2 Acabado superficial en maquinado

Con frecuencia, el maquinado es el proceso de manufactura que determina la geometría final y las dimensiones de la pieza, así como la textura de la superficie (sección 5.2.2). La tabla 24.2 enlista las rugosidades superficiales típicas que pueden alcanzarse en las operaciones de maquinado. Estos acabados deben alcanzarse con facilidad mediante las máquinas herramienta modernas en buenas condiciones de mantenimiento.

A continuación se analiza cómo determinar los acabados superficiales en una operación de maquinado. La rugosidad de una superficie maquinada depende de muchos factores que pueden agruparse de la siguiente manera: 1) factores geométricos, 2) factores de material de trabajo y 3) factores de vibración y de la máquina herramienta. Mediante el análisis del acabado superficial que se realiza en este capítulo, se estudian estos factores y sus efectos.

Factores geométricos Estos factores determinan la geometría de la superficie en una pieza maquinada. Éstos incluyen: 1) el tipo de operación de maquinado; 2) la geometría de la herramienta de corte, la más importante es el radio de la nariz; y 3) el avance. La característica de la superficie que resulta de estos factores es la rugosidad superficial “ideal” o “teórica” que se obtendría en ausencia de los factores del material de trabajo, de la vibración y de la máquina herramienta.

El tipo de operación se refiere al proceso de maquinado que se usa para generar la superficie. Por ejemplo, el fresado periférico, el fresado de frente y el perfilado, todos producen superficies planas; sin embargo, la geometría de la superficie es diferente para toda operación debido a las diferencias en la forma de la herramienta y en la manera en que la herramienta interactúa con la superficie. En la figura 5.4 puede obtenerse una idea de las diferencias, al observar diferentes orientaciones posibles de una superficie.

La geometría de la herramienta y el avance se combinan para formar la geometría de la superficie. En la geometría de la herramienta, el factor importante es la forma de la punta de la herramienta. Los efectos pueden verse para una herramienta de punta sencilla en la figura 24.1. Con el mismo avance, un mayor radio de nariz causa marcas de avance menos pronunciadas, lo que produce un mejor acabado. Si se comparan dos avances con el mismo radio de la nariz, el avance más grande aumenta la separación entre las marcas de avance y conduce a un incremento en el valor de la rugosidad superficial ideal. Si la velocidad de avance es lo suficientemente grande y el radio de la nariz es lo suficientemente pequeño, de manera que el filo de corte frontal participe en la creación de la nueva superficie, entonces el ángulo del filo de corte frontal (AFCF) afectará la geometría de la superficie. En este caso, un mayor AFCF producirá un valor de la rugosidad superficial más alto. En teoría, un AFCF igual a cero podría producir una superficie perfectamente suave; sin embargo, las imperfecciones de la herramienta, del material de trabajo y del proceso de maquinado impiden alcanzar un acabado ideal como éste.

Los efectos del radio de la nariz y del avance pueden combinarse en una ecuación para predecir la media aritmética ideal de la rugosidad de una superficie producida por una herramienta de punta sencilla. La ecuación se aplica a operaciones como las de torneado, perfilado y cepillado:

$$R_i = \frac{f^2}{32NR} \quad (24.1)$$

donde R_i = media aritmética teórica de la rugosidad superficial, mm (in); f = avance, mm (in) y NR = radio de la nariz en la punta de la herramienta, mm (in). La ecuación supone que el radio de la nariz no es cero y que el avance y el radio de la nariz serán los factores principales que determinen la geometría de la superficie. Los valores para R_i se dan en unidades de mm (in), los cuales pueden convertirse a μm ($\mu\text{-in}$).

La ecuación (24.1) puede usarse para estimar la rugosidad superficial ideal en el fresado frontal con herramienta de insertos, donde f representa la carga de viruta (avance por

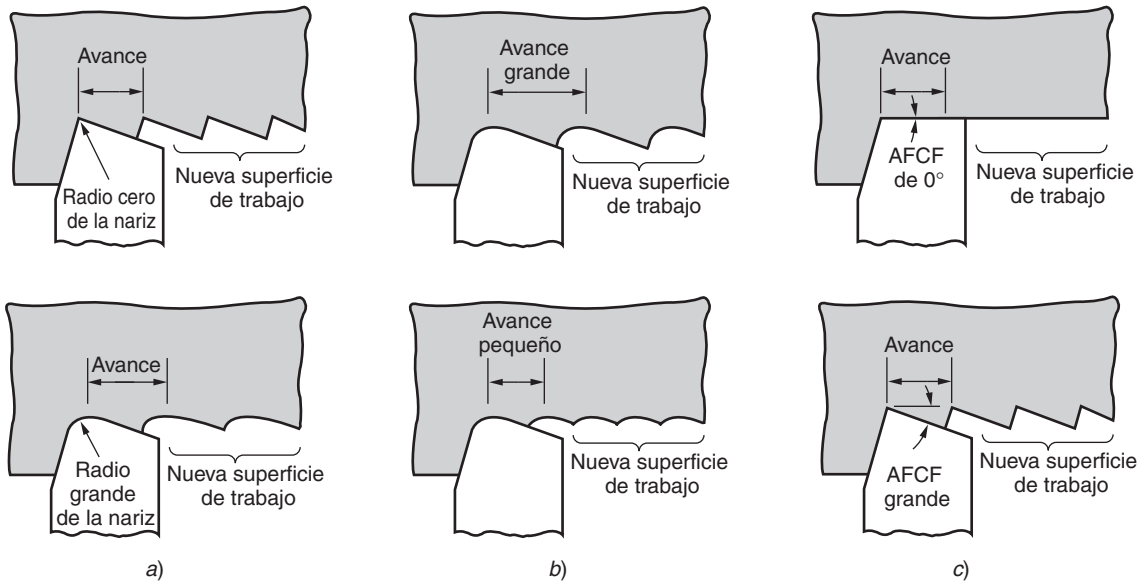


FIGURA 24.1 Efecto de los factores geométricos en la determinación del acabado teórico sobre una superficie de trabajo para herramientas de punta sencilla: a) efecto del radio de la nariz, b) efecto del avance y c) efecto del ángulo del filo de corte frontal (AFCF).

diente). Sin embargo, debe notarse que las puntas traseras y delanteras de los filos de rotación de la fresa producen marcas de avance sobre la superficie de trabajo, lo cual complica la geometría de la superficie.

En el fresado de placas, donde se utilizan los filos de corte recto de la fresa para generar la geometría superficial, puede usarse la siguiente relación para estimar el valor ideal de rugosidad superficial, con base en el análisis de Martellotti [13]:

$$R_i = \frac{0.125 f^2}{(D/2) \pm (f n_t / \pi)} \quad (24.2)$$

donde f = carga de viruta, mm/diente (in/diente); D = diámetro de la fresadora, mm (in); y n_t = número de dientes. El signo positivo en el denominador es para el fresado ascendente y el signo negativo es para el fresado descendente. En la ecuación (24.2), se supone que cada diente está igualmente espaciado alrededor del cortador, que todos los filos de corte son equidistantes al eje de rotación y que el árbol que soporta el cortador se conserva perfectamente recto durante la rotación (desviación cero). Estas suposiciones se dan muy pocas veces en la práctica. En consecuencia, los patrones ondulatorios se superponen frecuentemente en la superficie, donde las ondulaciones corresponden a la velocidad de rotación de corte.

Las relaciones anteriores para el acabado de la superficie ideal suponen una herramienta de corte afilada. Al desgastarse la herramienta, cambia la forma del corte y esto se refleja en la geometría de la superficie de trabajo. El efecto no se nota para desgastes ligeros. Sin embargo, cuando el desgaste de la herramienta se vuelve significativo, en especial el desgaste del radio de la nariz, la rugosidad de la superficie se deteriora en comparación con los valores ideales determinados por las ecuaciones anteriores.

Factores del material de trabajo En la mayoría de las operaciones de maquinado, no es posible alcanzar el acabado ideal de la superficie, debido a los factores que se relacionan con el material de trabajo y a su interacción con la herramienta. Los factores del material de trabajo que afectan el acabado son: 1) efectos de recrecimiento del filo (AEF), debido a que se forma una AEF que se desprende en algún momento, las partículas se depositan en la superficie de trabajo recién creada y ocasionan una textura rugosa parecida al del papel de lija; 2) daño a la superficie causado por la viruta enredada en el trabajo;

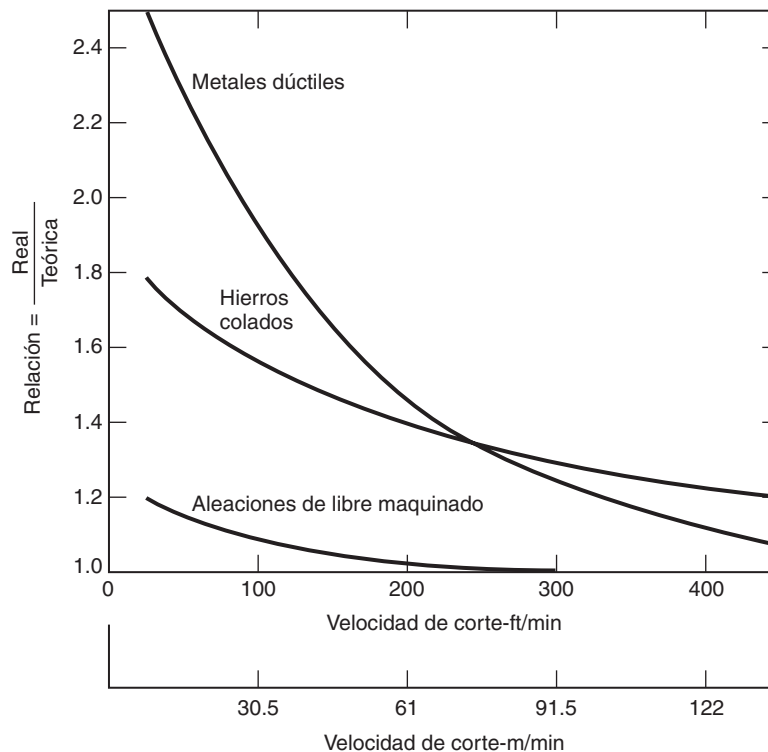


FIGURA 24.2 Relación entre la rugosidad superficial real y la rugosidad superficial ideal para varias clases de materiales. (Fuente: datos de General Electric Co. [15]).

3) desgarramiento de la superficie de trabajo durante la formación de viruta cuando se maquinan materiales dúctiles; 4) grietas en la superficie causadas por la formación discontinua de viruta cuando se maquinan materiales quebradizos y 5) fricción entre el flanco de la herramienta y la superficie de trabajo recién generada. Estos factores del material de trabajo son influidos por la velocidad de corte y el ángulo de inclinación, de manera que un aumento de la velocidad de corte o del ángulo de inclinación produce mejoras en el acabado superficial.

Los factores del material de trabajo son la causa de que el acabado real de la superficie sea en general más defectuoso que el ideal. Puede desarrollarse una relación empírica para convertir los valores de rugosidad ideal en un valor estimado de la rugosidad superficial real. Esta relación toma en cuenta la formación de AEF, el desgarre y otros factores. El valor de la relación depende de la velocidad de corte, así como el del material de trabajo. La figura 24.2 muestra la relación entre la rugosidad superficial real y la ideal como una función de la velocidad para varias clases de material de trabajo.

El procedimiento para predecir la rugosidad superficial real en una operación de maquinado es calcular el valor de la rugosidad superficial ideal y después multiplicar este valor por la relación entre la rugosidad real e ideal para la clase apropiada de material de trabajo. Esto puede resumirse como:

$$R_a = r_{ai} R_i \quad (24.3)$$

donde R_a = valor estimado de la rugosidad real; r_{ai} = relación del acabado superficial real e ideal de la figura 24.2 y R_i = valor real de la rugosidad de las ecuaciones previas (24.1) o (24.2).

EJEMPLO 24.2 Rugosidad superficial

Una operación de torneado se ejecuta sobre un acero C1008 (el cual es un material relativamente dúctil) usando una herramienta con un radio de nariz = 1.2 mm. Las condiciones de corte son velocidad = 100 m/min y avance = 0.25 mm/rev. Calcule un estimado de la rugosidad superficial para esta operación.

Solución: La rugosidad superficial ideal puede calcularse mediante la ecuación (24.1):

$$R_i = (0.25)^2 / (32 \times 1.2) = 0.0016 \text{ mm} = 1.6 \text{ }\mu\text{m}$$

De la gráfica en la figura 24.2, la relación entre la rugosidad real a la ideal para metales dúctiles en 100 m/min es aproximadamente de 1.25. Por consiguiente, la rugosidad superficial real para la operación sería (aproximadamente):

$$R_a = 1.25 \times 1.6 = 2.0 \text{ }\mu\text{m}$$

Factores de vibración y de la máquina herramienta Estos factores se relacionan con la máquina herramienta, con las herramientas utilizadas y con la instalación de la operación. Incluyen el traqueteo o vibración de la máquina o de la herramienta de corte, la deflexión de los montajes que es una resultante frecuente de la vibración y el juego entre los mecanismos de avance, particularmente en máquinas herramienta antiguas. Si estos factores de la máquina herramienta pueden minimizarse o eliminarse, la rugosidad superficial en el maquinado será determinada primordialmente por los factores geométricos y los factores del material de trabajo descritos antes.

El traqueteo o vibración en la operación de una máquina puede producir ondulaciones pronunciadas en la superficie de trabajo. El operador puede distinguir un ruido característico cuando ocurre el traqueteo. Los pasos posibles para reducir o eliminar la vibración incluyen 1) añadir rigidez o amortiguación a la instalación, 2) operar a velocidades que no causen fuerzas cíclicas cuya frecuencia se aproxime a la frecuencia natural del sistema de la máquina herramienta, 3) reducir los avances y las profundidades para disminuir las fuerzas de corte y 4) cambiar el diseño del cortador para reducir fuerzas. La geometría de la pieza de trabajo también puede tener influencia en el traqueteo. Las secciones transversales delgadas tienden a incrementar la posibilidad de traqueteo; por lo tanto, requieren soportes adicionales para mitigar esta condición.

24.3 SELECCIÓN DE LAS CONDICIONES DE CORTE

Un problema práctico en el maquinado es seleccionar las condiciones de corte apropiadas para una operación dada. Ésta es una de las tareas de planeación de procesos (sección 41.1). Para cada operación deben tomarse decisiones acerca de la máquina herramienta, de la(s) herramienta(s) de corte y de las condiciones de corte; estas decisiones deben considerar la maquinabilidad de la pieza de trabajo, la geometría de la pieza, el acabado superficial, etcétera.

24.3.1 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 (sección 23.4). 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 pieza.

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 con mayor facilidad que los aceros de alta velocidad. Estas herramientas se usan normalmente a velocidades de avance más 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 altos avances, típicamente de 0.05 a 1.25 mm/rev (0.020-0.050 in/rev) para torneado; las operaciones de acabado implican avances lentos, de manera típica, de 0.125 a 0.4 mm/rev (0.005-0.015 in/rev) para el torneado.
- **Restricciones sobre el avance en desbaste.** Si la operación es desbaste, ¿cuán alta puede fijarse la velocidad de avance? Para maximizar la velocidad de remoción de metal, el avance debe establecerse 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 por los caballos de fuerza.
- **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 y pueden usarse cálculos como los del ejemplo 24.2 para estimar el avance que producirá un acabado superficial deseado.

24.3.2 Optimización de la velocidad de corte

La selección de la velocidad de corte se basa en el mejor aprovechamiento de 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 obtenido fórmulas matemáticas para determinar la velocidad óptima de corte para una operación de maquinado, siempre y cuando se conozcan los diferentes tiempos y componentes de costo de la operación. La derivación original de las **ecuaciones económicas** del maquinado se acredita a W. Gilbert [10]. Las fórmulas permiten calcular las velocidades óptimas de corte para alcanzar dos objetivos: 1) máxima velocidad de producción o 2) mínimo costo por unidad. Ambos objetivos buscan lograr un balance entre la velocidad de remoción de material y la vida de la herramienta. Las fórmulas se basan en el conocimiento de la ecuación de Taylor para la vida de la herramienta usada en la operación. Por consiguiente, se han establecido el avance, la profundidad de corte y el material de trabajo. La derivación de la fórmula se ilustrará para una operación de torneado. Se puede desarrollar derivaciones similares para otros tipos de operaciones de maquinado [2].

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. La minimización del tiempo de corte por unidad es equivalente a la maximización de la velocidad de producción. Este objetivo es importante en casos donde las órdenes de producción deben terminarse tan rápido como sea posible.

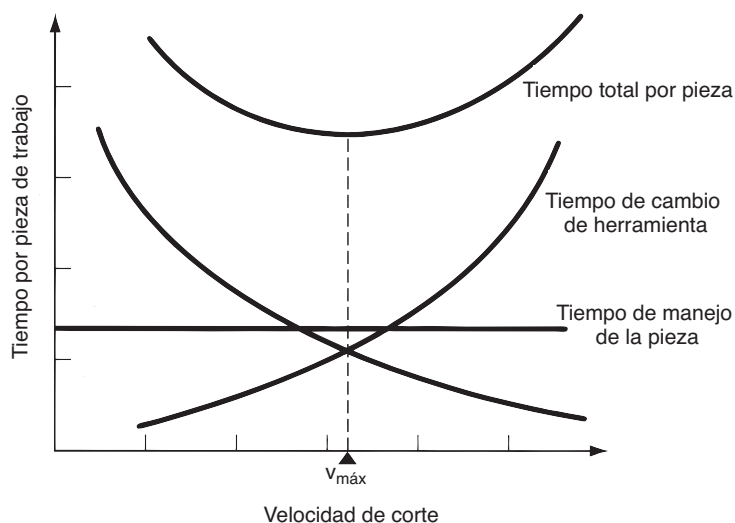
En el torneado existen tres etapas que contribuyen a la duración del ciclo de producción total para una pieza:

1. **Tiempo de manejo de la pieza T_h .** Es el tiempo que utiliza el operador para cargar la pieza en la máquina herramienta al principio del ciclo de producción y descargar la pieza 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 piezas que se produjeron durante la vida de la herramienta. Sea n_p = número de piezas cortadas durante la vida de la herramienta (número de piezas que se cortan con un filo de corte hasta que la herramienta se cambia); entonces, el tiempo de cambio de la herramienta por pieza = T_t / n_p .

La suma de estos tres elementos de tiempo proporciona el tiempo total por unidad de producto para el ciclo de operación:

$$T_c = T_h + T_m + \frac{T_t}{n_p} \quad (24.4)$$

FIGURA 24.3 Elementos de tiempo en un ciclo de maquinado representados en función de la velocidad de corte. El tiempo total del ciclo por pieza se minimiza en un cierto valor de la velocidad de corte. Ésta es la velocidad para la máxima velocidad de producción.



donde T_c = tiempo del ciclo de producción por pieza, minutos; los otros términos se han definido con anterioridad.

El tiempo del ciclo T_c es una función de la velocidad de corte. Al incrementarse la velocidad de corte, T_m disminuye y T/n_p aumenta; T_h no se ve afectada por la velocidad. Estas relaciones se muestran en la figura 24.3.

El tiempo total por cada pieza se minimiza a un cierto valor de velocidad de corte. Esta velocidad óptima puede identificarse con una reordenación matemática de la ecuación (24.4) como una función de la velocidad. Puede demostrarse que el tiempo de maquinado en una operación de torneado recto está dado por:

$$T_m = \frac{\pi DL}{vf} \quad (24.5)$$

donde T_m = tiempo de maquinado, minutos; D = diámetro de la pieza de trabajo, mm (in); L = longitud de la pieza de trabajo, mm (in); f = avance, mm/rev (in/rev); y v = velocidad de corte mm/min para dar consistencia a las unidades (in/min para dar consistencia a las unidades).

El número de piezas por herramienta n_p también es una función de la velocidad. Puede demostrarse que:

$$n_p = \frac{T}{T_m} \quad (24.6)$$

donde T = vida de la herramienta, min/herr; y T_m = tiempo de maquinado por pieza, min/pieza. Tanto T como T_m son funciones de la velocidad; por lo tanto, la relación es una función de la velocidad:

$$n_p = \frac{fC^{1/n}}{\pi DLv^{1/n-1}} \quad (24.7)$$

El efecto de esta relación es que T/n_p en la ecuación (24.4) se incrementa al aumentar la velocidad de corte. Al sustituir las ecuaciones (24.5) y (24.7) en la ecuación (24.4) para T_c , se tiene

$$T_c = T_h + \frac{\pi DL}{fv} + \frac{T_f(\pi DLv^{1/n-1})}{fC^{1/n}} \quad (24.8)$$

La duración del ciclo por pieza es mínimo en la velocidad de corte para la cual la derivada de la ecuación (24.8) es igual a cero:

$$\frac{dT_c}{dv} = 0$$

Al resolver esta ecuación se obtiene la velocidad de corte para la máxima velocidad de producción en la operación:

$$v_{\text{máx}} = \frac{C}{\left[\left(\frac{1}{n} - 1 \right) T_t \right]^n} \quad (24.9)$$

donde $v_{\text{máx}}$ se expresa en m/min (ft/min). La vida de la herramienta correspondiente a la máxima velocidad de producción es:

$$T_{\text{máx}} = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) T_t \quad (24.10)$$

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 para la operación. Cuando se derivan las ecuaciones para este caso, se inicia 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 pieza.** Es el costo del tiempo que utiliza el operador cargando y descargando la pieza. Sea C_o = tasa de costo (por ejemplo, \$/min) para el operador y la máquina. Entonces el costo de tiempo de manejo de la pieza = $C_o T_h$.
2. **Costo del tiempo de maquinado.** Es el costo del tiempo que toma la herramienta para hacer el maquinado. Si se usa 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 = $C_o T_t/n_p$.
4. **Costo de la herramienta.** Además del tiempo de cambio de la herramienta, ésta en sí tiene un costo que debe añadirse al costo total de operación. Este costo es relativo al filo de corte C_t , dividido entre el número de piezas maquinadas con ese filo de corte n_p . Entonces, el costo de la herramienta por unidad de producto está dado por C_t/n_p .

El costo de la herramienta requiere una explicación, puesto que es afectado por diferentes situaciones de la herramienta. Para insertos desechables (por ejemplo, insertos de carburo cementado), el costo de la herramienta se determina como

$$C_t = \frac{P_t}{n_e} \quad (24.11)$$

donde C_t = costo por filo cortante, \$/vida de la herramienta; P_t = precio del inserto, \$/inserto; y n_e = número de filos cortantes por inserto. Esto depende del tipo de inserto; por ejemplo, los insertos triangulares que pueden usarse sólo por un lado (inclinación positiva de la herramienta) rinden tres filos/inserto; si pueden usarse los dos lados del inserto (inclinación negativa de la herramienta) hay seis filos/inserto, y así sucesivamente.

Para herramientas que pueden reafilarse varias veces (por ejemplo, herramientas de acero de alta velocidad de vástago sólido o herramientas de carburo, soldado), el costo de la herramienta incluye el precio de compra más el costo de reafilado.

$$C_t = \frac{P_t}{n_g} + T_g C_g \quad (24.12)$$

donde C_t = costo por vida de la herramienta, \$/vida de la herramienta; P_t = precio de compra de la herramienta de vástago sólido o inserto soldado, \$/herramienta; n_g = número de vidas de la herramienta por herramienta, que es el número de veces que la herramienta puede reafilarse antes de que su desgaste sea tal que ya no pueda usarse (de 5 a 10 veces para herramientas de desbaste y de 10 a 20 veces para herramientas de acabado); T_g = tiempo para afilar o reafilar la herramienta, min/vida de la herramienta; y C_g = tasa de afilado, \$/min.

La suma de los cuatro componentes de costo proporciona el costo total por unidad de producto C_c para el ciclo de maquinado:

$$C_c = C_o T_h + C_o T_m + \frac{C_o T_t}{n_p} + \frac{C_t}{n_p} \quad (24.13)$$

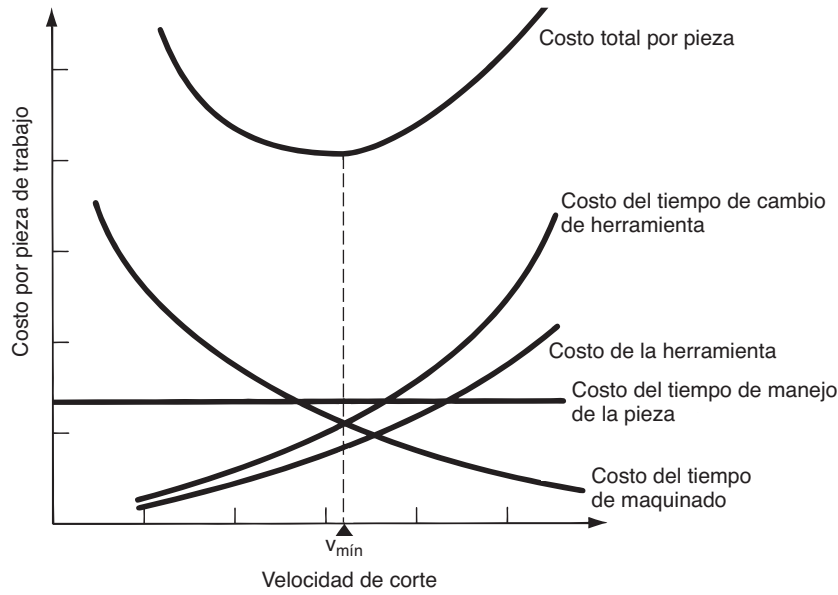


FIGURA 24.4
Componentes del costo en una operación de maquinado representados en función de la velocidad de corte. El costo total por pieza se minimiza en un cierto valor de la velocidad de corte. Ésta es la velocidad para el costo mínimo por pieza.

C_c es una función de la velocidad de corte, de igual manera que T_c es una función de v . Las relaciones para los términos individuales y el costo total como función de la velocidad de corte se muestran en la figura 24.4. La ecuación (24.13) puede describirse de manera distinta en términos de v y se obtiene:

$$C_c = C_o T_h + \frac{C_o \pi D L}{f v} + \frac{(C_o T_t + C_t)(\pi D L v^{1/n-1})}{f C^{1/n}} \quad (24.14)$$

La velocidad de corte que produce el mínimo costo por pieza para la operación puede determinarse si se toma la derivada de la ecuación (24.14) con respecto a v , se iguala a cero y se resuelve para $v_{\min}$:

$$v_{\min} = C \left(\frac{n}{1-n} \frac{C_o}{C_o T_t + C_t} \right)^n \quad (24.15)$$

La vida de la herramienta correspondiente está dada por:

$$T_{\min} = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(\frac{C_o T_t + C_t}{C_o} \right) \quad (24.16)$$

EJEMPLO 24.3 Determinación de velocidades de corte en la economía del maquinado

Supóngase que una operación de torneado se desempeña con una herramienta de acero de alta velocidad sobre acero suave, con parámetros para la vida de la herramienta de Taylor $n = 0.125$, $C = 70$ m/min (tabla 23.2). La pieza de trabajo tiene una longitud = 500 mm y un diámetro = 100 mm. El avance = 0.25 mm/rev. El tiempo de manejo por pieza = 5.0 min y el tiempo de cambio de herramienta = 2.0 min. El costo de la máquina y del operador = \$30.00/h y el costo de la herramienta = \$3 por filo de corte. Encuentre: a) la velocidad de corte para la velocidad de producción máxima y b) la velocidad de corte para el costo mínimo.

Solución: a) La velocidad de corte para máxima velocidad de producción está dada por la ecuación (24.9):

$$T_{\min} = 70 \left(\frac{0.125}{0.875} \cdot \frac{1}{2} \right)^{0.125} = 50 \text{ m/min}$$

al convertir $C_o = \$30/\text{h}$ a $\$0.5/\text{min}$, la velocidad de corte para el costo mínimo está dada por la ecuación 24.15.

$$v_{\max} = 70 \left(\frac{0.125}{0.875} \cdot \frac{0.5}{0.5(2) + 3.00} \right)^{0.125} = 42 \text{ m/min}$$

EJEMPLO 24.4 Velocidad de producción y costo en la economía del maquinado

Determine la velocidad de producción por hora y el costo por pieza para las dos velocidades de corte que se calcularon en el ejemplo 24.3. Se tienen los siguientes datos adicionales relativos al costo de la herramienta: precio del vástago de la herramienta de acero de alta velocidad = \$25.00, número de reafilados = 16, tiempo para reafilado = 7.0 minutos y costo hora de reafilado = \$30.00/h (\$0.50/min).

Solución: Primero se calcula el costo de herramienta, que se aplica a ambas velocidades de corte:

$$C_t = \frac{25.00}{16} + (7.0)(0.50) = \$5.06/\text{fillo de corte}$$

a) Para la velocidad de corte que da la producción máxima, $v_{\max} = 50 \text{ m/min}$, se calcula el tiempo de maquinado por pieza y la vida de la herramienta.

$$\text{Tiempo de maquinado } T_m = \frac{\pi(0.5)(0.1)}{(0.25)(10^{-3})(50)} = 12.57 \text{ min/pieza}$$

$$\text{Vida de la herramienta } T = \left(\frac{70}{50} \right)^8 = 14.76 \text{ min/fillo de corte}$$

A partir de esto se observa que el número de piezas por herramienta $n_p = 14.76/12.57 = 1.17$. Se utiliza $n_p = 1$. A partir de la ecuación (24.4), el tiempo del ciclo de producción promedio para la operación es

$$T_c = 5.0 + 12.57 + 2.0/1 = 19.57 \text{ min/pieza}$$

La velocidad de producción por hora correspondiente $R_p = 60/19.57 = 3.1 \text{ piezas/hora}$. De la ecuación (24.13), el costo promedio por pieza para la operación es

$$C_c = 0.5(5.0) + 0.5(12.57) + 0.5(2.0)/1 + 5.06/1 = \$14.85/\text{pieza}$$

b) Para la velocidad de corte que da el costo de producción mínimo por pieza, $v_{\min} = 42 \text{ m/min}$, el tiempo de maquinado por pieza y la vida de la herramienta se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo de maquinado } T_m = \frac{\pi(0.5)(0.1)}{(0.25)(10^{-3})(42)} = 14.96 \text{ min/pieza}$$

$$\text{Vida de la herramienta } T = \left(\frac{70}{42} \right)^8 = 59.54 \text{ min/fillo de corte}$$

El número de piezas por herramienta $n_p = 59.54/14.96 = 3.98$. → Se usa $n_p = 3$ para evitar la falla durante la operación. El tiempo del ciclo de producción promedio para la operación es

$$T_c = 5.0 + 14.96 + 2.0/3 = 20.63 \text{ min/pieza}$$

La velocidad de producción por hora correspondiente $R_p = 60/20.63 = 2.9 \text{ piezas/h}$. El costo promedio por pieza para la operación es

$$C_c = 0.5(5.0) + 0.5(14.96) + 0.5(2.0)/3 + 5.06/3 = \$12.00/\text{pieza}$$

Observe que la velocidad de producción es mayor para $v_{\max}$ y el costo por pieza es mínimo para $v_{\min}$.

Algunos comentarios sobre la economía del maquinado Pueden hacerse algunas observaciones prácticas relacionadas con las ecuaciones de la velocidad de corte óptimo. Primero, al aumentar los valores de C y n en la ecuación de la vida de la herramienta de Taylor, la velocidad óptima de corte aumenta según la ecuación (24.9) o (24.15). Las herramientas de carburos cementados o cerámicas deben usarse a velocidades que sean significativamente más altas que para las herramientas de acero de alta velocidad.

Segundo, al aumentar el tiempo o el costo de las herramientas (T_{tc} y C_p), las ecuaciones de la velocidad de corte producen valores más bajos. Las velocidades más bajas permiten una mayor durabilidad en las herramientas, y es un desperdicio cambiar las herramientas con demasiada frecuencia si el costo de las mismas o el tiempo para cambiarlas es alto. Un efecto importante del factor de costo es que los insertos desechables poseen generalmente una ventaja económica sustancial sobre las herramientas que pueden afilarse varias veces. Aunque el costo por inserto es significativo, el número de filos por inserto es lo suficientemente grande, y el tiempo requerido para cambiar el filo cortante es lo suficientemente bajo para que las herramientas desechables logren velocidades de producción más altas y costos por unidad de producto más bajos.

Tercero, $v_{m\acute{a}x}$ es siempre mayor que $v_{m\acute{i}n}$. El término C_t/n_p en la ecuación (24.13) tiene el efecto de empujar el valor de la velocidad óptima hacia la izquierda en la figura 24.4, lo que resulta en un valor más bajo que en la figura 24.3. En lugar de tomar el riesgo de cortar a una velocidad por encima de $v_{m\acute{a}x}$ o por debajo de $v_{m\acute{i}n}$, algunos talleres de maquinado se esfuerzan en operar en el intervalo entre $v_{m\acute{i}n}$ y $v_{m\acute{a}x}$, un intervalo algunas veces llamado “rango de alta eficiencia”.

Los procedimientos esquematizados para seleccionar los avances y velocidades en maquinado son difíciles de aplicar en la práctica. Resulta difícil determinar la mejor velocidad de avance, porque las relaciones entre el avance y el acabado superficial, la fuerza, la potencia y otras restricciones no están fácilmente disponibles para cada máquina herramienta. Se requiere experiencia, juicio y experimentación para seleccionar el avance adecuado. La velocidad de corte óptima es difícil de calcular, porque para conocer los parámetros de la ecuación de Taylor C y n , por lo general es necesario realizar un ensayo previo. Las pruebas de este tipo en un ambiente de producción son costosas.

24.4 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL PRODUCTO EN MAQUINADO

Ya se han considerado varios aspectos del diseño de productos durante el estudio de la tolerancia y el acabado superficial (sección 24.2). En esta sección se presentarán algunos lineamientos de diseño para maquinado recopilados de las fuentes [1], [4] y [16]:

- En lo posible, las piezas deben diseñarse para que no necesiten maquinado. Si esto no es posible, entonces debe minimizarse la magnitud del maquinado requerido en las piezas. En general, se logra un menor costo de producción mediante el uso de procesos de forma final como la fundición de precisión, el forjado en matriz cerrada o el moldeado (de plásticos); o procesos de forma casi acabada como el forjado con matrices de recalcado. Las razones que hacen necesario el maquinado incluyen las tolerancias estrechas, el buen acabado superficial y las características geométricas especiales como roscas, agujeros de precisión, secciones cilíndricas con alto grado de redondez y formas similares que no pueden lograrse por otros medios diferentes al maquinado.
- Las tolerancias deben especificarse para satisfacer los requerimientos funcionales, pero también deben considerarse las capacidades de los procesos. Véase la tabla 24.2 para capacidades de las tolerancias en maquinado. Las tolerancias excesivamente restringidas aumentan el costo y puede ser que no añadan valor a la pieza. Al hacerse más estrechas las tolerancias (más pequeñas), los costos del producto se incrementan generalmente debido a procesamientos adicionales, equipamiento, inspección, retrabajo y desperdicio (véase la figura 42.1).
- Debe especificarse el acabado superficial para cumplir con requerimientos funcionales o estéticos, pero los mejores acabados incrementan generalmente los costos de procesamiento y requieren operaciones adicionales como esmerilado o bruñido.

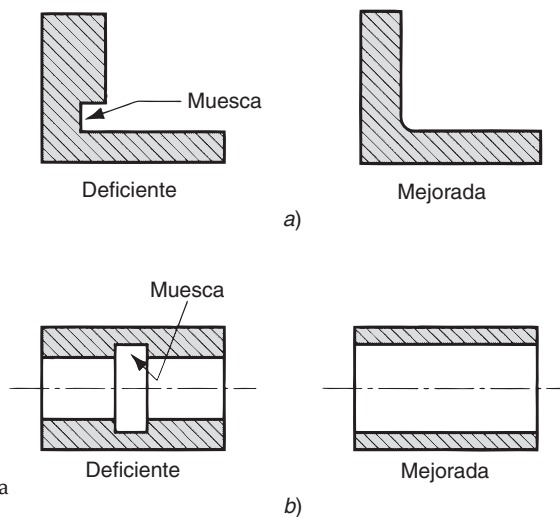
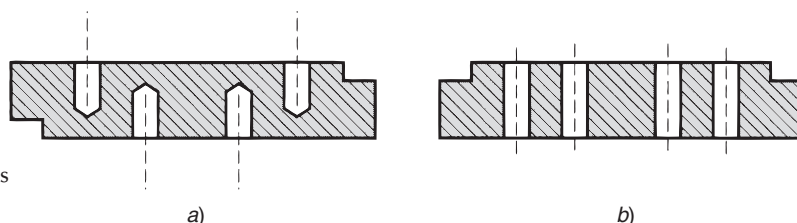


FIGURA 24.5
Dos piezas maquinadas con muescas: secciones transversales de a) una ménsula y b) una pieza giratoria. También se muestra cómo se mejora el diseño.

- Debe evitarse las formas maquinadas, como esquinas agudas, aristas y puntas, las cuales frecuentemente son difíciles de lograr por medio de maquinado. Las esquinas internas agudas requieren herramientas de corte puntiagudas que tienden a romperse durante el maquinado. Las esquinas y aristas agudas tienden a crear rebabas y son peligrosas al manejarse.
- Debe evitarse el barrenado de agujeros profundos. El barrenado de agujeros hondos requiere barras perforadoras largas. Las barras perforadoras deben ser rígidas y esto requiere frecuentemente el uso de materiales con alta rigidez, como carburos cementados, lo que resulta costoso.
- Las piezas maquinadas deben diseñarse de manera que se puedan producir a partir del material estándar disponible. Deben elegirse las dimensiones exteriores iguales o cercanas al tamaño estándar de los materiales para minimizar el maquinado; por ejemplo, piezas giratorias con diámetros exteriores iguales al diámetro estándar de las barras disponibles.
- Se deben diseñar las piezas que sean lo suficientemente rígidas para soportar las fuerzas de corte y de las mordazas de sujeción. Debe evitarse en lo posible el maquinado de piezas largas y delgadas, piezas planas grandes, piezas con paredes delgadas y formas similares.
- Debe evitarse las muescas, como las de la figura 24.5, porque frecuentemente requieren instalaciones adicionales, operaciones o herramientas especiales; también pueden conducir a las concentraciones de esfuerzos en el uso.
- Los diseñadores deben seleccionar materiales con buena maquinabilidad (sección 24.1). Como guía general, el índice de maquinabilidad de un material se correlaciona con la velocidad de corte y con la velocidad de producción disponibles. Por lo tanto, las piezas hechas con materiales de baja maquinabilidad son más costosas de producir. Las piezas que se endurecen por medio de tratamiento térmico deben acabarse mediante rectificado o esmerilado o maquinado, para lograr el tamaño y las tolerancias finales, generalmente con herramientas más costosas.

FIGURA 24.6 Dos piezas con formas similares de agujeros: a) agujeros que deben maquinarse desde los dos lados y requieren dos montajes y b) agujeros que pueden maquinarse desde un lado.



- Las piezas maquinadas deben diseñarse con formas que se puedan producir con un número mínimo de ajustes, si es posible con un solo ajuste. Por lo general, esto indica características geométricas que puedan formarse desde un solo lado de la pieza (véase la figura 24.6).
- Las piezas maquinadas deben diseñarse con formas que puedan lograrse con herramientas de corte estándar. Esto significa evitar tamaños inusuales de barrenos, roscas y características de formas extrañas que requieren herramientas con formas especiales. Además, resulta útil diseñar piezas que necesiten un número mínimo de cortes individuales en maquinado; esto permite frecuentemente completar la pieza en un solo ajuste de máquinas, como un centro de maquinado con capacidad limitada de almacenamiento de herramientas.

REFERENCIAS

- [1] Bakerjian, R. (ed.), *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol VI, *Design for Manufacturability*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1992.
- [2] Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, 2a. ed. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1989.
- [3] Boston, O. W., *Metal Processing*, 2a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1951.
- [4] Bralla, J. G. (ed.), *Design for Manufacturability Handbook*, 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.
- [5] Brierley, R. G. y Siekman, H. J., *Machining Principles and Cost Control*, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1964.
- [6] DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Kohser, R. A., *Materials and Processes in Manufacturing*, 9a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.
- [7] Drozda, T. J., y Wick, C. (eds.), *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol I. *Machining*. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1983.
- [8] Eary, D. F. y Johnson, G. E., *Process Engineering: for Manufacturing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1962.
- [9] Ewell, J. R., "Thermal Coefficients—A Proposed Machinability Index", *Technical Paper MR67-200*, Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1967.
- [10] Gilbert, W. W., "Economics of Machining". *Machining—Theory and Practice*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1950. pp. 465-485.
- [11] Groover, M. P., "A Survey on the Machinability of Metals". *Technical Paper MR76-269*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1976.
- [12] *Machining Data Handbook*, 3a. ed., vols. I y II. Metcut Research Associates, Inc., Cincinnati, Ohio, 1980.
- [13] Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process". *ASME Transactions*, vol. 63, noviembre de 1941, pp. 677-700.
- [14] Schaffer, G. H., "The Many Faces of Surface Texture". Special Report 801. *American Machinist & Automated Manufacturing*, Junio de 1988, pp. 61-68.
- [15] *Surface Finish*, Machining Development Service. Publicación A-5, General Electric Company, Schenectady, Nueva York (sin fecha).
- [16] Trucks, H. E. y Lewis, G., *Designing for Economical Production*, 2a. ed., Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1987.
- [17] Van Voast, J., *United States Air Force Machinability Report*, vol. 3, Curtiss-Wright Corporation, 1954.

PREGUNTAS DE REPASO

- 24.1 Defina maquinabilidad.
- 24.2 ¿Cuáles son los criterios por los que se valora comúnmente la maquinabilidad en operaciones de maquinado de producción?
- 24.3 Mencione algunas de las propiedades físicas o mecánicas importantes que afectan la maquinabilidad de un material de trabajo.
- 24.4 ¿Por qué los costos tienden a incrementarse cuando se requiere un mejor acabado superficial sobre una pieza maquinada?
- 24.5 ¿Cuáles son los factores básicos que afectan el acabado superficial en el maquinado?
- 24.6 ¿Cuáles son los parámetros que tienen mayor influencia en la determinación de la rugosidad ideal de superficie R_i en una operación de torneado?
- 24.7 Mencione algunos de los pasos que pueden tomarse para reducir o eliminar vibraciones en maquinado.

- 24.8 ¿Cuáles son los factores en que debe basarse la selección del avance en una operación de maquinado?
- 24.9 El costo unitario en una operación de maquinado es la suma de cuatro términos de costo. Los primeros tres términos son: 1) costo de cargar y descargar la pieza, 2) costo del tiempo en que la herramienta corta realmente el trabajo y 3) el costo de tiempo para cambiar la herramienta. ¿Cuál es el cuarto término?
- 24.10 ¿Cuál velocidad de corte es siempre menor para una operación de maquinado, dada la velocidad de corte para el costo mínimo o la velocidad de corte para la máxima velocidad de producción? ¿Por qué?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 14 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea la calificación se reduce un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

- 24.1. ¿Cuáles de los siguientes criterios se reconocen en forma general como indicativos de buena maquinabilidad (las cuatro mejores respuestas)? *a)* facilidad en la eliminación de la viruta, *b)* temperaturas de corte altas, *c)* requerimientos de potencia altos, *d)* valor alto de R_a , *e)* vida larga de la herramienta, *f)* fuerzas de corte bajas y *g)* ángulo del plano de corte igual a cero.
- 24.2. De los diferentes métodos para probar la maquinabilidad, ¿cuál de los siguientes es el más importante? *a)* fuerzas de corte, *b)* temperatura de corte, *c)* potencia consumida en la operación, *d)* rugosidad superficial, *e)* vida de la herramienta, *f)* desgaste de la herramienta.
- 24.3. ¿Un índice de maquinabilidad mayor que 1.0 indica que el material de trabajo *a)* es más fácil de maquinar que el metal base o *b)* más difícil de maquinar que el metal base, donde el metal base tiene un índice = 1.0?
- 24.4. En general, ¿cuál de los siguientes materiales tiene la maquinabilidad más alta? *a)* aluminio, *b)* hierro fundido, *c)* cobre, *d)* acero al bajo carbono, *e)* acero inoxidable, *f)* aleaciones de titanio o *g)* acero de herramienta no endurecido.
- 24.5. En general, ¿con cuál de las siguientes operaciones puede lograrse las tolerancias más estrechas? *a)* embrocado, *b)* perforado, *c)* fresado final, *d)* cepillado, *e)* aserrado.
- 24.6. Si se aumenta la velocidad de corte al maquinar un material de trabajo dúctil, ¿cuál será generalmente el efecto en el acabado superficial? *a)* degradar el acabado superficial, lo que significa un alto valor de R_a o *b)* mejorar el acabado superficial, lo que implica un valor bajo de R_a .
- 24.7. En general, ¿con cuál de las siguientes operaciones puede lograrse los mejores acabados superficiales (el valor más bajo de R_a)? *a)* embrocado, *b)* perforado, *c)* fresado final, *d)* cepillado, *e)* torneado.
- 24.8. ¿Cuál de los siguientes componentes de tiempo en el ciclo de maquinado se ve afectado por la velocidad de corte? (dos respuestas correctas): *a)* tiempo de carga y descarga de la pieza, *b)* tiempo de montaje de la máquina herramienta, *c)* tiempo en que la herramienta comienza a cortar y *d)* tiempo promedio de cambio de la herramienta por pieza.
- 24.9. ¿Cuál velocidad de corte es siempre menor para una operación de maquinado dada? *a)* la velocidad de corte para la máxima velocidad de producción o *b)* la velocidad de corte para el costo mínimo.
- 24.10 ¿Un costo de herramienta o un tiempo de cambio de herramienta altos tenderán a *a)* disminuir, *b)* no tener ningún efecto o *c)* aumentar la velocidad de corte para el costo mínimo?

PROBLEMAS

Maquinabilidad

- 24.1. Se necesita determinar el índice de maquinabilidad para un nuevo material de trabajo usando la velocidad de corte para una vida de la herramienta de 60 min como base de comparación. Del ensayo para el material base (acero B1112), resultaron los siguientes valores de los parámetros de la ecuación de Taylor: $n = 0.29$ y $C = 500$, donde la velocidad está en m/min y la vida de la herramienta es min. Para el nuevo material, los valores de los parámetros fueron $n = 0.21$ y $C = 400$. Estos resultados se obtuvieron usando herramientas de carburo cementado. *a)* Calcule el índice de maquinabilidad para el nuevo material. *b)* Suponga que el criterio de maquinabilidad fue la velocidad de corte para una vida de la herramienta de 10 minutos, en lugar del criterio presente. Calcule el índice de maquinabilidad para este caso. *c)* ¿Qué demuestran los resultados de los dos cálculos acerca de las dificultades en la medición de la maquinabilidad?
- 24.2. Una pequeña compañía usa una sierra de banda para cortar por completo una barra de metal de 2 in. Un alimentador de piezas introduce un nuevo material que se supone debe ser más maquinable y que proporciona propiedades mecánicas semejantes. La compañía no tiene acceso a dispositivos de medición sofisticados, pero sí cuenta con un cronómetro.

Se adquirió una muestra del nuevo material y se cortó tanto el material actual como el nuevo con las mismas especificaciones para la sierra de banda. En el proceso, se midió cuánto tiempo fue necesario para cortar cada uno de los materiales. Para cortar el material actual se ocupó un promedio de 2 minutos 20 segundos. Para cortar por completo el material nuevo, se utilizó un promedio de 2 minutos 6 segundos. a) Desarrolle un sistema de índices de maquinabilidad basado en el tiempo necesario para cortar por completo la barra de 2.0 in, usando el material actual como material base. b) Utilice dicho sistema para determinar el índice de maquinabilidad para el material nuevo.

- 24.3 Se necesita determinar el índice de maquinabilidad para un nuevo material de trabajo. Con el material base (B1112), los datos del ensayo resultaron en una ecuación de Taylor con parámetros $n = 0.29$ y $C = 490$. Para el material nuevo, los parámetros de Taylor fueron $n = 0.23$ y $C = 430$. Las unidades en ambos casos corresponden a: velocidad en m/min y vida de la herramienta en minutos. Estos resultados se obtuvieron usando herramientas de carburo cementado. a) Calcule un índice de maquinabilidad para el material

nuevo utilizando la velocidad de corte para una vida de la herramienta de 30 minutos como base de comparación. b) Si el criterio de maquinabilidad fuera la vida de la herramienta para una velocidad de corte de 150 m/min. ¿Cuál es el índice de maquinabilidad para el material nuevo?

- 24.4 Se han realizado ensayos para determinar la vida de la herramienta en el torneado sobre acero B1112 con herramientas de acero de alta velocidad, y los parámetros resultantes de la ecuación de Taylor son $n = 0.13$ y $C = 225$. El metal base es acero B1112 el cual tiene un índice de maquinabilidad = 1.00 (100%). El avance y la profundidad durante estos ensayos fueron avance = 0.010 in/rev y profundidad de corte = 0.100 in. Con base en esta información y los datos de maquinabilidad proporcionados en la tabla 24.1, determine la velocidad de corte que recomendaría usted para los siguientes materiales de trabajo, si la vida deseada para la herramienta en operación es de 30 minutos (suponga que se utiliza el mismo avance y profundidad de corte): a) acero al bajo carbono C1008 con dureza Brinell = 150, b) aleación de acero 4130 con dureza Brinell = 190, c) acero B1113 con dureza Brinell = 170.

Rugosidad superficial

- 24.5. En una operación de torneado sobre hierro fundido se utiliza una herramienta de corte con un radio de nariz = 1.5 mm, avance = 0.22 mm/rev y una velocidad = 1.8 m/s. Realice una estimación de la rugosidad superficial para este corte.
- 24.6. En una operación de torneado se utiliza una herramienta de corte con un radio de nariz de 2/64 in sobre un acero de maquinado libre con una velocidad de avance = 0.010 in/rev y una velocidad de corte = 300 ft/min. Determine la rugosidad superficial para este corte.
- 24.7. Se usa una herramienta de punta sencilla de acero de alta velocidad con radio de nariz = 3/64 in en una operación de perfilado de una pieza de acero dúctil. La velocidad de corte = 120 ft/min. El avance = 0.014 in/paso y la profundidad de corte es de 0.135 in. Determine la rugosidad superficial para esta operación.
- 24.8 Una pieza que se tornea en un torno mecánico debe tener un acabado superficial de $1.6 \mu\text{m}$. La pieza está hecha de aleación de aluminio de maquinado libre. La velocidad de corte = 150 m/min y la profundidad de corte = 4.0 mm. El radio de nariz de la herramienta = 0.75 mm. Determine el avance con el que se puede lograr el acabado superficial especificado.
- 24.9 Resuelva el problema 24.8, considerando que la pieza está hecha de hierro colado en lugar de aluminio y la velocidad de corte se reduce a 100 m/min.
- 24.10 Una pieza que se tornea en un torno mecánico debe tener un acabado superficial de $1.5 \mu\text{m}$. La pieza está hecha de aluminio. La velocidad de corte es 1.5 m/s y la profundidad es de 3.0 mm. El radio de la nariz de la herramienta = 1.00 mm. Determine el avance con el que se logra el acabado superficial especificado.
- 24.11 La especificación del acabado superficial en un trabajo de torneado es de $0.8 \mu\text{m}$. El material de trabajo es hierro colado. Las condiciones de corte se han establecido como: $v = 75$ m/min, $f = 0.3$ mm/rev y $d = 4.0$ mm. Es necesario

seleccionar el radio de nariz de la herramienta de corte. Determine el radio de nariz mínimo con el que podría lograrse el acabado especificado en esta operación.

- 24.12 Se realiza una operación de fresado frontal en una pieza de hierro fundido para lograr un acabado superficial de $36 \mu\text{-in}$. El cortador usa cuatro insertos y tiene 3.0 in de diámetro. El cortador gira a 475 rev/min. Para obtener el mejor acabado posible se usan insertos de carburo con un radio de nariz = 4/64 in. Determine la velocidad de avance requerida (in/min) para lograr el acabado de $32 \mu\text{-in}$.
- 24.13 Una operación de fresado frontal no está rindiendo el acabado superficial requerido sobre el trabajo. El cortador tiene cuatro dientes tipo inserto para fresado frontal. El supervisor del taller de maquinado cree que el problema consiste en que el material es demasiado dúctil para el trabajo, pero según los ensayos este parámetro está dentro del rango de ductilidad del material especificado por el diseñador. Sin conocer más acerca del trabajo, ¿cuáles cambios sugeriría usted a) en las condiciones de corte y b) en las herramientas, para mejorar el acabado superficial?
- 24.14 Se ejecuta una operación de torneado sobre acero C1010, el cual es un grado dúctil. Se desea un acabado superficial de $64 \mu\text{-in}$ (AA), y al mismo tiempo maximizar la velocidad de remoción del metal. Se ha decidido que la velocidad debe estar en una escala de 200 a 400 ft/min y que la velocidad de corte sea de 0.080 in. El radio de la nariz de la herramienta = 3/64 in. Determine la combinación de velocidad y avance que satisface estos criterios.
- 24.15 Se realiza fresado plano para acabar una pieza de hierro colado antes de pintarla. El cortador de la fresadora tiene un diámetro de 80 mm y cuatro dientes igualmente espaciados. La carga de virutas se establece en 0.40 mm/diente, y la velocidad de corte es de 1.0 m/s. Estime la rugosidad superficial para a) el fresado ascendente y b) el fresado descendente.

- 24.16 Se ejecuta una operación de fresado periférico usando una fresa para placa con 4 dientes y un diámetro de 2.50 in. El avance = 0.015 in/diente y la velocidad de corte = 150 ft/min. Suponga primero que los dientes están igualmente es-

paciados alrededor del cortador y que cada diente proyecta una distancia igual desde el eje de rotación, determine la rugosidad superficial teórica para a) el fresado ascendente y b) el fresado descendente.

Economía del maquinado

- 24.17 Se usa una herramienta de acero de alta velocidad para torneear una pieza de acero de 300 mm de largo y 80 mm de diámetro. Los parámetros en la ecuación de Taylor son $n = 0.13$ y $C = 75$ (m/min) para un avance de 0.4 mm/rev. El costo del operador y la máquina herramienta = \$30.00/h y el costo de la herramienta por filo de corte = \$4.00. Se requieren 2.0 min para cargar y descargar la pieza de trabajo y 3.50 min para cambiar las herramientas. Determine a) la velocidad de corte para una velocidad de producción máxima, b) la vida de la herramienta en minutos de corte y c) la duración del ciclo y el costo por unidad de producto.
- 24.18 Resuelva el problema 24.17, pero en el inciso a) determine la velocidad de corte para el costo mínimo.
- 24.19 Una herramienta de carburo cementado se usa para torneear una pieza que tiene 14.0 in de largo y 4.0 in de diámetro. Los parámetros en la ecuación de Taylor son $n = 0.25$ y $C = 1\,000$ (ft/min). La tasa para el operador y la máquina herramienta = \$45.00/h y el costo de la herramienta por filo de corte = \$2.50. Se requiere 2.5 min para cargar y descargar la pieza de trabajo y 1.50 min para cambiar la herramienta. El avance = 0.015 in/rev. Determine a) la velocidad de corte para la máxima velocidad de producción, b) la vida de la herramienta en minutos de corte y c) la duración del ciclo y el costo por unidad de producto.
- 24.20 Resuelva el problema 24.19, pero en el inciso a) determine la velocidad de corte para el costo mínimo.
- 24.21 En este problema se comparan las herramientas desechables y reafilables. En cierto taller de maquinado, se cuenta con el mismo grado de herramientas de carburo en dos formas distintas para operaciones de torneado: insertos desechables e insertos soldados. Los parámetros en la ecuación de Taylor para este grado son $n = 0.25$ y $C = 300$ (m/min) bajo las condiciones de corte consideradas aquí. El precio de cada inserto desechable = \$6.00, cada inserto tiene 4 filos de cortes y el tiempo para cambiar la herramienta = 1.0 min (éste es un promedio del tiempo para recorrer el inserto y el tiempo para reemplazarlo cuando se han usado todos los filos). El precio de la herramienta con insertos soldados = \$30.00 y se estima que puede usarse un total de 15 veces antes de desecharla. El tiempo de cambio de herramienta para la herramienta reafilable = 3.0 min. El tiempo estándar para afilar o reafilar el filo de corte es de 5.0 min y el afilado se paga a una tasa = \$20.00/hr. El tiempo de maquinado en el torno cuesta \$24.00/h. La pieza de trabajo a usar en la comparación tiene 375 mm de largo y 62.5 mm de diámetro, y se requieren 2.0 minutos para cargar y descargar el trabajo. El avance = 0.30 mm/rev. Para los dos casos, compare a) las velocidades de corte para el costo mínimo, b) las vidas de las herramientas, c) la duración del ciclo y el costo por unidad de producción. ¿Qué herramienta recomendaría usted?
- 24.22 Resuelva el problema 24.21 pero en el inciso a), determine las velocidades de corte para la máxima velocidad de producción.
- 24.23 Se comparan tres materiales de herramienta para realizar la misma operación de torneado para acabado en un lote de 150 piezas de acero: acero de alta velocidad, carburo cementado y cerámica. Para el acero de alta velocidad, los parámetros de la ecuación de Taylor son $n = 0.130$ y $C = 80$ (m/min). El precio de la herramienta de acero de alta velocidad es de \$20.00 y se estima que puede afilarse y reafilarse 15 veces a un costo de \$2.00 por afilado. El tiempo de cambio de la herramienta es de 3 min. Tanto las herramientas de carburo como las cerámicas son en forma de insertos y pueden fijarse en el mismo portaherramientas mecánico. Los parámetros de la ecuación de Taylor para el carburo cementado son $n = 0.3$ y $C = 650$ (m/min), y para la cerámica $n = 0.6$ y $C = 3500$ (m/min). El costo por inserto para el carburo es de \$8.00 y para la cerámica de \$10.00. En ambos casos, el número de cortes de filos cortantes por inserto es de seis. El tiempo de cambio de la herramienta es de 1.0 min para los dos tipos de herramientas. El tiempo de cambio de las piezas de trabajo es de 2.5 min. El avance es de 0.30 mm/rev y la profundidad de corte es de 3.5 mm. El costo del tiempo de maquinado es de \$40/h. Las dimensiones de la pieza son 73.0 mm de diámetro y 250 mm de longitud. El tiempo de montaje para el lote es de 2.0 h. Para los tres tipos de herramienta, compare a) las velocidades de corte para el costo mínimo, b) las vidas de las herramientas, c) la duración del ciclo, d) el costo por unidad de producción, e) el tiempo total para completar el lote y la velocidad de producción, f) ¿cuál es la proporción de tiempo que se requiere en realidad para cortar el metal con cada herramienta?
- 24.24. Resuelva el problema 24.23, pero en los incisos a) y b), determine las velocidades de corte y las vidas de las herramientas para la máxima velocidad de producción.
- 24.25. Se usa una máquina de fresado vertical para perforar el diámetro interno de un lote grande de piezas tubulares. El diámetro = 28.0 in y la longitud de la perforación = 14.0 in. Las condiciones de corte actuales son: velocidad = 200 ft/min, avance = 0.015 in/rev y profundidad = 0.125 in. Los parámetros de la ecuación de Taylor para la herramienta de corte en esta operación son $n = 0.23$ y $C = 850$ (ft/min). El tiempo de cambio de la herramienta = 3.0 min y el costo de la herramienta = \$3.50 por filo de corte. El tiempo requerido para cargar y descargar las piezas = 12.0 min y el costo del tiempo de maquinado en esta operación de perforado = \$42.00/h. La administración ha indicado que la tasa de producción para este trabajo debe incrementarse en 25%. ¿Es esto posible? Suponga que el avance debe permanecer sin cambio a fin de lograr el acabado superficial requerido. ¿Cuál es la velocidad actual de producción y la máxima velocidad posible para este trabajo?
- 24.26. Un torno de CN hace dos pasos de corte a través de una pieza cilíndrica de trabajo en un ciclo automático. El ope-

rador carga y descarga la máquina. El diámetro inicial del trabajo es de 3.00 in y su longitud = 10 in. El ciclo de trabajo consiste en los siguientes pasos (con elementos de tiempo dados entre paréntesis cuando esto es aplicable): 1. El operador carga la pieza en la máquina, empieza el ciclo (1.00 min); 2. El torno de CN coloca las herramientas en posición para el primer paso (0.10 min); 3. El torno de CN maquina el primer paso (el tiempo depende de la velocidad de corte); 4. El torno de CN reposiciona la herramienta para el segundo paso (0.4 min); 5. El torno de CN maquina el segundo paso (el tiempo depende de la velocidad de corte); 6. El operador descarga la pieza y la coloca en la charola (1.00 min). Además, la herramienta de corte debe cambiarse en forma periódica y este cambio de herramienta toma 1.00 min. La velocidad de avance = 0.007 in/rev y la profundidad de corte para cada paso = 0.100 in. El costo del operador y de la máquina = \$39/h y el costo de la herramienta = \$2/filo de corte. La ecuación de Taylor aplicable para la vida de la herramienta tiene los parámetros $n = 0.26$ y $C = 900$ (ft/min). Determine *a*) la velocidad de corte para el costo mínimo por pieza, *b*) el tiempo promedio requerido para completar un ciclo de producción, *c*) el costo del ciclo de producción. Si el tiempo total de montaje para este trabajo es de 3.0 h y el tamaño del lote es de 300 piezas, ¿cuánto tiempo se requerirá para completar el lote?

- 24.27. Como se indicó en la sección 24.4, el efecto de un fluido para corte es aumentar el valor de C en la ecuación de vida de la herramienta de Taylor. En cierta situación de maquinado, donde se utilizaban herramientas de acero de alta velocidad, el valor de C se incrementó de 200 a 225 debido al uso de un fluido para corte. El valor de n es el mismo con o sin fluido en $n = 0.125$. La velocidad de corte usada en la operación fue $v = 125$ ft/min. Avance = 0.010 in/rev y profundidad = 0.100 in. El efecto del fluido para corte puede ser incrementar la velocidad de corte (con la misma vida de la herramienta) o aumentar la vida de la herramienta (a la misma velocidad de corte). *a*) ¿Cuál es la velocidad de

corte que resultaría del uso del fluido de corte si la vida de la herramienta permanece igual que sin usar dicho fluido? *b*) ¿Cuál es la vida de la herramienta que resultaría si la velocidad de corte es de 125 ft/min? *c*) Económicamente, ¿cuál efecto es el mejor?, considere que el costo de la herramienta = \$2.00 por filo de corte, el tiempo de cambio de la herramienta = 2.5 min y el costo del operador y de la máquina = \$30/h. Justifique su respuesta con cálculos, usando el costo por pulgada cúbica de metal maquinado como un criterio de comparación. No tome en cuenta los efectos del tiempo de manejo de la pieza de trabajo.

- 24.28. En una operación de torneado sobre acero dúctil se desea obtener una rugosidad superficial real de $63 \mu\text{-in}$ usando una herramienta con radio de nariz de $2/64$ in. La rugosidad ideal está dada por la ecuación (24.1) y tendrá que hacerse un ajuste usando la figura 24.2 para convertir la rugosidad real de $63 \mu\text{-in}$ a una rugosidad ideal; debe tomarse en cuenta el material y la velocidad de corte. Se utilizan insertos desechables a un costo de \$1.75 por filo de corte (cada inserto cuesta \$7.00 y hay cuatro filos por cada inserto). El tiempo necesario para recorrer cada inserto = 25 segundos y para remplazar uno de ellos, después de haberlo recorrido cuatro veces, se requieren 45 segundos. La longitud de la pieza de trabajo = 30.0 in y su diámetro = 3.5 in. El costo de la máquina y el operador = \$39.00 por hora incluidos los sobrecostos aplicables. La ecuación de la vida de la herramienta de Taylor para esta combinación de herramienta y trabajo está dada por: $vT^{0.23}f^{0.55} = 40.75$, donde T = vida de la herramienta, min; v = velocidad de corte, ft/min; y f = avance, in/rev. Encuentre *a*) el avance en in/rev con el que se logrará el acabado real deseado, *b*) la velocidad de corte para el costo mínimo por pieza dado el avance determinado en el inciso *a*). **Sugerencia:** Para resolver *a*) y *b*) se requiere un procedimiento computacional iterativo.
- 24.29. Compruebe que la derivada de la ecuación (24.8) resulta en la ecuación (24.9).
- 24.30. Compruebe que la derivada de la ecuación (24.14) resulta en la ecuación (24.15).

25

ESMERILADO Y OTROS PROCESOS ABRASIVOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 25.1 Esmerilado
 - 25.1.1 La rueda de esmeril
 - 25.1.2 Análisis del proceso de esmerilado
 - 25.1.3 Consideraciones en la aplicación del esmerilado
 - 25.1.4 Operaciones de esmerilado y máquinas de esmerilado
- 25.2 Procesos abrasivos relacionados
 - 25.2.1 Rectificado con abrasivos
 - 25.2.2 Bruñido
 - 25.2.3 Superacabado
 - 25.2.4 Pulido y abrillantado

El **maquinado por abrasivos** implica la eliminación de material por la acción de partículas abrasivas duras que están por lo general adheridas a una rueda. El esmerilado es el proceso abrasivo más importante. En términos del número de máquinas herramientas en uso, el esmerilado es el más común de todas las operaciones de trabajo con máquinas herramienta [11]. Otros procesos por abrasivos incluyen el rectificado, el bruñido, el superacabado, el pulido y el abrillantado. Por lo general, los procesos de maquinado abrasivo se usan como operaciones de acabado, aunque algunos de ellos son capaces de remover grandes cantidades de material que rivalizan con las operaciones de maquinado convencional.

El uso de abrasivos para dar forma a las piezas de trabajo es probablemente el proceso más antiguo de remoción de material (nota histórica 25.1). Las razones por las que los procesos abrasivos son importantes comercial y tecnológicamente en la actualidad, son las siguientes:

- Pueden usarse en todos los tipos de materiales, desde metales suaves hasta aceros endurecidos, y en materiales no metálicos, como cerámicas y silicio.
- Algunos de estos procesos pueden usarse para producir acabados superficiales extremadamente finos de hasta $0.025 \mu\text{m}$ ($1\mu\text{-in}$).
- Para ciertos procesos abrasivos, las dimensiones pueden sujetarse a tolerancias extremadamente estrechas.

El corte con chorro de agua abrasivo y el maquinado ultrasónico también se clasifican algunas veces como procesos abrasivos debido a que realizan el corte por medios similares. Sin embargo, estos procesos se conocen comúnmente como procesos no tradicionales de remoción de material, los cuales se cubren en el capítulo siguiente.

Nota histórica 23.1 *Materiales para herramientas de corte.*

El uso de los abrasivos es más antiguo que cualquiera de las otras operaciones de maquinado. Hay evidencias arqueológicas de que los hombres antiguos usaron piedras abrasivas, como la arenisca natural, para afilar herramientas y armas, y raspar porciones no deseadas de materiales más suaves para hacer implementos domésticos.

El esmerilado se convirtió en una técnica comercial importante en el antiguo Egipto. Las grandes piedras usadas para construir las pirámides se cortaron a su tamaño actual mediante procesos rudimentarios de esmerilado. El esmerilado de metales data alrededor de los 2000 años a.C. y era una habilidad altamente valorada en aquella época.

Los primeros materiales abrasivos fueron aquellos que se encontraban en la naturaleza, como la arenisca, que está compuesta fundamentalmente de cuarzo (SiO_2); el esmeril, que consiste en corindón (Al_2O_3) más una cantidad igual o menor de minerales de hierro hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4), y el diamante. Las primeras ruedas de esmeril fueron probablemente de piedra tallada y giradas a mano. Sin embargo, las ruedas esmeriladoras hechas en esta forma no tenían una calidad consistente.

A inicios del siglo XIX se produjeron en la India las primeras ruedas de esmeril aglutinadas. Se usaron para esmerilar gemas, un importante artículo de comercio en la India en esa época. Los abrasivos fueron el corindón, el esmeril y el diamante. El material aglutinante se hizo de resinas naturales de laca. La tecnología se exportó a Europa y Estados Unidos, donde se introdujeron de manera subsecuente otros materiales aglutinantes: los de hule a mediados del siglo XIX, los vitrificados alrededor de 1870, los de laca

aproximadamente en 1880 y los resinosos en la década de 1920 con el desarrollo de los primeros plásticos termoestables (termofijos) (fenol-formaldehído).

A finales del siglo XIX se produjeron los primeros abrasivos sintéticos: carburo de silicio (SiC) y óxido de aluminio (Al_2O_3). Con la fabricación de abrasivos, se pudo controlar más estrechamente su composición química y el tamaño individual de los granos, así se obtuvieron ruedas de esmeril de mayor calidad.

Las primeras máquinas reales de esmerilado fueron hechas en Estados Unidos, por la compañía Brown and Sharpe, en la década de 1860 para esmerilado de piezas de máquinas de coser, una industria importante en ese periodo. Las máquinas esmeriladoras también contribuyeron al desarrollo de la industria de las bicicletas en la década de 1890 y después en la industria automotriz. Los procesos de esmerilado se usaban para ajustar el tamaño y el acabado de ciertas piezas endurecidas por tratamiento térmico en estos productos.

Los superabrasivos como el diamante y el nitruro de boro cúbico son productos del siglo XX. General Electric (GE) produjo los primeros diamantes sintéticos en 1955. Estos abrasivos se usaron para esmerilar herramientas de corte de carburo cementado, y en la actualidad aún es una aplicación importante de los abrasivos de diamante. El nitruro de boro cúbico (CBN), segundo en dureza después del diamante, se sintetizó por primera vez en 1957 por GE, usando un proceso semejante al de la fabricación de diamantes artificiales. El CBN se ha convertido en un abrasivo importante para el esmerilado de aceros endurecidos.

25.1 ESMERILADO

El esmerilado es un proceso de remoción de material en el cual las partículas abrasivas están contenidas en una rueda de esmeril aglutinado que opera a velocidades periféricas muy altas. Por lo general la rueda de esmeril tiene una forma de disco, balanceada con toda precisión para soportar altas velocidades de rotación.

El esmerilado puede equipararse al fresado. En ambas técnicas, el corte ocurre en la periferia o en el frente de la rueda de esmeril, similar al fresado periférico y al fresado frontal. El esmerilado periférico es mucho más común que el esmerilado de frente. La rueda giratoria del esmeril consiste en muchos dientes cortantes (partículas abrasivas) y la pieza de trabajo avanza hacia esta rueda para lograr la remoción del material. A pesar de las similitudes, hay una diferencia significativa entre el esmerilado y el fresado: 1) los granos abrasivos en la rueda son mucho más pequeños y numerosos que los dientes del cortador de una fresa; 2) las velocidades de corte en el esmerilado son mucho más altas que en el fresado; 3) los granos abrasivos en una rueda de esmeril están orientados en forma aleatoria y tienen un ángulo de inclinación promedio muy alto; 4) una rueda de esmeril es autoafilante; al desgastarse la rueda, las partículas abrasivas pierden el filo y se

fracturan para crear nuevos bordes cortantes, o se eliminan de la superficie de la rueda para dejar expuestos nuevos granos.

25.1.1 La rueda de esmeril

Una rueda de esmeril consiste en partículas abrasivas y material aglutinante. Los materiales aglutinantes mantienen a las partículas en su lugar y establecen la forma y la estructura de la rueda. Estos dos ingredientes y la forma en que se fabrican determinan los cinco parámetros básicos de la rueda de esmeril: 1) material abrasivo, 2) tamaño del grano, 3) material aglutinante, 4) Dureza de la rueda y 5) estructura de la rueda. Para lograr el desempeño deseado en una aplicación dada, debe seleccionarse cada parámetro con extremo cuidado.

Material abrasivo Los diferentes materiales abrasivos se adecuan para esmerilar diferentes materiales de trabajo. Las propiedades generales de un material abrasivo para las ruedas de esmeril incluyen alta dureza, resistencia al desgaste, tenacidad y fragilidad. La dureza, la resistencia y la tenacidad son propiedades convenientes para cualquier material de herramienta de corte. La fragilidad se refiere a la capacidad del material abrasivo a fracturarse cuando el filo de corte del grano se desgasta, exponiendo así un nuevo filo de corte.

El desarrollo de los abrasivos para esmerilar se describió en la nota histórica. En la actualidad, los materiales abrasivos de mayor importancia comercial son el óxido de aluminio, el carburo de silicio, el nitruro de boro cúbico y el diamante; en la tabla 25.1 se presenta una descripción de estos materiales junto con sus valores relativos de dureza.

Tamaño del grano El tamaño de grano de las partículas abrasivas es un parámetro importante en la determinación del acabado superficial y de la velocidad de remoción del material. El tamaño de grano pequeño produce mejores acabados, mientras que los mayores tamaños de grano permiten velocidades de remoción de material más grandes. Por lo tanto, cuando se selecciona el tamaño de granos abrasivos, debe tomarse en cuenta ambos parámetros. La selección del tamaño de grano depende también hasta cierto punto del tipo de material de trabajo. Los materiales de trabajo más duros requieren tamaño de grano más pequeño para un corte efectivo, mientras que los materiales más suaves requieren tamaños de granos más grandes.

El tamaño de grano se mide mediante el procedimiento de cribas y mallas, descrito en la sección 16.1. En este procedimiento, los tamaños de grano más pequeños tienen nú-

TABLA 25.1 Abrasivos de mayor importancia en el esmerilado.

Abrasivo	Descripción	Dureza Knoop
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	Es el material abrasivo más común (sección 7.3.1). Se usa para esmerilado acero y otras aleaciones ferrosas de alta resistencia.	2 100
Carburo de silicio (SiC)	Es más duro que el Al ₂ O ₃ , pero no tan tenaz (sección 7.2.2). Sus aplicaciones incluyen metales dúctiles, como el aluminio, el latón y el acero inoxidable, así como materiales frágiles, como algunas fundiciones de hierro y ciertos cerámicos. No puede usarse efectivamente para el esmerilado de acero debido a la fuerte afinidad química entre el carbono en SiC y el hierro en el acero.	2 500
Nitruro de boro cúbico (CBN)	Cuando se usa como abrasivo, el CBN (sección 7.3.3) se produce bajo el nombre comercial de Borazon, por General Electric Company. Las ruedas de esmeril de CBN se usan para materiales duros, como aceros de herramienta endurecidos y aleaciones aeroespaciales.	5 000
Diamante	Los abrasivos de diamante se dan en forma natural y también pueden hacerse sintéticamente (sección 7.5.1). Las ruedas de diamante se usan generalmente en aplicaciones de esmerilado de materiales abrasivos duros, como cerámicos, carburos cementados y vidrio.	7 000

TABLA 25.2 Materiales aglutinantes usados en ruedas de esmeril.

Material aglutinante	Descripción
Aglutinante vitrificado	Consiste principalmente en arcilla cocida y materiales cerámicos. La mayoría de las ruedas de esmeril de uso común son ruedas con aglutinantes vitrificados, fuertes y rígidos, resistentes a las temperaturas elevadas y casi no se ven afectados con el agua y los aceites que pudiesen usarse en los fluidos de esmerilado.
Aglutinante de silicato	Consiste en silicato de sodio (Na_2SiO_3). Sus aplicaciones se limitan generalmente a situaciones en las que se debe minimizar la generación de calor, como en el esmerilado de herramientas de corte.
Aglutinante de hule	Es el más flexible de los materiales aglutinantes. Se usa como material aglutinante en las ruedas de corte.
Aglutinante de resina	Consiste en materiales con diferentes resinas termoestables, como fenol-formaldehído. Tiene una gran resistencia y se usa para esmerilado grueso y operaciones de corte.
Aglutinante de laca	Son relativamente fuertes pero no rígidas. Se usan con frecuencia en aplicaciones que requieren un buen acabado.
Aglutinante metálico	El metal, por lo general bronce, es el material aglutinante más común para ruedas de diamante y de nitruro de boro cúbico. Se usan procedimientos técnicos de procesamiento de partículas (capítulos 16 y 17) para aglutinar la matriz de los granos abrasivos, en los cuales se pega el material únicamente en la periferia de la rueda, y de esta forma se conservan los costosos materiales abrasivos.

meros más grandes y viceversa. El tamaño de los granos usados en las ruedas de esmeril fluctúan típicamente entre 8 y 250. El grano tamaño 8 es muy grueso y el tamaño 250 es muy fino. Los tamaños de grano más fino se utilizan para el bruñido y el superacabado (sección 25.2).

Materiales aglutinantes El material aglutinante sujeta los granos abrasivos y establece la forma y la integridad estructural de la rueda de esmeril. Las propiedades convenientes del material aglutinante incluyen la resistencia, la tenacidad, la dureza y la resistencia a la temperatura. El material aglutinante debe ser capaz de soportar las fuerzas centrífugas y las altas temperaturas experimentadas por la rueda de esmeril, y resistir sin quebrarse ante los impactos de la rueda; también deben sostener los granos abrasivos rígidamente en su lugar para lograr la acción de corte y permitir el desalojo de los granos gastados, de manera que se expongan nuevos granos. En la tabla 25.2 se identifican y se describen brevemente los materiales aglutinantes utilizados con mayor frecuencia en las ruedas de esmeril.

Estructura de la rueda y dureza de la rueda La *estructura de la rueda* se refiere al espaciamiento relativo entre los granos abrasivos en la rueda. Además de los granos abrasivos y el material aglutinante, las ruedas de esmeril contienen huecos de aire o poros, como se ilustra en la figura 25.1. Las proporciones volumétricas de los granos, el material aglutinante y los poros pueden expresarse como:

$$P_g + P_b + P_p = 1.0 \quad (25.1)$$

donde P_g = proporción de los granos abrasivos en el volumen total de la rueda, P_b = proporción del material aglutinante y P_p = proporción de los poros (huecos).

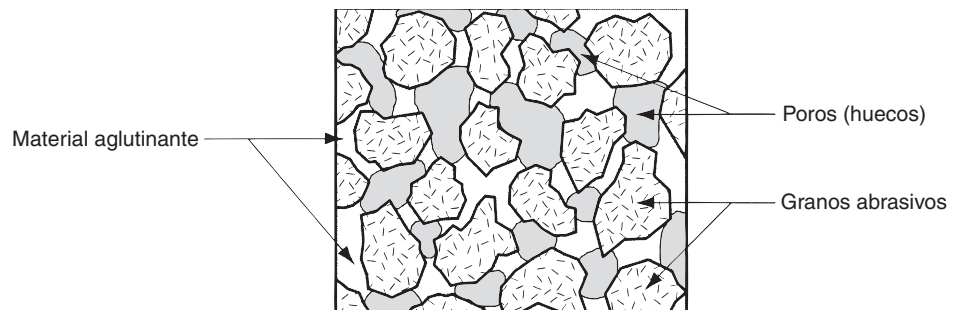
FIGURA 25.1 Estructura típica de una rueda de esmeril.

TABLA 25.3 Sistema de identificación para ruedas de esmeril convencionales definido por la norma ANSI B74.13-1977 [3].

30	A	46	H	6	V	XX
Marca privada del fabricante de la rueda (opcional).						
Tipo de aglutinante: B = resinoso, BF = resinoso reforzado E = laca, R = hule o caucho, RF = hule reforzado, S = silicato, V = vitrificado. M = metálica.						
Estructura: La escala va del 1 al 15: 1 = estructura muy densa, 15 = estructura muy abierta.						
Dureza: La escala va de la A a la Z: A = suave, M = mediano, Z = duro.						
Tamaño del grano: Grueso = tamaños de grano 8 a 24, Mediano = tamaños de grano 30 a 60, Fino = tamaños de grano 70 a 180, Muy fino = tamaños de grano 220 a 600.						
Tipo de abrasivo: A = óxido de aluminio, C = carburo de silicio. D = Diamante, B = Borazon						
Prefijo: Símbolo del fabricante para el abrasivo (opcional).						

La estructura de la rueda se mide en una escala que va de “abierta” a “densa”. Una estructura abierta es aquella en la que P_p es relativamente grande y P_g es relativamente pequeña. Esto es, hay muchos poros y pocos granos por unidad de volumen en una rueda de estructura abierta. Por el contrario, en una estructura densa P_p es relativamente pequeña y P_g es más grande. En general, se recomiendan estructuras abiertas en situaciones donde se debe proveer espacios libres para la viruta. Las estructuras densas se usan para obtener mejores acabados superficiales y control dimensional.

La dureza de la rueda indica la resistencia del aglutinante de la rueda de esmeril para retener los granos abrasivos durante el corte. Esto depende en gran medida de la cantidad de material aglutinante presente en la estructura de la rueda, P_b , en la ecuación (25.1). La dureza se mide en una escala que va de suave a duro. Las ruedas “suaves” pierden los granos fácilmente, mientras que las ruedas “duras” retienen los granos abrasivos. Las ruedas suaves se usan generalmente para aplicaciones que requieren una baja velocidad de remoción de material y en el esmerilado de materiales de trabajo duros. Las ruedas duras se usan típicamente para lograr altas velocidades de remoción de material y para el esmerilado de materiales de trabajo relativamente suaves.

Especificación de las ruedas de esmeril Los parámetros precedentes se pueden designar concisamente usando un sistema de especificación de ruedas de esmeril definido por la American National Standards Institute (ANSI) [3]. Este sistema de especificación usa números y letras para identificar el tipo de abrasivo, el tamaño del grano, la dureza, la estructura y el material aglutinante. En la tabla 25.3 se presenta una versión abreviada de la norma ANSI que indica cómo se interpretan los números y las letras. La norma también proporciona identificaciones adicionales que pueden utilizar los fabricantes de ruedas de esmeril.

La norma ANSI para las ruedas de esmerilado de diamante y de nitruro de boro cúbico es ligeramente diferente que la de las ruedas convencionales. El sistema de especificación para estas nuevas ruedas de v se presenta en la tabla 25.4.

Las ruedas de esmerilado tienen en una variedad de formas y tamaños, como se muestra en la figura 25.2. Las configuraciones a), b) y c) son ruedas de esmerilado periféricas, en las cuales la remoción de material la realiza la circunferencia exterior de la rueda. En el inciso d) se muestra una rueda para esmerilado de corte típica, la cual involucra también el corte periférico. Las ruedas e), f) y g) son ruedas de esmerilado frontal, en las cuales la cara plana de la rueda remueve el material de la superficie de trabajo.

25.1.2 Análisis del proceso de esmerilado

Las condiciones de corte en el esmerilado se caracterizan por velocidades muy altas y cortes muy pequeños, comparados con el fresado y otras operaciones de maquinado tradicional. Si se usa el esmerilado superficial de la figura 25.3a) para ilustrar las caracterís-

TABLA 25.4 Sistema de identificación para ruedas de esmeril de diamante y nitruro de boro cúbico definido por la norma ANSI B74.13-1977 [3].

XX	D	150	P	YY	M	ZZ	3
Profundidad del abrasivo = Profundidad del abrasivo en el perímetro de la rueda de la sección abrasiva en mm (como se muestra aquí) o en pulgadas (como en la figura 25.2c). Modificación del aglutinante = nota del fabricante sobre la modificación o tipo de aglutinante especial. Tipo de aglutinante: B = Resina, M = Metal, V = Vitrificado. Concentración: Designación del fabricante; puede ser un número o símbolo. Dureza: La escala va de la A a la Z: A = suave, M = mediano, Z = duro. Tamaño de grano: Grueso = tamaños de grano 8 a 24, Mediano = tamaños de grano 30 a 60, Fino = tamaños de grano 70 a 180, Muy fino = tamaños de grano 220 a 600. Tipo de abrasivo: D = Diamante, B = Nitruro de boro cúbico. Prefijo: Símbolo del fabricante para el abrasivo (opcional).							

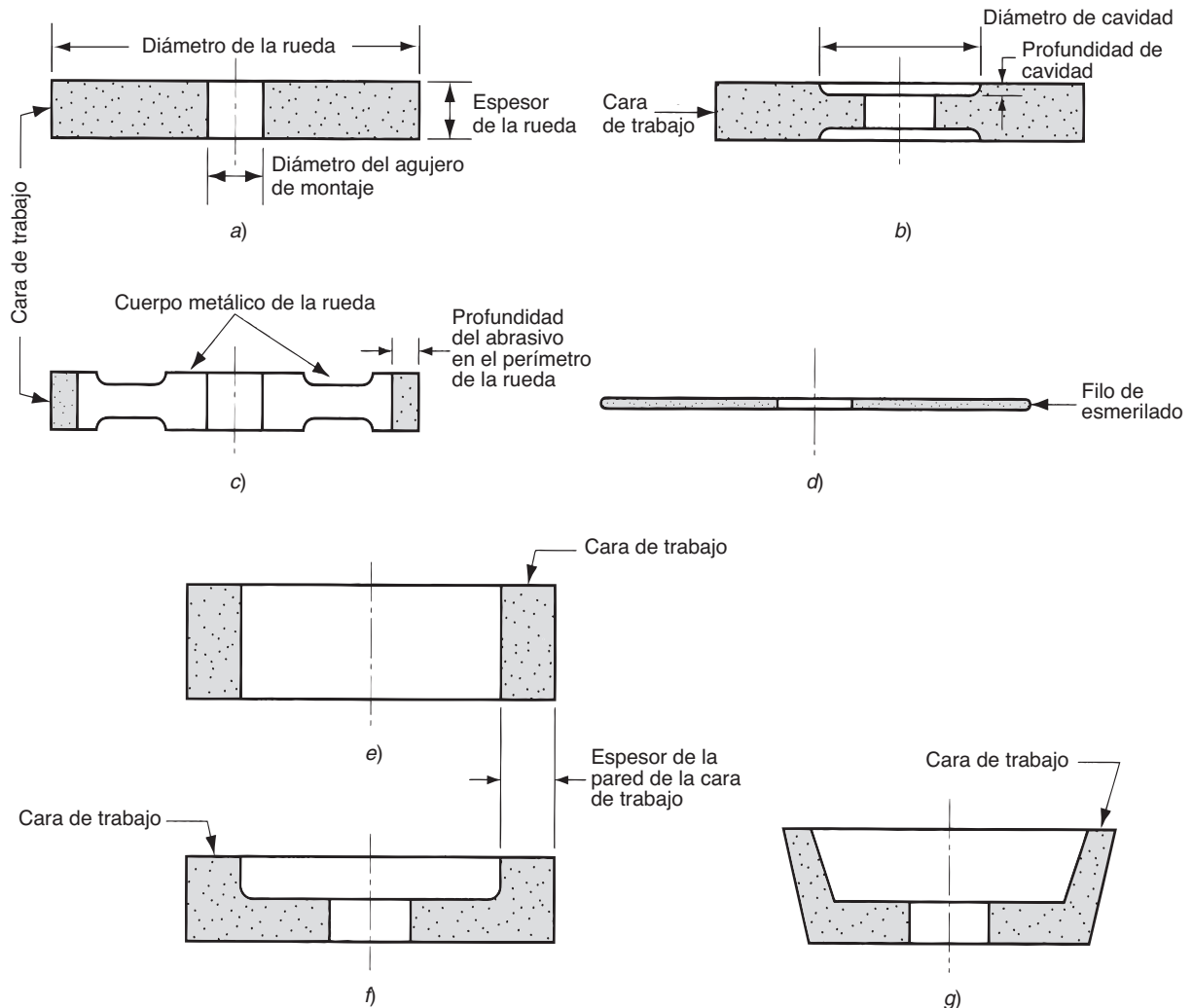


FIGURA 25.2 Algunas formas estándar de ruedas abrasivas: a) recta, b) con cavidades de los dos lados, c) rueda con cuerpo metálico y abrasivo adherido en la circunferencia, d) disco abrasivo de corte, e) rueda cilíndrica, f) rueda de copa recta y g) rueda de copa angular.

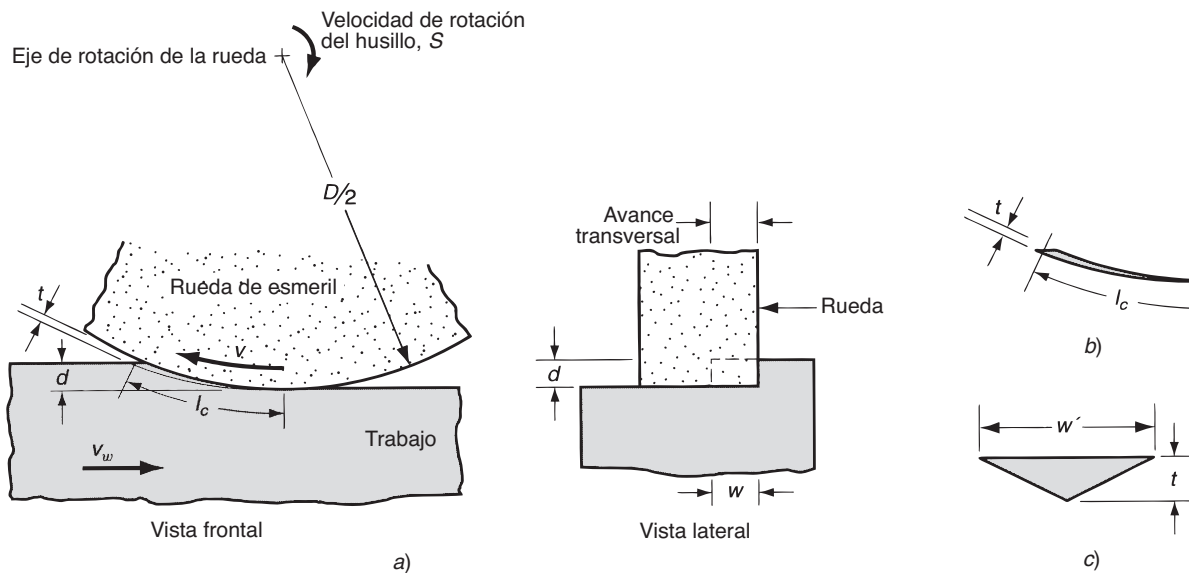


FIGURA 25.3 a) La geometría de la superficie de esmerilado muestra las condiciones de corte; b) implica la forma longitudinal y c) la sección transversal de una viruta simple.

Las principales del proceso, la velocidad periférica de la rueda de esmeril se determina mediante la velocidad de rotación de la rueda:

$$v = \pi DN \quad (25.2)$$

donde v = velocidad lineal de la rueda, m/min (ft/min); N = velocidad de rotación del husillo, rev/min; y D = diámetro de la rueda, m (ft).

La profundidad del corte d , llamada **avance radial**, es la penetración de la rueda dentro de la superficie original de trabajo. Al proseguir la operación, la rueda de esmeril avanza lateralmente a través de la superficie en cada ciclo de trabajo. Esto se llama **avance transversal** y determina el ancho de la trayectoria del esmerilado w en la figura 25.3a). Este ancho, multiplicado por la profundidad d , determina el área de la sección transversal de corte. En la mayoría de las operaciones de esmerilado, el trabajo se mueve contra la rueda a una cierta velocidad v_w , de manera que la velocidad de remoción de material es:

$$R_{MR} = v_w w d \quad (25.3)$$

Cada grano de la rueda de esmeril corta una viruta individual, cuya forma antes del corte se muestra en la figura 25.3b) y cuya forma de sección transversal supuesta es triangular, como en la figura 25.3c). En el punto de salida del grano respecto al trabajo, donde la sección transversal de la viruta es mayor; este triángulo tiene una altura t y un ancho w' .

En una operación de esmerilado, lo que interesa es cómo se combinan las condiciones de corte con los parámetros de la rueda de esmeril para afectar los siguientes aspectos: 1) acabado superficial, 2) fuerzas y energía, 3) temperatura de la superficie de trabajo, 4) desgaste de la rueda.

Acabado superficial La mayor parte del esmerilado comercial se realiza para lograr acabados superficiales superiores a los que puede alcanzarse con maquinado convencional. El acabado superficial de la pieza de trabajo lo afecta el tamaño de las virutas individuales que se forman durante el esmerilado. Un factor obvio en la determinación del tamaño de viruta es el tamaño del grano; los tamaños más pequeños de grano o partículas rinden mejores acabados.

A continuación, se examinan las dimensiones de una viruta individual. A partir de la geometría del proceso de esmerilado en la figura 25.3, puede mostrarse que la longitud promedio de una viruta está dada por

$$l_c = \sqrt{Dd} \quad (25.4)$$

donde l_c es la longitud de la viruta, mm (in); D = diámetro de la rueda, mm (in); y d = profundidad de corte o avance radial, mm (in). Se supone que la viruta la forma un grano que actúa a través de todo el arco barrido que se muestra en el diagrama.

En la figura 25.3c) se muestra la sección transversal supuesta para una viruta en esmerilado. La forma de la sección transversal es triangular con un ancho w' , y es más grande que el espesor t por un factor llamado relación de aspecto del grano r_g , definido por

$$r_g = \frac{w'}{t} \quad (25.5)$$

Los valores típicos del aspecto del grano están entre 10 y 20.

El número de granos o partículas activas (dientes cortantes) por pulgada cuadrada en la periferia de la rueda de esmeril se denota por C , cuyo valor es por lo general inversamente proporcional al tamaño del grano. Se relaciona C también con la estructura de la rueda. Una estructura más densa implica más granos por área. Con base en el valor de C , el número de virutas formadas por unidad de tiempo n_c está dado por

$$n_c = v w C \quad (25.6)$$

donde v = velocidad de la rueda, mm/min (in/min); w = avance transversal, mm (in); y C = granos por área en la superficie de la rueda de esmeril, granos/mm² (granos/in²). Se da por entendido que el acabado superficial mejorará al aumentar el número de virutas formadas por unidad de tiempo, sobre la superficie del trabajo para un ancho dado w . Por lo tanto, de acuerdo con la ecuación (25.6), al incrementar v o C se mejorará el acabado. Debe recordarse que los tamaños de grano más pequeños rinden valores de C más grandes.

Fuerzas y energía Si se conociera la fuerza requerida para pasar el trabajo contra una rueda de esmeril, la energía específica en el esmerilado podría determinarse como

$$U = \frac{F_c v}{v_w w d} \quad (25.7)$$

donde U = energía específica, J/mm³ (in-lb/in³); F_c = la fuerza de corte necesaria para pasar el trabajo contra la rueda, N (lb); v = velocidad de la rueda, m/min (ft/min); v_w = velocidad del trabajo, mm/min (in/min); w = ancho del corte, mm (in); y d = profundidad de corte, mm (in).

En el esmerilado, la energía específica es mucho más grande que en el maquinado convencional. Hay varias razones para esto. La primera es el **efecto del tamaño** en el maquinado. Como se analizó previamente, el espesor de la viruta en el esmerilado es mucho menor que para otras operaciones de maquinado, como el fresado. De acuerdo con este efecto de tamaño (sección 21.4), los tamaños más pequeños de viruta en el esmerilado ocasionan que la energía requerida para remover cada unidad de volumen de material sea significativamente más alta que en el maquinado convencional: aproximadamente diez veces más alta.

Segundo, los granos individuales en una rueda de esmeril tienen ángulos de inclinación extremadamente negativos. El ángulo de inclinación promedio es de aproximadamente -30° , y se cree que en algunos granos individuales hay valores de hasta -60° . Estos ángulos de inclinación muy bajos dan por resultado valores bajos para el ángulo del plano de corte y altas deformaciones cortantes; los dos hechos anteriores implican niveles de energía más altos en el esmerilado.

Tercero, la energía específica es más alta en el esmerilado porque no todas las partículas individuales se involucran en el corte real. Debido a sus posiciones y a las orientaciones aleatorias de los granos en la rueda, algunos granos no se proyectan lo suficiente dentro de la superficie de trabajo para realizar el corte. Pueden reconocerse tres tipos de acciones

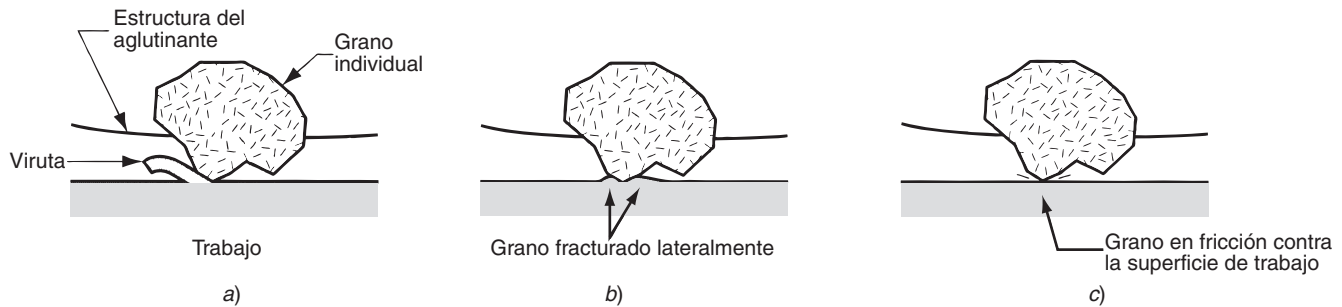


FIGURA 25.4 Tres tipos de acción de los granos en esmerilado: a) corte, b) fractura, y c) fricción.

de los granos, como se ilustra en la figura 25.4: a) Granos de **corte**, en el cual los granos penetran bastante dentro de la superficie para formar una viruta y remover el material; b) **Granos fracturados**, en el cual el grano penetra dentro del trabajo, pero no lo suficiente para causar corte; en su lugar, la superficie del trabajo se deforma y la energía se consume generando calor sin ninguna remoción de material; y c) **fricción**, en el cual el grano toca la superficie durante su recorrido, pero solamente ocurre fricción de roce, la cual consume energía generando calor sin remover ningún material.

El efecto del tamaño, los ángulos de inclinación negativa y las acciones ineficientes de los granos se combinan para causar que los procesos de esmerilado sean muy ineficientes en términos de consumo de energía por volumen de material removido.

Si se usan las relaciones de energía específica de la ecuación (25.7), y se supone que las fuerzas de corte que actúan en un solo grano de la rueda de esmeril son proporcionales a $r_g t$, puede demostrarse [9] que

$$F'_c = K_1 \left(\frac{r_g v_w}{vC} \right)^{0.5} \left(\frac{d}{D} \right)^{0.25} \quad (25.8)$$

donde F'_c es la fuerza de corte que actúa sobre un grano individual, K_1 es una constante de proporcionalidad que depende de la resistencia del material que se corta y de la agudeza de los granos individuales; los otros términos se definieron con anterioridad. La significación práctica de esta relación es que afecte o no F'_c a los granos individuales, jalará hacia afuera de la rueda de esmeril, un factor importante en la capacidad de la rueda para reafilarse a sí misma. Con referencia al análisis previo del grado de la rueda, puede lograrse que una rueda dura parezca más suave al incrementar la fuerza de corte que actúa sobre los granos individuales a través de ajustes apropiados en v_w , v y d , de acuerdo con la ecuación (25.8).

Temperaturas en la superficie de trabajo Debido al efecto de tamaño de grano, a los ángulos de inclinación altamente negativos, la profundidad del corte y a la fricción de los granos abrasivos contra la superficie de trabajo, el proceso de esmerilado se caracteriza por altas temperaturas y alta fricción. Al contrario de las operaciones convencionales de maquinado en las cuales la mayor parte de la energía calorífica generada en el proceso se va con la viruta, la mayor parte de la energía en el esmerilado permanece en la superficie trabajada [11], lo que ocasiona altas temperaturas de la superficie de trabajo. Las altas temperaturas superficiales tienen varios efectos dañinos posibles, sobre todo quemaduras y grietas en la superficie. Las marcas de quemaduras aparecen como decoloraciones de la superficie debidas a la oxidación. A menudo, las quemaduras por esmerilado son una señal de daño metalúrgico justo debajo de la superficie. Las grietas superficiales son perpendiculares a la dirección de la velocidad de la rueda. Éstas indican un caso extremo de daño térmico en la superficie de trabajo.

Un segundo efecto térmico perjudicial es el ablandamiento de la superficie de trabajo. Muchas operaciones de esmerilado se realizan sobre piezas que han sido tratadas térmicamente para obtener alta dureza. Las altas temperaturas de esmerilado pueden hacer que la superficie pierda algo de su dureza. El tercer efecto térmico en el esmerilado

puede causar esfuerzos residuales en la superficie de trabajo y posible decrecimiento en la resistencia a la fatiga de la pieza.

Resulta importante entender qué factores tienen influencia en la temperatura de la superficie de trabajo en el esmerilado. Se ha observado de manera experimental que la temperatura superficial depende de la energía por área superficial esmerilada (relacionada estrechamente con la energía específica U). Como ésta varía de manera inversa con el espesor de la viruta, puede demostrarse que la temperatura superficial T_s se relaciona con los parámetros del esmerilado de la siguiente manera [9]:

$$T_s = K_2 d^{0.75} \left(\frac{r_g C_v}{v_w} \right)^{0.5} D^{0.25} \quad (25.9)$$

donde K_2 = una constante de proporcionalidad. La implicación práctica de esta relación es que el daño superficial debido a la alta temperatura del trabajo puede mitigarse al disminuir la profundidad de corte d , la velocidad de la rueda v y el número de partículas activas por pulgada cuadrada en la rueda de esmeril C , o al incrementar la velocidad de trabajo v_w . Además, las ruedas de esmeril desgastadas y las ruedas que tienen alta dureza y estructura densa, tienden a causar problemas térmicos. Por supuesto, el uso de un fluido de corte también puede reducir las temperaturas de esmerilado.

Desgaste de la rueda Las ruedas de esmeril se desgastan como cualquier herramienta de corte convencional. Se reconocen tres mecanismos como las causas principales de desgaste en las ruedas de esmeril: 1) fractura de granos, 2) desgaste por rozamiento y 3) fractura del aglutinante. La **fractura del grano** ocurre cuando una porción de los granos se rompe, pero el resto permanece aglutinado en la rueda. Los filos del área fracturada se convierten en nuevos filos de corte en la rueda de esmeril. La tendencia del grano a fracturarse se denomina **fragilidad**. Una alta fragilidad significa que los granos se fracturan más rápidamente debido a las fuerzas de corte en los granos F'_c .

El **desgaste por rozamiento** involucra el desgaste de los granos individuales que dan como resultado zonas planas y filos redondeados. Este tipo de desgaste es análogo al desgaste de una herramienta de corte convencional. Se debe a mecanismos físicos similares, incluidas la fricción y la difusión, así como las reacciones químicas que se originan entre el material abrasivo y el de trabajo en presencia de temperaturas muy altas.

La **fractura del aglutinante** ocurre cuando los granos individuales son expulsados del material aglutinante. La tendencia hacia este mecanismo depende del grado de la rueda, entre otros factores. La fractura del aglutinante ocurre generalmente porque el grano se ha despegado debido al desgaste por roce, y la fuerza resultante del corte es excesiva. Los granos afilados cortan de manera más efectiva con fuerzas de corte más bajas; por lo tanto, éstos permanecen fijos en la estructura del aglutinante.

Los tres mecanismos se combinan para ocasionar que la rueda de esmeril se desgaste, como se describe en la figura 25.5. Pueden identificarse tres regiones de desgaste. En la primera región, los granos son agudos inicialmente y el desgaste se acelera debido a

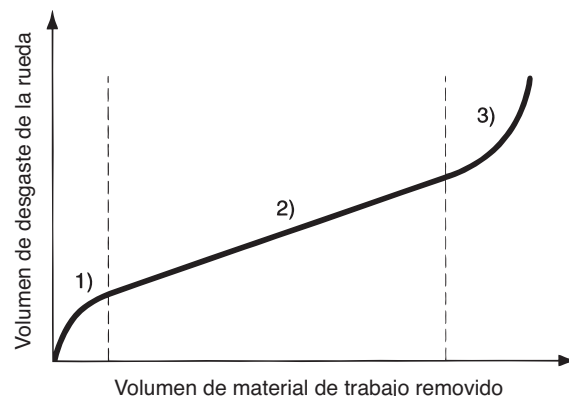


FIGURA 25.5 Curva de desgaste típica de una rueda de esmeril. El desgaste se grafica convenientemente en función del volumen de material removido, en lugar de hacerlo en función del tiempo (con base en [16]).

la fractura de los granos. Éste corresponde al periodo de “irrupción” en el desgaste convencional de la herramienta. En la segunda región, la velocidad de desgaste es bastante constante y provoca una relación lineal entre la rueda de esmeril y el volumen de metal removido. La característica principal de esta región es el desgaste por rozamiento, con algo de fractura de granos y de aglutinante. En la tercera sección de la curva de desgaste de la rueda, los granos se vuelven lisos y las magnitudes de la depresión y del rozamiento se incrementan en relación con el corte. Además, algunas de las virutas se quedan atrapadas en los poros de la rueda. A esto se le llama **tapado de la rueda**; dicho efecto impide la acción de corte y conduce a un mayor calentamiento y a temperaturas superficiales de trabajo. Como consecuencia, la eficiencia del esmerilado decrece y el volumen de la rueda removida aumenta en relación con el volumen del metal removido.

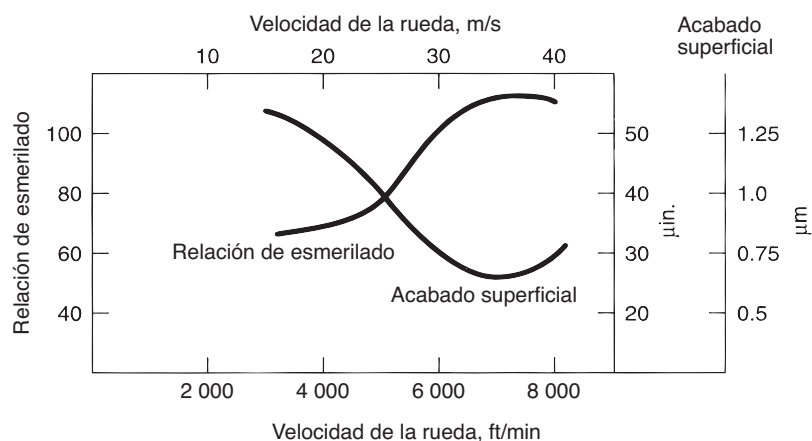
La **relación de esmerilado** es un término usado para indicar la pendiente de la curva de desgaste de la rueda. En forma específica,

$$GR = \frac{V_w}{V_g} \quad (25.10)$$

donde GR = relación de esmerilado, V_w = volumen de material de trabajo removido y V_g = volumen correspondiente de la rueda de rectificado que se gasta durante el proceso. La relación de esmerilado tiene el valor más significativo en la región de desgaste lineal de la figura 25.5. Los valores típicos de GR están entre 95 y 125 [5], lo que significa que están cerca de cinco órdenes de magnitud menos que la relación análoga en el maquinado convencional. La relación de esmerilado por lo general se incrementa cuando aumenta la velocidad de la rueda v . La razón es que el tamaño de la viruta formada por cada grano es más pequeño a velocidades más altas, así que la cantidad de fracturas de grano se reduce. Como las velocidades más altas de la rueda mejoran también el acabado superficial, hay una ventaja general al operar a altas velocidades de esmerilado. Sin embargo, cuando las velocidades se incrementan demasiado, aumenta el desgaste por fricción y la temperatura. Como resultado, la relación de rectificado se reduce y el acabado superficial se demerita. Como se muestra en la figura 25.6, este efecto lo registró originalmente Krabacher [14].

Cuando la rueda está en la tercera región de la curva de desgaste, debe reafilarse mediante un procedimiento llamado **aderezado**, que consiste en 1) romper los granos desgastados en la periferia exterior de la rueda de rectificado a fin de exponer granos afilados frescos y 2) remover las virutas que se han quedado atrapadas en los poros de la rueda. Esto se logra por medio de un disco giratorio, una barra abrasiva u otra rueda de rectificado operando a alta velocidad, sostenida contra la rueda que se adereza cuando está girando. Aunque el aderezado afila la rueda, no garantiza la forma de la rueda. El **formado** es un procedimiento alternativo que no sólo afila la rueda, sino que también restaura su forma cilíndrica y asegura la rectitud de su perímetro exterior. El procedimiento implica el uso de una herramienta de punta de diamante (se puede usar también otros tipos de herramienta

FIGURA 25.6 Relación de esmerilado y acabado superficial en función de la velocidad de la rueda. (Con base en datos de Krabacher [14]).



para rectificar) que avanza lentamente y con precisión a través de la rueda conforme ésta gira. Lo anterior sucede a una profundidad muy ligera de la rueda (0.025 mm o menos).

25.1.3 Consideraciones en la aplicación del esmerilado

En esta sección, se intentan resumir las revisiones previas sobre los parámetros de la rueda y el análisis teórico del esmerilado, así como sus aplicaciones prácticas. También se consideran los fluidos para esmerilado que se usan comúnmente en estos procesos.

Lineamientos de aplicación Existen muchas variables en el rectificado que afectan su desempeño y el éxito de la operación. Los lineamientos listados en la tabla 25.5 son útiles para clasificar las numerosas complejidades y seleccionar los parámetros apropiados de la rueda y las condiciones de esmerilado.

Fluidos de esmerilar La aplicación adecuada de los fluidos de corte ha sido efectiva para reducir los efectos térmicos y las altas temperaturas superficiales de trabajo descritas con anterioridad. Cuando estos fluidos se usan en la operación de esmerilado, se llaman fluidos de esmerilar. Las funciones que desempeñan son similares a las de los fluidos de corte (sección 23.4). Dos funciones comunes son reducir la fricción y eliminar el calor de los procesos. Además, el lavado de las virutas y la reducción de la temperatura de la superficie de trabajo son muy importantes en el esmerilado.

Los tipos de fluidos de esmerilado incluyen en su composición química aceites de esmerilar y aceites solubles al agua. Los aceites de esmerilar se derivan del petróleo y otras fuentes. Estos productos son atractivos debido a que la fricción es un factor importante en el esmerilado. Sin embargo, presentan riesgos de incendio y de la salud para el operador y su costo es alto en relación con los aceites solubles. Además, su capacidad de eliminar el calor es menor que la de los fluidos solubles en agua.

Por esto se recomiendan comúnmente las mezclas de aceite en agua como fluidos de esmerilar, cuyas concentraciones son más altas que los aceites solubles para corte convencional; de esta forma se refuerza el mecanismo de reducción de la fricción.

TABLA 25.5 Lineamientos de aplicación para el esmerilado.

Problema u objetivo de aplicación	Recomendación o lineamiento
Esmerilar acero y la mayoría de las aleaciones de hierro	Seleccione el óxido de aluminio como abrasivo.
Esmerilar la mayoría de los metales no ferrosos	Seleccione el carburo de silicio como abrasivo.
Esmerilar aceros de herramienta endurecidos y ciertas aleaciones aeroespaciales	Seleccione el nitruro de boro cúbico (Borazón) como abrasivo.
Esmerilar materiales abrasivos duros, como cerámicos, carburos cementados y vidrio	Seleccione el diamante como abrasivo
Esmerilar metales suaves	Seleccione un tamaño grande de grano y el grado de rueda más duro
Esmerilar metales duros	Seleccione un tamaño de grano pequeño y una dureza de rueda menor
Optimizar el acabado superficial	Seleccione una estructura de rueda densa con granos de tamaño pequeño. Use velocidades más altas (v) y velocidades de trabajo bajas (v_w)
Maximizar la velocidad de remoción de material	Seleccione un tamaño grande de grano, estructura de rueda más abierta y aglutinante vitrificado
Minimizar el daño por calor, el agrietado y el torcido de la superficie de trabajo	Mantenga el filo de la rueda. Aderece la rueda frecuentemente. Use profundidades de corte menores (d), velocidades de rueda más bajas (v), velocidades de trabajo más rápidas (v_w)
Si la rueda de esmeril se abrillanta y se quema	Seleccione una rueda de dureza menor y una estructura más abierta
Si la rueda de esmeril se rompe demasiado rápido	Seleccione una rueda de mayor dureza y una estructura más densa.

Recopilado de [7], [11] y [16].

25.1.4 Operaciones de esmerilado y máquinas de esmerilar

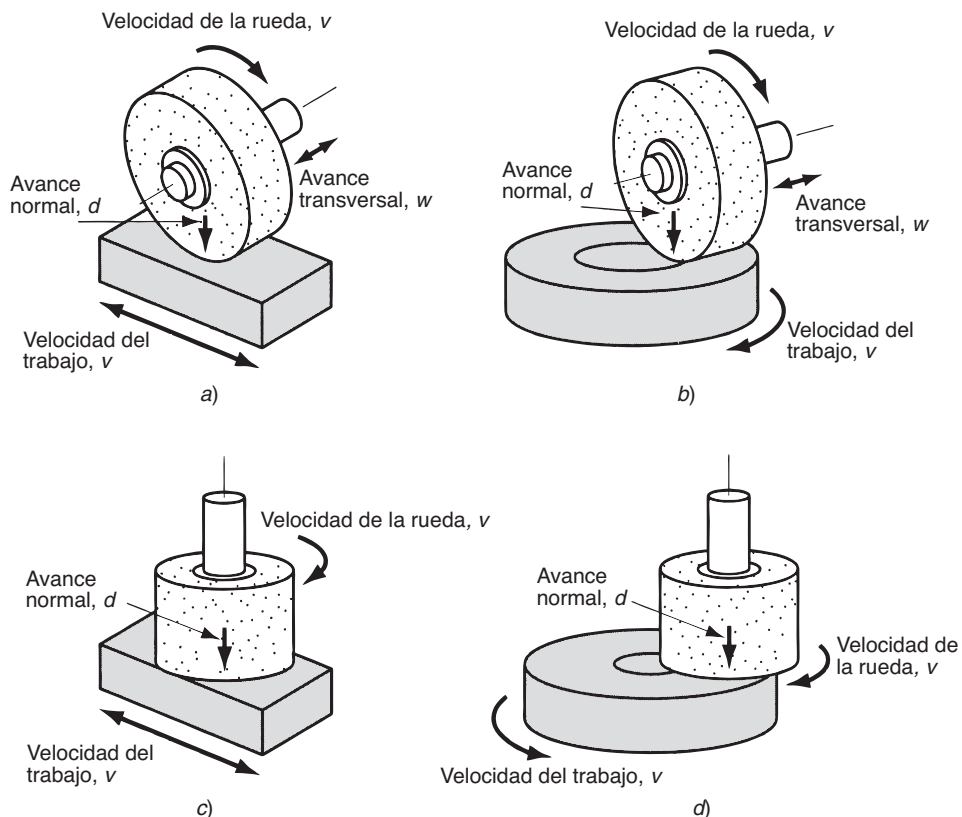
El rectificado se usa tradicionalmente para el acabado de piezas cuya geometría ha sido creada mediante otras operaciones. Por consiguiente, se han diseñado máquinas para rectificar superficies planas, cilindros exteriores o interiores y formas de contorno, como roscas. Los contornos se crean frecuentemente por medio de ruedas de formado especial, que tienen el contorno opuesto al que se desea impartir al trabajo. El rectificado se usa también en los cuartos de herramientas para formar la geometría de las herramientas de corte. Además de estos usos tradicionales, las aplicaciones del esmerilado se están expandiendo para incluir operaciones de más alta velocidad y más alta remoción de material. El estudio de las operaciones y de las máquinas en esta sección incluyen los siguientes tipos: 1) Esmerilado de superficies planas, 2) esmerilado de superficies cilíndricas, 3) esmerilado sin centros, 4) esmerilado de alta remoción de material, 5) otras operaciones de esmerilado.

El esmerilado de superficies planas Se usa normalmente, como su nombre lo indica, para el esmerilado de superficies planas. Se realiza ya sea con la periferia de la rueda de esmeril o con la cara plana de la rueda. Como el trabajo se sostiene normalmente en una orientación horizontal, el esmerilado periférico se realiza girando la rueda en un eje horizontal, y el esmerilado frontal se realiza girando la rueda en un eje vertical. En cualquier caso, el movimiento relativo de la pieza de trabajo se logra mediante un movimiento oscilante de la pieza de trabajo frente a la rueda o haciéndola girar. Estas posibles combinaciones de las orientaciones de los movimientos de la rueda y de la pieza de trabajo producen los cuatro tipos de máquinas de esmerilado superficial que se ilustran en la figura 25.7.

De los cuatro tipos, la máquina de husillo horizontal con mesa oscilante, y que es la más común, se muestra en la figura 25.8. El esmerilado se realiza haciendo oscilar el trabajo en forma longitudinal bajo la rueda a una profundidad muy pequeña (avance normal) y haciendo avanzar la rueda en forma transversal dentro del trabajo una cierta distancia

FIGURA 25.7 Cuatro tipos de esmeriladoras de superficies planas:

a) husillo horizontal con mesa de trabajo oscilante,
b) husillo horizontal con mesa de trabajo giratoria,
c) husillo vertical con mesa de trabajo oscilante y
d) husillo vertical con mesa de trabajo giratoria.



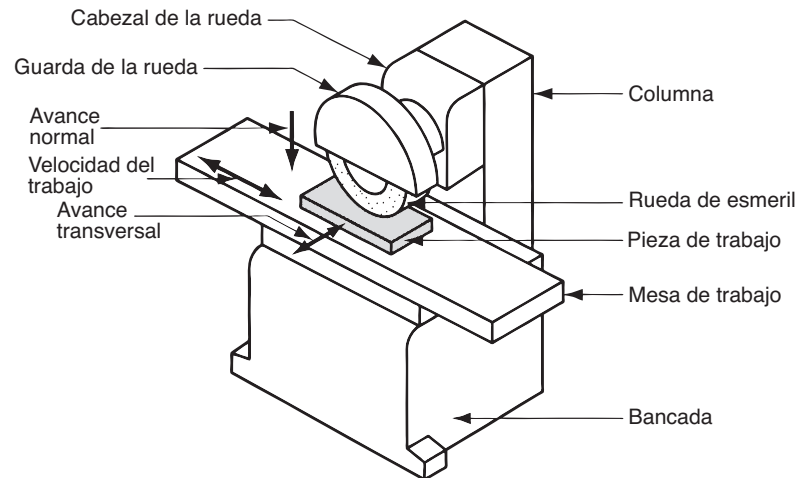


FIGURA 25.8 Esmeriladora de superficies planas con husillo horizontal y mesa de trabajo oscilante.

entre cada recorrido. En estas operaciones el ancho de la rueda es generalmente menor que el de la pieza de trabajo.

Además de sus aplicaciones convencionales, una máquina de esmerilado con husillo horizontal y mesa oscilante puede usarse para formar superficies con contornos especiales empleando una rueda de rectificado perfilada. En lugar de hacer avanzar la rueda transversalmente sobre el trabajo conforme éste oscila, la rueda *penetra* verticalmente en el trabajo. Por lo tanto, la forma de la rueda se transfiere a la superficie del trabajo.

Las máquinas de esmerilar con husillos verticales y mesas oscilantes se montan para que el diámetro de la rueda sea mayor que el ancho del trabajo. En consecuencia, estas operaciones pueden realizarse sin necesidad de usar un movimiento de avance transversal. En su lugar, el esmerilado se realiza haciendo oscilar el trabajo enfrente de la rueda y haciendo avanzar la rueda verticalmente en el trabajo a la dimensión deseada. Esta configuración es capaz de lograr una superficie muy plana en el trabajo.

De los dos tipos de mesa rotatoria para esmerilado de la figura 25.7b) y d), las máquinas de husillo vertical son las más comunes. Debido a la superficie de contacto relativamente grande que existe entre la rueda y la pieza de trabajo, las máquinas de esmerilar de mesa rotatoria y husillo vertical son capaces de altas velocidades de remoción del metal cuando están equipadas con las ruedas de esmeril apropiadas.

Esmerilado cilíndrico Como su nombre lo indica, se usa para piezas de revolución. Estas operaciones de esmerilado se dividen en dos tipos básicos, figura 25.9: a) esmerilado cilíndrico externo y b) esmerilado cilíndrico interno.

El esmerilado *cilíndrico externo* (también llamado esmerilado *entre centros*, para distinguirlo del esmerilado sin centros) se realiza en forma parecida a la operación de torneado. Las máquinas de esmerilar que se usan para estas operaciones se asemejan mucho a un torno, en el cual el portaherramientas ha sido remplazado por un motor de alta velocidad para mover la rueda de esmeril. La pieza de trabajo cilíndrica se hace girar entre los centros para proporcionar una velocidad superficial de 18 a 30 m/min (60 a 100 ft/min) [16], y la rueda de esmeril, que gira a 1 200-2 000 m/min (4 000-6 500 ft/min), se sujeta para realizar el corte. Existen dos tipos de movimiento de avance: avance transversal y corte profundo, como se muestra en la figura 25.10. En el avance transversal la rueda de esmeril avanza en dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo. El avance normal se fija dentro de un rango típico de 0.0075 a 0.075 mm (0.0003 a 0.003 in). Algunas veces se le da a la rueda o al trabajo un movimiento oscilante longitudinal para mejorar el acabado superficial. En el corte profundo, la rueda de esmeril avanza de manera radial dentro del trabajo. Las ruedas de esmerilado perfiladas usan este tipo de movimiento de avance.

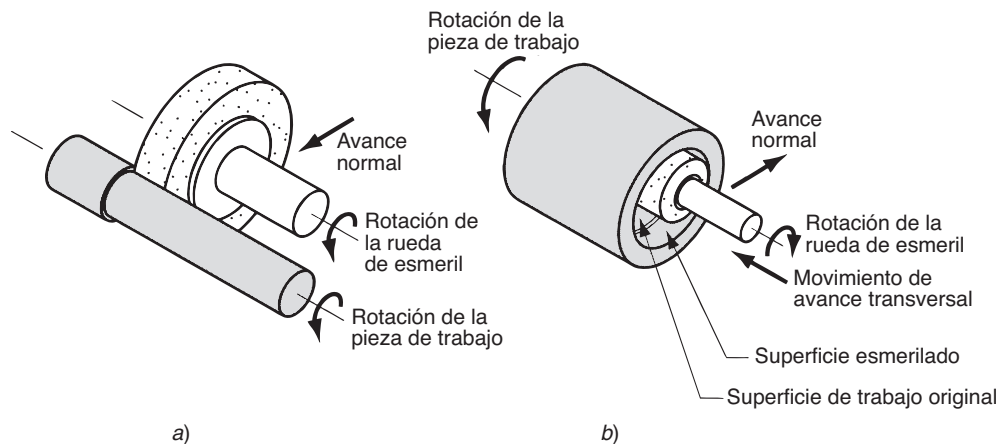


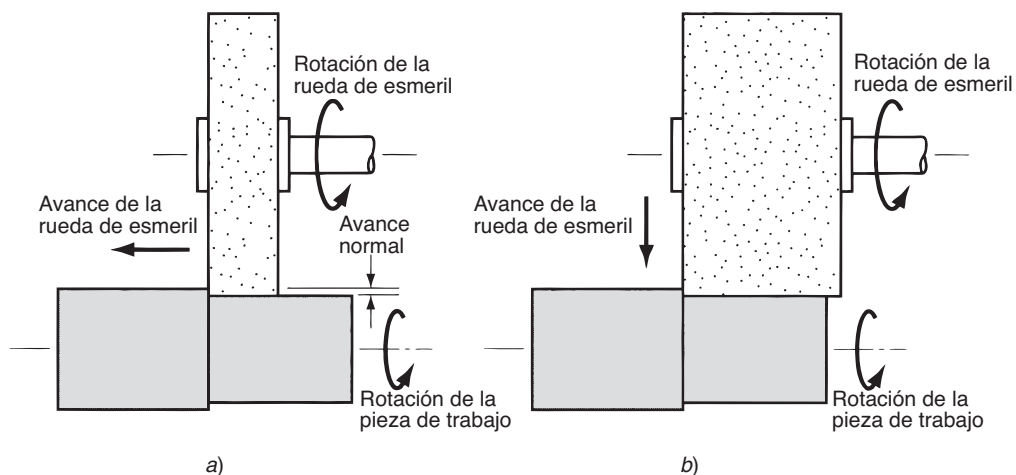
FIGURA 25.9 Dos tipos de esmerilado cilíndrico: a) exteriores y b) interiores.

El esmerilado cilíndrico externo se usa para terminar piezas que han sido maquinadas al tamaño aproximado y tratadas térmicamente para alcanzar la dureza deseada. Estas piezas incluyen ejes, cigüeñales, husillos, cojinetes, boquillas y rodillos para molinos laminadores. La operación de esmerilado produce el tamaño final y el acabado superficial requerido en estas piezas endurecidas.

El esmerilado **cilíndrico interno** opera en forma similar a la operación de torneado interno. La pieza de trabajo se sostiene por lo general en un mandril y se hace girar para obtener velocidades superficiales de 20 a 60 m/min (75 a 200 ft/min) [16]. Las velocidades superficiales de la rueda son similares a las del esmerilado cilíndrico externo. La rueda avanza en cualquiera de estas dos formas: avance transversal, figura 25.9b), y avance profundo. Obviamente, el diámetro de la rueda en el esmerilado cilíndrico interno debe ser más pequeño que el agujero perforado originalmente. Esto significa frecuentemente que el diámetro de la rueda es muy pequeño y, por lo tanto, se necesitan velocidades de rotación muy altas a fin de lograr la velocidad superficial deseada. El esmerilado interno se usa para acabar superficies internas endurecidas de guías de cojinetes y superficies de bujes.

Esmerilado sin centros El esmerilado sin centros es un proceso alternativo para esmerilar superficies cilíndricas internas y externas. Como su nombre lo indica, la pieza de trabajo no se sostiene entre los centros, lo cual produce una reducción del tiempo de manejo del trabajo. Por esta causa, el esmerilado sin centros se usa frecuentemente para trabajo de alta producción. El arreglo para el esmerilado **externo sin centros** (figura 25.11) consiste en dos ruedas: la rueda de esmeril y una rueda reguladora. Las piezas de trabajo, que

FIGURA 25.10 Dos tipos de movimientos de avance en esmerilado cilíndrico externo: a) avance transversal y b) corte profundo.



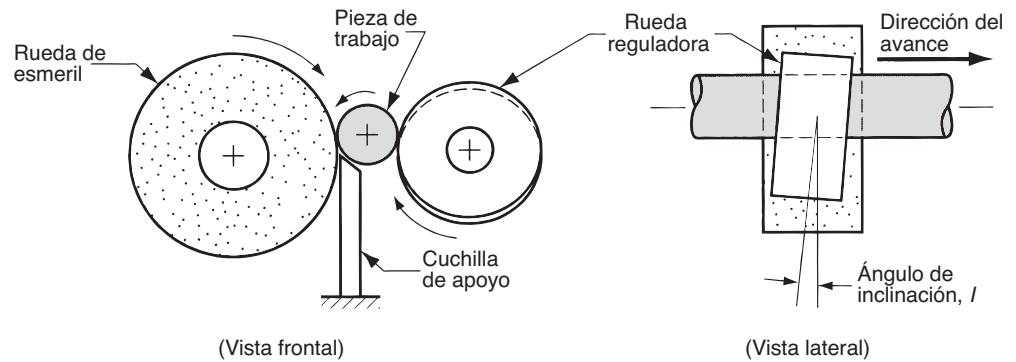


FIGURA 25.11 Esmerilado externo sin centros.

pueden ser muchas piezas cortas individuales de varias pulgadas de largo, o varias barras largas (por ejemplo de 3 o 4 m de largo), se sostienen mediante una cuchilla de apoyo y se alimentan a través de las dos ruedas. La rueda de esmeril hace el corte girando a una velocidad superficial de 1 200 a 1 800 m/min (4 000 a 6 000 ft/min). La rueda reguladora gira a velocidades mucho más bajas y está inclinada a un ángulo ligero I para controlar la alimentación del trabajo. La siguiente ecuación puede usarse para predecir la velocidad de alimentación, con base en un ángulo de inclinación y en otros parámetros del proceso [16]:

$$f_r = \pi D_r N_r \sin I \quad (25.11)$$

donde f_r = velocidad de avance, mm/min (in/min); D_r = diámetro de la rueda reguladora, mm (in); N_r = velocidad de rotación de la rueda reguladora en rev/min; e I = ángulo de inclinación de la rueda reguladora.

El arreglo típico en el esmerilado **interno sin centros** se muestra en la figura 25.12. En lugar de la cuchilla de apoyo, se usan dos rodillos de soporte para mantener la posición del trabajo. La rueda reguladora se inclina en un pequeño ángulo para controlar el avance del trabajo que pasa enfrente de la rueda de esmeril. Debido a la necesidad de sostener la rueda de esmeril, no es posible el avance del trabajo como en el esmerilado externo sin centros. Por lo tanto, esta operación de esmerilado no puede lograrse a las mismas velocidades de alta producción que son posibles en el proceso externo sin centros. Su ventaja consiste en que es capaz de proporcionar una concentricidad muy estrecha entre los diámetros interno y externo de una pieza tubular, como las guías para un cojinete de rodillos.

Esmerilado de alta remoción de material Una forma relativamente nueva de esmerilado es el esmerilado de alta remoción de material, creado alrededor de 1958. El esmerilado de alta remoción se realiza a profundidades de corte muy altas y a velocidades de avance muy bajas. La comparación con el esmerilado convencional se ilustra en la figura 25.13.

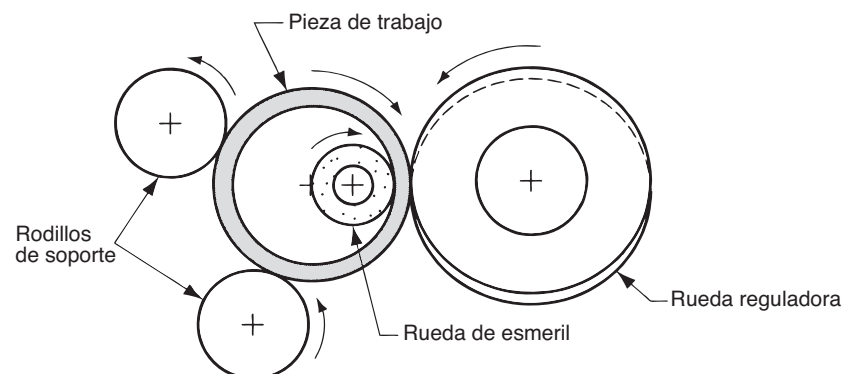


FIGURA 25.12 Esmerilado interno sin centros.

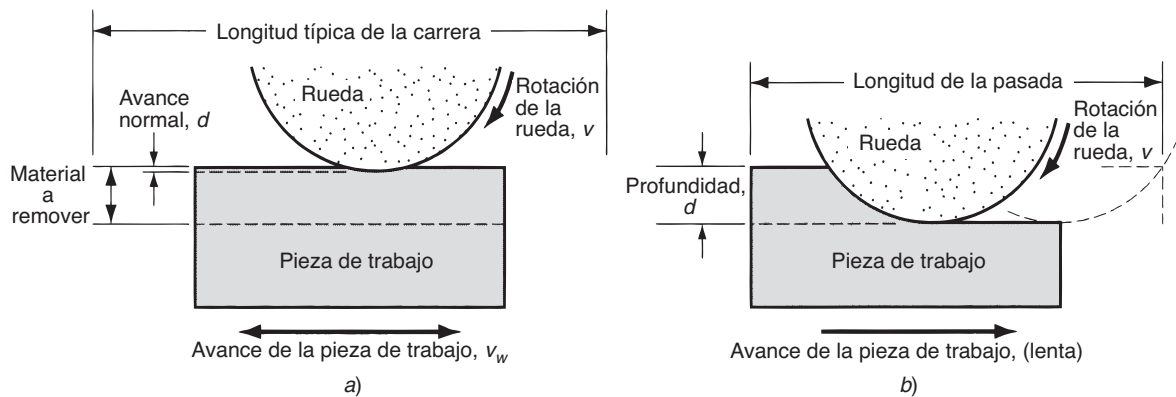


FIGURA 25.13 Comparación de a) esmerilado convencional y b) esmerilado de alta remoción de material.

Las profundidades de corte en el esmerilado de alta remoción son de 1 000 a 10 000 veces más grandes que en el esmerilado superficial convencional, y las velocidades de avance se reducen alrededor de la misma proporción. Sin embargo, la tasa de remoción del material y la productividad se incrementan debido a que la rueda corta de manera continua. Esto contrasta con el esmerilado convencional en el cual el movimiento oscilante del trabajo da como resultado una pérdida significativa de tiempo durante cada carrera.

El esmerilado de alta remoción puede aplicarse en el esmerilado de superficies planas y en el esmerilado cilíndrico externo. Las aplicaciones del esmerilado de superficies planas incluyen el esmerilado de ranuras y perfiles. El proceso parece especialmente apropiado para aquellos casos en los cuales la relación entre profundidad y ancho es relativamente grande. Las aplicaciones cilíndricas incluyen roscas, perfiles de engranes formados y otros componentes cilíndricos. El término **esmerilado profundo** se usa en Europa para describir estas aplicaciones del esmerilado cilíndrico externo con avance lento.

Se ha despertado un reciente interés en el esmerilado de alta remoción debido a la introducción de máquinas esmeriladoras diseñadas con características especiales para realizar este proceso. Dentro de estas características están [11] alta estabilidad estática y dinámica, correderas muy precisas con poca tendencia a atascarse, poder incrementado del husillo (dos a tres veces la potencia de las máquinas de esmerilado convencionales), mesas estables para avances lentos, sistemas de manejo de fluidos para esmerilado de alta presión, sistemas capaces de aderezar las ruedas de esmerilado durante el proceso. Las ventajas típicas del esmerilado de alta remoción incluyen: 1) altas tasas de remoción de material, 2) precisión mejorada para piezas contorneadas y 3) temperaturas reducidas en la superficie de trabajo.

Otras operaciones de esmerilado Es necesario mencionar otras operaciones de esmerilado para completar la revisión de esta sección. Se incluyen el afilado de herramientas, esmerilado de interiores vertical, esmeril de discos, rebabadores y bandas abrasivas.

Las herramientas de corte están hechas de acero endurecido y otros materiales duros. Las esmeriladoras **de herramientas** son máquinas de rectificar especiales, de varios diseños para afilar y reacondicionar las herramientas de corte. Estas máquinas tienen dispositivos que posicionan y orientan las herramientas durante el esmerilado de las superficies deseadas, a los ángulos y radios especificados. Algunas de las esmeriladoras de herramientas son de propósito general, mientras que otras tienen el único propósito de generar geometría de tipos específicos de herramienta. Las esmeriladoras de afilado de herramientas de propósito general usan aditamentos especiales y ajustes para acomodar una variedad de configuraciones geométricas de las herramientas. Las esmeriladoras de herramientas de propósito único incluyen afiladores para fresas de engranes, afiladores de fresas de varios tipos, afiladores de brocas y afiladores de punta de brocas.

Las esmeriladoras **de interiores verticales** son máquinas usadas tradicionalmente para rectificar agujeros con alta precisión en piezas de acero endurecido. Las aplicaciones

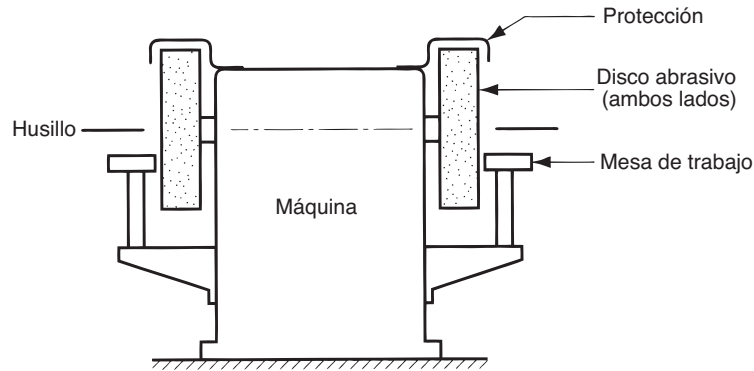


FIGURA 25.14
Configuración típica de un
esmeril de discos.

originales incluyen matrices y troqueles. Aunque estas aplicaciones son todavía importantes, las esmeriladoras de interiores verticales se usan actualmente en un rango más amplio, donde se requiere alta precisión y buen acabado de componentes endurecidos. Hay máquinas de esmerilado interno vertical que disponen de controles numéricos para lograr una operación automatizada.

Los **esmeriles de disco** son máquinas esmeriladoras con discos abrasivos grandes montados en ambos extremos de un husillo horizontal, como se muestra en la figura 25.14. El trabajo se sostiene contra la superficie lateral plana de la rueda (en general, manualmente) para realizar la operación de esmerilado. Algunas máquinas esmeriladoras de disco tienen husillos opuestos dobles. Al ajustar los discos a la separación deseada, la pieza de trabajo puede avanzar en forma automática entre los dos discos y puede esmerilarse simultáneamente sobre los lados opuestos. Las ventajas del esmerilador de discos son una buena planicidad y paralelismo a velocidades altas de producción.

La configuración del **rebabador** es similar al esmeril de disco. La diferencia es que el esmerilado se hace en la periferia de la rueda más que en el lado plano de la rueda. Por lo tanto, el diseño de las ruedas de esmeril es diferente al de los esmeriladores de discos. El rebabado es generalmente una operación manual para operaciones de esmerilado de desbaste, tales como remover la rebaba de piezas fundidas, forjado y alisado de las juntas soldadas.

El **esmerilado con bandas abrasivas** usa partículas abrasivas pegadas a una banda flexible (tela). El arreglo típico se ilustra en la figura 25.15. El soporte de la banda se requiere cuando el trabajo se presiona contra ella; este soporte se consigue por medio de un rodillo o placa localizado atrás de la banda. Se usa una placa plana para trabajos que necesiten superficies planas. Se puede usar una placa suave si se quiere conformar la banda al contorno general de la pieza durante el esmerilado. La velocidad de la banda depende del material que se está esmerilando. El rango típico es de 750 a 1 700 m/min (2 500 a 5 500 ft/min). Debido a los mejoramientos en los abrasivos y en los materiales aglutinantes, cada vez se usan más bandas abrasivas para altas velocidades de remoción de material, en lugar del esmerilado ligero aplicado tradicionalmente. El término **lijadora de banda** se refiere a las aplicaciones ligeras del esmerilado, en las cuales la pieza de trabajo se presiona contra

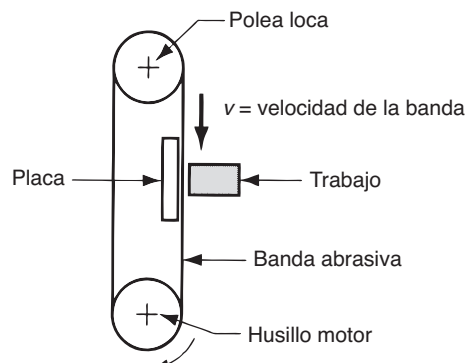


FIGURA 25.15 Esmerilador de banda abrasiva.

la banda para eliminación de rebabas y salientes, y también para producir un mejor acabado en forma rápida y manual.

25.2 PROCESOS ABRASIVOS RELACIONADOS

Otros procesos abrasivos incluyen el rectificado, el bruñido, el superacabado, el pulido y el abrillantado. Éstos se usan exclusivamente como operaciones de acabado. La forma inicial de la pieza se crea mediante algún otro proceso y se termina por medio de alguna de estas operaciones para obtener un acabado superficial superior. Las geometrías usuales de las piezas para estos procesos se indican en la tabla 25.6. Para efectos de comparación, también se presentan los datos correspondientes para el esmerilado.

Otra clase de operaciones de acabado, llamadas acabado en masa (sección 28.2.2), se usan para acabar piezas en forma colectiva más que individual. Estos métodos de acabado masivo se usan también para limpieza y eliminación de rebabas.

25.2.1 Rectificado

El **rectificado** es un proceso abrasivo ejecutado por un conjunto de barras abrasivas pegadas. Una aplicación común es el acabado de las perforaciones en los motores de combustión interna. Otras aplicaciones incluyen cojinetes, cilindros hidráulicos y cañones de pistolas. En estas aplicaciones se logran acabados superficiales cercanos a 0.12 μm (5 $\mu\text{-in}$) o ligeramente menores. El rectificado produce una superficie cruzada transversal característica, que tiende a retener la lubricación durante la operación del componente, contribuyendo a su funcionamiento y vida de servicio.

El proceso de rectificado para una superficie cilíndrica interna se ilustra en la figura 25.16. La herramienta de rectificado consiste en un conjunto de barras abrasivas pegadas. Se usan cuatro barras sobre la herramienta que se muestra en la figura, pero su número depende del tamaño del agujero. Para agujeros pequeños (por ejemplo, cañones de pistola) se podrían usar de dos a cuatro barras, y para agujeros de diámetro más grande se podrían usar una docena o más. El movimiento de la herramienta de rectificado es una combinación de rotación y oscilación lineal, regulada de tal manera que un punto dado de la barra abrasiva no repite la misma trayectoria. Este movimiento bien complejo produce el patrón cruzado transversal sobre la superficie del barreno. Las velocidades de rectificado están entre 15 y 150 m/min (50 y 500 ft/min) [4]. Durante este proceso las barras abrasivas presionan hacia afuera contra la superficie del barreno para producir la acción de corte abrasiva deseada. Son típicas las presiones de rectificado de 1 a 3 MPa (150 a 450 lb/in²), aunque se han reportado presiones fuera de este rango [4]. La herramienta de rectificado se sostiene en el orificio mediante dos juntas universales, lo que ocasiona que la herramienta siga el eje previamente definido del orificio. El rectificado agranda y termina la perforación, pero no puede cambiar su localización.

En el rectificado, el tamaño de los granos fluctúa entre 30 y 600. Tanto en el rectificado como en el esmerilado existe la misma relación entre mejor acabado y velocidades

TABLA 25.6 Geometría usual de las piezas para rectificado, bruñido, superacabado, pulido y abrillantado.

Proceso	Geometría usual de la pieza	Rugosidad superficial	
		μm	$\mu\text{-in}$
Esmerilado, tamaño de grano medio	Plana, cilíndrica externa, agujeros redondos	04-1.6	16-63
Esmerilado, tamaño de grano fino	Plana, cilíndrica externa, agujeros redondos	0.2-0.4	8-16
Rectificado	Agujero redondo (por ejemplo, perforación de motor)	0.1-0.8	4-32
Bruñido	Plana o ligeramente esférica (por ejemplo, lentes)	0.025-0.4	1-16
Superacabado	Superficie plana, cilíndrica externa	0.013-0.2	0.5-8
Pulimentado	Formas diversas	0.025-0.8	1-32
Abrillantado	Formas diversas	0.013-0.4	0.5-16

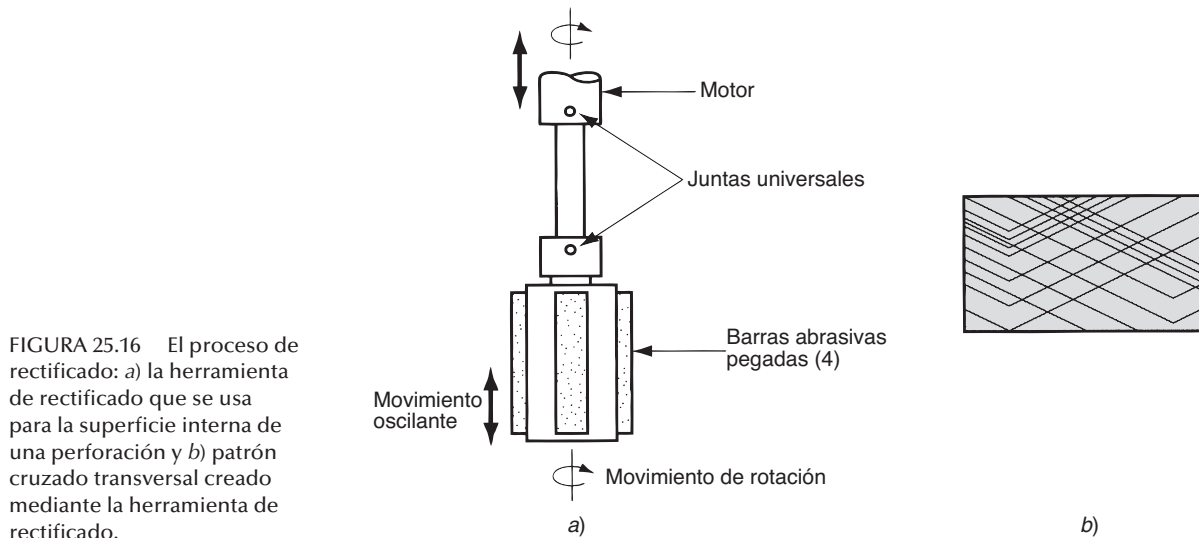


FIGURA 25.16 El proceso de rectificado: a) la herramienta de rectificado que se usa para la superficie interna de una perforación y b) patrón cruzado transversal creado mediante la herramienta de rectificado.

de remoción de material más altas. La cantidad de material removido de la superficie de trabajo durante una operación de rectificado puede ser de hasta 0.5 mm (0.020 in), pero generalmente es mucho menor que esto. En el rectificado, es necesario usar un fluido de corte con el fin de enfriar y lubricar la herramienta y para ayudar a remover las virutas.

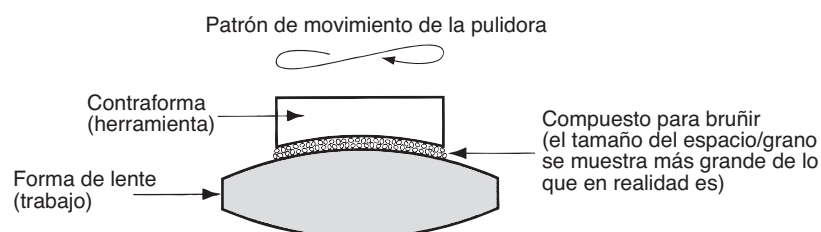
25.2.2 Bruñido

El bruñido es un proceso abrasivo que se usa para producir acabados superficiales de extrema precisión y tersura. Se usa en la producción de lentes ópticos, superficies metálicas para cojinetes, calibradores y otras piezas que requieren acabados muy buenos. Con frecuencia, se bruñen las piezas metálicas que están sujetas a cargas y fatiga o superficies que se usan para formar un sello con una pieza complementaria.

En lugar de una herramienta abrasiva, en el bruñido se usa una suspensión de partículas abrasivas muy pequeñas mezcladas en un fluido entre la pieza de trabajo y la herramienta de bruñir. En la figura 25.17 se ilustra la aplicación del proceso en la fabricación de lentes. Al fluido con abrasivos se le llama **compuesto para bruñir** y tiene la apariencia general de una pasta calcárea. Los fluidos que se usan para hacer el compuesto son aceites y queroseno. Los abrasivos comunes son óxido de aluminio y carburo de silicio con tamaños de grano típicos entre 300 y 600. La herramienta para bruñido se llama **contraforma** y tiene exactamente la contraforma de la forma deseada en la pieza de trabajo. Para realizar el proceso, la contraforma se presiona contra el trabajo y se mueve hacia atrás y adelante sobre la superficie en forma de un ocho u otro patrón de movimiento, sujetando todas las porciones de la superficie a la misma acción. El bruñido se hace algunas veces a mano, pero las máquinas bruñidoras realizan el proceso con mayor consistencia y eficiencia.

Los materiales que se usan para la contraforma van desde acero y fundición de hierro hasta cobre o plomo. Se han hecho ruedas contraforma de madera. Dado que se usa un compuesto de pulido en lugar de una herramienta abrasiva pegada, el mecanismo de este proceso es de alguna forma diferente al esmerilado. Se cree que existen dos mecanismos

FIGURA 25.17 El proceso de bruñir en la elaboración de lentes.



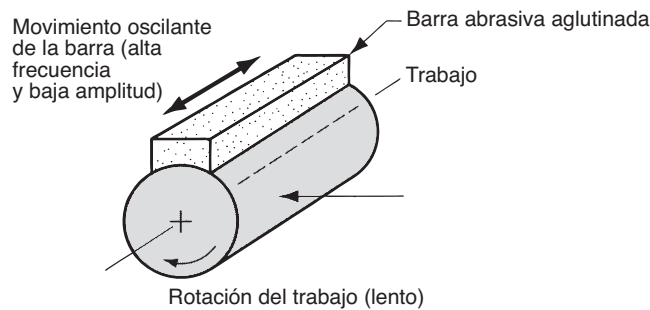


FIGURA 25.18
Superacabado de una
superficie cilíndrica externa.

alternativos de corte en el bruñido [4]. En el primer mecanismo, las partículas abrasivas ruedan y se deslizan entre la rueda de bruñido y el trabajo, y ocurre muy poca acción de corte en ambas superficies. En el segundo mecanismo, los abrasivos quedan incorporados en la superficie de la contraforma y la acción de corte es muy similar al esmerilado. Lo más probable es que el bruñido sea una combinación de estos dos mecanismos, dependiendo de la dureza relativa del trabajo y de la contraforma. Para contraformas de materiales suaves, el mecanismo de incorporación de granos es el dominante y para contraformas duras, domina el rodado y el deslizado.

25.2.3 Superacabado

El superacabado es un proceso abrasivo similar al lapeado. Ambos procesos usan una barra con abrasivo pegado, la cual se mueve mediante una acción oscilante y de compresión contra la superficie que se trabaja. El superacabado difiere del bruñido en los siguientes aspectos [4]: 1) los recorridos son más cortos, 5 mm (3/16 in); 2) se usan frecuencias más altas (hasta 1 500 recorridos por minuto); 3) se aplican presiones más bajas entre la herramienta y la superficie, debajo de 0.28 MPa (40 lb/in²); 4) las velocidades de la pieza de trabajo son más bajas 15 m/min (50 ft/min) o menos; y 5) los tamaños de granos son generalmente menores. El movimiento relativo entre la barra abrasiva y la superficie de trabajo es variado, de manera que los granos individuales no recorren la misma trayectoria. Se usa un fluido de corte para enfriar la superficie del trabajo y eliminar las virutas. Además, el fluido tiende a separar la barra abrasiva de la superficie de trabajo después de que se alcanza un cierto nivel de tersura en las superficies; de esta forma se previene una acción posterior de corte. El resultado de estas condiciones de operación son acabados similares al de un espejo con valores en la rugosidad superficial cercanos a 0.025 μm (1 $\mu\text{-in}$). El superacabado puede usarse para superficies planas y cilíndricas externas. El proceso se ilustra en la figura 25.18 para estas últimas geometrías.

25.2.4 Pulimentado y abrillantado

El **pulimentado** se usa para remover arañazos y rebabas y para alisar las superficies gruesas por medio de granos abrasivos pegados a una rueda de pulimentado que gira a altas velocidades, alrededor de 2 300 m/min (7 500 ft/min). Las ruedas se hacen de lona, cuero, fieltro e incluso papel; así, estas ruedas son un tanto flexibles. Los granos abrasivos se pegan en la periferia de la rueda. Cuando se gastan los abrasivos, se le vuelven a pegar a la rueda nuevos granos. El tamaño de los granos es de 20 a 80 para pulimentado basto y de 90 a 120 para pulimentado fino, y arriba de 120 para acabados más finos. A menudo, las operaciones de pulimentado se realizan a mano.

El **abrillantado** es similar en apariencia al pulimentado, pero su función es diferente. El abrillantado se usa para producir superficies atractivas de alto lustre. Las ruedas de abrillantado se hacen de materiales similares a las ruedas de pulido (cuero, fieltro, algodón,

etcétera) pero las ruedas de abrillantado por lo general son más suaves. Los abrasivos son muy finos y están contenidos en un compuesto de abrillantado que se presiona en la superficie externa de la rueda mientras gira. Esto contrasta con el pulimentado, en el cual los granos de abrasivos están pegados a la superficie de la rueda. Las partículas abrasivas deben reponerse periódicamente como en el pulimentado. El abrillantado se hace por lo general manualmente, como en el pulimentado, aunque se han diseñado máquinas para realizar el proceso de manera automática. Las velocidades están entre 2 400 y 5 200 m/min (8 000 y 17 000 ft/min).

REFERENCIAS

- [1] Aronson, R. B., "More Than a Pretty Finish", *Manufacturing Engineering*, febrero de 2005, pp. 57-69.
- [2] Andrew, C., Howes, T. D. y Pearce, T. R. A., *Creep Feed Grinding*, Holt, Rinehart and Winston, Ltd., Londres, 1985.
- [3] **ANSI Standard B74.13-1977**, "Markings for Identifying Grinding Wheels and Other Bonded Abrasives", American National Standards Institute, Nueva York, 1977.
- [4] Armarego, E. J. A. y Brown, R. H., *The Machining of Metals*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1969.
- [5] Bacher, W. R. y Merchant, M. E., "On the Basic Mechanics of the Grinding Process", *Transactions ASME*, Serie B, vol. 80, núm. 1, 1958, pp. 141.
- [6] Black, P. H., *Theory of Metal Cutting*, McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1961.
- [7] Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, 2a. ed., Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1989.
- [8] Boston, O. W., *Metal Processing*, 2a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1951.
- [9] Cook, N. H., *Manufacturing Analysis*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1966.
- [10] DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Kohser, R. A., *Materials and Processes in Manufacturing*, 9a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.
- [11] Drozda, T. J. y Wick, C. (eds.), *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., Vol. I. *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1983.
- [12] Eary, D. F. y Johnson, G. E., *Process Engineering for Manufacturing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1962.
- [13] Kaiser, R., "The Facts about Grinding", *Manufacturing Engineering*, vol. 125, núm. 3, septiembre de 2000, pp. 78-85.
- [14] Krabacher, E. J., "Factors Influencing the Performance of Grinding Wheels", *Transactions ASME*, Serie B, vol. 81, núm. 3, 1959, pp. 187-199.
- [15] Krar, S. F., *Grinding Technology*, 2da. ed., Delmar Publishers, 1995.
- [16] *Machining Data Handbook*, 3a. ed., vol. I y II. Metcut Research Associates, Inc., Cincinnati, Ohio, 1980.
- [17] Malkin, S., *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1996.
- [18] Phillips, D., "Creeping Up", *Cutting Tool Engineering*, vol. 52, núm. 3, marzo de 2000, pp. 32-43.
- [19] Salmon, S., "Creep-Feed Grinding Is Surprisingly Versatile." *Manufacturing Engineering*, noviembre de 2004, pp. 59-64.

PREGUNTAS DE REPASO

- 25.1 ¿Por qué los procesos abrasivos son tecnológica y comercialmente importantes?
- 25.2 ¿Cuáles son los cinco parámetros principales de una rueda de esmerilado?
- 25.3 ¿Cuáles son algunos de los materiales abrasivos que se usan en la rueda de esmerilado?
- 25.4 Mencione algunos de los principales materiales aglutinantes que se usan en las ruedas de esmerilado.
- 25.5 ¿Qué es la estructura de la rueda?
- 25.6 ¿Qué es la dureza de la rueda de esmeril?
- 25.7 ¿Por qué los valores de la energía específica son mucho más altos en el esmerilado que en los procesos tradicionales de maquinado como el fresado?
- 25.8 El esmerilado crea altas temperaturas. ¿De qué manera resulta dañina la temperatura en este proceso?
- 25.9 ¿Cuáles son los tres mecanismos de desgaste de las ruedas de esmeril?
- 25.10 ¿Qué es la operación llamada aderezado, con referencia a las ruedas de esmerilado?
- 25.11 ¿Qué es el formado en relación con las ruedas de esmerilado?
- 25.12 ¿Qué materiales abrasivos se seleccionan para afilar una herramienta de corte de carburo cementado?

- 25.13 ¿Cuáles son las funciones de un fluido de esmerilado?
 25.14 ¿Qué es el esmerilado sin centros?
 25.15 ¿En qué difiere el esmerilado de alta remoción del esmerilado convencional?
 25.16 ¿En qué difiere el esmerilado con bandas abrasivas de las operaciones de esmerilado de superficies planas?
 25.17 Mencione algunas de las operaciones abrasivas de que se dispone para lograr muy buenos acabados superficiales.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 16 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea la calificación se reduce un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de la calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

- 25.1. ¿Cuál de los siguientes procesos de maquinado convencional está más cercano al esmerilado? *a)* taladrado, *b)* fresado, *c)* cepillado o *d)* torneado.
 25.2. De los siguientes materiales abrasivos, ¿cuál es el que tiene la dureza más alta? *a)* óxido de aluminio, *b)* nitruro de boro cúbico, *c)* diamante o *d)* carburo de silicio.
 25.3. ¿Cuál de los siguientes efectos tiende a provocar el tamaño de grano más pequeño en una rueda de esmeril? *a)* degradar el acabado superficial, *b)* no tiene efecto en el acabado superficial o *c)* mejorar el acabado superficial.
 25.4. ¿Cuál de las siguientes opciones proporcionaría velocidades más altas de remoción de material? *a)* tamaño más grande de grano o *b)* tamaño más pequeño de grano.
 25.5. ¿Cuál de las siguientes opciones mejora el acabado superficial en el esmerilado? (tres de las respuestas posibles son las mejores): *a)* estructura más densa de la rueda, *b)* mayor velocidad de la rueda, *c)* velocidades del trabajo más altas, *d)* mayor avance normal, *e)* menor avance normal, *f)* menor velocidad de la rueda, *g)* menor velocidad del trabajo y *h)* estructura más abierta de la rueda.
 25.6. ¿Cuál de los siguientes materiales abrasivos es el más apropiado para esmerilado de acero y hierro fundido?: *a)* óxido de aluminio, *b)* nitruro de boro cúbico, *c)* diamante o *d)* carburo de silicio.
 25.7. ¿Cuál de los siguientes materiales abrasivos es el más apropiado para esmerilado de acero de herramienta endurecido?: *a)* óxido de aluminio, *b)* nitruro de boro cúbico, *c)* diamante o *d)* carburo de silicio.
 25.8. ¿Cuál de los siguientes materiales abrasivos es el más apropiado para esmerilado de metales no ferrosos?: *a)* óxido de aluminio, *b)* nitruro de boro cúbico, *c)* diamante, *d)* carburo de silicio.
 25.9. ¿Cuál de las siguientes opciones ayuda a reducir la incidencia del daño por calor en la superficie de trabajo en esmerilado? (hay cuatro respuestas correctas) *a)* labrado o rectificado frecuente de la rueda, *b)* mayor avance normal, *c)* velocidades de rueda más altas, *d)* velocidades del trabajo más altas, *e)* menor avance normal, *f)* velocidades de la rueda más bajas, *g)* velocidades del trabajo más bajas.
 25.10. ¿Con cuál de los siguientes procesos abrasivos se logra el mejor acabado superficial?: *a)* esmerilado sin centros, *b)* bruñido, *c)* pulido o *d)* superacabado.
 25.11. ¿El término esmerilado de alta remoción se refiere a cuál de las siguientes descripciones? *a)* nombre alternativo de cualquier operación de esmerilado de alta remoción, *b)* esmerilado de alta remoción cilíndrico externo, *c)* operación de esmerilado ejecutado en el fondo de un agujero, *d)* esmerilado de superficies que usa un avance transversal grande, *e)* esmerilado de superficies que usa un avance normal grande.

PROBLEMAS

- 25.1. En cierta operación de esmerilado de superficies el diámetro de la rueda = 150 mm y el avance normal = 0.07 mm. La velocidad de la rueda = 1 450 m/min, la velocidad del trabajo = 0.25 m/s y el avance transversal = 5 mm. El número de granos activos por área de la superficie de la rueda = 0.75 granos/mm². Determine *a)* la longitud promedio por viruta, *b)* la velocidad de remoción de metal y *c)* el número de virutas formadas por unidad de tiempo para la porción de la operación cuando la rueda está trabajando.
 25.2. Las siguientes condiciones y configuraciones se usan en cierta operación de esmerilado de superficies: diámetro de la rueda = 6.0 in, velocidad de la rueda = 4 750 ft/min, velocidad del trabajo = 50 ft/min y el avance transversal = 0.20 in. El número de granos activos por pulgada cuadrada de la superficie de la rueda = 500. Determine *a)* la longitud promedio por viruta, *b)* la velocidad de remoción de metal y *c)* el número de virutas formadas por unidad de tiempo para la porción de la operación cuando la rueda está trabajando.
 25.3. Se usa una operación de esmerilado cilíndrico para acabar el interior de un orificio desde un diámetro inicial de 250.00 mm hasta un diámetro final de 252.5 mm. El orificio tiene una longitud de 125 mm. Se usa una rueda de esmerilado con un diámetro inicial de 150.00 mm y una anchura de 20.0 mm. Después de la operación, el diámetro de la rueda de

esmeril se ha reducido a 149.75 mm. Determine la relación de esmerilado en esta operación.

- 25.4 En una operación de esmerilado superficial que se realiza sobre una pieza plana de acero al carbono endurecido, la rueda de esmeril tiene un diámetro = 200 mm y una anchura de 25 mm. La rueda gira a 2 400 rev/min, con una profundidad de corte (avance normal) = 0.05 mm/paso y un avance transversal = 3.50 mm. La velocidad oscilante del trabajo es de 6 m/min y la operación se ejecuta en seco. Determine *a*) la longitud del contacto entre la rueda y el trabajo y *b*) la velocidad del volumen de metal removido. *c*) Si hay 64 granos activos/cm² en la superficie de la rueda, estime el número de virutas formadas por unidad de tiempo. *d*) ¿Cuál es el volumen promedio por viruta? *e*) Si la fuerza cortante tangencial sobre el trabajo = 30 N, calcule la energía específica en esta operación.
- 25.5 Se usa una rueda de esmeril de 8 in de diámetro y 1.0 in de ancho en el esmerilado de cierta superficie en un trabajo sobre una pieza plana de acero 4340 tratado térmicamente. La rueda gira para alcanzar 5 000 ft/min, con una profundidad de corte (avance normal) = 0.002 in por paso y un avance transversal = 0.15 in. La velocidad oscilante del trabajo es = 20 ft/min y la operación se ejecuta en seco. *a*) ¿Cuál es la longitud de contacto entre la rueda y el trabajo?, *b*) ¿cuál es la velocidad del volumen del material removido? *c*) Si hay 300 granos activos/in² en la superficie de la rueda, estime el número de virutas formadas por unidad de tiempo, *d*) ¿Cuál es el volumen promedio por viruta? *e*) Si la fuerza de corte tangencial sobre la pieza de trabajo = 10 lbs, ¿cuál es la energía específica calculada para este trabajo?
- 25.6 Se ejecuta una operación de esmerilado de superficies sobre una pieza de trabajo de acero 6150 (con dureza aproximada de 200 BHN). La designación de la rueda de esmeril es C-24-D-5-V. La rueda tiene 7.0 in de diámetro, 1.00 in de ancho y opera con una velocidad rotacional de 3 000 rev/min. La profundidad (avance normal) = 0.002 in por paso y el avance transversal = 0.5 in. La velocidad de la pieza de trabajo = 20 ft/min. Esta operación ha sido una fuente de problemas casi desde el principio. El acabado superficial no es tan bueno como las 16 μ -in que se especifican en la etiqueta de la pieza y hay señales de daño metalúrgico en la superficie. Además, la rueda parece saturarse casi tan pronto como empieza la operación. En resumen, casi siempre las cosas han salido mal desde el principio. *a*) Determine la velocidad de remoción de metal cuando la rueda está trabajando, *b*) si el número de granos activos por pulgada cuadrada = 200, determine la longitud promedio de las virutas y el número de ellas formadas por unidad de tiempo, *c*) ¿qué cambios recomendaría usted en la rueda de esmeril para ayudar a resolver los problemas que se han encontrado? Explique las razones de cada recomendación.
- 25.7 En cierta operación de esmerilado sin centros, la rueda de esmeril tiene 200 mm de diámetro y la rueda reguladora tiene 125 mm de diámetro. La rueda de esmeril gira a 3 000 rev/min y la rueda reguladora lo hace a 200 rev/min. El ángulo de inclinación de la rueda reguladora = 2.5°. Determine la velocidad de avance de las piezas de trabajo cilíndricas que tienen 25.0 mm de diámetro y 175 mm de largo.
- 25.8 Una operación de esmerilado sin centros usa una rueda reguladora de 150 mm de diámetro, con una velocidad de rotación = 500 rev/min. ¿A qué ángulo de inclinación debe colocarse la rueda reguladora si se desea alimentar una pieza de trabajo de 3.5 m de largo y 18 mm de diámetro a través de la operación en exactamente 45 segundos?
- 25.9 En cierta operación de esmerilado sin centros, la rueda de esmeril tiene 8.5 in de diámetro y la rueda reguladora tiene 5.0 in de diámetro. La rueda de esmeril gira a 3 500 rev/min y la rueda reguladora gira a 150 rev/min. El ángulo de inclinación de la rueda reguladora = 3°. Determine la velocidad de avance de piezas cilíndricas que tienen 1.25 in de diámetro y 8.0 in de largo?
- 25.10 Se desea comparar las duraciones del ciclo requerido para esmerilado de una pieza de trabajo particular usando el esmerilado superficies de tradicional y el esmerilado de alta remoción. La pieza de trabajo tiene 200 mm de largo, 30 mm de ancho y 75 mm de espesor. Para hacer una buena comparación, la rueda de esmeril en ambos casos tiene 250 mm de diámetro, 35 mm de ancho y gira a 1 500 rev/min. Se desea remover 25 mm de material de la superficie. Cuando se usa el esmerilado tradicional, el avance normal se ajusta a 0.025 mm y la rueda atraviesa dos veces (hacia adelante y hacia atrás) a través de la superficie del trabajo en cada paso antes de reajustar el avance normal. No hay avance transversal porque el ancho de la rueda es mayor que el ancho del trabajo. Cada paso se hace a una velocidad de trabajo de 12 m/min, pero la rueda sobrepasa la pieza en ambos lados. Con aceleración y desaceleración, la rueda trabaja 50% del tiempo en cada paso. Cuando se usa el esmerilado de alta remoción, la profundidad se incrementa en 1000 y el avance hacia adelante disminuye en 1000. ¿Cuánto tiempo se requiere para completar la operación de esmerilado? *a*) con esmerilado tradicional y *b*) con esmerilado de alta remoción.
- 25.11 En cierta operación de esmerilado, el grado de la rueda de esmeril debería ser “M” (medio), pero sólo se dispone de una rueda de grado “T” (duro). Se desea hacer que la rueda parezca más suave haciendo cambios en las condiciones de corte. ¿Qué cambios recomendaría usted?
- 25.12 Se esmerila una aleación de aluminio en una operación de esmerilado cilíndrico externo para obtener un buen acabado superficial. Especifique los parámetros adecuados de la rueda de esmeril y las condiciones de esmerilado para este trabajo.
- 25.13 Se reafila un escariador (endurecido) de acero de alta velocidad para lograr un buen acabado. Especifique los parámetros adecuados de la rueda de esmeril para este trabajo.
- 25.14 Con base en las ecuaciones del texto, obtenga una ecuación para calcular el volumen promedio por viruta formada en el proceso de esmerilado.

26

PROCESO DE MAQUINADO NO TRADICIONAL Y DE CORTE TÉRMICO

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 26.1 Procesos de energía mecánica
 - 26.1.1 Maquinado ultrasónico
 - 26.1.2 Procesos con chorro de agua y chorro abrasivo
- 26.2 Procesos de maquinado electroquímico
 - 26.2.1 Maquinado electroquímico
 - 26.2.2 Remoción de virutas y esmerilado con material electroquímico
- 26.3 Procesos de energía térmica
 - 26.3.1 Procesos con descarga eléctrica
 - 26.3.2 Maquinado con haz de electrones
 - 26.3.3 Maquinado con haz láser
 - 26.3.4 Procesos de corte con arco eléctrico
 - 26.3.5 Procesos de corte con oxígeno y gas combustible
- 26.4 Maquinado químico
 - 26.4.1 Mecánica y química del maquinado químico
 - 26.4.2 Procesos de maquinado químico
- 26.5 Consideraciones para la aplicación

Los procesos de maquinado convencionales (por ejemplo, el torneado, el taladrado y el fre-sado) usan una herramienta de corte afilada para formar una viruta en un trabajo mediante una deformación cortante. Además de estos métodos convencionales, existe un grupo de procesos que usa otros mecanismos para remover materiales. El término ***maquinado no tradicional*** se refiere a este grupo de procesos, los cuales remueven el exceso de material mediante diversas técnicas que incluyen la energía mecánica, térmica, eléctrica o química (o combinaciones de ellas). Estos procesos no usan un instrumento afilado de corte en el sentido convencional.

Desde la Segunda Guerra Mundial se han desarrollado procesos no tradicionales, como respuesta a las necesidades nuevas y específicas que no pueden satisfacerse mediante

métodos convencionales. Estas necesidades y la importancia comercial y tecnológica resultante de los procesos no tradicionales incluyen:

- La necesidad de maquinar metales y no metales de reciente creación. Con frecuencia, estos materiales nuevos tienen propiedades especiales (por ejemplo: resistencia, tenacidad y alta dureza) que dificultan o imposibilitan su maquinado mediante métodos convencionales.
- La necesidad de obtener geometrías de piezas inusuales o complejas que no se obtienen con facilidad y que, en algunos casos, son imposibles de lograr mediante maquinado convencional.
- La necesidad de evitar daños externos en una pieza, lo cual sucede frecuentemente por los esfuerzos que surgen por el maquinado convencional.

Muchas de estas necesidades están asociadas con las industrias aeroespacial y electrónica, las cuales se han desarrollado en forma significativa durante las recientes décadas.

Existen literalmente docenas de procesos de maquinado no tradicionales y gran parte de ellos son únicos en su rango de aplicaciones. En este capítulo se analizarán los de mayor importancia comercial. Varias de las referencias bibliográficas de este libro contienen análisis más detallados de estos métodos no tradicionales.

A menudo, los procesos no tradicionales se clasifican de acuerdo con la forma principal de energía que usan para la remoción de materiales. En esta clasificación hay cuatro tipos:

1. **Mecánicos.** En estos procesos no tradicionales se utiliza energía mecánica en alguna forma diferente a la acción de una herramienta de corte convencional. La forma típica de acción mecánica en estos procesos es la erosión del trabajo mediante un chorro a alta velocidad de abrasivos o fluidos (o ambos).
2. **Eléctricos.** Estos procesos no tradicionales usan energía electroquímica para la remoción de material; el mecanismo es lo opuesto al de galvanoplastia.
3. **Térmicos.** Estos procesos usan energía térmica para cortar o dar forma a una pieza de trabajo. Por lo general se aplica energía térmica a una parte muy pequeña de la superficie de trabajo, lo que provoca que esa parte se remueva por fusión o vaporización del material. La energía térmica se genera mediante la conversión de energía eléctrica en energía térmica.
4. **Químicos.** La mayoría de los materiales (en particular los metales) son susceptibles de ataques químicos por medio de ciertos ácidos y otras sustancias. En el maquinado químico, las sustancias seleccionadas remueven material de ciertas porciones de la pieza de trabajo, mientras que otras porciones de la superficie se protegen con una máscara.

26.1 PROCESOS DE ENERGÍA MECÁNICA

En esta sección se examinarán varios de los procesos no tradicionales de energía mecánica:

1) el maquinado ultrasónico, 2) el corte con chorro de agua, 3) el corte con chorro de agua abrasiva y 4) el maquinado con chorro abrasivo.

26.1.1 Maquinado ultrasónico

El **maquinado ultrasónico** (USM, por sus siglas en inglés) es un proceso de maquinado no tradicional en el cual se utilizan abrasivos a alta velocidad contenidos en una pasta fluida sobre un trabajo, mediante una herramienta vibratoria en amplitud baja, alrededor de 0.075 mm (0.003 in) y en una alta frecuencia, aproximadamente 20 000 Hz. La herramienta oscila en una dirección perpendicular a la superficie de trabajo y avanza lentamente hacia el trabajo para que la pieza adopte la forma deseada. Sin embargo, la acción de los abrasivos

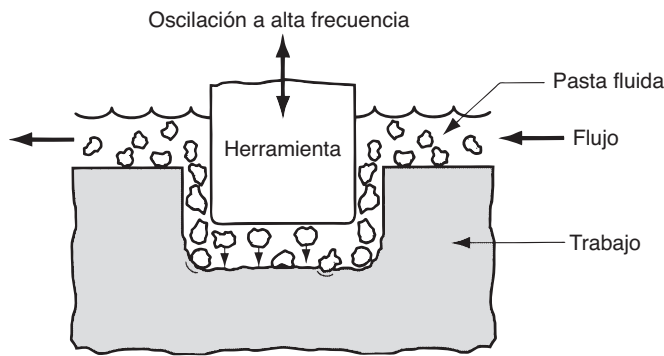


FIGURA 26.1 Maquinado ultrasónico.

es lo que ejecuta el corte, al chocar contra la superficie de trabajo. El arreglo general del proceso de USM se muestra en la figura 26.1.

Los materiales de herramienta comunes que se usan en el USM incluyen el acero suave y el acero inoxidable. Los materiales abrasivos incluyen el nitrato de boro, el carburo de boro, el óxido de aluminio, el carburo de silicio y el diamante. El tamaño de los granos (sección 16.1.1) varía entre 100 y 2 000. La amplitud de vibración debe establecerse aproximadamente igual al tamaño del grano y el tamaño del espaciamiento debe mantenerse en alrededor de dos veces el del grano. En un grado significativo, el tamaño del grano determina el acabado superficial en la nueva superficie de trabajo.

Además del acabado superficial, la velocidad de remoción de materiales es una importante variable de rendimiento en el maquinado ultrasónico. Para determinado material de trabajo, la velocidad de remoción en el USM aumenta, al incrementar la frecuencia y la amplitud de vibración, como se muestra en la figura 26.2.

La acción de corte en el USM afecta tanto a la herramienta como al trabajo. Conforme las partículas abrasivas erosionan la superficie de trabajo, también desgastan la herramienta y afectan su forma. Por lo tanto, es importante conocer los volúmenes relativos que se remueven del material de trabajo y de la herramienta durante el proceso, de manera semejante a la relación de esmerilado (sección 25.1.2). Esta relación de materia prima removida por desgaste de la herramienta varía para los diferentes materiales de trabajo, en proporciones que van desde 100:1 para cortar vidrio, hasta 1:1 para cortar acero de herramienta.

La pasta fluida en el USM consiste en una mezcla de agua y partículas abrasivas. La concentración de abrasivos en el agua varía de 20% a 60% [5]. La pasta debe circular en forma continua para que entren en acción los granos frescos en el espaciamiento entre la herramienta y el trabajo. También sirve para retirar las rebabas y los restos de esmeril producidos por el proceso de corte.

El maquinado ultrasónico se creó por la necesidad de maquinar materiales de trabajo duros y frágiles, tales como la cerámica, el vidrio y los carburos. También se usa con éxito sobre ciertos materiales, tales como el acero inoxidable y el titanio. Las formas que se obtienen mediante el USM incluyen orificios no redondeados, orificios a lo largo de un eje curvo y operaciones de acuñado, en las cuales se imparte un patrón de imágenes en la herramienta para una superficie de trabajo plana.

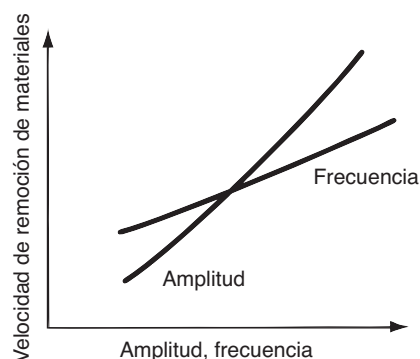


FIGURA 26.2 Efecto de la frecuencia de oscilación y la amplitud sobre la velocidad de remoción de materiales en el maquinado ultrasónico.

26.1.2 Procesos con chorro de agua y chorro abrasivo

Los procesos descritos en esta sección remueven material mediante chorros de agua a alta velocidad, chorros abrasivos o una combinación de ambos.

Corte con chorro de agua El *corte con chorro de agua* (WJC, por sus siglas en inglés) usa una corriente fina de agua a alta presión y velocidad dirigida hacia la superficie de trabajo para producir un corte, como se ilustra en la figura 26.3. Para este proceso también se emplea el nombre *maquinado hidrodinámico*, pero el término de uso más frecuente en la industria parece ser corte con chorro de agua.

Para obtener un chorro fino de agua, se usa una pequeña abertura de boquilla con un diámetro de 0.1 a 0.4 mm (0.004 a 0.016 in). Para proporcionar al chorro una energía suficiente para poder cortar, se usan presiones hasta de 400 MPa (60 000 lb/in²) y el chorro alcanza velocidades hasta de 900 m/s (3 000 ft/s). Una bomba hidráulica presuriza el fluido al nivel deseado. La unidad de boquilla consiste en un soporte hecho de acero inoxidable y una boquilla de zafiro, rubí o diamante. El diamante dura más, pero es el más costoso. En el WJC deben usarse sistemas de filtración para separar las rebabas producidas durante el corte.

Los fluidos de corte en el WJC son soluciones de polímeros, las cuales se prefieren debido a que tienden a producir un chorro consistente. Ya se han analizado los fluidos de corte en el contexto del maquinado convencional (sección 23.4), pero el término se usa de manera más adecuada en el WJC.

Los parámetros de proceso importantes en el WJC incluyen la distancia de separación, el diámetro de abertura de la boquilla, la presión del agua y la velocidad de avance del corte. En la figura 26.3, la *distancia de separación* es la distancia entre la boquilla y la superficie de trabajo. En general, se prefiere que esta distancia sea mínima para reducir la dispersión del chorro de fluido antes de que golpee la superficie. Una distancia de separación normal es de 3.2 mm (0.125 in). El tamaño del orificio de la boquilla afecta la precisión del corte; las aberturas más pequeñas se usan para cortes más finos sobre materiales más delgados. Para cortar materia prima más gruesa se requieren chorros de fluido más densos y mayores presiones. La velocidad de avance del corte se refiere a la velocidad a la que se mueve la boquilla a lo largo de la trayectoria de corte. La velocidad de avance típica varía desde 5 mm/s (12 in/min) hasta más de 500 mm/s (1 200 in/min), dependiendo del material de trabajo y su grosor [5]. Por lo general, el WJC se realiza en forma automática usando un control numérico computarizado o robots industriales para manipular la unidad de boquilla a lo largo de la trayectoria deseada.

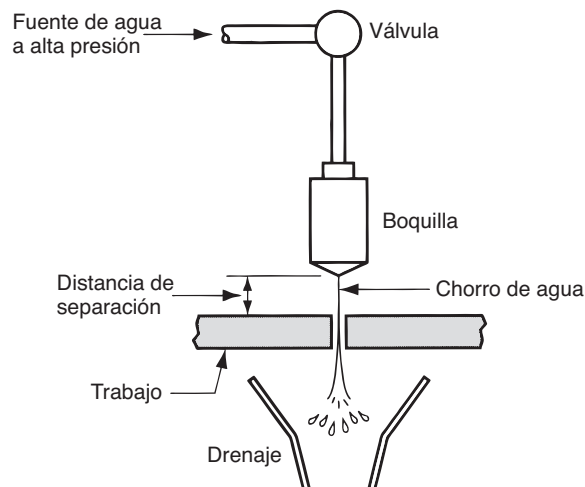


FIGURA 26.3 Corte con chorro de agua.

El corte con chorro de agua se usa en forma eficaz para obtener tiras de materia prima plana, como plásticos, textiles, materiales compuestos, mosaicos para pisos, alfombras, piel y cartulinas. Se han instalado celdas robóticas con boquillas para WJC ensambladas como la herramienta de un robot para seguir patrones tridimensionales de corte irregular, por ejemplo para cortar y rebordear tableros de automóvil antes del ensamble [8]. En estas aplicaciones, las ventajas del WJC incluyen 1) que la superficie de trabajo no se deforma ni quema como en otros procesos mecánicos o térmicos, 2) la pérdida de material es mínima porque la ranura de corte es estrecha, 3) se reduce la contaminación ambiental y 4) existe la facilidad de automatizar el proceso usando control numérico o robots industriales. Una limitación del WJC es que no es conveniente para cortar materiales frágiles (por ejemplo, vidrio), porque tienden a resquebrajarse durante el proceso.

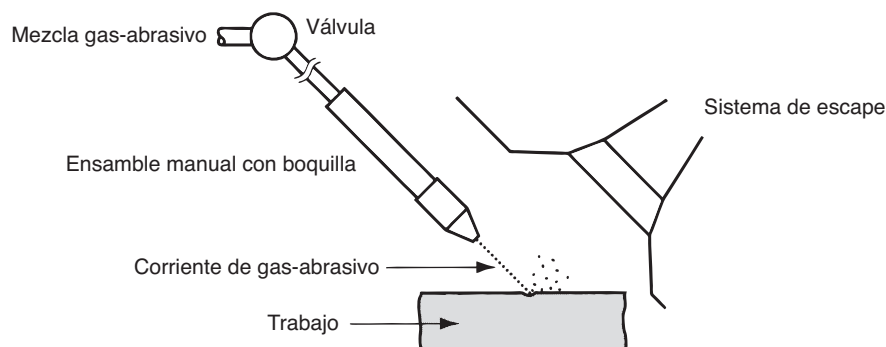
Corte con chorro de agua abrasiva Cuando se usa un WJC sobre piezas metálicas, por lo general debe agregarse partículas abrasivas a la corriente a chorro para facilitar el corte. Por lo tanto, este proceso se denomina **corte con chorro de agua abrasiva** (en inglés AWJC). La incorporación de las partículas abrasivas al flujo complica el proceso porque aumenta la cantidad de parámetros que deben controlarse. Entre los parámetros de proceso adicionales están el tipo de abrasivo, el tamaño del grano y la proporción de abrasivo en el flujo. Entre los materiales abrasivos comunes están el óxido de aluminio, el dióxido de silicio y el granate (un mineral de silicato); los tamaños del grano varían entre 60 y 120. Las partículas abrasivas se agregan al chorro de agua a aproximadamente 0.25 kg/min (0.5 lb/min) después de que salen de la boquilla para el WJC.

Los parámetros de proceso restantes incluyen algunos que son comunes para el WJC: el diámetro de abertura de la boquilla, la presión del agua y la distancia de separación. Los diámetros del orificio de la boquilla varían de 0.25 a 0.63 mm (0.010 a 0.025 in), el tamaño es más grande que en el corte con chorro de agua y permite que el chorro sea más denso y con mayor energía antes de la adición de abrasivos. Las presiones del agua son semejantes a las del WJC. Las distancias de separación son menores para reducir el efecto de la dispersión del fluido de corte, el cual contiene partículas abrasivas en esta etapa. Las distancias de separación típicas están entre una cuarta parte y la mitad de las que se usan en el WJC.

Maquinado con chorro abrasivo No debe confundirse el corte con chorro de agua abrasiva con el proceso denominado **maquinado con chorro abrasivo** (AJM, por sus siglas en inglés), el cual es un proceso de remoción de materiales que se produce por la acción de un flujo de gas a alta velocidad que contiene pequeñas partículas abrasivas, como se muestra en la figura 26.4. El gas es seco y se usan presiones de 0.2 a 1.4 MPa (25 a 200 lb/in²) para propulsar el gas por los orificios de la boquilla con un diámetro de 0.075 a 1.0 mm (0.003 a 0.040 in), a velocidades de 2.5 a 5.0 m/s (500 a 1 000 ft/min). Los gases incluyen el aire seco, el nitrógeno, el dióxido de carbono y el helio.

Por lo general, el proceso lo realiza un operador en forma manual, quien dirige la boquilla hacia el trabajo. Las distancias típicas entre la punta de la boquilla y la superficie

FIGURA 26.4 Maquinado con chorro abrasivo (AJM).



de trabajo varían entre 3 mm y 75 mm (0.125 y 3 in). La estación de trabajo debe contar con ventilación apropiada para el operador.

Normalmente, el AJM se usa como proceso de acabado y no como proceso de corte en la producción. Las aplicaciones incluyen el rebabeado, el retiro de virutas de cizallado y retiro de excedentes de material de forjado, la limpieza y el pulido. Los cortes se llevan a cabo sobre materiales duros y frágiles (por ejemplo, vidrio, silicio, mica y cerámica) que están en forma de materias primas planas y delgadas. Los abrasivos normales usados en el maquinado con chorro abrasivo incluyen el óxido de aluminio (para aluminio y latón), el carburo de silicio (para acero inoxidable y cerámica) y las perlas de vidrio (para pulido). Los tamaños de grano son pequeños, sus diámetros oscilan entre 15 y 40 μm (0.006 y 0.0016 in) y su tamaño debe ser muy uniforme para determinadas aplicaciones. Es importante no reciclar los abrasivos debido a que los granos usados se fracturan (por lo cual se reduce su tamaño), se gastan y contaminan.

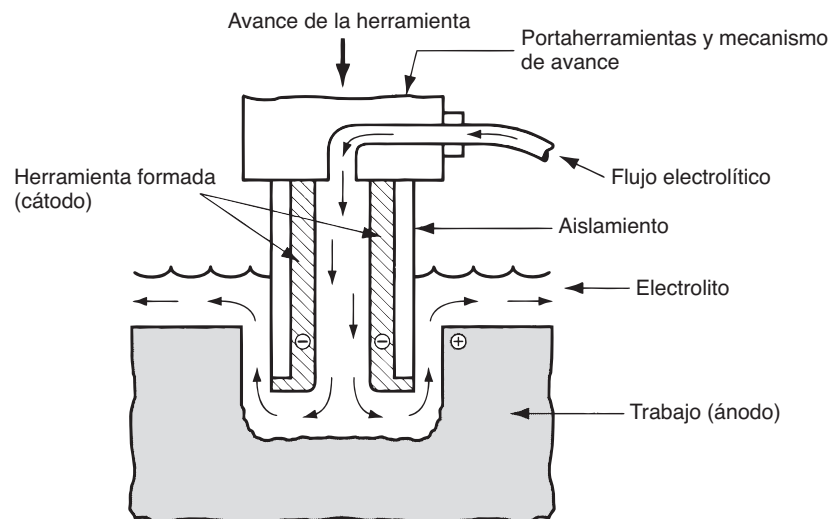
26.2 PROCESOS DE MAQUINADO ELECTROQUÍMICO

Un grupo importante de procesos no tradicionales utiliza la energía eléctrica para la remoción de material. Este grupo se identifica con el término de **procesos electroquímicos**, debido a que se usa la energía eléctrica junto con reacciones químicas para obtener la remoción. De hecho, estos procesos son lo opuesto a la galvanoplastia (sección 29.1.1). El material de trabajo debe ser conductor en el maquinado electroquímico.

26.2.1 Maquinado electroquímico

El proceso básico en este grupo es el maquinado electroquímico (ECM por sus siglas en inglés). El **maquinado electroquímico** retira metal de una pieza de trabajo conductora de electricidad por medio de disolución anódica, en la cual se obtiene la forma de la pieza de trabajo a través de una herramienta formada por electrodos, muy próxima al trabajo, pero al mismo tiempo separada de él mediante un electrolito que fluye con rapidez. El ECM es básicamente una operación de remoción de recubrimientos galvánicos como se muestra en la figura 26.5. La pieza de trabajo es el ánodo y la herramienta es el cátodo. El proceso aplica el principio de que el material se retira de la superficie que funciona como ánodo (el polo positivo) y se deposita en el cátodo (el polo negativo) ante la presencia de un baño electrolítico (sección 4.5). La diferencia en el ECM es que el baño electrolítico

FIGURA 26.5 Maquinado electromecánico (ECM)



fluye con rapidez entre los dos polos para retirar el material removido de la superficie, de manera que el material que se retira de la pieza no forma una capa sobre la herramienta.

Por lo general, se diseña una herramienta de electrodos (hecha de cobre, bronce o acero inoxidable) que posee aproximadamente la forma inversa a la que se desea obtener. Debe considerarse una tolerancia en el tamaño de la herramienta para el espacio que existe entre la herramienta y el trabajo. Para conseguir la remoción de metal, se hace avanzar el electrodo hacia el trabajo a una velocidad igual a la velocidad de remoción del metal de trabajo. La velocidad de remoción del metal se determina por medio de la primera ley de Faraday, la cual establece que la cantidad de cambio químico que produce una corriente eléctrica (esto es, la cantidad de metal disuelto) es proporcional a la cantidad de electricidad transmitida (corriente $\times$ tiempo):

$$V = CIt \quad (26.1)$$

donde V = volumen de metal removido, mm^3 (in^3); C = una constante llamada la velocidad de remoción específica, que depende del peso atómico, la valencia y la densidad del material de trabajo, $\text{mm}^3/\text{amp-s}$ ($\text{in}^3/\text{amp-min}$); I = corriente, amps; y t = tiempo, s (min).

Con base en la ley de Ohm, la corriente $I = E/R$, donde E = voltaje y R = resistencia. Bajo las condiciones de la operación de ECM, la resistencia está dada por:

$$R = \frac{gr}{A} \quad (26.2)$$

donde g = separación entre el electrodo y el trabajo, mm (in); r = resistividad del electrolito, ohm-mm (ohm-in); y A = área de superficie entre el trabajo y la herramienta en la separación frontal del trabajo, mm^2 (in^2). Al sustituir esta expresión para R en la ley de Ohm, se obtiene

$$I = \frac{EA}{gr} \quad (26.3)$$

Al sustituir la expresión anterior en la ecuación que define la ley de Faraday,

$$V = \frac{C(EAt)}{gr} \quad (26.4)$$

Resulta conveniente convertir esta ecuación a una expresión para velocidad de avance, que es la velocidad a la cual el electrodo (la herramienta) puede avanzar hacia el trabajo. Esta conversión puede conseguirse en dos pasos. Primero, se divide la ecuación (26.4) por At (área $\times$ tiempo) para convertir el volumen de metal removido a una velocidad de desplazamiento lineal:

$$\frac{V}{At} = f_r = \frac{CE}{gr} \quad (26.5)$$

donde f_r = velocidad de avance, en mm/s (in/min). Segundo, se sustituye I/A en lugar de $E/(gr)$, como se da en la ecuación (26.3). Por lo tanto, la velocidad de avance en el ECM es:

$$f_r = \frac{CI}{A} \quad (26.6)$$

donde A = el área frontal del electrodo, mm^2 (in^2). Ésta es el área proyectada de la herramienta en la dirección del avance hacia el trabajo. Los valores de la velocidad de remoción específica C se presentan en la tabla 26.1 para diferentes materiales de trabajo. Debe observarse que esta ecuación supone una eficiencia de 100% en la remoción de metal. La eficiencia real está entre 90 y 100% y depende de la forma de la herramienta, el voltaje y la densidad de corriente, así como de otros factores.

EJEMPLO 26.1 Maquinado electroquímico

Se usará una operación de ECM para cortar un orificio en una placa de aluminio con un grosor de 12 mm. El orificio tiene una sección transversal rectangular de 10 mm por 30 mm. La operación de ECM se conseguirá bajo una corriente de 1 200 amps. Se espera una eficiencia de 95%. Determine la velocidad de avance y el tiempo requeridos para cortar la placa.

Solución: Por los datos de la tabla 26.1, la velocidad de remoción específica C para el aluminio es de $3.44 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{A-s}$. El área frontal del electrodo $A = 10 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} = 300 \text{ mm}^2$. A un nivel de corriente de 1 200 amps, la velocidad de avance es

$$f_r = 0.0344 \text{ mm}^3 / \text{A-s} \left(\frac{1200}{300} \text{ A/mm}^2 \right) = 0.1376 \text{ mm/s}$$

A una eficiencia de 95%, la velocidad de avance real es

$$f_r = 0.1376 \text{ mm/s}(0.95) = 0.1307 \text{ mm/s}$$

El tiempo para maquinar a través de la placa de 12 mm es

$$T_m = \frac{12.0}{0.1307} = 91.8 \text{ s} = 1.53 \text{ min}$$

Las ecuaciones anteriores indican que los parámetros de proceso más importantes para determinar la velocidad de remoción de metal y la velocidad de avance en el maquinado electroquímico son: la distancia de separación g , la resistividad electrolítica r , la corriente i y el área frontal de electrodos A . La distancia de separación necesita controlarse con mucha atención. Si g se hace demasiado grande, el proceso electroquímico se vuelve lento. Sin embargo, si el electrodo toca el trabajo, ocurre un cortocircuito que detiene todo el proceso. Como una cuestión práctica, la distancia de separación por lo general se mantiene dentro de un rango de 0.075 a 0.75 mm (0.003 a 0.030 in).

El agua se utiliza como base para el material electrolítico en el ECM. Para reducir la resistividad del material electrolítico se añaden sales a la solución, tales como NaCl o NaNO_3 . Además de retirar los materiales removidos de la pieza de trabajo, el flujo electrolítico también sirve para retirar el calor y las burbujas de hidrógeno que se crean en las reacciones químicas del proceso. El material de trabajo removido está en forma de partículas microscópicas que deben separarse del material electrolítico mediante centrifugado, sedimentación u otros medios. Las partículas separadas forman una gruesa capa cuya disposición es un problema ambiental asociado con el ECM.

Para realizar un ECM, se requieren grandes cantidades de potencia eléctrica. Como indican las ecuaciones, la potencia eléctrica determina la velocidad de remoción de metal, específicamente la densidad de corriente que se proporciona para la operación. El voltaje en un ECM se conserva relativamente bajo para minimizar la generación de arcos a través de la separación.

Por lo general, el maquinado electroquímico se usa en aplicaciones donde el metal de trabajo es muy duro o difícil de maquinar o donde es difícil (o imposible) obtener una geometría de piezas de trabajo mediante métodos de maquinado convencionales. La dureza del trabajo no representa una diferencia en el ECM, debido a que la remoción del metal no es mecánica. Las aplicaciones típicas del ECM incluyen 1) **Cavidades de troqueles**, la cual implica el maquinado de formas y contornos irregulares en matrices de forjado, moldes plásticos y otras herramientas de formado; 2) barrenado de orificios múltiples, donde con el ECM es posible el barrenado de muchos orificios en forma simultánea, a diferencia del

TABLA 26.1 Valores típicos de una velocidad de remoción específica para materiales de trabajo seleccionados en el maquinado electroquímico.

Material de trabajo ^a	Velocidad de remoción específica C		Material de trabajo ^a	Velocidad de remoción específica C	
	$\text{mm}^3/\text{amp-sec}$	$\text{in}^3/\text{amp-min}$		$\text{mm}^3/\text{amp-s}$	$\text{in}^3/\text{amp-min}$
Aluminio (3)	3.44×10^{-2}	1.26×10^{-4}	Aceros:		
Cobre (1)	7.35×10^{-2}	2.69×10^{-4}	De baja aleación	3.0×10^{-2}	1.1×10^{-4}
Hierro (2)	3.69×10^{-2}	1.35×10^{-4}	De alta aleación	2.73×10^{-2}	1.0×10^{-4}
Níquel (2)	3.42×10^{-2}	1.25×10^{-4}	Inoxidable	2.46×10^{-2}	0.9×10^{-4}
			Titanio (4)	2.73×10^{-2}	1.0×10^{-4}

Recopilado de los datos en [7].

^aLa valencia más común se proporciona entre paréntesis () y se supone para determinar la velocidad de remoción específica C . Para una valencia diferente, C se calcula multiplicando este valor por la valencia más común y dividiéndola entre la valencia real.

taladrado convencional que requeriría que los orificios se hiciesen en forma secuencial; 3) orificios que no son redondos, dado que el maquinado electroquímico no usa un taladro rotatorio; y 4) la remoción de rebabas (sección 26.2.2).

Las ventajas del ECM incluyen 1) poco daño superficial a la pieza de trabajo, 2) no hay rebabas como en el maquinado convencional, 3) un bajo desgaste de la herramienta (el único desgaste de la herramienta se produce por el flujo electrolítico) y 4) velocidades de remoción de metal relativamente altas para metales duros y difíciles de maquinar. Las desventajas del ECM son: 1) un costo significativo en el consumo de energía eléctrica necesaria para ejecutar la operación y 2) problemas de disposición de la masa electrolítica de desecho.

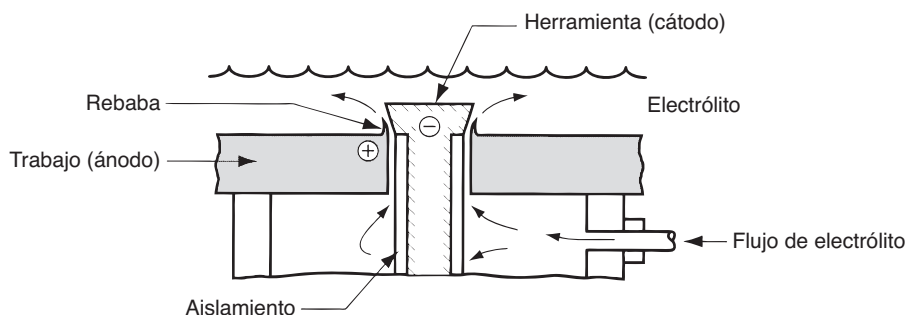
26.2.2 Remoción de virutas y esmerilado con material electroquímico

La **remoción electroquímica de virutas** (ECD, por sus siglas en inglés) es una adaptación del ECM diseñada para retirar las virutas o para redondear las esquinas agudas de piezas de trabajo metálico mediante disolución anódica. En la figura 26.6 se muestra una disposición posible para la ECD. El orificio en la pieza de trabajo tiene una rebaba o viruta filosa del tipo que se produce en una operación de taladrado convencional a través de un orificio. La herramienta de electrodos está diseñada para concentrar la acción de remoción de metal en la viruta. Se aíslan las partes de la herramienta que no se usan para el maquinado. El material electrolítico fluye por el orificio para desalojar las partículas de la viruta. En la ECD se aplican los mismos principios de la operación de ECM. Sin embargo, dado que se retira mucho menos material en una ECD, los ciclos de tiempo son mucho más breves. Un ciclo de tiempo típico en la remoción electroquímica de virutas es menor de un minuto. El tiempo aumenta si se pretende redondear una esquina además de remover la viruta.

El **esmerilado electroquímico** (ECG, por sus siglas en inglés) es una forma especial de ECM, en el cual se usa una rueda de esmeril rotatoria con un material de enlace conductivo para aumentar la disolución anódica de la superficie metálica de la pieza de trabajo, como se muestra en la figura 26.7. Los abrasivos usados en el ECG incluyen el óxido de aluminio y el diamante. El material de enlace es metálico (para abrasivos de diamante) o es resina impregnada con partículas metálicas para hacerlo eléctricamente conductivo (para el óxido de aluminio). Los granos abrasivos que sobresalen de la rueda de esmeril y entran en contacto con la pieza de trabajo establecen la distancia de separación en el ECG. Los electrolitos fluyen por la separación entre los granos para cumplir su función en la electrólisis.

La acción electroquímica es responsable de 95% o más de la remoción de metal en el esmerilado electroquímico, y la acción abrasiva de la rueda de esmeril elimina 5% restante o menos, sobre todo en forma de películas salinas que se producen en la superficie de trabajo durante las reacciones electroquímicas. Debido a que gran parte del maquinado se consigue mediante acción electroquímica, una rueda de esmeril en este proceso dura mucho más que una rueda en el esmerilado convencional. El resultado es una velocidad de esmerilado mucho más alta. Además, el aderezado de la rueda de esmeril se requiere con mucha menor frecuencia. Éstas son las ventajas más importantes del proceso. Las aplicaciones del ECG incluyen el afilado de herramientas de carburo cementado y el esmerilado de agujas quirúrgicas, corte de tubos de pared delgada y piezas frágiles.

FIGURA 26.6 Remoción electroquímica de virutas (ECD).



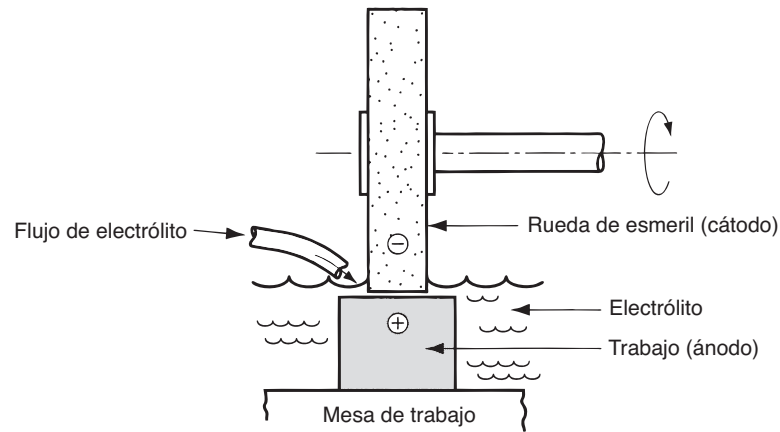


FIGURA 26.7 Esmerilado electroquímico (ECG).

26.3 PROCESOS DE ENERGÍA TÉRMICA

Los procesos de remoción de material basados en la energía térmica se caracterizan por temperaturas locales muy altas, con calor suficiente para remover material mediante fusión o vaporización. Debido a las altas temperaturas, estos procesos producen daños físicos y metalúrgicos en la nueva superficie de trabajo. En algunos casos, el acabado resultante es tan deficiente que se requiere un procesamiento posterior para alisar la superficie. En esta sección se examinan varios procesos de energía térmica que tienen importancia comercial: 1) Electroerosión maquinado por descarga eléctrica y corte por descarga eléctrica con alambre, 2) maquinado con haz de electrones, 3) maquinado con haz láser, 4) maquinado con arco de plasma y 5) procesos convencionales de corte térmico.

26.3.1 Procesos con descarga eléctrica (electroerosión)

Los procesos de remoción de material con descarga eléctrica retiran metal mediante una serie de descargas eléctricas discontinuas (arcos eléctricos) que producen temperaturas localizadas suficientemente altas para fundir o vaporizar el metal en la vecindad inmediata a la descarga. Los dos procesos principales en esta categoría son: 1) electroerosión por penetración y 2) electroerosión con alambre. Estos procesos sólo pueden usarse en materiales de trabajo eléctricamente conductivos. El video clip sobre maquinado con descarga eléctrica ilustra los diferentes tipos de EDM.

Electroerosión por penetración (EDM ram) El maquinado por descarga eléctrica (EDM) es uno de los procesos no tradicionales de uso más amplio. En la figura 26.8 se muestra una disposición de EDM. La forma de la superficie de trabajo acabada se produce mediante una herramienta formada que actúa como electrodo. Ocurren arcos eléctricos a través de una pequeña separación entre la herramienta y la superficie de trabajo. El proceso de EDM debe realizarse en presencia de un fluido dieléctrico, el cual crea una trayectoria para cada descarga conforme se ioniza el fluido en la separación. Las descargas se generan mediante un transformador de corriente directa pulsante conectado al trabajo y a la herramienta.

En la figura 26.8b se muestra un acercamiento de la separación entre la herramienta y el trabajo. La descarga ocurre en la posición en la que las dos superficies están más cerca. El fluido dieléctrico se ioniza en esta posición con el fin de crear una trayectoria para la

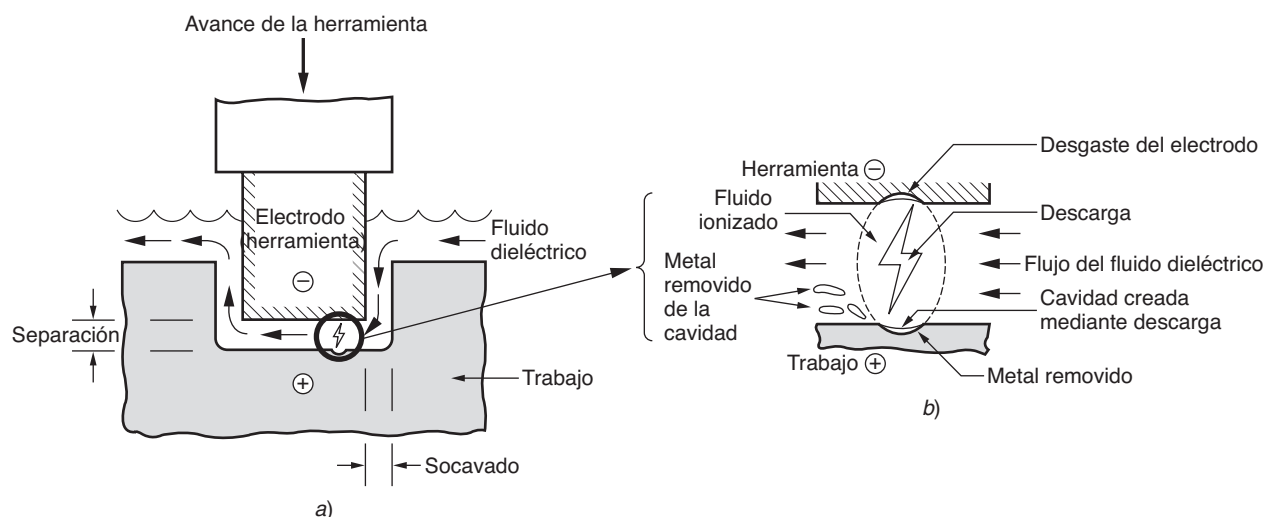
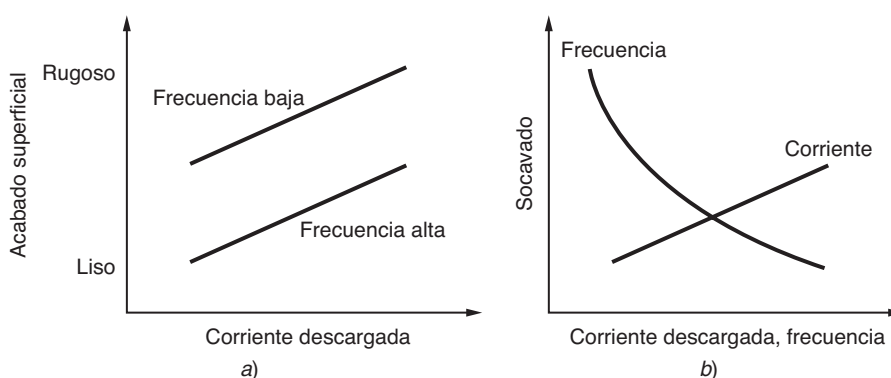


FIGURA 26.8 Maquinado por descarga eléctrica: a) disposición general y b) vista de acercamiento de la separación, que muestra la descarga y la remoción de metal.

descarga. La región en la que ocurre la descarga se calienta a temperaturas extremadamente altas, de modo que una pequeña parte de la superficie de trabajo se funde repentinamente y es removida. Después, el flujo dieléctrico aleja la pequeña partícula (llamada rebaba o viruta). Como la superficie de trabajo en la posición previa a la descarga está a una distancia mayor de la herramienta, ésta es la posición menos probable para que ocurra otra chispa hasta que las regiones que la rodean se hayan reducido al mismo nivel o a uno inferior. Aunque las descargas individuales retiran material en puntos muy localizados, ocurren cientos o miles de veces por segundo, de modo que sucede una erosión gradual de toda la superficie en el área de la separación.

Dos parámetros importantes en el proceso de EDM son la corriente descargada y la frecuencia de la descarga. Conforme aumenta cualquiera de estos parámetros, se incrementa la velocidad de remoción de metal. La aspereza de la superficie también se ve afectada por la corriente y la frecuencia, como se muestra en la figura 26.9a). El mejor acabado en la superficie se obtiene cuando el EDM se realiza a frecuencias altas y corrientes de descarga bajas. Conforme la herramienta de electrodos penetra en el trabajo ocurre un excedente de corte. El **socavado** en el EDM es la distancia por la que la cavidad maquinada rebasa el tamaño de la herramienta en cada lado de la misma, como se muestra en la figura 26.8a). Este efecto se debe a que las descargas eléctricas ocurren tanto a los lados de la herramienta, como en su parte frontal. El socavado es una función de la corriente y la frecuencia, como se ilustra en la figura 26.9b), y puede llegar a ser de varias milésimas de in.

FIGURA 26.9 a) Acabado superficial en EDM como una función de la corriente descargada y la frecuencia de las descargas. b) socavado en el EDM como una función de la corriente descargada y la frecuencia de las descargas.



Debe señalarse que las altas temperaturas de las chispas que funden el trabajo también afectan a la herramienta, al crear una pequeña cavidad en la superficie opuesta a la cavidad producida en el trabajo. Por lo general, el desgaste de la herramienta se mide como la razón del material de trabajo removido entre el material removido de la herramienta (semejante a la relación de esmerilado). Esta razón de desgaste varía entre 1.0 y 100 o un poco más, dependiendo de la combinación del trabajo y los materiales de los electrodos. Los electrodos pueden fabricarse de grafito, cobre, latón, tungsteno aleado con cobre, tungsteno aleado con plata y otros materiales. La selección depende del tipo de circuito del transformador de potencia disponible en la máquina para EDM, el tipo de material de trabajo que se va a maquinar y si se va a pulir o a dar un acabado al material. En muchas aplicaciones se prefiere el grafito debido a sus características de fusión. De hecho, el grafito no se funde, sino que se vaporiza a muy altas temperaturas, y la cavidad creada por el arco eléctrico generalmente es más pequeña que en los restantes materiales de electrodos para EDM. En consecuencia, con las herramientas de grafito se obtiene una razón alta de material de trabajo removido sobre desgaste de la herramienta.

La dureza y la resistencia del material de trabajo no son factores en el EDM, puesto que el proceso no es una competencia de dureza entre la herramienta y el trabajo. El punto de fusión del material de trabajo es una propiedad importante, y la velocidad de remoción de metal se relaciona, en forma aproximada, con el punto de fusión mediante la siguiente fórmula empírica, basada en una ecuación descrita en Weller [16]:

$$R_{MR} = \frac{KI}{T_m^{1.23}} \quad (26.7)$$

donde R_{MR} = velocidad de remoción de metal, mm^3/s (in^3/min); K = constante de proporcionalidad cuyo valor de 664 en unidades del SI (5.08 en unidades de uso común en Estados Unidos); I = corriente descargada, amperes; y T_m = temperatura de fusión del metal de trabajo, $^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{F}$). Los puntos de fusión de los metales seleccionados se enlistan en la tabla 4.1.

EJEMPLO 26.2 Maquinado por descarga eléctrica

Se debe maquinar cierta aleación cuyo punto de fusión = $1\,100\,^{\circ}\text{C}$ en una operación de EDM. Si se descarga una corriente = 25 amps, ¿cuál es la velocidad esperada de remoción de metal?

Solución: A partir de la ecuación (26.7), la velocidad anticipada de remoción de metal es

$$R_{MR} = \frac{664(25)}{1100^{1.23}} = 3.01\,\text{mm}^3/\text{s}$$

Los fluidos dieléctricos usados en el EDM incluyen los aceites de hidrocarburos, el queroseno y el agua destilada o deionizada. El fluido dieléctrico funciona como un aislante en la separación, excepto cuando ocurre una ionización en presencia de un arco eléctrico. Otras de sus funciones consisten en desalojar el material removido de la separación y retirar el calor de la herramienta y la pieza de trabajo.

Las aplicaciones del maquinado por descarga eléctrica incluyen tanto la fabricación de herramientas como la producción de piezas. Con frecuencia, la fabricación de herramientas para muchos de los procesos mecánicos analizados en este libro se realiza mediante EDM, incluidos moldes para inyección en plásticos, dados para extrusión, dados para estirado de alambres, matrices para forja y recalcado y matrices para estampado en láminas metálicas. Como en el ECM, el término **maquinado por penetración** se usa para operaciones en las que se produce una cavidad de molde, y el proceso EDM se llama algunas veces **EDM ram**. Para muchas de estas aplicaciones, los materiales usados para habilitar herramientas son difíciles (o imposibles) de maquinar mediante métodos convencionales. Ciertas partes de un producto también requieren de una aplicación de EDM. Los ejemplos incluyen algunas partes delicadas que no son lo bastante rígidas para soportar las fuerzas de corte convencionales: el taladrado de orificios donde los ejes del agujero forman un ángulo agudo con respecto a la superficie, donde con un taladrado convencional no podría iniciar el orificio, y el maquinado para la producción de metales duros y raros.

Electroerosión con alambre El **corte por descarga eléctrica con alambre** (EDWC, por sus siglas en inglés), comúnmente llamado **EDM con alambre**, es una forma especial del maquinado

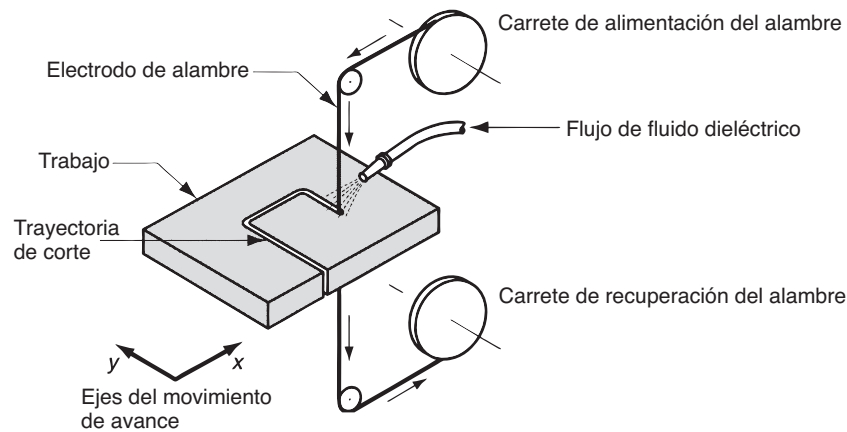


FIGURA 26.10 Corte por descarga eléctrica con alambre (EDWC), también llamado EDM con alambre.

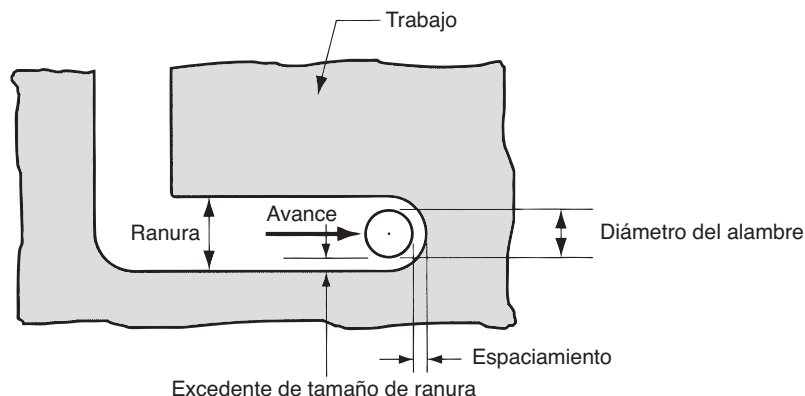
con descarga eléctrica que usa un alambre de diámetro pequeño como electrodo para cortar una ranura exacta en el trabajo. La acción de corte en el EDM con alambre se obtiene por medio de energía térmica, a partir de las descargas eléctricas entre el alambre electrodo y la pieza de trabajo. El EDM con alambre se ilustra en la figura 26.10. La pieza de trabajo avanza en forma continua y lenta a través del alambre para obtener la trayectoria de corte deseada, de un modo parecido a una operación con sierra caladora. El control numérico se usa para fijar los movimientos de la pieza de trabajo durante el corte. Conforme se realiza el corte, el alambre avanza en forma continua entre un carrete de alimentación y uno de recuperación para presentar un electrodo nuevo de diámetro constante para el trabajo. Esto ayuda a mantener una ranura de corte constante durante el proceso. Al igual que en el EDM, el EDM con alambre debe realizarse en presencia de un material dieléctrico. Éste puede aplicarse ya sea mediante boquillas dirigidas a la intersección herramienta-trabajo, como en la figura, o por inmersión de la pieza de trabajo en un baño dieléctrico.

Los diámetros del alambre varían entre 0.076 y 0.30 mm (0.003 a 0.012 in), dependiendo de la anchura de ranura requerida. Los materiales que se usan para el alambre incluyen el latón, el cobre, el tungsteno y el molibdeno. Los fluidos dieléctricos incluyen el agua deionizada o el aceite. Al igual que en el EDM, en el EDWC existe una distancia entre el alambre y la pieza de trabajo, que provoca que el corte producido sea mayor que el diámetro del alambre, como se muestra en la figura 26.11. Dicha distancia está en el rango de 0.020 a 0.050 mm (0.0008 a 0.002 in). Una vez establecidas las condiciones de corte para una operación determinada, la distancia de separación entre el alambre y la pieza permanecen bastante constantes y predecibles.

Aunque el EDWC se asemeja a una operación con sierra caladora, su precisión es mucho mayor que la de esta última. La ranura es mucho más pequeña, es posible hacer más agudas las esquinas y, por lo tanto, las fuerzas de corte en contra del trabajo son nulas. Además, la dureza y la resistencia del material de trabajo no afectan el rendimiento del corte. El único requisito es que el material de trabajo debe ser eléctricamente conductivo.

Las características especiales del EDM con alambre lo hacen ideal para fabricar componentes para matrices de corte para troqueles. Debido que la ranura es tan pequeña, con

FIGURA 26.11 Definición de excedente de tamaño de ranura respecto al diámetro de alambre en el corte por descarga eléctrica con alambre.



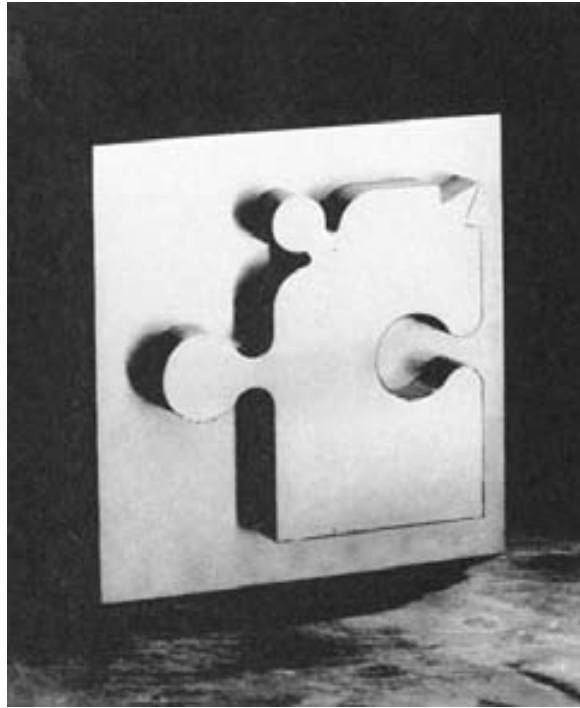


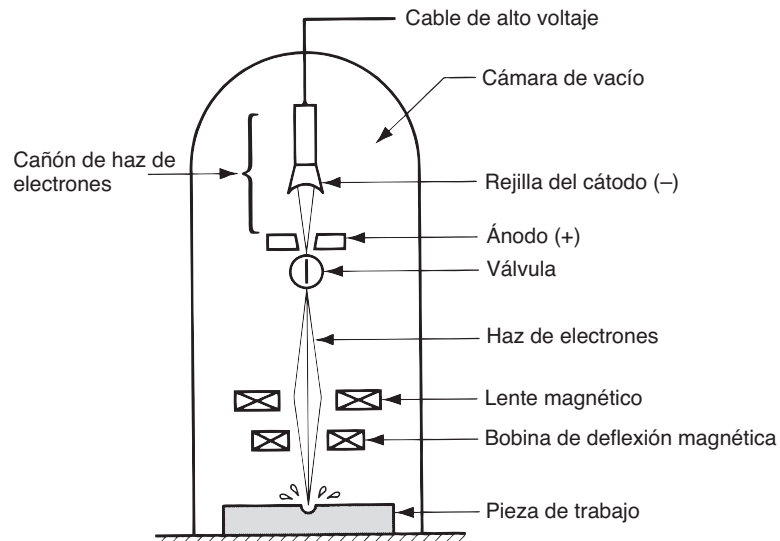
FIGURA 26.12 Corte de contorno irregular de un bloque sólido de metal mediante EDM con alambre. (Fotografía cortesía de LeBlond Makino Machine Tool Company).

frecuencia es posible fabricar punzones y matrices en un solo corte, como se sugiere en la figura 26.12. La manufactura de otras herramientas y piezas con formas de contornos complicados, como herramientas de formado para torneado, dados para extrusión y plantillas planas, se hace mediante corte por descarga eléctrica con alambre.

26.3.2 Maquinado con haz de electrones

El maquinado con haz de electrones (EBM, por sus siglas en inglés) es uno de los varios procesos industriales que usan haces de electrones. Además del maquinado, otras aplicaciones de esta tecnología incluyen el tratamiento térmico (sección 27.5.2) y la microsoldadura (sección 31.4.1). El **maquinado con haz de electrones** utiliza una corriente de electrones a alta velocidad enfocada hacia la superficie de la pieza de trabajo para remover material mediante fusión y vaporización. En la figura 26.13 se muestra un esquema del

FIGURA 26.13 Maquinado con haz de electrones (EBM).



proceso EBM. Un cañón de haz de electrones genera una corriente continua de electrones que se aceleran a aproximadamente 75% de la velocidad de la luz y se enfocan a través de un lente electromagnético sobre la superficie de trabajo. El lente es capaz de reducir el área del haz a un diámetro tan pequeño como 0.025 mm (0.001 in). Al chocar contra la superficie, la energía cinética de los electrones se convierte en energía térmica de una densidad muy alta, la cual funde o vaporiza el material en un área localizada.

El maquinado con haz de electrones se usa para diversas aplicaciones de corte de alta precisión sobre cualquier material conocido. Las aplicaciones incluyen el taladrado de orificios de diámetro muy pequeño, hasta 0.05 mm (0.002 in) de diámetro, el taladrado de orificios cuya relación entre profundidad y diámetro sea muy alta, mayores que 100:1, y el corte de ranuras con una anchura de 0.001 in (0.025 mm). Estos cortes pueden hacerse con tolerancias muy pequeñas sin fuerzas de corte ni desgaste de las herramientas. El proceso es ideal para el nanomaquinado y por lo general se limita a operaciones de corte en piezas delgadas, en el rango de 0.25 a 6.3 mm (0.010 a 0.250 in) de grosor. El EBM debe realizarse en una cámara de vacío para eliminar la colisión de los electrones con las moléculas de la atmósfera. Otras limitaciones incluyen la alta energía requerida y el equipo costoso.

26.3.3 Maquinado con haz láser

Los láser se han usado para diversas aplicaciones industriales que incluyen el tratamiento térmico (sección 27.5.2), la microsoldadura (sección 31.4.2) y la medición (sección 44.5.2), así como en los procesos de grabado, taladrado y corte (que se describen aquí). El término **láser** está formado por las siglas en inglés de *light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificación luminosa de emisiones de radiación estimulada). Un láser es un transductor óptico que convierte energía eléctrica en un haz luminoso altamente consistente. Un haz láser tiene varias propiedades que lo distinguen de otras formas de luz. Es monocromático (en teoría, la luz tiene una longitud de onda única) y muy alineado (los rayos de luz en el haz son casi perfectamente paralelos). Estas propiedades permiten enfocar la luz generada por un láser, mediante lentes ópticos convencionales, sobre un punto muy pequeño, produciendo densidades muy potentes. Dependiendo de la cantidad de energía que contiene el haz de luz y su grado de concentración en el punto, pueden realizarse los diversos procesos con láser que se identifican a continuación.

El maquinado por haz láser (LBM, por sus siglas en inglés) usa la energía luminosa de un láser para remover material mediante vaporización y desgaste. La instalación para el LBM se ilustra en la figura 26.14. Los tipos de láser usados en este proceso son de gas de dióxido de carbono y de estado sólido (de los cuales hay varios tipos). En el maquinado por haz láser, la energía del haz de luz coherente se concentra no sólo en forma óptica, sino también en términos de tiempo. El haz de luz se dirige para que la energía liberada produzca un impulso contra la superficie de trabajo, lo que a su vez produce una combinación de evaporación y fusión, con la salida de material fundido desde la superficie de trabajo a alta velocidad.

El LBM se usa para ejecutar diferentes tipos de operaciones de taladrado, corte en tiras, ranurado, grabado y marcado. Es posible obtener un taladrado con orificios de diámetro pequeño, hasta de 0.025 mm (0.001 in). Para orificios más grandes, cuyo diámetro es superior a 0.50 mm (0.020 in), el haz láser se controla para cortar el contorno del orificio. El LBM no se considera un proceso de producción en masa y, por lo general, se usa en lotes pequeños. El rango de materiales de trabajo que se pueden maquinar mediante este proceso es virtualmente ilimitado. Las propiedades ideales de un material para LBM incluyen una alta absorción de energía luminosa, baja reflectividad, buena conductividad térmica, bajo calor específico, bajo calor de fusión y bajo calor de evaporación. Por supuesto, ningún material tiene esta combinación ideal de propiedades. La lista real de materiales de trabajo procesados mediante LBM incluye metales con alta dureza y resistencia, metales suaves, cerámica, vidrio y cristal epóxicos, plástico, caucho, textiles y madera.

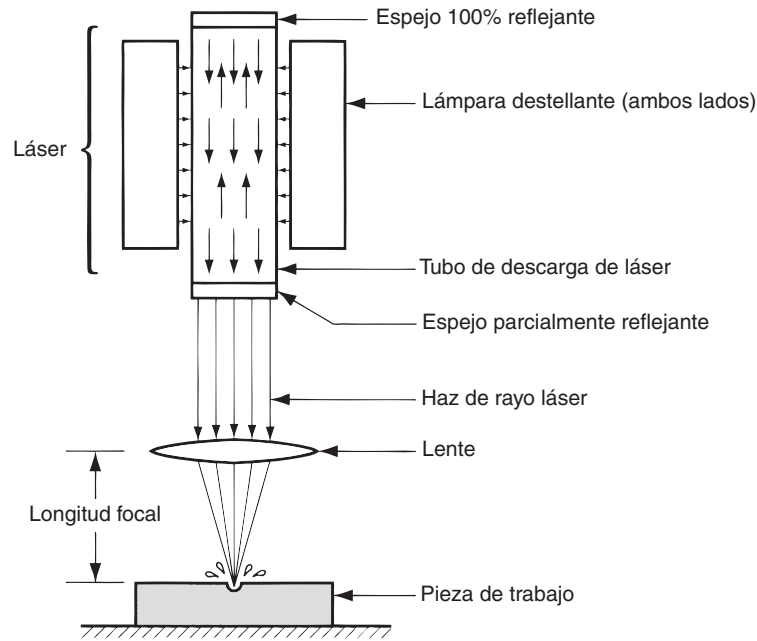


FIGURA 26.14 Maquinado por haz láser (LBM).

26.3.4 Procesos de corte con arco eléctrico

El intenso calor que proviene de un arco eléctrico puede usarse para fundir virtualmente cualquier metal con el propósito de soldar o cortar. La mayoría de los procesos de corte usan el calor generado por un arco entre un electrodo y una pieza de trabajo metálica (por lo general una placa o lámina planas) para fundir una ranura que separe la pieza. Los procesos de corte con arco eléctrico más comunes son: 1) el corte con arco de plasma y 2) el corte con arco de carbono y aire [10].

Corte con arco de plasma Un *plasma* se define como un gas supercalentado y ionizado eléctricamente. El **corte con arco de plasma** (PAC por sus siglas en inglés) usa una corriente de plasma que opera a altas temperaturas en el rango de 10 000 a 14 000 °C (18 000 a 25 000 °F) para cortar metal por fusión como se muestra en la figura 26.15. En la acción de corte se dirige la corriente de plasma a alta velocidad hacia el trabajo; esta misma acción funde e impulsa el metal fundido por la ranura. El arco de plasma se genera entre un electrodo dentro del soplete y la pieza de trabajo (ánodo). El plasma fluye a través de una boquilla enfriada con agua, que controla y dirige la corriente a la posición deseada del trabajo. El chorro de plasma resultante es una corriente de alta velocidad bien alineada con temperaturas extremadamente altas en su centro, y con el calor suficiente para cortar a través de un metal, que en algunos casos tiene un espesor de 150 mm (6 in).

Los gases usados para crear el plasma en el PAC incluyen el nitrógeno, el argón, el hidrógeno o una mezcla de éstos. Tales fluidos se denominan los gases primarios en el proceso. Con frecuencia se dirigen gases secundarios o agua para rodear el chorro de plasma, a fin de ayudar a confinar el arco y limpiar la ranura de metal que se forma.

La mayoría de las aplicaciones del PAC implican el corte de láminas de metal y placas planas. Las operaciones incluyen el barrenado y el corte a lo largo de una trayectoria definida. La trayectoria deseada se corta ya sea mediante un soplete manual controlado por una persona o dirigiendo la trayectoria de corte del soplete mediante control numérico (CN). Para una producción más rápida y una mayor precisión se prefiere el CN, debido a que se supervisan mejor las variables más importantes del proceso, como la distancia de separación y la velocidad de avance. El corte con arco de plasma puede usarse para cortar casi cualquier metal eléctricamente conductivo. Con frecuencia los metales cortados mediante PAC incluyen aceros al carbono simple, el acero inoxidable y el aluminio. En

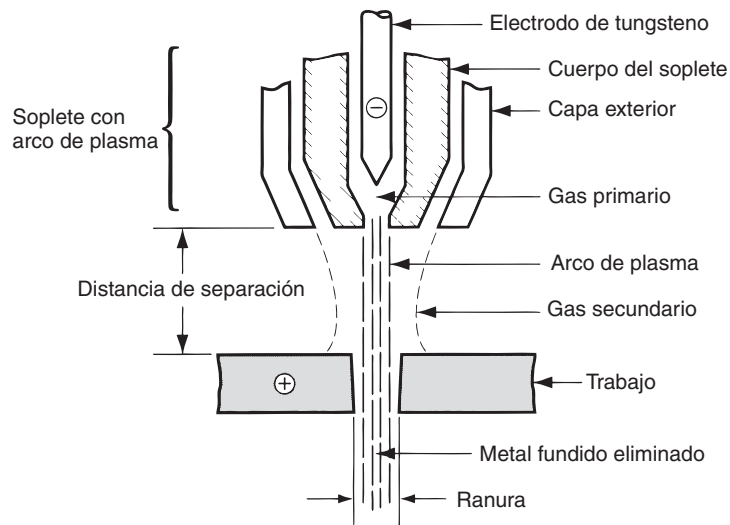


FIGURA 26.15 Corte con arco de plasma (PAC).

estas aplicaciones, la ventaja del corte con arco de plasma con CN es la alta productividad. Las velocidades de alimentación a lo largo de la trayectoria de corte pueden ser tan altas como 200 mm/s (450 in/min) para una placa de aluminio de 6 mm (0.25 in), y de 85 mm/s (200 in/min) para una placa de acero de 6 mm (0.25 in) [7]. Para materiales más gruesos, las velocidades de avance deben reducirse. Por ejemplo, la velocidad de avance máxima para cortar materia prima de aluminio de 100 mm (4 in) de espesor es de alrededor de 8 mm/s (20 in/min) [7]. Las desventajas del PAC son: 1) la superficie de corte es áspera y 2) el daño metalúrgico en la superficie es el más severo entre los procesos metalúrgicos no tradicionales.

Corte con arco de carbono y aire En este proceso, el arco se genera entre un electrodo de carbono y un metal, y se usa un chorro de aire a alta velocidad para alejar la parte fundida del metal. Este procedimiento se usa con el propósito de formar una ranura para separar la pieza o para formar una cavidad en ella. La cavidad prepara los bordes de las placas para la soldadura por fusión, por ejemplo, para crear un surco en forma de U en una junta empalmada (sección 30.2). El corte con arco de carbono y aire se usa en una variedad de metales, incluidos el hierro colado, el acero al carbono, las aleaciones bajas y el acero inoxidable, así como diversas aleaciones no ferrosas. La salpicadura de metal fundido es un riesgo y una desventaja del proceso.

Otros procesos de corte con arco Otros procesos de arco eléctrico se utilizan para aplicaciones de corte, aunque no con tanta frecuencia como el corte con arco de plasma o con arco de carbono y aire. Estos otros procesos incluyen: 1) el corte de metal con arco eléctrico y gas, 2) el corte con arco protegido, 3) el corte con arco eléctrico por tungsteno y gas y 4) el corte con arco de carbono. Las tecnologías son las mismas que se usan en la soldadura de arco (sección 31.1), excepto porque el calor del arco eléctrico se usa para cortar.

26.3.5 Procesos de corte con oxígeno y gas combustible

Una familia de procesos de corte térmico de uso muy difundido, conocida popularmente como el **corte con flama**, usa el calor de combustión de ciertos gases combinado con la reacción exotérmica del metal con el oxígeno. El soplete de corte que se usa en estos procesos está diseñado para proporcionar una mezcla de gas combustible y oxígeno en las cantidades correctas y dirigir una corriente de oxígeno a la región de corte. El mecanismo principal de la remoción de material en el corte con oxígeno y gas combustible (OFC, por sus siglas en inglés) es la reacción química del oxígeno con el metal base. El propósito

de la combustión del oxígeno y el gas es elevar la temperatura en la región de corte para soportar la reacción. Por lo general, estos procesos se usan para cortar placas metálicas ferrosas, en las cuales ocurre una rápida oxidación del hierro de acuerdo con las reacciones siguientes [10]:



La segunda de estas reacciones, mostrada en la ecuación (26.8b), es la más importante en términos de generación de calor.

El mecanismo de corte para metales no ferrosos es distinto en cierta forma. En general, estos metales se caracterizan por temperaturas de fusión más bajas que los metales ferrosos y hay más resistencia a la oxidación. En estos casos, el calor de la combustión de la mezcla de oxígeno y gas combustible tiene una función más importante en la creación de la ranura. Asimismo, para promover la reacción oxidante del metal, con frecuencia se añaden flujos químicos o polvos metálicos a la corriente de oxígeno.

Los combustibles usados en el OFC incluyen el acetileno (C_2H_2). El MAPP (metilacetileno-propadieno- C_3H_4), el propileno (C_3H_6) y el propano (C_3H_8). Las temperaturas de flama y de combustión para estos combustibles se enlistan en la tabla 31.2 del capítulo 31. El acetileno se quema a la máxima temperatura de flama y es el combustible de mayor uso para soldar con autógena y cortar. Sin embargo, deben considerarse ciertos riesgos con el almacenamiento y manejo del acetileno (sección 31.3.1).

Los procesos de OFC se realizan en forma manual o con máquina. Los sopletes operados en forma manual se usan para trabajo de reparación, corte de metal desechado, desbastado de protuberancias de fundición en arena y en operaciones similares que generalmente requieren una mínima precisión. Para trabajo de producción, el corte con una flama de máquina permite velocidades mayores y una mejor precisión. Con frecuencia, este equipo se controla en forma numérica para permitir que se corten formas perfiladas.

26.4 MAQUINADO QUÍMICO

El maquinado químico (CHM, por sus siglas en inglés) es un proceso no tradicional en el que ocurre una remoción de materiales mediante el contacto con sustancias de acción química fuerte. Las aplicaciones dentro del proceso industrial empezaron poco después de la Segunda Guerra Mundial en la industria de las aeronaves. El uso de materiales químicos para remover secciones no deseadas de una pieza de trabajo se aplica en varias formas y se han creado términos distintos para diferenciar las aplicaciones. Estos términos incluyen el fresado químico, el preformado químico, el grabado químico y el maquinado fotoquímico (PCM, por sus siglas en inglés). Todos emplean el mismo mecanismo de remoción de material y es conveniente analizar las características generales del maquinado químico antes de definir los procesos individuales.

26.4.1 Mecánica y química del maquinado químico

El proceso de maquinado químico consta de varios pasos. Las diferencias en las aplicaciones y las formas en que se realizan las etapas establecen las diferentes formas del CHM. Los pasos son:

1. **Limpieza.** El primer paso es una operación de limpieza para asegurar que el material se remueva en forma uniforme de las superficies que se van a atacar.
2. **Enmascarado.** Un recubrimiento protector se aplica a ciertas zonas de la pieza. Este protector está hecho de material químicamente resistente al material de ataque químico.

mico (el término **resistir** se usa para el material protector). Por lo tanto, sólo se aplica a aquellas porciones de la superficie de trabajo que no se van a atacar.

3. **Ataque químico.** Éste es el paso de remoción de material. La pieza de trabajo se sumerge en un material de ataque químico que afecta aquellas porciones de la superficie de la pieza que no están protegidas. En el método normal de ataque, el material de trabajo (por ejemplo, un metal) se convierte en una sal que se disuelve dentro del material de ataque químico, y posteriormente se remueve de la superficie. Cuando se ha removido la cantidad deseada de material, se retira la parte del material de ataque químico y se enjuaga para detener el proceso.
4. **Desenmascarado.** El protector se retira de la pieza.

En el maquinado químico, los dos pasos que implican variaciones significativas en los métodos, materiales y parámetros del proceso son el enmascarado y el ataque químico, es decir, los pasos 2 y 3.

Los materiales protectores incluyen el neopreno, el cloruro de polivinilo, el polietileno y otros polímeros. La protección se consigue por alguno de estos tres métodos: 1) corte y desprendimiento, 2) resistencia fotográfica y 3) resistencia de pantalla. El método de **corte y desprendimiento** implica la aplicación del protector sobre toda la pieza, ya sea por inmersión, recubrimiento o rocío. El grosor del protector resultante es de 0.025 a 0.125 mm (0.001 a 0.005 in). Después de que el protector endurece, se corta mediante una navaja para marcar y se desprende de las áreas de la superficie de trabajo que se van a atacar. La operación de corte del protector se realiza a mano, generalmente guiando la navaja con una plantilla. El método de corte y desprendimiento se usa para la manufactura de piezas de trabajo grandes, cantidades de producción bajas y donde la precisión no es un factor crítico. Este método no se aplica para tolerancias más estrechas de ± 0.125 mm (± 0.005 in), excepto que la técnica se ejecute con mucho cuidado.

Como su nombre lo indica, el método de **resistencia fotográfica** (que se abrevia como **fotorresistencia**) usa técnicas fotográficas para realizar el paso de enmascarado. Los materiales enmascarados contienen químicos fotosensibles. Éstos se aplican a la superficie de trabajo y la pieza recubierta se expone a la luz a través de una imagen en negativo de las áreas que se van a atacar. Después, estas áreas protegidas se retiran de la superficie mediante técnicas de revelado fotográfico. Dicho procedimiento deja con material protector la superficie deseada de la pieza y sin protección las áreas restantes que son vulnerables al ataque químico. Por lo general, las técnicas de enmascarado fotorresistente se aplican donde se producen piezas pequeñas en grandes cantidades y se requieren tolerancias estrechas. Esta técnica se aplica para tolerancias más estrechas que ± 0.0125 mm (± 0.0005 in) [16].

En la técnica **resistencia de pantalla** se aplica el protector mediante métodos de serigrafía. En estos métodos, el protector se aplica sobre la superficie de las piezas de trabajo por medio de una malla de seda o acero inoxidable. La malla tiene incrustado un esténcil que protege la aplicación con barniz protector y deja expuestas las áreas que se van a atacar. Así, el protector recubre las áreas de trabajo que no se van a atacar. En general, el método resistencia de pantalla se usa en aplicaciones que se encuentran entre los otros dos métodos de enmascarado, en términos de precisión, tamaño de piezas y cantidades de producción. Con este método de enmascarado pueden obtenerse tolerancias de ± 0.075 mm (± 0.003 in).

La elección del material de **ataque químico** depende del material de trabajo que se va a atacar, la profundidad y la velocidad de remoción de material deseadas, así como los requerimientos de acabado superficial. El material de ataque químico también debe combinarse con un protector que asegure que dicho agente no afecte al protector. En la tabla 26.2 se enlistan algunos de los materiales de trabajo que se maquinan bajo el método de CHM, junto con los materiales de ataque químico que se usan para estos materiales. La tabla también incluye una velocidad de penetración y factores de ataque químico. Estos parámetros se explican a continuación.

Por lo general, las velocidades de remoción de material en el CHM se indican como velocidades de penetración en mm/min (in/min), puesto que la velocidad de ataque químico sobre el material de trabajo se dirige a la superficie. El área de la superficie no afecta la velocidad de penetración. Las velocidades de penetración enlistadas en la tabla 26.2 son valores típicos para los materiales de trabajo y los agentes de ataque químico dados.

TABLA 26.2 Materiales de trabajo y de ataque químico comunes en el CHM, con velocidades de penetración y factores de ataque típicos.

Material de trabajo	Material de ataque químico	Velocidades de penetración		Factor ataque químico
		mm/min	in/min	
Aluminio	FeCl ₃	0.020	0.0008	1.75
y aleaciones	NaOH	0.025	0.001	1.75
Cobre y aleaciones	FeCl ₃	0.050	0.002	2.75
Magnesio y aleaciones	H ₂ SO ₄	0.038	0.0015	1.0
Silicio	HNO ₃ : HF : H ₂ O	muy lento		ND
Acero dulce	HCl : HNO ₃	0.025	0.001	2.0
	FeCl ₃	0.025	0.001	2.0
Titanio	HF	0.025	0.001	1.0
y aleaciones	HF : HNO ₃	0.025	0.001	1.0

Recopilado de [5], [7] y [16].

ND = Datos no disponibles.

Las profundidades de corte en el maquinado químico son de hasta 12.5 mm (0.5 in) para paneles de aeronaves hechas de placas metálicas. Sin embargo, muchas aplicaciones requieren profundidades de sólo algunas centésimas de milímetro. Junto con la penetración en el trabajo, también ocurre un ataque químico en las regiones laterales situadas bajo el protector, como se ilustra en la figura 26.16. Este efecto se denomina el **socavado** y debe considerarse durante el diseño de la máscara para producir un corte que tenga las dimensiones especificadas. Para determinado material de trabajo, el socavado se relacionará directamente con la profundidad del corte. La constante de proporcionalidad para el material se llama factor de ataque químico, y se define como:

$$F_e = \frac{d}{u} \quad (26.9)$$

en donde F_e = factor de ataque químico; d = profundidad de corte, mm (in); y u = socavado, mm (in). Las dimensiones u y d se definen en la figura 26.16. En el maquinado químico, los diferentes materiales de trabajo tienen distintos factores de ataque químico. Algunos valores típicos se presentan en la tabla 26.2. El factor de ataque químico puede usarse para determinar las dimensiones de las áreas de corte en el protector, de manera que se logren las dimensiones especificadas de las áreas por atacar en la pieza.

26.4.2 Procesos de maquinado químico

En esta sección se describirán los principales procesos de maquinado químico: 1) fresado químico, 2) preformado químico, 3) grabado químico y 4) maquinado fotoquímico.

Fresado químico El fresado químico fue el primer proceso de CHM que se comercializó. Durante la Segunda Guerra Mundial, una compañía de aeronaves en Estados Unidos empezó a usar dicho proceso para remover el metal de algunos componentes de las aeronaves. En la actualidad, el fresado químico todavía se utiliza ampliamente en la industria

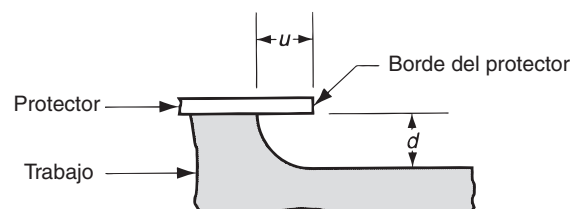


FIGURA 26.16 Socavado en el maquinado químico.

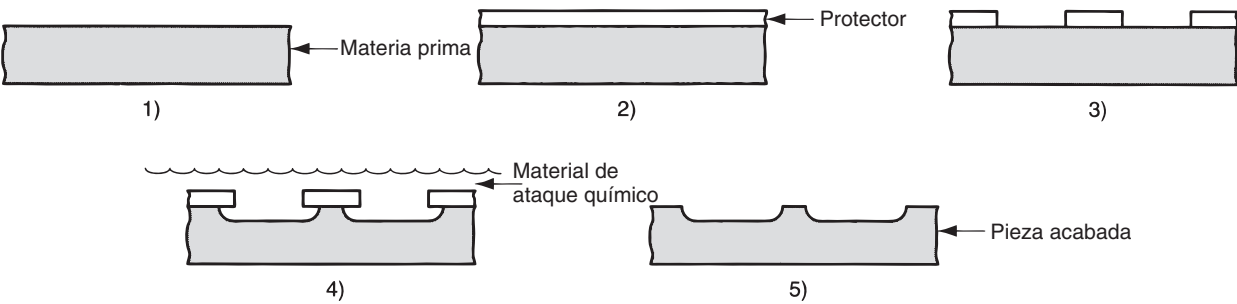


FIGURA 26.17 Sucesión de pasos en el procesamiento por fresado químico: 1) limpieza de la materia prima, 2) aplicación del protector, 3) marcado, corte y desprendimiento del protector de las áreas que se van a atacar, 4) ataque con material químico y 5) remoción del protector y limpieza para obtener una pieza acabada.

aeronáutica para retirar material de paneles de las alas y el fuselaje, con el propósito de reducir el peso. El método es aplicable a piezas grandes, de las cuales se retiran cantidades sustanciales de metal durante el proceso. Se emplea el método de corte y desprendimiento del protector. Por lo general se usa una plantilla, que toma en cuenta el socavado que se producirá durante el ataque químico. La secuencia de los pasos del procesamiento se ilustra en la figura 26.17.

El fresado químico produce un acabado superficial que varía con cada material de trabajo. En la tabla 26.3 se proporciona una muestra de los valores. El acabado superficial depende de la profundidad de penetración. Conforme aumenta la profundidad, empeora el acabado, acercándose al límite superior de los rangos que proporciona la tabla. El daño metalúrgico del fresado químico es muy pequeño, quizá de alrededor de 0.005 mm (0.0002 in) dentro de la superficie de trabajo.

Preformado químico El preformado químico usa la erosión química para cortar piezas de láminas metálicas muy delgadas, con un espesor de hasta 0.025 mm (0.001 in), o para patrones de corte complicados. En ambos ejemplos, los métodos convencionales para perforado y troquelado no funcionan, debido a que las fuerzas de troquelado pueden dañar las láminas metálicas, o el costo de las herramientas es muy alto. El preformado químico produce piezas sin rebabas y aventaja a otras operaciones convencionales de corte.

Los métodos que se usan para aplicar el protector en el preformado químico son la fotorresistencia o la resistencia de pantalla. Para patrones de corte pequeños o complicados, así como para tolerancias estrechas, se usa el método de fotorresistencia; de lo contrario, se usa el método de resistencia de pantalla. Cuando el tamaño de la pieza de trabajo es pequeño, el preformado químico excluye el método de corte y desprendimiento del protector.

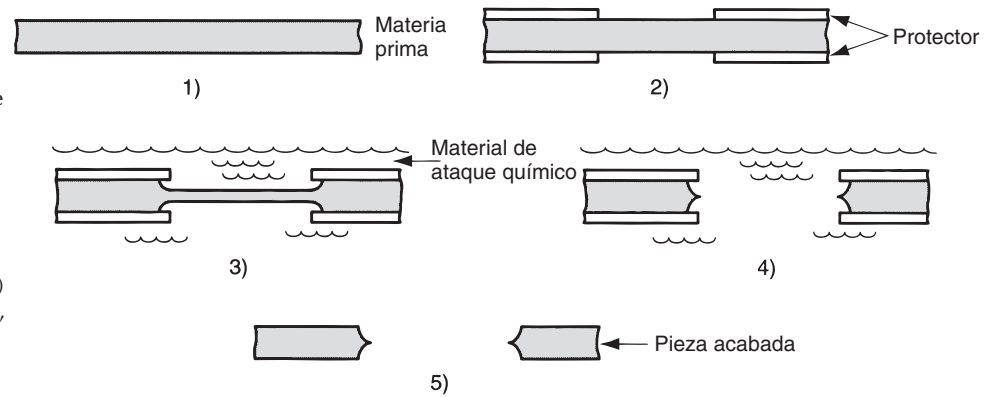
La figura 26.18 muestra los pasos del preformado químico mediante el ejemplo del método de resistencia de pantalla. Como en este proceso el ataque químico ocurre en ambos lados de la pieza, es importante que el procedimiento de enmascarado proporcione un

TABLA 26.3 Acabados superficiales esperados en el fresado químico.

Material de trabajo	Rango de acabado superficial	
	μm	$\mu\text{-in}$
Aluminio y aleaciones	1.8-4.1	70-160
Magnesio	0.8-1.8	30-70
Acero dulce	0.8-6.4	30-250
Titanio y aleaciones	0.4-2.5	15-100

Recopilado de [7] y [16].

FIGURA 26.18 Sucesión de pasos en el procesamiento por formado químico: 1) limpieza de la materia prima, 2) aplicación del protector a través de la pantalla, 3) ataque químico (parcialmente terminado), 4) ataque químico (terminado), 5) remoción del protector y limpieza para obtener la parte acabada.

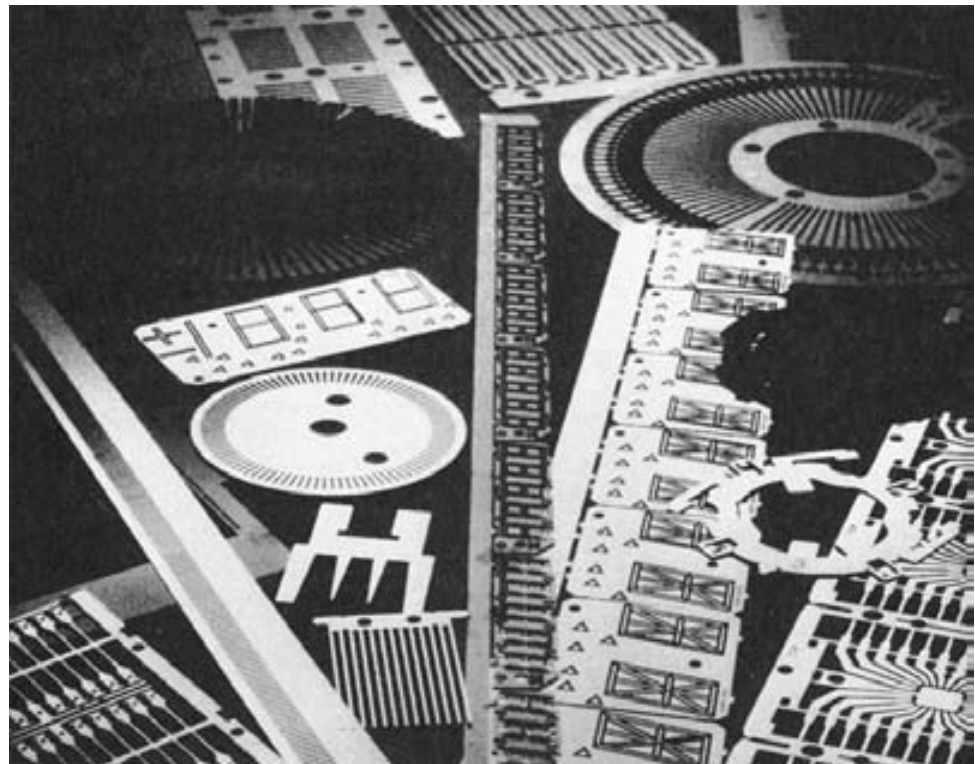


registro preciso entre los dos lados. De lo contrario, la erosión de la pieza no podrá alinearse desde direcciones opuestas. Esto resulta especialmente crítico con piezas de tamaño pequeño y patrones complicados.

Por las razones expuestas, la aplicación del preformado químico se limita a materiales delgados o patrones complicados. El grosor máximo de la materia prima es de alrededor de 0.75 mm (0.030 in). Asimismo, es posible procesar materiales endurecidos y frágiles mediante el preformado químico, lo cual sería imposible usando métodos mecánicos porque seguramente se fracturaría el trabajo. En la figura 26.19 se presenta una muestra de piezas producidas por medio del proceso de preformado químico.

Cuando se utiliza el método de fotorresistencia para enmascarar, pueden mantenerse tolerancias tan reducidas como ± 0.0025 mm (± 0.0001 in) sobre materiales que tengan un grosor de hasta 0.025 mm (0.001 in). Conforme aumenta el grosor de la materia prima, deben permitirse tolerancias más amplias. Los métodos de enmascarado con resistencia de pantalla no son tan precisos como el de fotorresistencia. En consecuencia, cuando se

FIGURA 26.19 Piezas hechas mediante preformado químico. (Foto cortesía de Buckbee-Mears St. Paul.)



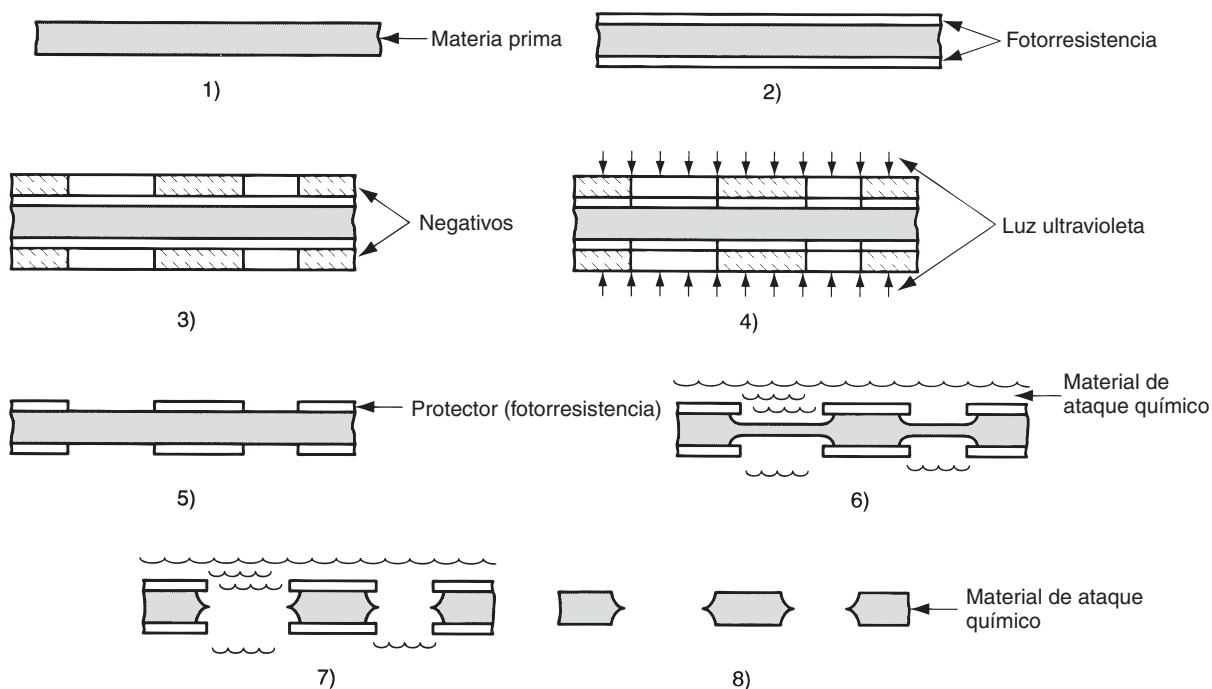
requieren tolerancias estrechas en la pieza, debe usarse el método de fotorresistencia para realizar el paso de enmascarado.

Grabado químico El grabado químico es un proceso de maquinado químico para hacer placas con nombres y otros paneles planos que tienen letras o dibujos en un lado. De otra forma, estas placas y paneles se harían usando una máquina convencional de grabado o un proceso similar. El grabado químico se usa para hacer paneles con las letras bajo relieve o alto relieve, con sólo invertir las partes del enmascarado a las que se va a aplicar el ataque químico. El enmascarado se hace mediante el método de fotorresistencia o por medio de la resistencia de pantalla. La sucesión de pasos para el grabado químico es similar a la de otros procesos de CHM, excepto porque después del ataque con material químico se hace una operación de rellenado. El propósito del rellenado es aplicar pintura u otra protección en las áreas hundidas formadas por el material de ataque químico. Después, el panel se sumerge en una solución que disuelve el protector pero no ataca el material de recubrimiento. Así, cuando se retira el protector, el recubrimiento permanece en las áreas atacadas, con lo que el patrón resalta.

Maquinado fotoquímico En el maquinado fotoquímico (PCM, por sus siglas en inglés), se usa el método de fotorresistencia para enmascarar. Por lo tanto, el término se aplica correctamente al preformado químico y al grabado químico cuando estos métodos usan el método de resistencia fotográfica. El PCM se emplea en el procesamiento de metales cuando se requieren tolerancias cerradas o patrones complicados sobre piezas planas. Los procesos fotoquímicos también se usan ampliamente en la industria de la electrónica para producir diseños de circuitos complicados sobre tarjetas de semiconductores (sección 35.3.1).

En la figura 26.20 se muestra la sucesión de pasos en el maquinado fotoquímico, cuando éste se aplica al preformado químico. Existen varias formas de exponer fotográficamente

FIGURA 26.20 Sucesión de pasos del procesamiento en el maquinado fotoquímico: 1) limpieza de la materia prima, 2) aplicación de un resistente (protector) por inmersión, pulverización o pintura, 3) colocación de un negativo sobre el resistente, 4) exposición a una luz ultravioleta, 5) revelado para remover el protector sólo en las áreas que se van a atacar, 6) ataque con un material químico (se muestra un efecto parcial), 7) ataque con un material químico (completo), 8) remoción del protector y limpieza para obtener la pieza acabada.



te la imagen deseada sobre la resistencia. La figura muestra el negativo en contacto con la superficie de la resistencia durante la exposición. Ésta es una impresión de contacto, pero existen otros métodos de impresión fotográfica que exponen el negativo a través de un sistema de lentes para ampliar o reducir el tamaño del patrón impreso en la superficie del protector. Los materiales fotoprotectores de uso actual son sensibles a la luz ultravioleta, pero no a la luz de otras longitudes de onda. Por lo tanto, con una iluminación adecuada en la fábrica, no es necesario realizar los pasos del procesamiento en un ambiente de cuarto oscuro. Una vez que se efectúa la operación de enmascarado, los pasos restantes del procedimiento son similares a los de otros métodos de maquinado químico.

En el maquinado fotoquímico, el término que corresponde al factor de ataque químico es **anisotropía**, que se define como la profundidad del corte d dividida entre el socavado u (véase la figura 26.18). Es la misma definición que en la ecuación (26.9).

26.5 CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN

Las aplicaciones típicas de los procesos no tradicionales incluyen las geometrías de piezas con características especiales y los materiales de trabajo que no se procesan con facilidad mediante las técnicas convencionales. En esta sección se examinarán estos aspectos. También se hará un resumen de las características de desempeño generales de los procesos no tradicionales.

Geometría de la pieza de trabajo y materiales de trabajo En la tabla 26.4 se enlistan algunas de las formas de piezas de trabajo especiales, para las que son convenientes los procesos no tradicionales; además se mencionan los procesos no tradicionales que podrían resultar adecuados.

Como grupo, los procesos no tradicionales se aplican a casi todos los materiales de trabajo, tanto metales como no metales. Sin embargo, ciertos procesos no son convenientes

TABLA 26.4 Características geométricas de la pieza de trabajo y procesos no tradicionales adecuados.

Característica geométrica	Proceso adecuado
Orificios muy pequeños. Diámetros menores a 0.125 mm (0.005 in), en algunos casos por debajo de 0.025 mm (0.001 in). Por lo general están por debajo del rango de diámetro para las brocas de taladro convencionales.	EBM, LBM
Orificios cuya relación entre profundidad y diámetro es grande , por ejemplo, $d/D > 20$. Excepto por el taladrado de inyección, estos orificios no pueden maquinarse en las operaciones de taladrado convencionales.	ECM, EDM
Orificios que no son redondos. Los orificios no redondos no pueden taladrarse con una broca de taladro giratorio.	EDM, ECM
Ranuras delgadas en láminas y placas de diferentes materiales. Las ranuras no son necesariamente rectas. En algunos casos, las ranuras tienen formas extremadamente complicadas.	EBM, LBM, WJC, EDM con alambre, AWCI.
Nanomaquinado. Además de cortar pequeños orificios y ranuras estrechas, hay otras aplicaciones de remoción de materiales donde la pieza de trabajo o las áreas que se van a cortar son muy pequeñas.	PCM, LBM, EBM
Cavidades poco profundas y detalles superficiales en piezas planas. Hay un rango significativo en los tamaños de las piezas para esta categoría, desde chips microscópicos para circuitos integrados hasta grandes paneles para aeronaves.	CHM
Formas con contornos especiales para aplicaciones de moldes y troqueles. En ocasiones estas aplicaciones se denominan como producción de matrices.	

TABLA 26.5 Aplicabilidad de procesos de maquinado no tradicionales seleccionados para diversos materiales de trabajo. En esta recopilación se incluyen el fresado y el esmerilado convencionales, con propósitos de comparación.

Material de trabajo	Procesos no tradicionales								Procesos convencionales	
	Mecánicos		Eléctricos		Térmicos			Químicos	Fresado	Esmerilado
	USM	WJC	ECM	EDM	EBM	LBM	PAC	CHM		
Aluminio	C	C	B	B	B	B	A	A	A	A
Acero	B	D	A	A	B	B	A	A	A	A
Superalaciones	C	D	A	A	B	B	A	B	B	B
Cerámicas	A	D	D	D	A	A	D	C	D	C
Vidrio	A	D	D	D	B	B	D	B	D	C
Silicio ^a			D	D	B	B	D	B	D	B
Plásticos	B	B	D	D	B	B	D	C	B	C
Tarjeta impresa ^b	D	D	D	D			D	D	D	D
Textiles ^c	D	D	D	D			D	D	D	D

Recopilados de [16] y otras fuentes.

Clave: A = buena aplicación, B = aplicación regular, C = aplicación deficiente, D = no es aplicable. Los espacios en blanco indican que no se encontraron datos disponibles durante la recopilación.

^aSe refiere al silicio usado en la fabricación de chips de circuitos integrados.

^bIncluye otros productos de papel.

^cIncluye fieltro, cuero y materiales similares.

tes para ciertos materiales de trabajo. En la tabla 26.5 se relaciona la aplicabilidad de los procesos no tradicionales a diversos tipos de materiales. Varios de estos procesos pueden usarse sobre metales, pero nunca sobre no metales. Por ejemplo, el ECM, el EDM y el PAM requieren materiales de trabajo que sean conductores eléctricos. Esto generalmente limita su aplicabilidad a piezas metálicas. El maquinado químico depende de la disponibilidad de un material de ataque químico apropiado para el material de trabajo determinado. Como los metales son más susceptibles al ataque químico de ciertos materiales, por lo general se usa el CHM para procesar metales. Con algunas excepciones, es posible usar USM, AJM, EBM y LBM tanto en metales como en no metales. Generalmente, el WJC está limitado al corte de plásticos, cartulinas, textiles y otros materiales que no poseen la resistencia de los metales.

Desempeño de los procesos no tradicionales En general, los procesos no tradicionales se caracterizan por las velocidades bajas en la remoción de material y energías específicas altas, en relación con las operaciones de maquinado convencionales. La capacidad de control de las dimensiones y el acabado superficial de los procesos no tradicionales varían mucho, pues mientras algunos proporcionan una enorme precisión y buenos acabados,

TABLA 26.6 Características del maquinado en los procesos no tradicionales.

Característica	Procesos no tradicionales								Procesos convencionales	
	Mecánicos		Eléctricos		Térmicos			Químicos	Fresado	Esmerilado
	USM	WJC	ECM	EDM	EBM	LBM	PAC	CHM		
Velocidades de remoción de material	C	C	B	C	D	D	A	B-D ^a	A	B
Control de dimensiones	A	B	B	A-D ^b	A	A	D	A-B ^b	B	A
Acabado superficial	A	A	B	B-D ^b	B	B	D	B	B-C ^b	A
Daño superficial ^c	B	B	A	D	D	D	D	A	B	B-C ^b

Recopilado de [16]. Clave: A = excelente, B = bueno, C = regular y D = deficiente.

^aLa valoración depende del tamaño del trabajo y el método de enmascarado.

^bLa valoración depende de las condiciones de corte.

^cEn el daño superficial, una buena calificación significa un daño mínimo y una calificación deficiente significa una profunda penetración que daña la superficie; los procesos térmicos pueden producir un daño de hasta 0.020 in (0.50 mm) bajo la nueva superficie de trabajo.

otros producen acabados y precisiones deficientes. Otra consideración es el daño de las superficies. Algunos de estos procesos producen muy poco daño metalúrgico sobre el material localizado inmediatamente abajo de la superficie de trabajo, mientras que otros (sobre todo los procesos térmicos) causan un daño considerable a las superficies. La tabla 26.6 compara estas características importantes de los procesos no tradicionales, y usa el fresado y el esmerilado de superficies convencionales con propósitos de comparación. El análisis de los datos revela amplias diferencias en las características de maquinado. Al comparar las características de los maquinados no tradicional y convencional no debe olvidarse que los procesos no tradicionales se usan generalmente cuando los métodos convencionales no son prácticos o económicos.

REFERENCIAS

- [1] Aronson, R. B., "Waterjets Move into the Mainstream", *Manufacturing Engineering*, abril de 2005, pp. 69-74.
- [2] Bellows, G., y Kohls, J. B., "Drilling without Drills", Special Report 743, *American Machinist*, marzo de 1982, pp. 173-188.
- [3] Benedict, G. F., *Nontraditional Manufacturing Processes*, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1987.
- [4] Dini, J. W., "Fundamentals of Chemical Milling", Special Report 768, *American Machinist*, julio de 1984, pp. 99-114.
- [5] Drozda, T. J. y C. Wick (eds.), *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a ed. Vol. I, *Machining*. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1983.
- [6] Guitrau, E., "Sparking Innovations", *Cutting Tool Engineering*, vol. 52, núm. 10, octubre de 2000, pp. 36-43.
- [7] *Machining Data Handbook*, 3a ed. Vol. II. Machinability Data Center. Metcut Research Associates Inc., Cincinnati, Ohio, 1980.
- [8] Mason, F., "Water Jet Cuts Instrument Panels", *American Machinist & Automated Manufacturing*, julio de 1988, pp. 126-127.
- [9] McGeough, J. A., *Advanced Methods of Machining*, Chapman and Hall, Londres, Inglaterra, 1988.
- [10] O'Brien, R. L., *Welding Handbook*, 8a. ed. Vol. 2, *Welding Processes*, American Welding Society, Miami, Florida, 1991.
- [11] Pandey, P. C. y Shan, H. S., *Modern Machining Processes*, Tata McGraw-Hill Publishing Company, Nueva Delhi, India, 1980.
- [12] Vaccari, J. A., "The Laser's Edge in Metalworking", Special Report 768, *American Machinist*, agosto de 1984, pp. 99-114.
- [13] Vaccari, J. A., "Thermal Cutting", Special Report 778, *American Machinist*, julio de 1988, pp. 111-126.
- [14] Vaccari, J. A., "Advances in Laser Cutting", *American Machinist & Automated Manufacturing*, marzo de 1988, pp. 59-61.
- [15] Waurzyniak, P., "EDM's Cutting Edge", *Manufacturing Engineering*, Vol. 123, núm. 5, noviembre de 1999, pp. 38-44.
- [16] Weller, E. J. (ed.), *Nontraditional Machining Processes*. 2a. ed. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

- 26.1. ¿Por qué son importantes los procesos no tradicionales de remoción de material?
- 26.2. Existen cuatro categorías de procesos no tradicionales de maquinado basadas en una forma de energía principal. Mencione estas cuatro categorías.
- 26.3. ¿Cómo funciona el proceso de maquinado ultrasónico?
- 26.4. Describa el proceso de corte con chorro de agua.
- 26.5. ¿Cuál es la diferencia entre el corte con chorro de agua, el corte con chorro de agua abrasiva y el corte con chorro abrasivo?
- 26.6. Mencione los tres tipos principales de maquinado electroquímico.
- 26.7. Identifique las desventajas importantes del maquinado electroquímico.
- 26.8. ¿Cómo afecta una descarga creciente de corriente a la velocidad de remoción de metal y al acabado superficial en el maquinado por descarga eléctrica?
- 26.9. ¿Qué significa el término socavado en el maquinado por descarga eléctrica?
- 26.10. Identifique dos desventajas importantes del corte con arco de plasma.
- 26.11. ¿Cuáles son algunos de los combustibles usados en el corte con oxígeno y gas combustible?
- 26.12. Mencione los cuatro pasos principales en el maquinado químico.
- 26.13. ¿Cuáles son los tres métodos para ejecutar el paso de la colocación del protector en el maquinado químico?
- 26.14. ¿Qué es fotorresistencia en el maquinado químico?