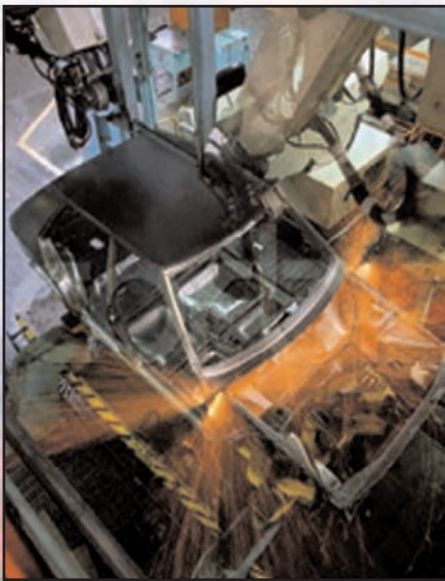


MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

QUINTA EDICIÓN



S. Kalpakjian • S. R. Schmid

Manufactura, ingeniería y tecnología

QUINTA
EDICIÓN

Serope Kalpakjian

Illinois Institute of Technology

Steven R. Schmid

The University of Notre Dame

TRADUCCIÓN

Jaime Espinosa Limón

Ingeniero mecánico

REVISIÓN TÉCNICA

Francisco Javier Sandoval Palafox

Ulises Figueroa López

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Estado de México

Roberto Hernández Cárdenas

Departamentos de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería Industrial

Tecnológico de Estudios Superiores de Jilotepec

PEARSON

Educación

®

México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

Datos de catalogación bibliográfica

KALPAKJIAN, SEROPE

Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2008

ISBN: 978-970-26-1026-7

Área: Ingeniería

Formato: 21 × 27 cm

Páginas: 1328

Authorized translation from the English language edition, entitled *Manufacturing engineering and technology, 5th edition* by *Serope Kalpakjian and Steven Schmid*, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2006. All rights reserved.

ISBN 0-13-148965-8

Traducción autorizada de la edición en idioma inglés, *Manufacturing engineering and technology, 5a edición* por *Serope Kalpakjian y Steven Schmid*, publicada por Pearson Education, Inc., publicada como Prentice Hall, Copyright © 2006. Todos los derechos reservados.

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Editor: Luis Miguel Cruz Castillo
e-mail: luis.cruz@pearsoned.com

Editora de desarrollo: Claudia Celia Martínez Amigón

Supervisor de producción: José D. Hernández Garduño

Edición en inglés

Vice President and Editorial Director, ECS: *Marcia J. Horton*

Executive Editor: *Eric Svendsen*

Associate Editor: *Dee Bernhard*

Executive Managing Editor: *Vince O'Brien*

Managing Editor: *David A. George*

Production Editor: *Rose Kernan*

Director of Creative Services: *Paul Belfanti*

Creative Director: *Heather Scott*

Cover Designer: *John Christiana*

Art Editor: *Xiaohong Zhu*

Manufacturing Manager: *Alexis Heydt-Long*

Manufacturing Buyer: *Lisa McDowell*

Senior Marketing Manager: *Holly Stark*

QUINTA EDICIÓN 2008

D.R. © 2008 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
Atacomulco 500, 5° piso
Col. Industrial Atoto
53519 Naucalpan de Juárez, Edo. de México
E-mail: editorial.universidades@pearsoned.com

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. Núm. 1031.

Prentice Hall es una marca registrada de Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.



ISBN 10: 970-26-1026-5

ISBN 13: 978-970-26-1026-7

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 11 10 09 08

Procesos de maquinado y máquinas herramienta

P A R T E

IV

Las partes manufacturadas mediante los procesos de fundición, formado y moldeado descritos en las partes II y III requieren con frecuencia operaciones adicionales antes de que el producto pueda utilizarse, incluyendo muchas piezas fabricadas con métodos de forma neta, o cercana a la neta. Por ejemplo, considérese las siguientes características de las partes y si pueden producirse por medio de los procesos analizados hasta este momento:

- Superficies lisas y brillantes, como las de apoyo del cigüeñal mostrado en la figura IV.1.
- Orificios de diámetro pequeño en una parte, como la boquilla de inyección mostrada en la figura IV.2.



FIGURA IV.1 Un cigüeñal forjado antes y después de maquinar las superficies de apoyo. Las superficies de apoyo brillantes de la parte a la derecha no se pueden producir con esas dimensiones y acabado superficial final por ningún otro de los procesos descritos en los capítulos anteriores de este libro. *Fuente:* Cortesía de Wyman-Gordon Company.

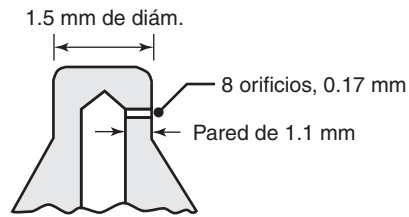


FIGURA IV.2 Sección transversal de una boquilla de inyección de combustible que muestra un pequeño orificio producido mediante el proceso de maquinado por descarga eléctrica, descrito en la sección 27.5. El material es acero con tratamiento térmico.

- Partes con detalles agudos, secciones roscadas y tolerancias dimensionales cerradas específicas, como se muestra en la figura IV.3.
- Un orificio u orificios roscados en diferentes superficies de una parte, para el ensamble mecánico con otros componentes.
- Acabado superficial y texturas especiales para propósitos funcionales o de apariencia.

Una breve revisión indicará que ninguno de los procesos de formado y moldeado ya descritos es capaz de producir partes con dichas características específicas, además de que las partes requerirían operaciones posteriores de manufactura. El **maquinado** es un término general que describe un grupo de procesos cuyo propósito es la *remoción* de material y la *modificación* de las superficies de una pieza de trabajo, después de haber sido producida por diversos métodos. Por ende, el maquinado comprende operaciones *secundarias* y de *acabado*.

La amplísima variedad de formas producidas por medio del maquinado se puede ver claramente en un automóvil, como se muestra en la figura IV.4. También debe reconocerse que algunas partes pueden fabricarse hasta darles su forma final (forma neta) y en grandes cantidades mediante los procesos de formado y moldeado, como la fundición a presión en matriz y la metalurgia de polvos. Sin embargo, el maquinado puede ser más

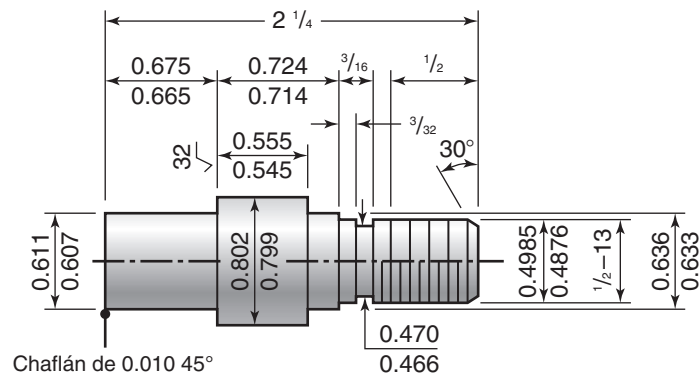


FIGURA IV.3 Parte maquinada y roscada que muestra diversas dimensiones y tolerancias; todas las dimensiones se miden en pulgadas. Obsérvese que algunas tolerancias sólo son de algunas milésimas de pulgada.

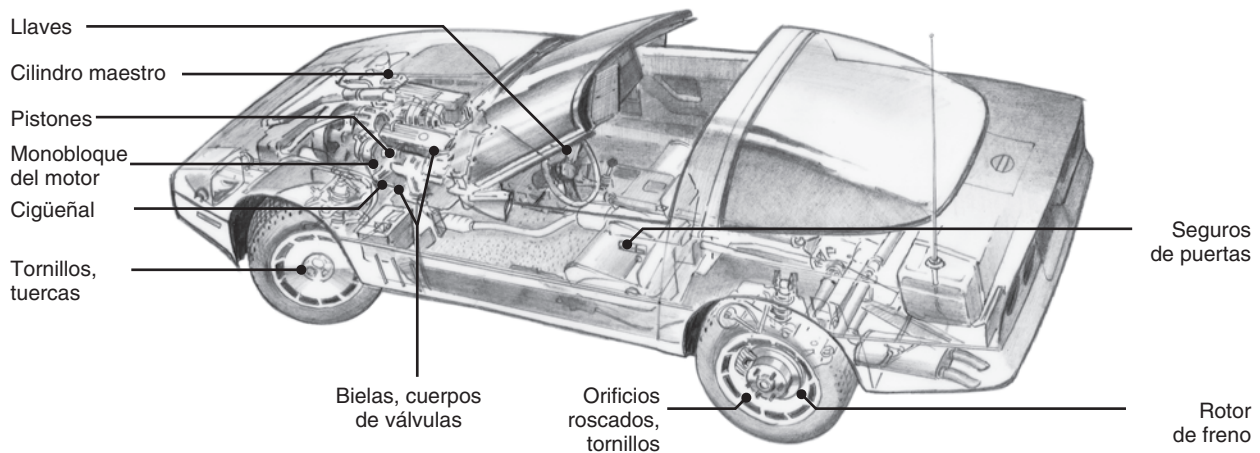


FIGURA IV.4 Partes comunes de un automóvil que requieren operaciones de maquinado para adquirir las características superficiales, dimensiones y tolerancias deseadas.

económico, dado que el número de partes requeridas es relativamente pequeño, o el material y la forma de la parte permiten maquinaarla a altas velocidades y cantidades, con una alta precisión dimensional. Un buen ejemplo es la producción de partes roscadas de bronce, mecanizadas en máquinas roscadoras automáticas de husillos múltiples.

Sin embargo, en general, acudir al maquinado sugiere que una parte podría no haberse producido hasta las especificaciones finales deseadas mediante los procesos fundamentales que se utilizaron para fabricarla. Nuevamente destacamos la importancia de la *manufactura de forma neta*, descrita en la sección I.5, para evitar estos pasos adicionales y reducir los costos de producción.

A pesar de sus ventajas, los procesos de remoción de material tienen las siguientes desventajas:

- *Desperdician material* (aunque la cantidad puede ser relativamente pequeña).
- Generalmente, los procesos requieren *más tiempo* que el necesario para dar forma mediante otros procesos.
- Por lo común requieren *más energía* para realizar las operaciones de formado y moldeado.
- Pueden tener *efectos adversos* en la calidad de la superficie y en las propiedades del producto.

Como se indicó en la figura I.7e de la Introducción General, el maquinado consiste en varios tipos importantes de procesos de remoción de material:

- **Corte**, que por lo común comprende herramientas de corte de un solo filo o de filos múltiples, cada una con una forma claramente definida (capítulos 23 a 25).
- **Procesos abrasivos**, como el rectificado y los procesos relacionados con éste (capítulo 26).
- **Procesos avanzados de maquinado**, que utilizan métodos eléctricos, químicos, térmicos, hidrodinámicos y láser para cumplir su tarea (capítulo 27).

Las máquinas en las que se realizan estas operaciones se llaman **máquinas herramienta**. Como se describe a lo largo de la parte IV, su construcción y características influyen en gran medida en dichas operaciones, así como en la calidad del producto, en el acabado superficial y en la precisión dimensional.

Como puede verse en la tabla I.2 de la Introducción General, las primeras herramientas primitivas (que se remontan a varios milenios atrás) se fabricaron con el objeti-

vo principal de retirar astillas y cortar todo tipo de material natural (como madera, piedra, vegetación y ganado) con propósitos de alimentación y abrigo. Obsérvese también que no fue sino hasta el siglo XVI cuando se inició el avance en la manufactura de productos mediante operaciones de maquinado, en particular con la introducción de los tornos. Ahora contamos con una amplia variedad de máquinas herramienta controladas por computadora y técnicas modernas (utilizando diversos materiales y fuentes de energía), que son capaces de producir partes funcionales del tamaño de diminutos insectos y con secciones transversales más pequeñas que el cabello humano.

Como en otras operaciones de manufactura, es importante ver las operaciones de maquinado como un *sistema*, que consta de:

- *Pieza de trabajo.*
- *Herramienta de corte.*
- *Máquina herramienta, y*
- *Personal de producción.*

El maquinado no se puede realizar eficiente o económicamente ni satisfacer especificaciones estrictas de la parte sin un conocimiento profundo de las interacciones entre estos cuatro elementos.

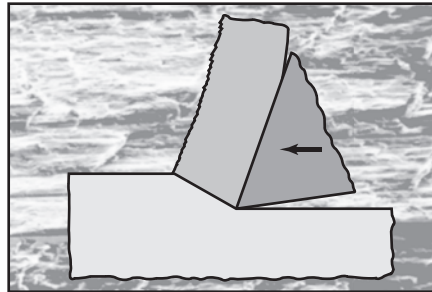
En los siguientes siete capítulos describimos primero la mecánica fundamental de la formación de viruta en el maquinado: las fuerzas de la herramienta, la potencia, la temperatura, el desgaste de las herramientas, el acabado y la integridad superficiales, las herramientas de corte y los fluidos de corte. Después analizamos los procesos específicos de maquinado, sus capacidades, limitaciones y aplicaciones comunes, e identificamos características importantes de las máquinas herramienta para operaciones como el torneado, fresado, mandrinado, taladrado y machueleado. También se describen las características de los *centros de maquinado*, máquinas herramienta versátiles controladas por computadora y capaces de realizar con eficiencia numerosas operaciones.

También describimos procesos en los que la remoción de material (hasta una precisión dimensional y un acabado superficial muy elevados) se efectúa mediante **procesos abrasivos** y operaciones relacionadas con ellos. Ejemplos comunes son los discos para rectificado, abrasivos recubiertos, honeado o asentado, lapeado, abrillantado, pulido, granallado y maquinado ultrasónico.

Por razones técnicas y económicas, algunas partes no se pueden maquinar de manera satisfactoria mediante procesos de corte o abrasivos. Desde la década de 1940 han ocurrido importantes desarrollos en los **procesos avanzados de maquinado**, como el maquinado químico, electroquímico, por descarga eléctrica, por rayo láser, por haz de electrones, por chorro abrasivo e hidrodinámico.

El conocimiento adquirido en la parte IV nos permitirá evaluar las capacidades y limitaciones de los procesos de remoción de material; las máquinas herramienta y el equipo relacionado con ellas; su selección apropiada para obtener la mayor eficiencia y productividad al menor costo, y cómo se encuadran estos procesos en el esquema más amplio de las operaciones de manufactura.

Fundamentos del maquinado



CAPÍTULO 21

Como introducción a los procesos de maquinado que se cubrirán en los siguientes capítulos, en éste describimos el mecanismo por el cual se cortan los materiales. Específicamente:

- Cómo se producen las virutas durante el maquinado.
- Requerimientos de fuerza y potencia en el maquinado.
- Factores comprendidos en la elevación de la temperatura y sus efectos.
- Cómo se desgastan y fallan las herramientas de corte.
- Acabado superficial e integridad de las partes producidas mediante maquinado.
- Maquinabilidad de los materiales.

21.1 | Introducción

Los procesos de corte retiran material de la superficie de una pieza de trabajo mediante la producción de **virutas**. En la figura 21.1 se ilustran algunos de estos procesos (ver también fig. I.7e).

- **Cilindrado**, en el que se gira la pieza de trabajo y una herramienta de corte retira una capa de material al moverse hacia la izquierda, como en la figura 21.1a.
- **Tronzado**, donde una herramienta de corte se desplaza radialmente hacia dentro y separa la pieza de la derecha de la masa de la pieza en bruto.
- La operación de **fresado de careado**, en la que una herramienta de corte retira una capa de material de la superficie de la pieza de trabajo.
- La operación de **fresado frontal**, en la que un cortador giratorio se desplaza con cierta profundidad a lo largo de la pieza de trabajo y produce una cavidad.

En el proceso de cilindrado, que se ilustra con mayor detalle en la figura 21.2, la herramienta de corte se ajusta a cierta *profundidad de corte* (en mm o en pulgadas) y se desplaza hacia la izquierda con determinada velocidad mientras la pieza de trabajo gira. El *avance*, o *velocidad de avance*, es la distancia que la herramienta se desplaza horizontalmente por cada revolución de la pieza (mm/rev o pulgadas/rev). Este movimiento de la herramienta produce una viruta, que se mueve hacia arriba de la cara de la herramienta.

Para analizar este proceso con detalle, en la figura 21.3a se presenta un modelo bidimensional. En este modelo idealizado, una herramienta de corte se mueve hacia la iz-

21.1	Introducción	607
21.2	Mecánica del corte	609
21.3	Fuerzas y potencia de corte	620
21.4	Temperaturas en el corte	623
21.5	Vida útil de la herramienta: desgaste y falla	626
21.6	Acabado superficial e integridad	635
21.7	Maquinabilidad	638

EJEMPLOS:

21.1	Energías relativas en el corte	623
21.2	Determinación de los coeficientes C y n en la ecuación de Taylor	630
21.3	Incremento de la vida de la herramienta mediante la reducción de la velocidad de corte	630
21.4	Efecto de la velocidad de corte en la remoción de material	631

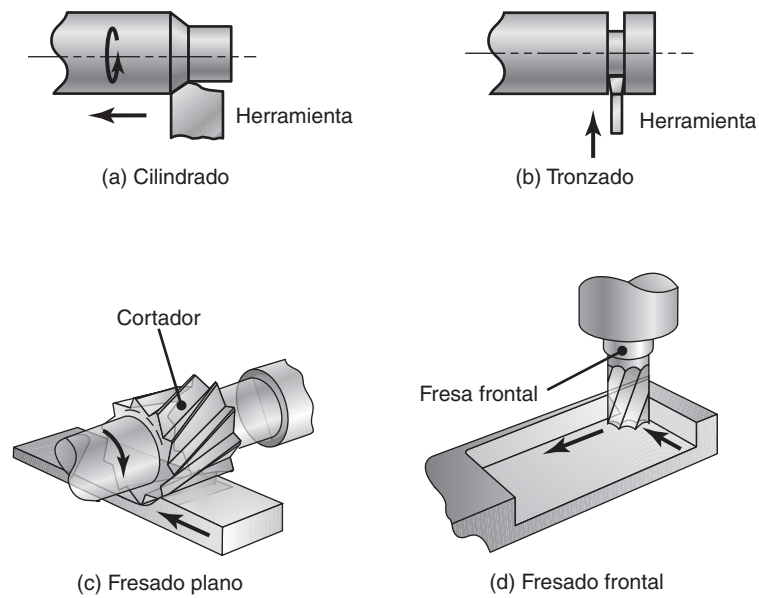


FIGURA 21.1 Algunos ejemplos de operaciones comunes de maquinado.

quiera a lo largo de la pieza de trabajo a una velocidad constante (V) y a una profundidad de corte (t_o). Se produce una viruta delante de la herramienta por medio de la deformación plástica y el cizallamiento continuo del material a lo largo del plano de corte. Este fenómeno se puede demostrar raspando lentamente la superficie de una barra de mantequilla a lo largo con un cuchillo afilado y observando la formación de una viruta. El rasurado de chocolate para decorar pasteles y galletas se produce de manera similar.

Si se comparan las figuras 21.2 y 21.3 se observará que el avance en el torneado es equivalente a t_o , y que la profundidad del corte equivale a su anchura (dimensión perpendicular a la página) en el modelo idealizado. Estas relaciones se pueden visualizar girando 90° la figura 21.3 en el sentido de las manecillas del reloj. Con esta breve introducción como antecedente, ahora describiremos el proceso de corte con mayor detalle.

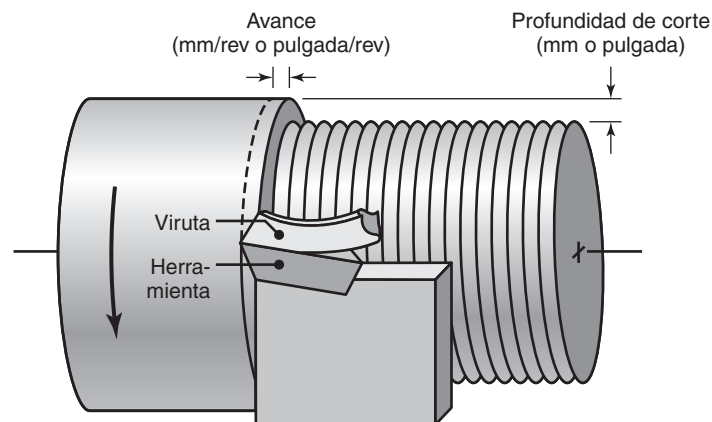


FIGURA 21.2 Esquema de la operación de cilindrado que muestra diversas características.

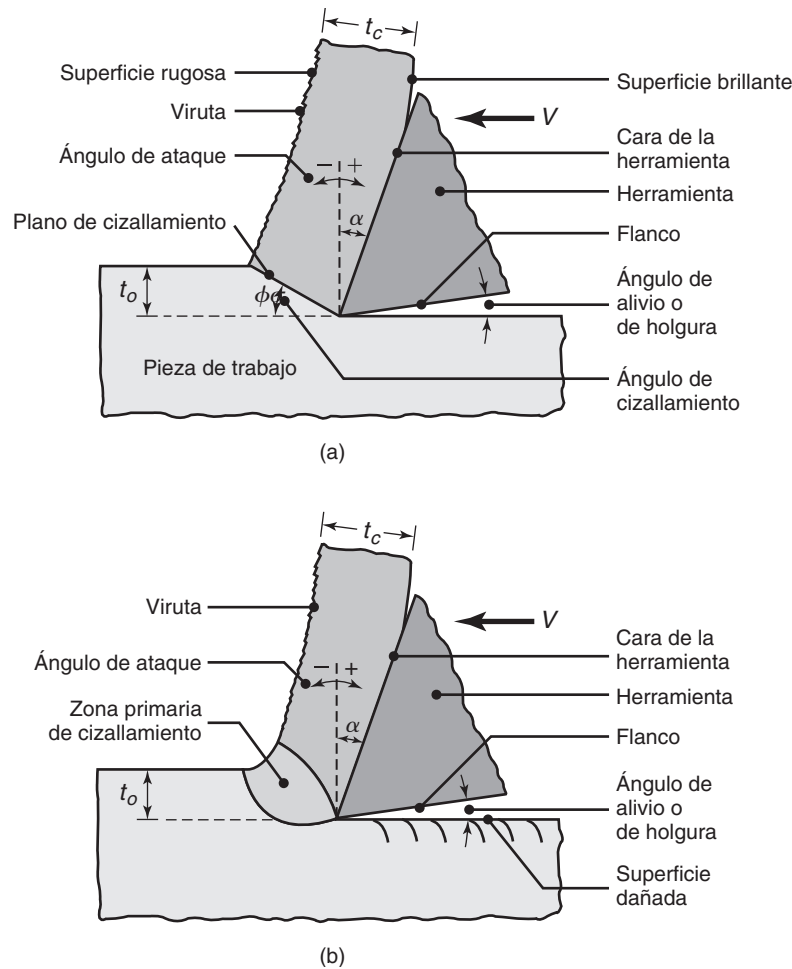


FIGURA 21.3 Esquema de un proceso de corte bidimensional, también llamado corte ortogonal: (a) corte ortogonal con un plano bien definido de cizallamiento, también conocido como modelo Merchant. Obsérvese que la forma de la herramienta, la profundidad de corte (t_o) y la velocidad de corte (V) son todas variables independientes; (b) corte ortogonal sin un plano bien definido de corte.

21.2 Mecánica del corte

En la tabla 21.1 se indican los factores que influyen en el proceso de corte. Para apreciar el contenido de esta tabla, identifiquemos ahora las *variables independientes* esenciales en el proceso de corte: (a) material y recubrimientos de la herramienta; (b) forma, acabado superficial y filo de la herramienta; (c) material y condiciones de la pieza de trabajo; (d) avance, velocidad y profundidad de corte; (e) fluidos de corte; (f) características de la máquina herramienta, y (g) sujeciones y soportes de la pieza de trabajo.

Las *variables dependientes* en el corte son aquellas a las que afectan los cambios en las variables independientes indicadas en el párrafo anterior, e incluyen: (a) tipo de viruta producida, (b) fuerza y energía disipada durante el corte, (c) elevación de la temperatura en la pieza de trabajo, la herramienta y la viruta, (d) desgaste y falla de la herramienta, y (e) acabado superficial e integridad de la superficie de la pieza de trabajo.

TABLA 21.1

Factores que influyen en las operaciones de maquinado	
Parámetro	Influencia y relación
Velocidad de corte, profundidad de corte, avance, fluidos de corte	Fuerzas, potencia, elevación de temperatura, vida útil de la herramienta, tipo de viruta, acabado e integridad superficial.
Ángulos de la herramienta	Igual que en el párrafo anterior; influencia en la dirección de flujo de la viruta; resistencia al desgaste y astillado de la herramienta.
Viruta continua	Buen acabado superficial; fuerzas estables de corte; indeseable, en particular en la maquinaria automatizada.
Viruta de borde acumulado o recrecido	Acabado e integridad superficial deficientes; si es delgada y estable, el borde acumulado puede proteger las superficies de la herramienta.
Viruta discontinua	Deseable para facilitar la disposición de la viruta; fuerzas fluctuantes de corte; puede afectar el acabado superficial y provocar vibración y traqueteo.
Elevación de la temperatura	Influye en la vida útil de la herramienta, en particular en la craterización y en la precisión dimensional de la pieza de trabajo; puede provocar daño térmico a la superficie de la pieza de trabajo.
Desgaste de la herramienta	Influye en el acabado e integridad superficial, la precisión dimensional, la elevación de la temperatura, las fuerzas y la potencia.
Maquinabilidad	Relacionada con la vida útil de la herramienta, el acabado superficial, las fuerzas y la potencia y el tipo de viruta.

Cuando los resultados de las operaciones de maquinado son inaceptables, la resolución normal de los problemas requiere una investigación sistemática. Una cuestión común es cuál de las variables independientes debe cambiarse primero, y en qué medida, si: (a) el acabado superficial de la pieza de trabajo que se está cortando es deficiente e inaceptable; (b) la herramienta de corte se desgasta con rapidez y se desafilas; (c) la pieza de trabajo se calienta mucho, y (d) la herramienta comienza a vibrar y traquetear.

Para entender estos fenómenos y responder a estas preguntas, primero analicemos la mecánica de la formación de viruta, un tema que se ha estudiado ampliamente desde la década de 1940. Se han propuesto varios modelos (con grados variables de complejidad). Como sucede en otros procesos de manufactura (como fundición, moldeo, moldeado y formado), los modelos avanzados de maquinado también están en continuo desarrollo. Estos métodos incluyen la *simulación en computadora* de los procesos de maquinado a fin de estudiar las complejas interacciones de las muchas variables comprendidas en el proceso, al tiempo que se desarrollan habilidades para *optimizar* las operaciones de maquinado.

El modelo simple presentado en la figura 21.3a (al que se conoce como modelo M. E. Merchant, desarrollado en la década de 1940) es suficiente para nuestros propósitos; se le llama de **corte ortogonal** porque es bidimensional y las fuerzas involucradas (como se muestra en la figura 21.11) son perpendiculares una a la otra. La herramienta de corte tiene un **ángulo de ataque** α (positivo, como se ve en la figura) y un **ángulo de alivio** o **de holgura**.

El examen microscópico de las virutas obtenidas en las operaciones reales de maquinado ha demostrado que se producen por *cizallamiento* (como se modela en la fig. 21.4a), de modo similar al movimiento de un paquete de naipes deslizándose uno sobre otro. El cizallamiento ocurre a lo largo de la **zona de cizallamiento** (por lo general, un plano bien definido al que se conoce como **plano de cizallamiento o cortante**) en un ángulo ϕ (llamado **ángulo de cizallamiento o del plano cortante**). Debajo de este plano, la pieza de trabajo permanece sin deformaciones; encima de él, la viruta recién formada se mueve hacia arriba sobre la cara de ataque de la herramienta. Se ha exagerado la dimensión d de la figura para mostrar el mecanismo correspondiente. En realidad, esta dimensión es sólo del orden de 10^{-2} a 10^{-3} mm (10^{-3} a 10^{-4} pulgadas).

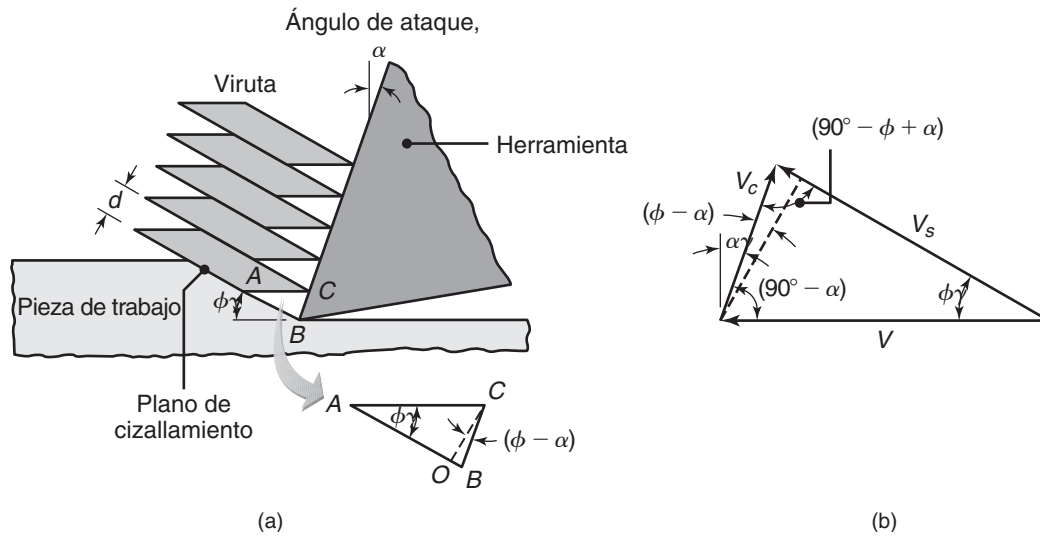


FIGURA 21.4 (a) Esquema del mecanismo básico de formación de viruta por cizallamiento. (b) Diagrama de velocidades que muestra las relaciones angulares entre las tres velocidades en la zona de corte.

Algunos materiales (de manera notable los hierros fundidos a bajas velocidades) no se cizallan a lo largo de un plano bien definido, sino en una zona, como se muestra en la figura 21.3b. El cizallamiento en tales volúmenes no es cuestionable, pero puede provocar defectos superficiales en la pieza de trabajo (como se discutirá más adelante).

Relación de corte. El espesor de la viruta (t_c) se puede determinar conociendo la profundidad de corte (t_o) y α y ϕ . A la relación de t_o/t_c se le llama **relación de corte** (o relación de espesor de viruta), r , y se relaciona con los dos ángulos mediante las siguientes relaciones:

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (21.1a)$$

y

$$r = \frac{t_o}{t_c} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (21.1b)$$

Debido a que el espesor de la viruta siempre es mayor que la profundidad de corte, el valor de r siempre es menor a la unidad. Al recíproco de r se le conoce como *relación* o *factor de compresión de la viruta* y es, por lo tanto, una medida de cuán gruesa se ha vuelto la viruta respecto de la profundidad de corte; de ahí que la relación de compresión de la viruta siempre sea mayor que la unidad. A la profundidad de corte también se le llama *espesor sin deformación de la viruta*, lo que puede visualizarse al revisar la figura 21.3.

La relación de corte es un parámetro importante y útil para evaluar las condiciones de corte. Debido a que el espesor sin deformación de la viruta (t_o) es un parámetro de la máquina, y por lo tanto ya es conocido, la relación de corte se puede calcular con facilidad midiendo el espesor de la viruta con un micrómetro. Si se conoce también el ángulo de ataque para una operación específica de corte (es una función de la geometría de la herramienta y de la pieza de trabajo en uso), la ecuación 21.1 permite calcular el ángulo de cizallamiento.

Aunque nos hemos referido a t_o como la *profundidad de corte*, nótese que en un proceso de maquinado (como el cilindrado que se muestra en la fig. 21.2) esta cantidad es el *avance*. Para visualizar esta situación, supóngase que la pieza de trabajo de la figura 21.2 es un tubo de pared delgada y que la anchura del corte es igual al espesor del tubo. Entonces, si la figura 21.3 se gira 90° en el sentido de las manecillas del reloj, observaremos que ahora es similar a la vista en la figura 21.2.

Deformación cortante o cizallamiento. Si nos referimos ahora a la figura 21.4a, podemos ver que la **deformación cortante** o cizallamiento (γ) que sufre el material se puede expresar como:

$$\gamma = \frac{AB}{OC} = \frac{AO}{OC} + \frac{OB}{OC}$$

o

$$\gamma = \cot \phi + \tan(\phi - \alpha) \quad (21.2)$$

Nótese que las deformaciones cortantes grandes se asocian con ángulos bajos de cizallamiento o con ángulos de ataque bajos o negativos. En las operaciones reales de corte se han observado deformaciones cortantes de 5 o mayores. Si se compara con los procesos de formado y moldeado, el material de la pieza de trabajo sufre una mayor deformación durante el corte, como se ve también en la tabla 2.4. Además, por lo general, la deformación en el corte ocurre dentro de una zona de deformación muy estrecha. En otras palabras, la dimensión $d = OC$ en la figura 21.4a es muy pequeña. Por lo tanto, la velocidad a la que ocurre el cizallamiento es alta. En la sección 21.3 analizamos la naturaleza y el tamaño de la zona de deformación.

El ángulo de cizallamiento tiene gran importancia en la mecánica de las operaciones de corte, pues afecta los requisitos de fuerza y potencia, el espesor de la viruta y la temperatura. Por lo tanto, se ha puesto mucha atención en determinar las relaciones entre dicho ángulo, las variables del proceso de corte y las propiedades del material de la pieza de trabajo. Uno de los primeros análisis se basó en el supuesto de que el ángulo de cizallamiento se ajusta por sí mismo para minimizar la fuerza de corte, o que el plano de cizallamiento es un plano de máximo esfuerzo cortante o de cizallamiento. Este análisis produjo la expresión:

$$\phi = 45^\circ + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (21.3)$$

donde β es el **ángulo de fricción** y está relacionado con el *coeficiente de fricción* (μ) en la interfaz herramienta-viruta mediante la expresión $\mu = \tan \beta$. Entre las muchas relaciones cizallamiento-ángulo desarrolladas, otra fórmula útil que suele aplicarse es:

$$\phi = 45^\circ + \alpha - \beta \quad (21.4)$$

En general, el coeficiente de fricción en el corte de metales va de aproximadamente 0.5 a 2, lo que indica que la viruta encuentra gran resistencia de fricción al moverse hacia arriba de la cara de ataque de la herramienta. Los experimentos han mostrado que μ varía de manera considerable a lo largo de la interfaz herramienta-viruta debido a las abruptas variaciones en la presión de contacto y en la temperatura. En consecuencia, a m también se le conoce como *coeficiente medio aparente de fricción*.

La ecuación 21.3 indica que: (a) al disminuir el ángulo de ataque y/o al aumentar la fricción en la interfaz herramienta-viruta (cara de ataque), el ángulo de cizallamiento se reduce y la viruta se vuelve más gruesa; (b) una viruta más gruesa significa mayor disipación de energía, ya que la deformación cortante es mayor (ver ecuación 21.2), y (c) debido a que el trabajo realizado durante el corte se convierte en calor, la elevación de la temperatura también es mayor. Los efectos de estos fenómenos se describen en el resto de este capítulo.

Velocidades en la zona de corte. En la figura 21.3 se observa que el espesor de la viruta es mayor que la profundidad de corte, por lo que la velocidad de la viruta (V_c) tiene que ser menor que la velocidad de corte (V).

Debido a que debe mantenerse la continuidad de la masa,

$$V t_o = V_c t_c \quad \text{o} \quad V_c = V r$$

De ahí que,

$$V_c = \frac{V \sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (21.5)$$

También se puede construir un *diagrama de velocidades*, como se muestra en la figura 21.4b, donde a partir de las relaciones trigonométricas obtenemos la ecuación:

$$\frac{V}{\cos(\phi - \alpha)} = \frac{V_s}{\cos \alpha} = \frac{V_c}{\sin \phi} \quad (21.6a)$$

donde V_s es la velocidad a la que ocurre el cizallamiento en el plano de cizallamiento. Obsérvese también que:

$$r = \frac{t_o}{t_c} = \frac{V_c}{V} \quad (21.6b)$$

Utilizaremos estas relaciones de velocidad en la sección 21.3, cuando se describan los requerimientos de potencia en las operaciones de corte.

21.2.1 Tipos de virutas producidos en el corte de metales

En la figura 21.5 se muestran los tipos de virutas metálicas que suelen observarse en la práctica y fotomicrografías de los mismos. Los cuatro tipos principales son:

- Continua
- De borde acumulado (o recrecido)
- Aserrada o segmentada
- Discontinua

Observemos primero que la viruta tiene dos superficies: una ha estado en contacto con la cara de ataque de la herramienta y posee una apariencia brillante y pulida, provocada por el rozamiento conforme la viruta se desplaza hacia arriba de la cara de la herramienta. La otra superficie es la original de la pieza de trabajo; su apariencia es rugosa y mellada (como se puede ver en las figs. 21.3 y 21.5), debido al mecanismo de cizallamiento mostrado en la figura 21.4a. Esta superficie está expuesta al ambiente y no ha entrado en contacto con algún cuerpo sólido.

Virutas continuas. Por lo general, las *virutas continuas* se forman con materiales dúctiles, maquinados a altas velocidades de corte o a ángulos elevados de ataque (fig. 21.5a). La deformación del material ocurre a lo largo de una estrecha zona de cizallamiento llamada *zona primaria de cizallamiento*. Las virutas continuas pueden desarrollar una *zona secundaria de cizallamiento* (fig. 21.5b) debido a la elevada fricción en la interfaz herramienta-viruta; esta zona se vuelve más gruesa al aumentar la fricción.

La deformación como viruta continua también puede ocurrir a lo largo de una zona primaria de cizallamiento con *fronteras curvas* (ver fig. 21.3b), a diferencia de la mostrada en la figura 21.5a. Obsérvese que la frontera inferior de la zona de deformación se encuentra *debajo* de la superficie maquinada, sometiéndola a distorsión, como indican las líneas verticales distorsionadas en la parte inferior de la superficie maquinada. Por lo general, esta situación se presenta en el maquinado de metales blandos a bajas velocidades y con bajos ángulos de ataque; comúnmente produce un pobre acabado superficial e induce esfuerzos residuales superficiales, lo que puede dañar las propiedades de la parte maquinada en la vida de su superficie.

Aunque por lo general producen un buen acabado superficial, las virutas continuas no son necesariamente deseables, en particular con las máquinas herramienta controladas por computadora que se utilizan con amplitud, pues tienden a atorarse alrededor del portaherramientas, los soportes, la pieza de trabajo y en los sistemas de disposición de las virutas. Es posible que la operación tenga que detenerse para limpiar las virutas. Este problema se puede aligerar con **rompevirutas** (para continuar) o cambiando los parámetros, como el avance, la velocidad y la profundidad de corte y mediante el uso de fluidos de corte.

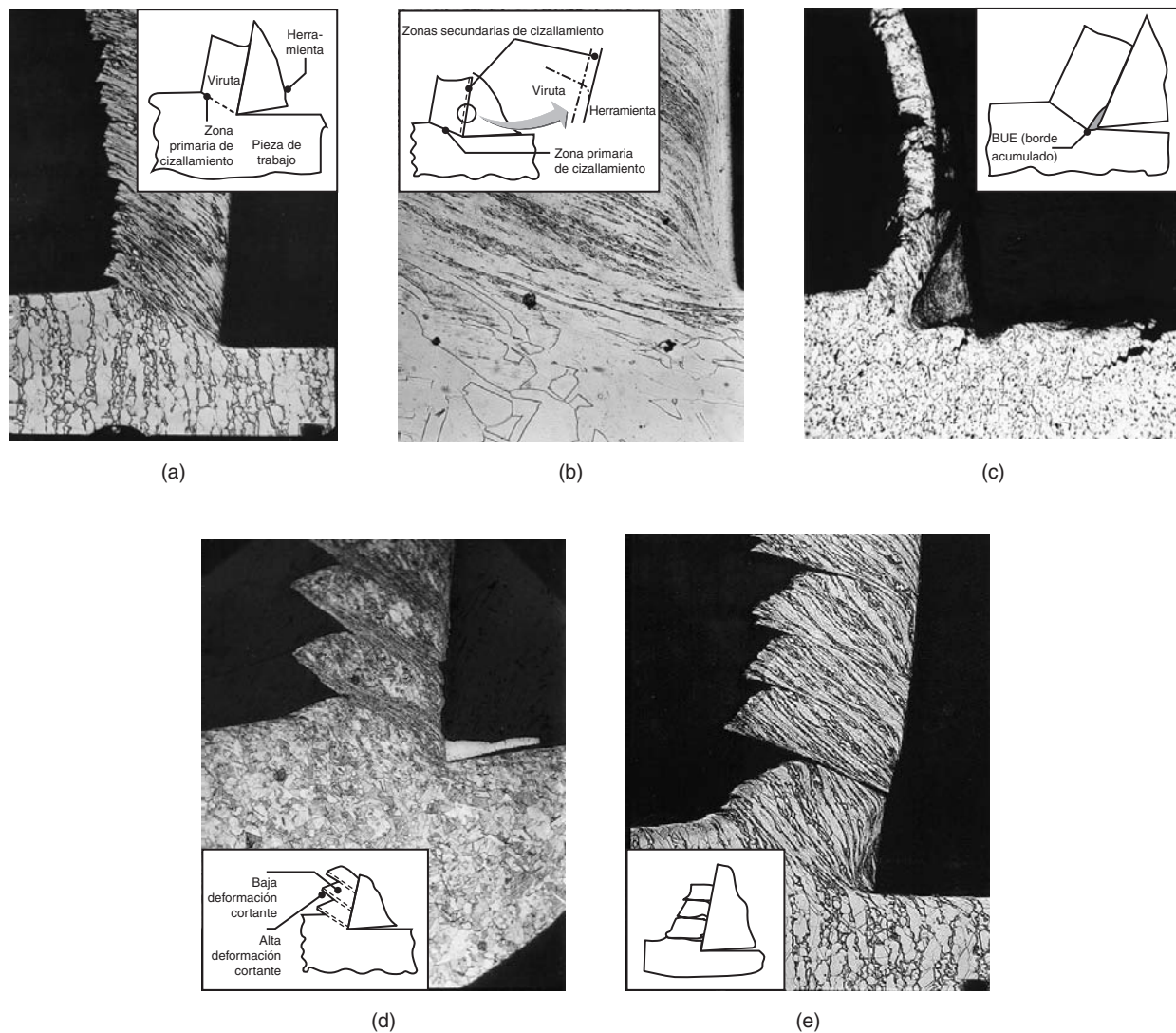


FIGURA 21.5 Tipos básicos de virutas generadas en el corte ortogonal de los metales, representación esquemática y fotomicrografías de la zona de corte: (a) viruta continua con una zona primaria de cizallamiento estrecha y recta; (b) viruta continua con una zona secundaria de cizallamiento en la interfaz viruta-herramienta; (c) borde acumulado o recrecido; (d) viruta segmentada o no homogénea; y (e) viruta discontinua. *Fuente:* M. C. Shaw, P. K. Wright y S. Kalpakjian.

Virutas de borde acumulado (o recrecido). Un *borde acumulado* o *recrecido* (BUE, por sus siglas en inglés) consiste en capas de material de la pieza de trabajo que se depositan gradualmente en la punta de la herramienta, de ahí el término *acumulado* (fig. 21.5c). Cuando crece, el BUE se vuelve inestable y al final se rompe. Parte del material del BUE es retirado mediante la cara de la herramienta de la viruta; el resto se deposita al azar sobre la superficie de la pieza de trabajo. El ciclo de formación y destrucción de BUE se repite en forma continua durante la operación de corte hasta que se toman medidas correctivas. En efecto, el borde acumulado cambia la geometría del filo y lo desafilado (fig. 21.6a).

El borde acumulado se observa comúnmente en la práctica. Es un factor importante que afecta de manera adversa el acabado superficial, como puede verse en las figuras 21.5c y 21.6b y c. Sin embargo, por lo regular, un BUE delgado y estable se considera deseable

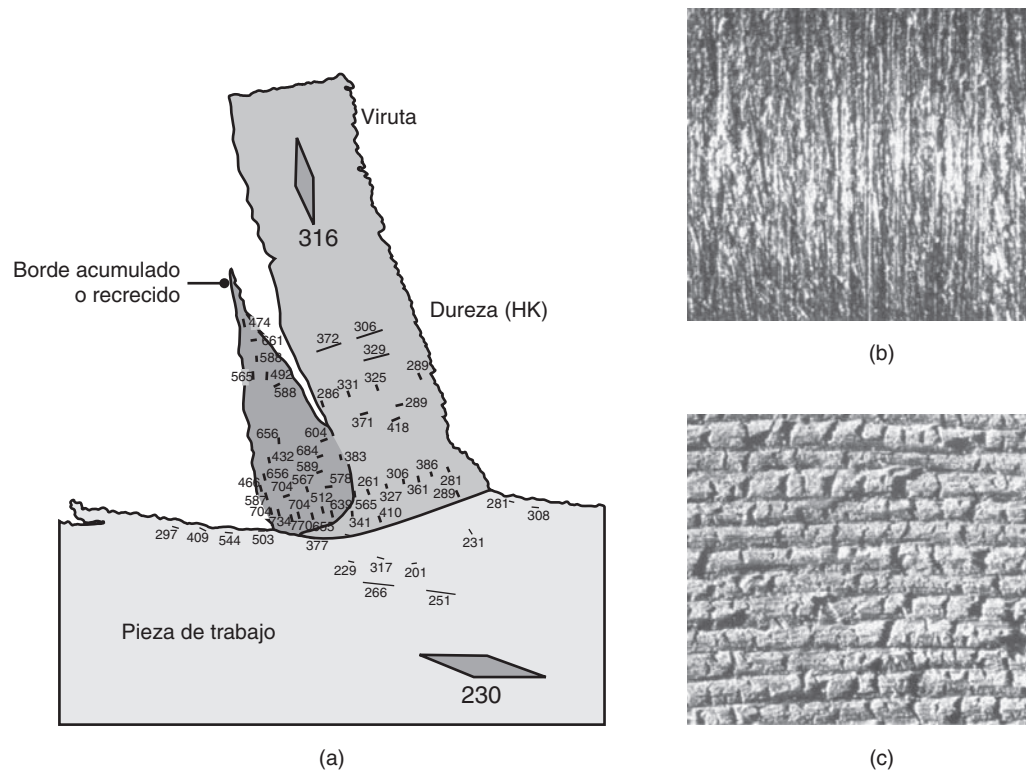


FIGURA 21.6 (a) Distribución de dureza con un borde acumulado o recocido en la zona de corte (material, acero 3115). Obsérvese que algunas regiones en el borde acumulado son hasta tres veces más duras que la masa del metal de la pieza de trabajo. (b) Acabado superficial producido al cilindrar acero 5130 con un borde acumulado. (c) Acabado superficial en acero 1018 en fresado plano. Amplificaciones: 15 $\times$. Fuente: Cortesía de Metcut Research Associates, Inc.

porque reduce el desgaste de la herramienta al proteger su cara de ataque. En general, los metales trabajados en frío tienen menor tendencia a formar BUE que en su condición de recocidos. El endurecimiento por trabajo y la deposición de capas sucesivas de material incrementan de manera significativa la dureza del BUE (fig. 21.6a). Al aumentar la velocidad de corte, disminuye el tamaño del BUE; de hecho, puede no formarse siquiera.

La tendencia a la formación del BUE se puede reducir mediante uno o más de los siguientes medios:

- Aumento de las velocidades de corte.
- Disminución de la profundidad de corte.
- Incremento del ángulo de ataque.
- Uso de una herramienta afilada.
- Uso de un fluido de corte eficaz.
- Uso de una herramienta de corte que tenga menos afinidad química con el material de la pieza de trabajo.

Virutas aserradas. Las *virutas aserradas* (también llamadas *virutas segmentadas* o *no homogéneas*, ver fig. 21.5d) son semicontinuas, con grandes zonas de baja deformación cortante y pequeñas zonas de alta deformación cortante, de ahí que a estas últimas se les conozca como zonas de *localización del cizallamiento*. Este comportamiento se

muestra en los metales con baja conductividad térmica y resistencia, que disminuyen en forma abrupta con la temperatura (reblandecimiento térmico), más notablemente en el titanio. Las virutas tienen una apariencia aserrada. (No debe confundirse este tipo de viruta con la ilustración de la fig. 21.4a, donde la dimensión d ha sido muy exagerada).

Virutas discontinuas. Las *virutas discontinuas* consisten en segmentos que pueden estar firmemente sujetos uno a otro, o muy sueltos (fig. 21.5e). Es común que las virutas discontinuas se formen en las siguientes condiciones:

- Materiales frágiles de la pieza de trabajo, porque no tienen la capacidad de soportar la elevada deformación cortante comprendida en el corte.
- Materiales de la pieza de trabajo con inclusiones duras e impurezas, o que tienen estructuras como de hojuelas de grafito en la fundición de hierro gris.
- Velocidades de corte muy bajas o muy altas.
- Grandes profundidades de corte.
- Bajos ángulos de ataque.
- Falta de un fluido de corte eficaz.
- Poca rigidez del portaherramientas o de la máquina herramienta, lo que permite que ocurra la vibración y el traqueteo.

La naturaleza discontinua de la formación de viruta ocasiona que la fuerza varíe de manera continua durante el corte. En consecuencia, la rigidez del portaherramienta de la herramienta de corte, los dispositivos de sujeción del trabajo y la máquina herramienta son importantes tanto en el corte con virutas aserradas como con virutas discontinuas. Si no es suficientemente rígida, la máquina herramienta puede comenzar a vibrar y traquear, como se discute con detalle en la sección 25.4. Esto, a su vez, afecta en forma adversa el acabado superficial y la precisión dimensional de la parte maquinada y, de ser excesivo, puede causar un desgaste prematuro o daño a la herramienta de corte, e incluso a los componentes de la máquina herramienta.

Rizo de viruta. En todas las operaciones de corte realizadas en metales y en materiales no metálicos, como plásticos y madera, las virutas desarrollan una curvatura (*rizo de viruta*) conforme abandonan la superficie de la pieza de trabajo (fig. 21.5). Entre los factores que afectan el rizo de la viruta están los siguientes:

- La distribución de esfuerzos en las zonas primaria y secundaria de cizallamiento.
- Los efectos térmicos.
- Las características de endurecimiento por trabajo del material de la pieza de trabajo.
- La geometría de la herramienta de corte.
- Los fluidos de corte.

Las variables del proceso también afectan el rizo de la viruta. Por lo general, al disminuir la profundidad de corte se reduce el radio de la curvatura; es decir, la viruta se vuelve más rizada. De la misma manera, los fluidos de corte pueden hacer que las virutas se vuelvan más rizadas (disminuyendo el radio de curvatura), esto es, reduciendo el área de contacto entre la herramienta y la viruta y concentrando el calor más cerca de la punta de la herramienta. El resultado es que aumenta el desgaste de la herramienta.

Rompevirutas. Como se estableció antes, las virutas largas y continuas son indeseables, ya que tienden a enrollarse y a interferir en las operaciones de maquinado y también se convierten en un riesgo potencial de seguridad. Si todas las variables del proceso están bajo control, el procedimiento que suele emplearse para evitar dicha situación consiste en romper la viruta de manera intermitente, con herramientas de corte que tienen elementos *rompevirutas*, como se muestra en la figura 21.7.

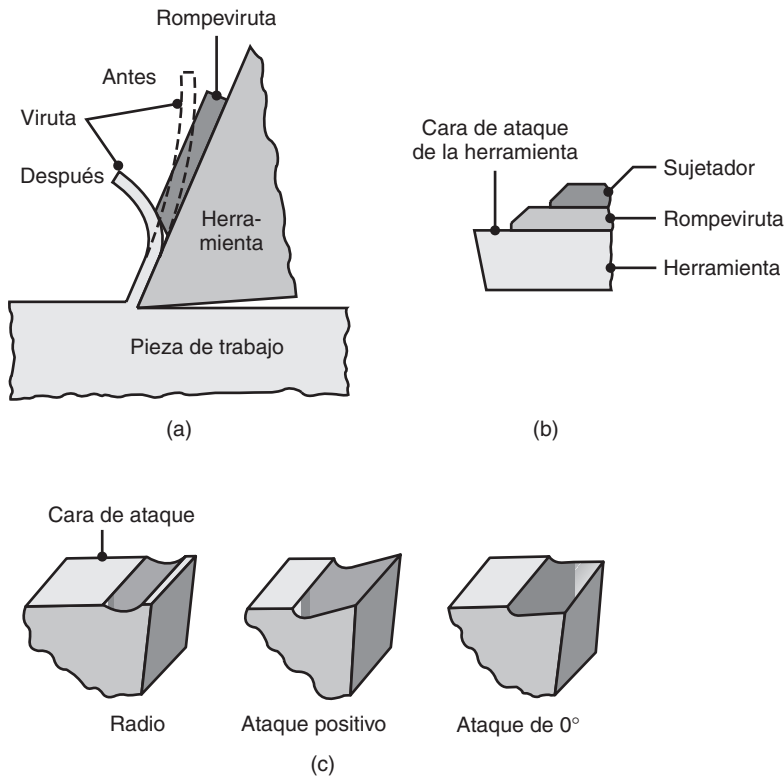


FIGURA 21.7 (a) Esquema de la acción de un rompevirutas. Obsérvese que éste disminuye el radio de la curvatura de la viruta y finalmente la rompe. (b) Rompeviruta sujeto sobre la cara de ataque de una herramienta de corte. (c) Ranuras en las herramientas de corte que actúan como rompevirutas. Ahora, la mayoría de las herramientas de corte utilizan *insertos* con características integradas para romper las virutas.

Tradicionalmente, los rompevirutas han sido piezas metálicas sujetas a la cara de ataque de la herramienta, que dobla y rompe la viruta. Sin embargo, las más modernas herramientas de corte e insertos ahora tienen características rompevirutas integradas (ver fig. 22.2) de diversos diseños (fig. 21.7). Las virutas también se pueden romper cambiando la geometría de la herramienta para controlar el flujo de la viruta, como en las operaciones de cilindrado mostradas en la figura 21.8. La experiencia indica que el tamaño ideal de viruta a romper es cuando tiene la forma de la letra C o del número 9 y cabe en un espacio cuadrado de 25 mm (1 pulgada).

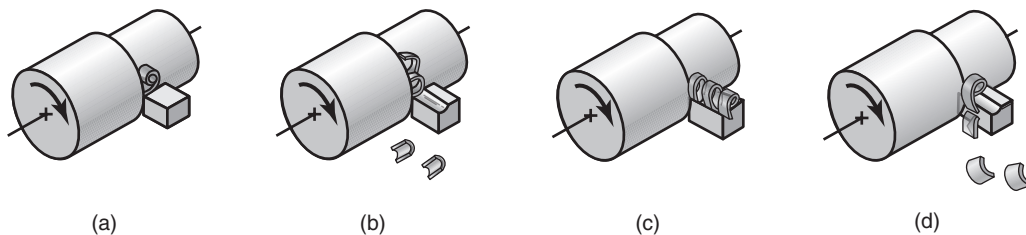


FIGURA 21.8 Virutas producidas en el cilindrado: (a) viruta muy rizada; (b) la viruta golpea la pieza de trabajo y se rompe; (c) viruta continua que se aleja radialmente de la pieza de trabajo, y (d) la viruta golpea el zanco de la herramienta y se rompe. *Fuente:* G. Boothroyd.

En los materiales blandos de la pieza de trabajo (como aluminio o cobre puros) tal vez no sea efectivo romper la viruta con tales medios, en cuyo caso el maquinado debe efectuarse por medio de incrementos pequeños (haciendo pausas para no generar viruta) o invirtiendo el avance en pequeños incrementos. En las operaciones de corte interrumpido (como en el fresado) por lo general no se necesitan los rompevirutas, porque las virutas ya tienen longitudes finitas.

Contacto controlado en las herramientas. Las herramientas de corte pueden diseñarse de manera que la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta se reduzca, ahuecando la cara de ataque de la herramienta a una pequeña distancia de la punta. Esta disminución de la longitud de contacto afecta la mecánica de la formación de viruta. En primer lugar, reduce las fuerzas de corte y, por lo tanto, la energía y la temperatura. Es importante determinar una longitud óptima, ya que una longitud de contacto muy pequeña concentraría el calor en la punta de la herramienta, aumentando así el desgaste.

Corte de materiales no metálicos. Al cortar termoplásticos se encuentra una variedad de virutas, dependiendo del tipo de polímero y de los parámetros del proceso, como la geometría de la herramienta, la profundidad y la velocidad de corte. Muchas discusiones relativas a los metales también suelen aplicarse a los polímeros. En general, los plásticos termofijos y los cerámicos producen virutas discontinuas debido a que son frágiles. En la sección 21.7.3 se señalan las características para otros materiales maquinados (como madera, cerámicos y materiales compósitos).

21.2.2 Corte oblicuo

La mayoría de las operaciones de maquinado comprenden formas de herramientas tridimensionales cuyo corte es *oblicuo*. En la figura 21.9a se puede ver la diferencia básica entre el corte oblicuo y el ortogonal. Mientras que en éste la viruta se desliza directamente sobre la cara de la herramienta, en aquél la viruta es *helicoidal* y en un ángulo i , llamado **ángulo de inclinación** (fig. 21.9b). Obsérvese la dirección lateral del movimiento de la viruta en el corte oblicuo, una situación similar a la pala de la barredora de nieve que empuja la nieve hacia los lados. Se puede ver que dicha viruta helicoidal se mueve hacia los lados, alejándose de la zona de corte y sin obstruirla, como lo haría en el corte ortogonal.

Nótese que la viruta en la figura 21.9a fluye hacia arriba de la cara de ataque de la herramienta a un ángulo α_c (**ángulo de flujo de la viruta**), que se mide en el plano de la cara de la herramienta. El ángulo α_t es el **ángulo normal de ataque**, y es una propiedad geo-

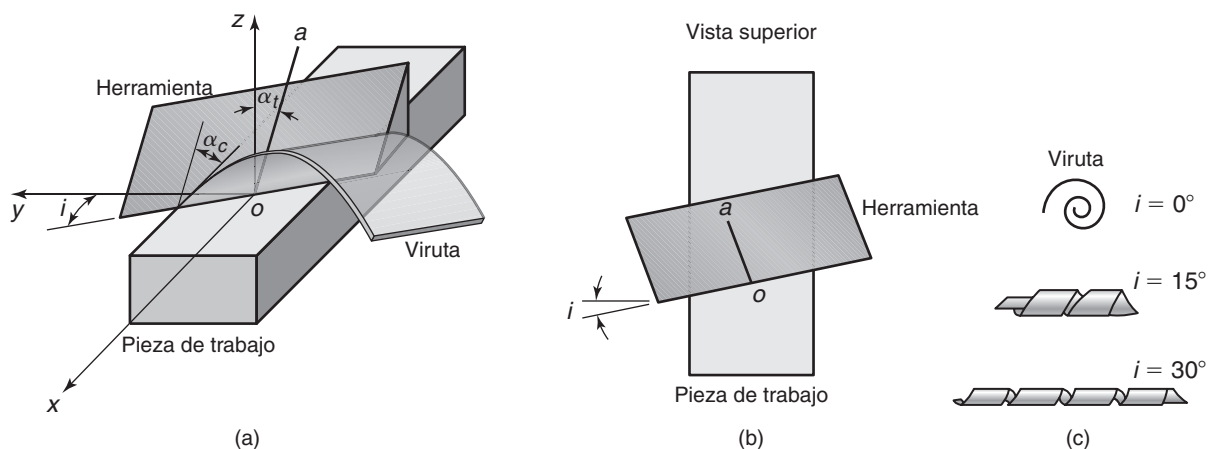


FIGURA 21.9 (a) Esquema de un corte con herramienta oblicua. Obsérvese la dirección de movimiento de la viruta. (b) Vista superior que muestra el ángulo de inclinación, i . (c) Tipos de virutas producidas por medio de herramientas con ángulos crecientes de inclinación.

métrica básica de la herramienta. Éste es el ángulo entre la línea oz normal a la superficie de la pieza de trabajo y a la línea oa de la cara de la herramienta.

El material de la pieza de trabajo se aproxima a la herramienta de corte a una velocidad (V) y abandona la superficie (como viruta) con una velocidad (V_c). El ángulo de ataque efectivo (α_e) se calcula en el plano de estas dos velocidades. Si el ángulo de flujo de la viruta (α_c) es igual al ángulo de inclinación, i (y se ha encontrado mediante experimentos que este supuesto es apropiado), el ángulo efectivo de ataque (α_e) es

$$\alpha_e = \sin^{-1}(\sin^2 i + \cos^2 i \sin \alpha_n). \quad (21.7)$$

Tanto i como α_n se pueden medir directamente, por lo que es posible calcular el ángulo efectivo de ataque. Obsérvese que, al aumentar i , se incrementa dicho ángulo y la viruta se vuelve más delgada y larga, y en consecuencia, disminuye la fuerza de corte. En la figura 21.9c se muestra la influencia del ángulo de inclinación en la forma de la viruta.

En la figura 21.10a se muestra una herramienta característica de torneado de un solo punto. Nótese los diversos ángulos involucrados, cada uno de los cuales debe seleccionarse de manera apropiada para obtener un corte eficiente. Aunque por lo general estos ángulos se pueden producir mediante rectificado, ahora la mayoría de las herramientas de corte se encuentran disponibles como **insertos** (ver fig. 21.10b), según se describe en el capítulo 22. En los capítulos 23 y 24 se examinan con mayor detalle diversas herramientas de corte tridimensionales, incluyendo las de taladrado, roscado, fresado, cepillado, formado, brochado, aserrado y limado.

Rasurado y pelado. Se pueden retirar delgadas capas de material de superficies rectas o curvas mediante un proceso similar al uso de un cepillo para rasurar madera. El *rasurado* es útil sobre todo para mejorar el acabado superficial y la precisión dimensional de las partes cizalladas y de las piezas troqueladas (fig. 16.9). También se aplica en el acabado de engranes, con un cortador en forma de diente del engrane (ver sección 24.7). Las partes largas, o que tienen una combinación de formas, se rasuran mediante el *pelado*, con una herramienta de corte cuya forma es especial, ya que se mueve tangencialmente a través de la longitud de la pieza de trabajo.

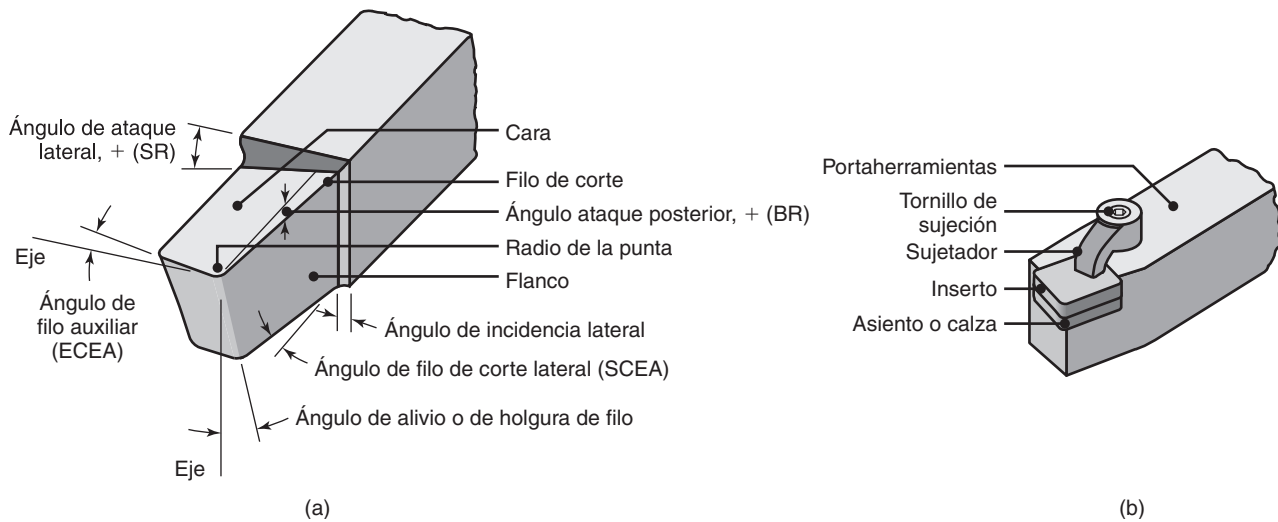


FIGURA 21.10 (a) Esquema de una herramienta de corte derecha. En la sección 23.2 se describen los diversos ángulos de estas herramientas y sus efectos en el maquinado. Aunque se han producido a partir de barras sólidas de acero, se han venido reemplazando en gran parte con (b) insertos fabricados con carburos y otros materiales de diversas formas y tamaños.

21.3 Fuerzas y potencia de corte

Es importante conocer las *fuerzas* y la *potencia de corte* comprendidas en las operaciones de maquinado por las siguientes razones:

- Los datos sobre las fuerzas de corte son fundamentales para que:
 - a. Las máquinas herramienta se puedan diseñar en forma apropiada para minimizar la distorsión de los componentes de la máquina, mantener la precisión dimensional deseada en la parte maquinada y ayudar a seleccionar tanto los portaherramientas como los dispositivos apropiados de sujeción de piezas.
 - b. La pieza de trabajo sea capaz de soportar estas fuerzas sin una distorsión excesiva.
- Deben conocerse los requerimientos de potencia para poder seleccionar una máquina herramienta con la potencia eléctrica adecuada.

En la figura 21.11a se muestran las fuerzas que actúan en el corte ortogonal. La **fuerza de corte** (F_c) actúa en la dirección de la velocidad de corte (V) y aporta la energía requerida para el corte. A la relación de dicha fuerza respecto del área transversal de la sección que se está cortando (es decir, el producto de la anchura de corte por la profundidad de corte) se le conoce como *fuerza específica de corte*.

La **fuerza de empuje** (F_t) actúa en dirección normal a la velocidad de corte. Estas dos fuerzas producen la **fuerza resultante** (R), como puede verse en el círculo de fuerzas mostrado en la figura 21.11b. Obsérvese que la fuerza resultante se puede resolver en dos componentes sobre la cara de la herramienta: una **fuerza de fricción** (F) a lo largo de la interfaz herramienta-viruta y una **fuerza normal** (N) perpendicular a ésta. También se puede demostrar que:

$$F = R \sen \beta \quad (21.8a)$$

y

$$N = R \cos \beta \quad (21.8b)$$

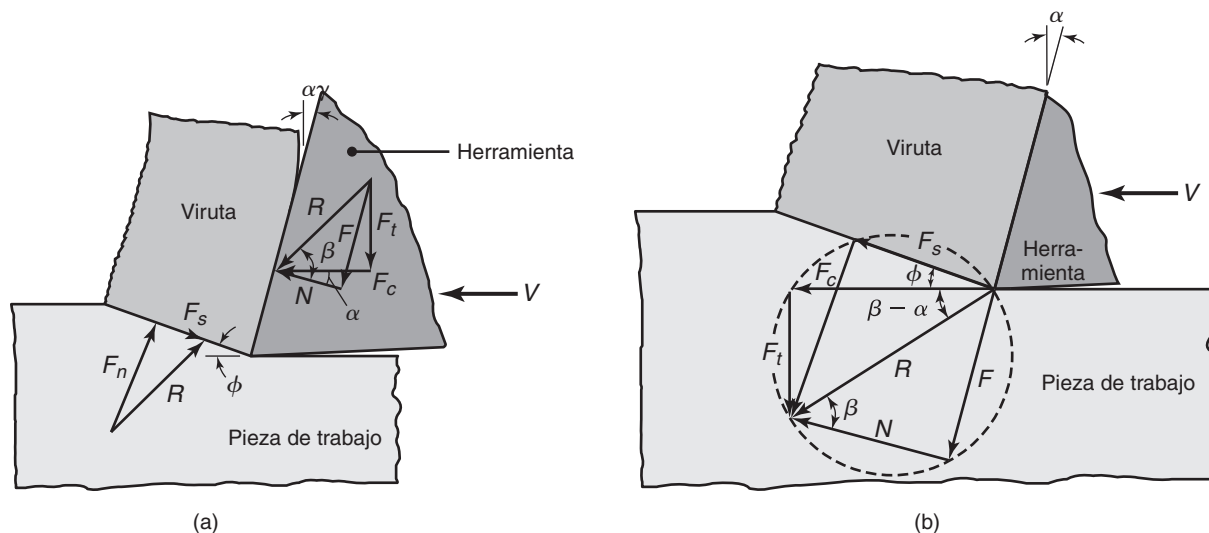


FIGURA 21.11 (a) Fuerzas que actúan en la zona de corte durante el corte bidimensional. Obsérvese que la fuerza resultante, R , debe ser colineal para equilibrar las fuerzas. (b) Círculo de fuerzas para determinar las diferentes fuerzas que actúan en la zona de corte.

Nótese que la fuerza resultante está equilibrada por una fuerza igual y opuesta a lo largo del plano de cizallamiento y se resuelve en una **fuerza de cizallamiento** (F_s) y una **fuerza normal** (F_n). Se puede demostrar que estas fuerzas se expresan de la siguiente manera:

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (21.9)$$

y

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (21.10)$$

Es posible calcular el área del plano de cizallamiento al conocer el ángulo de cizallamiento y la profundidad de corte, por lo que se pueden determinar los esfuerzos de cizallamiento y normal en dicho plano.

La relación de F a N es el **coeficiente de fricción** (μ) en la interfaz herramienta-viruta, y el ángulo β es el **ángulo de fricción** (como en la fig. 21.11). La magnitud de μ se puede determinar como:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha} \quad (21.11)$$

Aunque la magnitud de las fuerzas en las operaciones reales de corte suele ser de unos cuantos cientos de newtons, los *esfuerzos locales* en la zona de corte y las *presiones* en la herramienta son muy elevados porque las áreas de contacto son muy pequeñas. Por ejemplo, la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta (ver fig. 21.3) es comúnmente de 1 mm (0.04 pulgada). En consecuencia, la punta de la herramienta se somete a esfuerzos muy altos, lo que provoca desgaste y algunas veces astillado y fractura de la herramienta.

Fuerza de empuje. En el corte, es importante conocer la *fuerza de empuje* porque el portaherramientas, los dispositivos de sujeción del trabajo y la máquina herramienta deben ser lo suficientemente rígidos para soportarla con las deflexiones mínimas. Por ejemplo, si dicha fuerza es muy elevada, o si la máquina herramienta no es bastante rígida, la herramienta se alejaría de la superficie de la pieza de trabajo que se está maquinando. A su vez, este movimiento reduciría la profundidad de corte y produciría una falta de precisión dimensional en la parte maquinada.

También podemos mostrar el efecto de los ángulos de ataque y de fricción en la dirección de la fuerza de empuje, observando en la figura 21.11b que:

$$F_t = R \sin(\beta - \alpha) \quad (21.12a)$$

o

$$F_t = F_c \tan(\beta - \alpha) \quad (21.12b)$$

Obsérvese que la magnitud de la fuerza de corte (F_c) siempre es positiva, como se muestra en la figura 21.11, ya que ésta es la fuerza que aporta el trabajo requerido en el corte. Sin embargo, el signo de la fuerza de empuje (F_t) puede ser positivo o negativo, dependiendo de las magnitudes relativas de β y α . Cuando $\beta > \alpha$, el signo de F_t es positivo (esto es, *hacia abajo*), y cuando $\beta < \alpha$, el signo es negativo (*hacia arriba*). Por lo tanto, es posible tener una fuerza de empuje hacia arriba en condiciones de (a) ángulos grandes de ataque; (b) baja fricción en la interfaz herramienta-viruta, o (c) en ambas. Una fuerza negativa de empuje puede tener implicaciones importantes en el diseño de las máquinas herramienta y de los sujetadores del trabajo, así como en la estabilidad del proceso de corte.

Potencia. La *potencia* es el producto de la fuerza y la velocidad. Entonces, en referencia a la figura 21.11, la alimentación de potencia del corte es:

$$\text{Potencia} = F_c V \quad (21.13)$$

Esta potencia se disipa principalmente en la zona de cizallamiento (debido a la energía requerida para cizallar el material) y en la cara de ataque de la herramienta (por la fricción entre ésta y la viruta).

A partir de las figuras 21.4b y 21.11, se puede ver que la potencia disipada en el plano de cizallamiento es:

$$\text{Potencia de cizallamiento} = F_s V_s \quad (21.14)$$

Si permitimos que w sea la anchura de corte, la **energía específica de cizallamiento** (u_s) estará dada por:

$$u_s = \frac{F_s V_s}{wt_o V} \quad (21.15)$$

De manera similar, la potencia disipada en la fricción es:

$$\text{Potencia de fricción} = FV_c \quad (21.16)$$

y la **energía específica de fricción** (u_f) es:

$$u_f = \frac{FV_c}{wt_o V} = \frac{Fr}{wt_o} \quad (21.17)$$

Entonces, la **energía específica total** (u_t) es:

$$u_t = u_s + u_f \quad (21.18)$$

Debido a la multitud de factores involucrados, la predicción razonable de las fuerzas y las potencias de corte se basa en gran medida en datos experimentales, como los dados en la tabla 21.2. La amplia variedad de valores mostrados puede atribuirse a diferencias en la resistencia de cada grupo de materiales, y a diversos factores como la fricción, el uso de fluidos de corte y las variables del proceso.

El filo de la punta de la herramienta también influye en las fuerzas y la potencia. Como se fricciona contra la superficie maquinada y hace más grande la zona de deformación delante de la herramienta, las herramientas desafiladas requieren mayores fuerzas y potencia.

Medición de las fuerzas de corte y de la potencia. Las fuerzas de corte se pueden medir mediante un **transductor de fuerzas** (por lo común con sensores piezoeléctricos de cuarzo), un **dinamómetro** o una **celda de carga** (con calibradores de deformación de resistencia de alambre colocados en anillos octagonales), montados en el portaherramientas de

TABLA 21.2

Intervalo aproximado de requerimientos de energía en las operaciones de corte por lo que se refiere al motor de accionamiento de la máquina herramienta (multiplicar por 1.25 para herramientas desafiladas)

Material	Energía específica	
	W · s/mm ³	hp · min/pulg ³
Aleaciones de aluminio	0.4–1	0.15–0.4
Hierros fundidos	1.1–5.4	0.4–2
Aleaciones de cobre	1.4–3.2	0.5–1.2
Aleaciones de alta temperatura	3.2–8	1.2–3
Aleaciones de magnesio	0.3–0.6	0.1–0.2
Aleaciones de níquel	4.8–6.7	1.8–2.5
Aleaciones refractarias	3–9	1.1–3.5
Aceros inoxidable	2–5	0.8–1.9
Aceros	2–9	0.7–3.4
Aleaciones de titanio	2–5	0.7–2

la herramienta de corte. Los transductores poseen una frecuencia natural y una rigidez mucho mayores que los dinamómetros, cuyas tendencias a la deflexión y a la vibración son excesivas. Asimismo, es posible calcular la fuerza de corte con base en el **consumo de potencia** durante el corte, en la inteligencia de que se conoce, o se puede determinar, la eficiencia mecánica de la máquina herramienta. La potencia se puede medir con facilidad mediante un indicador de potencia, como un vatímetro. También puede utilizarse la *energía específica* del corte (como la mostrada en la tabla 21.2) para calcular las fuerzas de corte.

EJEMPLO 21.1 Energías relativas en el corte

En una operación de corte ortogonal, $t_o = 0.005$ pulgada, $V = 400$ pies/min, $\alpha = 10^\circ$ y la anchura de corte = 0.25 pulgada. Se observa que $t_c = 0.009$ pulgada, $F_c = 125$ libras y $F_t = 50$ libras. Calcule el porcentaje de la energía total utilizada para vencer la fricción en la interfaz herramienta-viruta.

Solución El porcentaje de energía se puede expresar como:

$$\frac{\text{Energía de fricción}}{\text{Energía total}} = \frac{FV_c}{F_c V} = \frac{Fr}{F_c}$$

donde

$$r = \frac{t_o}{t_c} = \frac{5}{9} = 0.555$$

$$F = R \sin \beta$$

$$F_c = R \cos(\beta - \alpha)$$

y

$$R = \sqrt{F_t^2 + F_c^2} = \sqrt{50^2 + 125^2} = 135 \text{ lb}$$

Entonces,

$$125 = 135 \cos(\beta - 10)$$

por lo que,

$$\beta = 32^\circ$$

y

$$F = 135 \sin 32^\circ = 71.5 \text{ lb}$$

De ahí que,

$$\text{Porcentaje} = \frac{(71.5)(0.555)}{125} = 0.32 \quad \text{o} \quad 32\%$$

21.4 | Temperaturas en el corte

Como en todos los procesos de trabajo de los metales en los que se involucra la deformación plástica, la energía disipada en el corte se convierte en calor, que a su vez eleva la temperatura en la zona de corte. La *elevación de la temperatura* es un factor muy importante en el maquinado por sus principales efectos adversos:

- La temperatura excesiva reduce la resistencia, la dureza, la rigidez y la resistencia al desgaste de la herramienta; las herramientas también se pueden reblandecer y sufrir deformación plástica, alterando de esta manera su forma.

- El aumento de calor provoca cambios dimensionales desequilibrados en la parte que se está maquinando, lo que dificulta el control de su precisión dimensional y de sus tolerancias.
- La elevación excesiva de temperatura puede ocasionar daños térmicos y cambios metalúrgicos en la superficie maquinada, afectando de manera adversa sus propiedades.

En las secciones precedentes se puede ver que las principales fuentes de calor en el maquinado son (a) el trabajo realizado en el cizallamiento en la zona primaria de cizallamiento, (b) la energía disipada como fricción en la interfaz herramienta-viruta, y (c) el calor generado cuando la herramienta roza contra la superficie maquinada, en particular en las herramientas desafiladas o gastadas. Se han empleado muchos esfuerzos para establecer relaciones entre la temperatura y diversas variables de los materiales y del proceso durante el corte. Una expresión completa para la temperatura media (T_{media}) en el *corte ortogonal* es:

$$T_{\text{media}} = \frac{1.2Y_f}{\rho c [V t_o / K]^{1/3}} \quad (21.19a)$$

donde la temperatura media está en °F, Y_f es el esfuerzo de fluencia en psi, ρc el calor específico volumétrico en lb/pulg³-°F y K la difusividad térmica (la relación de conductividad térmica respecto del calor específico volumétrico) en pulg²/s. Debido a que los parámetros del material en esta ecuación no dependen de la temperatura, es importante utilizar los valores apropiados que son compatibles con el intervalo de temperatura pronosticado. En la ecuación 21.19a puede verse que la temperatura media de corte aumenta con la resistencia de la pieza de trabajo, la velocidad de corte y la profundidad de corte; disminuye con el aumento de calor específico y con la conductividad térmica del material de la pieza de trabajo.

Una expresión para la *temperatura media de torneado* en un torno está dada por:

$$T_{\text{media}} \propto V^a f^b \quad (21.19b)$$

donde V es la velocidad de corte y f es el avance de la herramienta, como se muestra en la figura 21.2. Valores aproximados para los exponentes a y b son: para herramientas de *carburos*, $a = 0.2$ y $b = 0.125$; para herramientas de *acero de alta velocidad*, $a = 0.5$ y $b = 0.375$.

Distribución de la temperatura. Las fuentes de generación de calor en el maquinado se concentran en la zona primaria de cizallamiento y en la interfaz herramienta-viruta, por lo que es de esperarse que existan severos gradientes de temperatura en la zona de corte. En la figura 21.12 se muestra una distribución común de temperaturas. Obsérvese la presencia de severos gradientes y que la temperatura *máxima* se encuentra casi a la mitad arriba de la interfaz herramienta-viruta. Con base en los análisis anteriores, debe ser evidente que el patrón particular de temperaturas depende de varios factores relacionados con las propiedades del material y con las condiciones de corte, incluyendo el tipo de fluido de corte utilizado (si es que se usa alguno) durante el maquinado.

En la figura 21.13 se presentan las temperaturas desarrolladas en una operación de cilindrado en acero 52100. En la figura 21.13a se muestra la distribución de temperaturas a lo largo de la *superficie del flanco* de la herramienta, para V igual a 60, 90 y 170 m/min, respectivamente, como función de la distancia a la punta de la herramienta. En la figura 21.13b se describen las distribuciones de temperatura en la interfaz herramienta-viruta para las mismas tres velocidades de corte, como función de la fracción de longitud de contacto. Entonces, el cero en la abscisa representa la punta de la herramienta y 1.0 significa el extremo de la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta.

Nótese que la temperatura aumenta con la velocidad de corte y que la temperatura más elevada es casi 1100 °C (2000 °F). Se puede verificar la presencia de temperaturas tan elevadas en el maquinado simplemente observando el color azul oscuro de las virutas (originado por la oxidación) producida a altas velocidades de corte. Las virutas se ponen al rojo vivo y crean un riesgo de seguridad para el operador.

De la ecuación 21.19b y de los valores del exponente a , se puede ver que la velocidad de corte (V) influye mucho sobre la temperatura. La explicación es que al aumentar

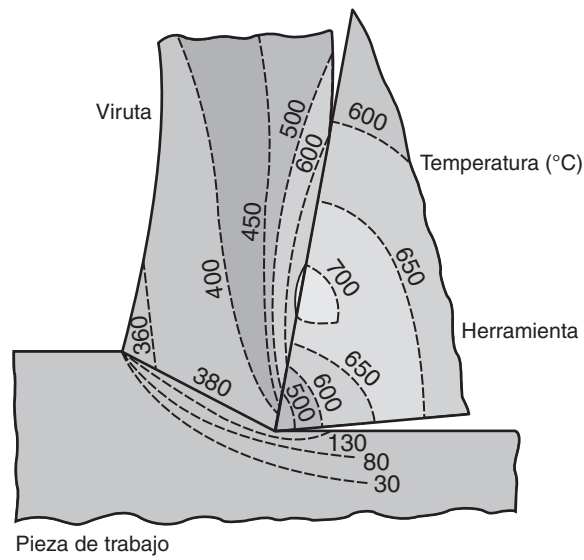


FIGURA 21.12 Distribución característica de temperaturas en la zona de corte. Obsérvese los severos gradientes de temperatura dentro de la herramienta y la viruta, y que la pieza de trabajo está relativamente fría. *Fuente:* G. Vieregge.

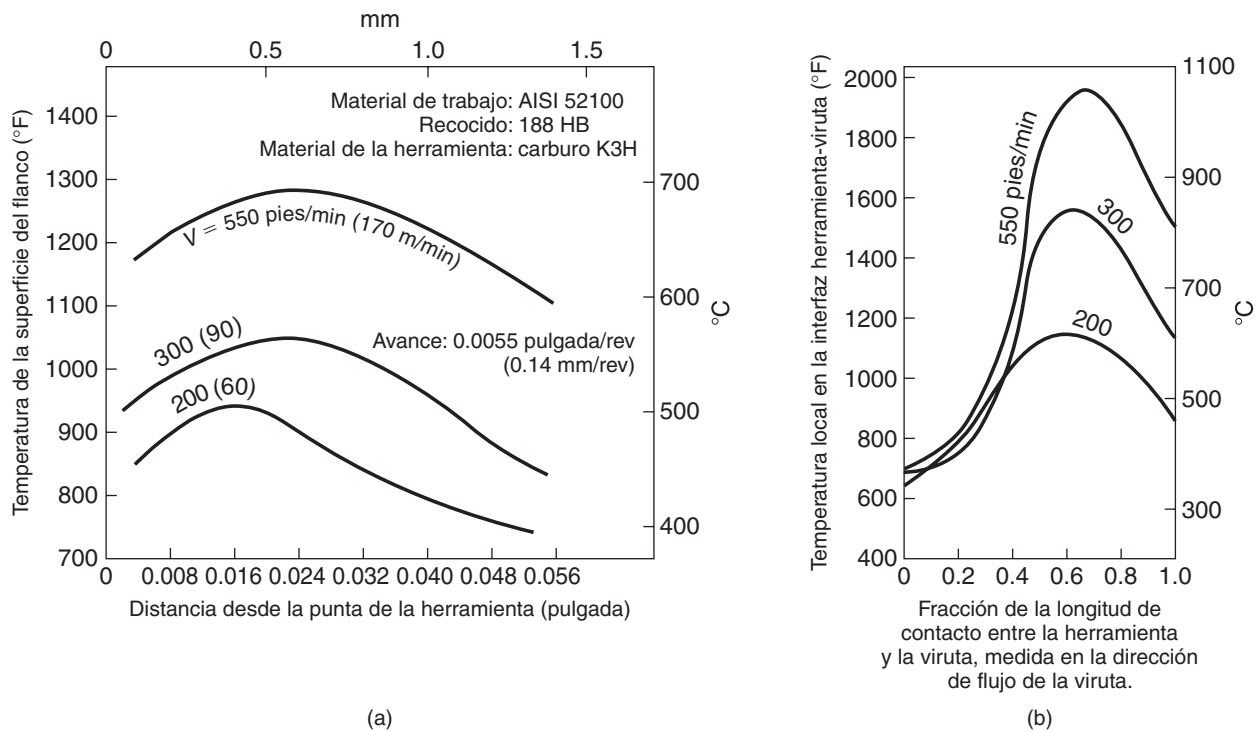


FIGURA 21.13 Temperaturas desarrolladas en el cilindrado de acero 52100: (a) distribución de temperaturas del flanco, y (b) distribución de temperaturas en la interfaz herramienta-viruta. *Fuente:* B. T. Chao y K. J. Trigger.

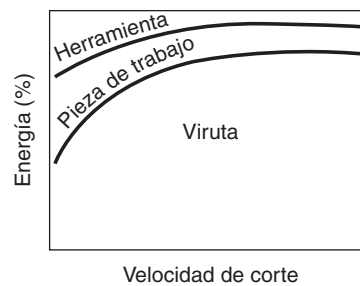


FIGURA 21.14 Proporción del calor generado en el corte transferido a la herramienta, la pieza de trabajo y la viruta, en función de la velocidad de corte. Obsérvese que la viruta retira la mayor parte del calor.

la velocidad disminuye el tiempo para disipar el calor, de ahí que la temperatura se eleve (convirtiéndose al final en casi un proceso adiabático). Este efecto de la velocidad puede demostrarse con facilidad frotando sus manos una contra la otra cada vez más rápido.

Como puede verse en la figura 21.14, la viruta retira la mayor parte del calor generado. Se ha estimado que durante una operación característica de maquinado, 90% de la energía se disipa en la viruta, mientras que el resto lo hace en la herramienta y en la pieza de trabajo. Obsérvese en esta figura que (al aumentar la velocidad de corte) la viruta retira una mayor proporción del calor total generado y menos calor va hacia la pieza de trabajo y la herramienta. Por esta razón las velocidades de maquinado se han incrementado de modo significativo a lo largo de los años (ver *maquinado de alta velocidad*, sección 25.5). El otro beneficio principal se asocia con la economía favorable que resulta al reducir el tiempo de maquinado, como se indica en la sección 25.8.

Técnicas para medir la temperatura. Las temperaturas y su distribución en la zona de corte se pueden determinar mediante **termopares** embebidos en la herramienta o en la pieza de trabajo. Esta técnica se ha utilizado con éxito, aunque implica un esfuerzo considerable. Es más fácil definir la temperatura *media* con la **fem térmica** (fuerza electromotriz) en la interfaz herramienta-viruta, que actúa como una *unión caliente* entre dos materiales diferentes (es decir, la herramienta y la viruta). Se puede supervisar la **radiación infrarroja** de la zona de corte mediante un *pirómetro de radiación*. Sin embargo, esta técnica sólo indica las temperaturas superficiales; la precisión de los resultados depende de la emisividad de las superficies, que es difícil determinar exactamente.

21.5 Vida útil de la herramienta: desgaste y falla

Se ha visto que las herramientas de corte se someten a (a) elevados esfuerzos localizados en la punta de la herramienta; (b) altas temperaturas, sobre todo a lo largo de la cara de ataque; (c) el deslizamiento de la viruta a lo largo de la cara de ataque, y (d) deslizamiento de la herramienta a lo largo de la superficie recién cortada de la pieza de trabajo. Estas condiciones inducen **desgaste de la herramienta**, que es un factor importante en todas las operaciones de maquinado, como lo son el desgaste del molde y de la matriz en la fundición y en el formado de los metales. El desgaste de la herramienta afecta de manera adversa la vida útil de la herramienta, la calidad de la superficie maquinada y su precisión dimensional, y, en consecuencia, la economía de las operaciones de corte.

El desgaste es un proceso gradual, muy parecido al desgaste de la punta de un lápiz ordinario. La rapidez de desgaste de la herramienta depende de los materiales de la misma y de la pieza de trabajo, de la geometría de la herramienta, de los parámetros del proceso, de los fluidos de corte y de las características de la máquina herramienta. El desgaste de la herramienta y los cambios en su geometría durante el corte se manifiestan de diferente manera; por lo general se clasifican como *desgaste del flanco*, *craterización*, *desgaste de la punta*, *muescado*, *deformación plástica de la punta de la herramienta*, *astillado* y *fractura gruesa* (fig. 21.15).

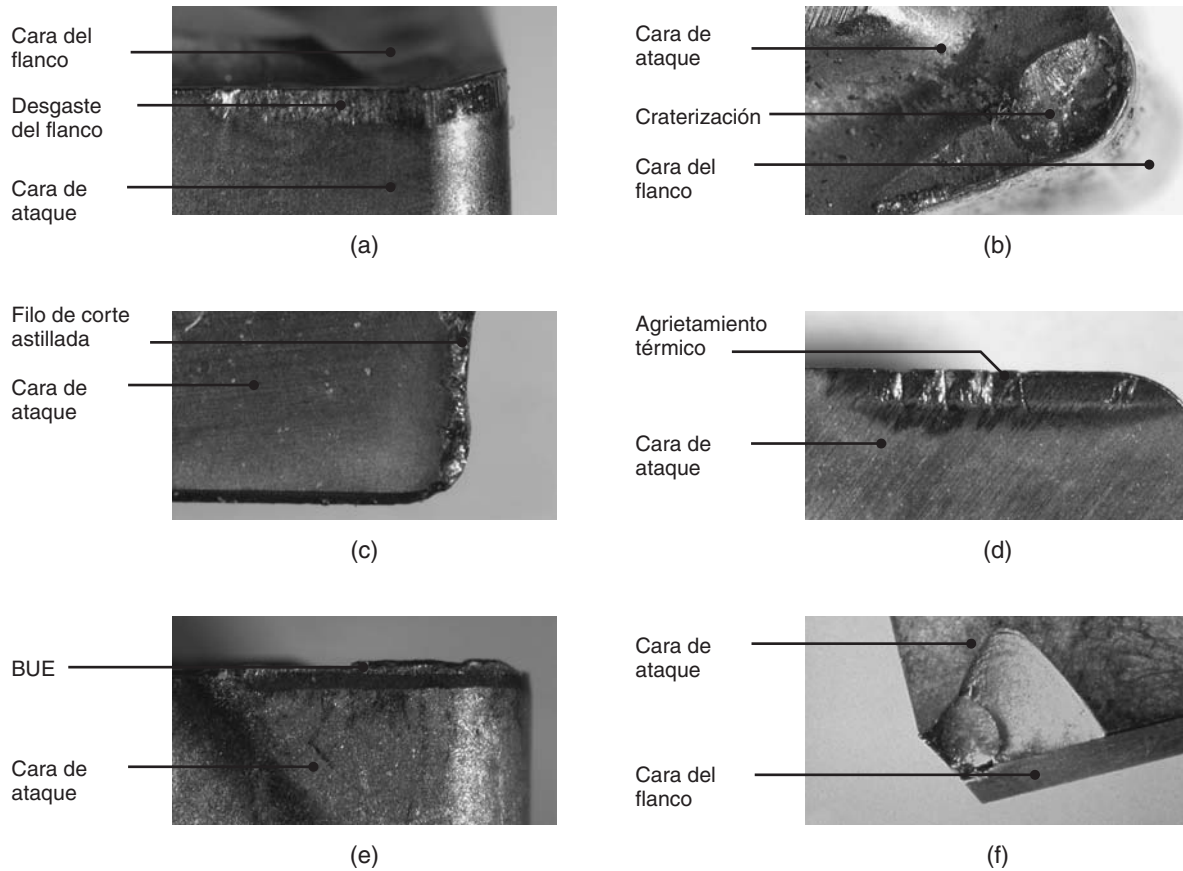


FIGURA 21.15 (a) Desgaste del flanco y craterización en una herramienta de corte; la herramienta se mueve a la izquierda, como en la figura 21.3. (b) Vista de la cara de ataque de una herramienta de cilindrado que muestra diversos patrones de desgaste. (c) Vista de la cara del flanco de una herramienta de cilindrado que muestra diversos patrones de desgaste. (d) Tipos de desgaste en una herramienta de cilindrado: 1. desgaste del flanco; 2. craterización; 3. filo de corte astillado; 4. agrietamiento térmico en la cara de ataque; 5. borde acumulado; 6. falla catastrófica. (Ver también fig. 21.18.) Fuente: Cortesía de Kennametal, Inc.

21.5.1 Desgaste del flanco

El *desgaste del flanco* ocurre en la cara de alivio (o flanco) de la herramienta (fig. 21.15a, c y d). Por lo general se atribuye a (a) rozamiento de la herramienta a lo largo de la superficie maquinada, lo que origina un desgaste adhesivo o abrasivo (ver sección 33.5), y (b) altas temperaturas, que afectan de manera adversa las propiedades del material de la herramienta.

En un estudio clásico de F. W. Taylor sobre el maquinado de aceros, conducido en la década de 1890, se estableció la siguiente relación aproximada:

$$VT^n = C \quad (21.20a)$$

donde V es la velocidad de corte, T el tiempo (en minutos) que se requiere para desarrollar una cierta **profundidad de desgaste** del flanco (mostrado como VB en la fig. 21.15c), n un exponente (que depende de los materiales de la herramienta y de la pieza de trabajo y de las condiciones de corte) y C una constante. Cada combinación de materiales de dicha pieza y de la herramienta y cada condición de corte tienen sus propios valores de n y C , los cuales se determinan de manera experimental. Sin embargo, por lo general, n depende del material de la herramienta, como se muestra en la tabla 21.3, y C del material de la pieza de trabajo. Obsérvese que la magnitud de C es la velocidad de corte a $T = 1$ min.

Para apreciar la importancia del exponente n , la ecuación 21.20 se puede reescribir como:

$$T = \left(\frac{C}{V} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (21.20b)$$

en donde se puede ver que para valores constantes de C , cuanto menor sea el valor de n menor será la vida útil de la herramienta.

La velocidad de corte es la variable del proceso más importante asociada con la vida útil de la herramienta, seguida de la profundidad de corte y del avance (f). La ecuación 21.20 se puede modificar como sigue:

$$VT^n d^x f^y = C \quad (21.21)$$

donde d es la profundidad de corte y f el avance en mm/rev, o en pulgadas/rev, como se muestra en la figura 21.2. Los exponentes x y y deben determinarse de forma experimental para cada condición de corte. Si se considera $n = 0.15$, $x = 0.15$ y $y = 0.6$ como valores comunes encontrados en la práctica del maquinado, se puede ver que la velocidad de corte, la razón de avance y la profundidad de corte tienen una importancia decreciente.

Podemos reescribir la ecuación 21.21 como:

$$T = C^{1/n} V^{-1/n} d^{-x/n} f^{-y/n} \quad (21.22)$$

o, utilizando valores característicos, como

$$T \simeq C^7 V^{-7} d^{-1} f^{-4} \quad (21.23)$$

A partir de la ecuación 21.23, se pueden hacer las siguientes observaciones para obtener la misma vida útil de la herramienta: (a) si se incrementa el avance o la profundidad de corte, debe disminuirse la velocidad de corte (y viceversa), y (b) dependiendo de los exponentes, una reducción de la velocidad puede producir un incremento en el volumen del material retirado, debido al aumento del avance o de la profundidad de corte.

Curvas de vida útil de la herramienta. Las *curvas de la vida útil de la herramienta* son gráficas de datos experimentales obtenidas mediante pruebas de corte en diversos

TABLA 21.3

Intervalos de valores de n para la ecuación de Taylor (21.20a) en diversos materiales para herramientas

Aceros de alta velocidad	0.08–0.2
Aleaciones fundidas	0.1–0.15
Carburos	0.2–0.5
Carburos recubiertos	0.4–0.6
Cerámicos	0.5–0.7

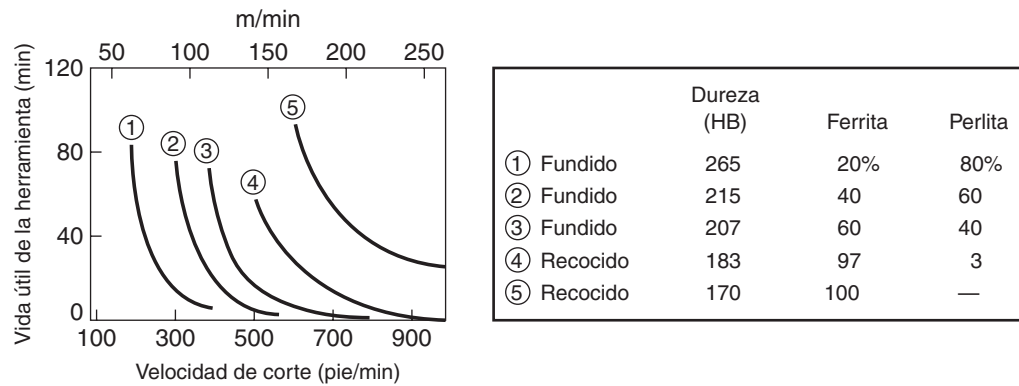


FIGURA 21.16 Efecto de la dureza y la microestructura de la pieza de trabajo sobre la vida útil de la herramienta en el cilindrado de hierro dúctil fundido. Obsérvese la rápida disminución de la vida útil de la herramienta (aproximándose a cero) conforme aumenta la velocidad de corte. Se han desarrollado materiales para herramientas que resisten altas temperaturas, entre ellos carburos, cerámicos y nitruro de boro cúbico, como se indicará en el capítulo 22.

materiales y en diferentes condiciones de corte, como el avance, la velocidad y la profundidad de corte, el material y la geometría de la herramienta y los fluidos de corte. Obsérvese en la figura 21.16, por ejemplo, que: (a) la vida útil de la herramienta disminuye con rapidez al aumentar la velocidad de corte; (b) las condiciones del material de la pieza de trabajo tienen una fuerte influencia en la vida útil de la herramienta, y (c) existe una gran diferencia en la vida útil de la herramienta para diferentes microestructuras del material de la pieza de trabajo.

El tratamiento térmico de la pieza de trabajo es importante, en gran medida debido a la dureza creciente de la misma. Por ejemplo, la ferrita tiene una dureza de alrededor de 100 HB, la perlita 200 HB y la martensita 300 a 500 HB. Las impurezas y los constituyentes duros en el material o en la superficie de la pieza (como óxido, cascarilla, escoria, etc.) también son factores importantes, porque su acción abrasiva reduce la vida útil de la herramienta.

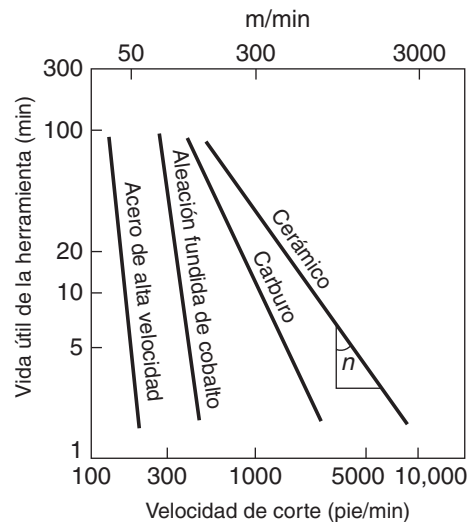


FIGURA 21.17 Curvas de vida útil de herramientas para varios materiales para herramientas de corte. El negativo inverso de la pendiente de estas curvas es el exponente n en la ecuación de Taylor para la vida útil de las herramientas, y C es la velocidad de corte a $T = 1$ min, que va de aproximadamente 200 a 10,000 pies/min en esta figura.

Por lo general, las curvas de la vida útil de la herramienta, de las cuales se puede determinar el exponente n (fig. 21.17), se trazan en escala logarítmica-logarítmica. Obsérvese que cuanto menor es el valor de n , más aguda es la curva, por lo que el desgaste de la herramienta aumenta con más rapidez al incrementarse la velocidad de corte. Aunque las curvas de vida útil de la herramienta son de alguna manera lineales para un intervalo limitado de velocidades de corte, raramente son lineales a lo largo de un intervalo grande. Además, el exponente n puede volverse *negativo* a bajas velocidades de corte, lo que significa que las curvas de vida útil de la herramienta pueden alcanzar un máximo y después curvarse hacia abajo. Debido a esta posibilidad, debe tenerse cuidado al usar ecuaciones de vida útil de la herramienta más allá del intervalo de velocidades de corte en las que son aplicables.

La temperatura tiene una gran influencia en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, por lo que también puede esperarse que influya de manera importante en el desgaste. Por ello, al aumentar la temperatura, el desgaste del flanco se incrementa con rapidez.

EJEMPLO 21.2 Determinación de los coeficientes C y n en la ecuación de Taylor

Determine los valores de C y n en la ecuación de Taylor para los cuatro materiales para herramienta mostrados en la figura 21.17.

Solución Se ha indicado que el valor de C corresponde a la velocidad de corte para una vida útil de la herramienta de un minuto. Por extrapolación, las cuatro líneas de la figura 21.17 tienen una vida útil de un minuto (que en este caso es la abscisa). Encontramos que de HSS (acero de alta velocidad, por sus siglas en inglés) a cerámico, los valores de C son de alrededor de 200, 400, 3,000 y 11,000, respectivamente.

Los valores de n se obtienen de las pendientes inversas negativas de las líneas en una gráfica logarítmica-logarítmica. Después estimamos que:

Para HSS es 6° , o $n = 0.11$

Para la aleación de cobalto fundido es 8° , o $n = 0.14$

Para el carburo es 25° , o $n = 0.47$

Para el cerámico es 36° , o $n = 0.73$

Comparando con los valores dados en la tabla 21.3, observamos que nuestros estimados se encuentran dentro del intervalo de los valores dados de n .

EJEMPLO 21.3 Incremento de la vida de la herramienta mediante la reducción de la velocidad de corte

Mediante la ecuación 21.20a de Taylor para la vida útil de la herramienta, y permitiendo que $n = 0.5$ y $C = 400$, calcule el porcentaje de incremento de la vida útil de la herramienta cuando la velocidad de corte se reduce 50%.

Solución Debido a que $n = 0.5$, la ecuación de Taylor se puede reescribir como $VT^{0.5} = 400$. Denotemos como V_1 la velocidad inicial y V_2 la velocidad reducida; entonces $V_2 = 0.5V_1$. Como C es una constante igual a 400, tenemos la relación:

$$0.5V_1\sqrt{T_2} = V_1\sqrt{T_1}$$

Simplificando esta expresión, $T_2/T_1 = 1/0.25 = 4$. Esto indica que el cambio de vida útil de la herramienta es:

$$\frac{T_2 - T_1}{T_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right) - 1 = 4 - 1 = 3$$

o que la vida útil de la herramienta aumenta 300%. Por lo tanto, la reducción de la velocidad de corte ha producido un incremento importante en la vida útil de la herramienta. Obsérvese también que, para este problema, la magnitud de C no es relevante.

TABLA 21.4

Profundidad de desgaste permisible promedio (ver VB en la fig. 21.15c) para herramientas de corte en diversas operaciones de maquinado

Operación	Profundidad de desgaste permisible (mm)	
	Herramientas de acero de alta velocidad	Herramientas de carburo
Cilindrado	1.5	0.4
Fresado de careado	1.5	0.4
Fresado frontal	0.3	0.3
Taladrado	0.4	0.4
Rimado o escariado	0.15	0.15

Nota: La profundidad de desgaste para las herramientas de cerámico es aproximadamente 50% mayor. El muescado permisible ($VB_{\text{máx}}$) es unas dos veces VB .

Profundidad de desgaste permisible. Nos damos cuenta de que tenemos que afilar un cuchillo o un par de tijeras cuando se deteriora la calidad del corte o cuando las fuerzas necesarias para hacerlo son muy elevadas. De manera similar, las herramientas de corte requieren reemplazo (o reafilado) cuando (a) el acabado superficial de la pieza de trabajo maquinada comienza a deteriorarse; (b) las fuerzas de corte aumentan de manera significativa, o (c) la temperatura se eleva en forma importante. En la tabla 21.4 se da la profundidad de *desgaste permisible* (VB en la fig. 21.15c) para diversas condiciones de maquinado. Para mejorar la precisión dimensional, las tolerancias y el acabado superficial, la profundidad de desgaste permisible puede ser menor que los valores dados en la tabla.

Por lo general, la *velocidad recomendada de corte* para una herramienta de acero de alta velocidad es la que produce una vida útil de la herramienta de 60 a 120 min, y para una herramienta de carburo, una de 30 a 60 min. Sin embargo, dependiendo de la pieza de trabajo en particular, la operación y las consideraciones de alta productividad debidas al uso de máquinas herramienta modernas controladas por computadora, las velocidades de corte seleccionadas pueden variar de modo significativo con respecto a estos valores.

Velocidad óptima de corte. Se ha indicado que al aumentar la velocidad de corte, la vida útil de la herramienta se reduce con rapidez. Por otro lado, si dicha velocidad es baja, la vida de la herramienta es larga, pero la *rapidez* a la que se remueve material también es baja. Por ello, existe una *velocidad óptima de corte*. Como comprende otros parámetros, describiremos este tema en la sección 25.8.

EJEMPLO 21.4 Efecto de la velocidad de corte en la remoción de material

El efecto de la velocidad de corte en el volumen de metal removido entre los cambios de herramienta (o reafilado) se puede apreciar analizando la figura 21.16. Supóngase que se está maquinando un material en la condición “uno” (esto es, fundido, con una dureza de 265 HB). Se observa que cuando la velocidad de corte es 60 m/min, la vida útil de la herramienta es de unos 40 min. Entonces, la herramienta se desplaza una distancia de $60 \text{ m/min} \times 40 \text{ min} = 2400 \text{ m}$ antes de que se reemplace. Sin embargo, cuando la velocidad de corte se incrementa a 120 m/min, la vida de la herramienta se reduce a casi 5 min y la herramienta viaja $120 \text{ m/min} \times 5 \text{ min} = 600 \text{ m}$ antes que tenga que reemplazarse.

Como el volumen de material removido es directamente proporcional a la distancia que se ha desplazado la herramienta, se puede ver que *disminuyendo* la velocidad de corte se retira *más* material entre cambios de herramienta. Sin embargo, cuanto menor sea la velocidad de corte, más tiempo se requerirá para maquinar una parte, lo que tiene un impacto económico significativo en la operación (ver la sección 25.8).

21.5.2 Craterización

La *craterización* ocurre en la cara de ataque de la herramienta, como se muestra en las figuras 21.15a, b y d, y 21.18, que presenta diversos tipos de desgaste y fallas de las herramientas. Se puede ver con facilidad que la craterización cambia la geometría de contacto de la interfaz herramienta-viruta. Los factores más significativos que influyen sobre la craterización son (a) la temperatura en la interfaz herramienta-viruta, y (b) la afinidad química entre los materiales de la herramienta y la pieza de trabajo. Además, los factores que influyen en el desgaste del flanco también influyen en la craterización.

Por lo general, la craterización se atribuye a un **mecanismo de difusión**, esto es, el movimiento de átomos a través de la interfaz herramienta-viruta. Debido a que la rapidez de difusión aumenta con el incremento de temperatura, la craterización aumenta al mismo tiempo que la temperatura. Obsérvese en la figura 21.19, por ejemplo, cuán rápidamente se incrementa la craterización dentro de un intervalo estrecho de temperatura. El *recubrimiento* de las herramientas es un medio efectivo para reducir la velocidad del proceso de difusión, disminuyendo así la craterización. Los recubrimientos comunes son el nitruro de titanio, el carburo de titanio, el carbonitruro de titanio y el óxido de aluminio, que se describen con mayor detalle en la sección 22.6.

Si se comparan las figuras 21.12 y 21.15a, se puede ver que la ubicación de la profundidad máxima de craterización (KT) coincide con la ubicación de la *temperatura máxima* en la interfaz herramienta-viruta. En la figura 21.20 se muestra una sección transversal real de esta interfaz cuando se corta acero a altas velocidades. Nótese que el patrón de craterización en la herramienta coincide con el patrón de decoloración, que es una indicación de la presencia de temperaturas elevadas.

21.5.3 Otros tipos de desgaste, astillado y fractura

Ahora se describirán los factores comprendidos en otros tipos de desgaste y fractura de las herramientas de corte.

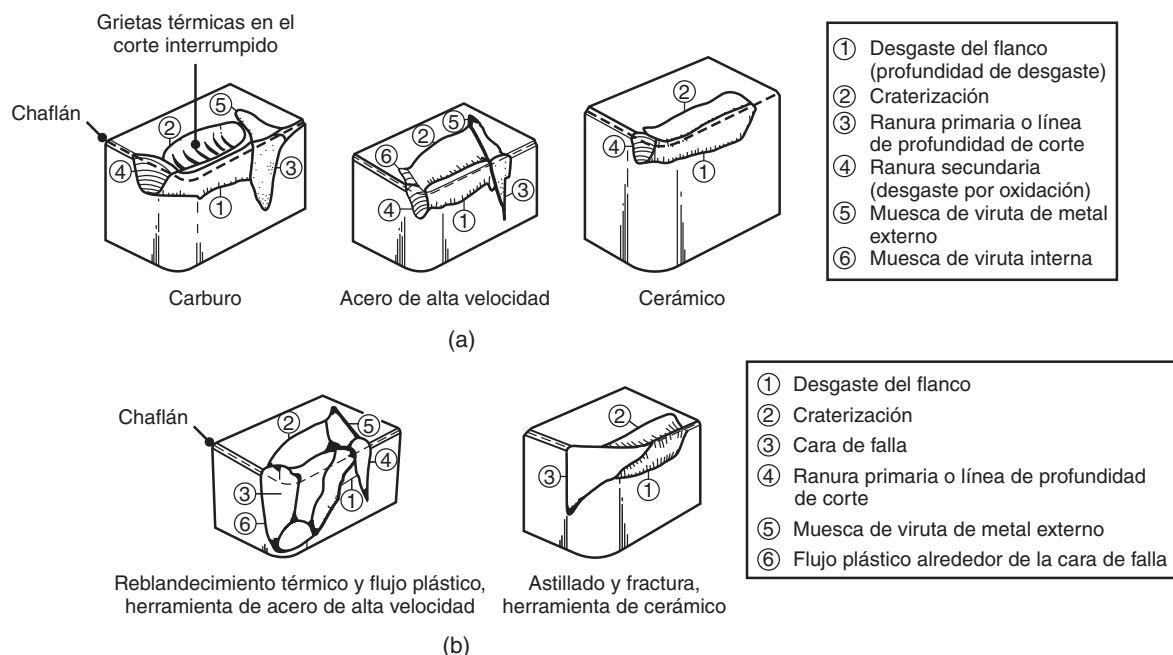


FIGURA 21.18 (a) Esquemas de los tipos de desgaste observados en diversas herramientas de corte. (b) Esquemas de fallas catastróficas de herramientas. Una gran variedad de parámetros influyen en estos patrones de desgaste y falla. Fuente: Cortesía de V. C. Venkatesh.

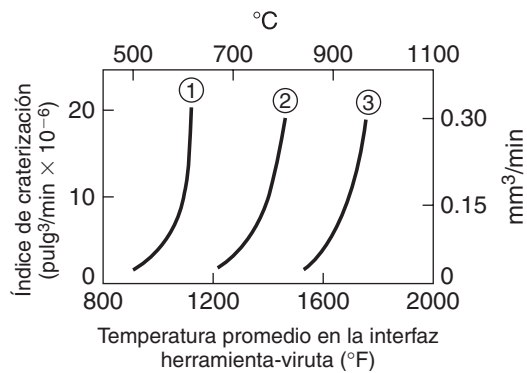


FIGURA 21.19 Relación entre el índice de craterización y la temperatura promedio de la interfaz herramienta-viruta: (1) acero de alta velocidad; (2) carburo C1, y (3) carburo C5 (ver la tabla 22.4). Obsérvese cómo el índice de craterización aumenta rápidamente con el incremento continuo de la temperatura. *Fuente:* B. T. Chao y K. J. Trigger.

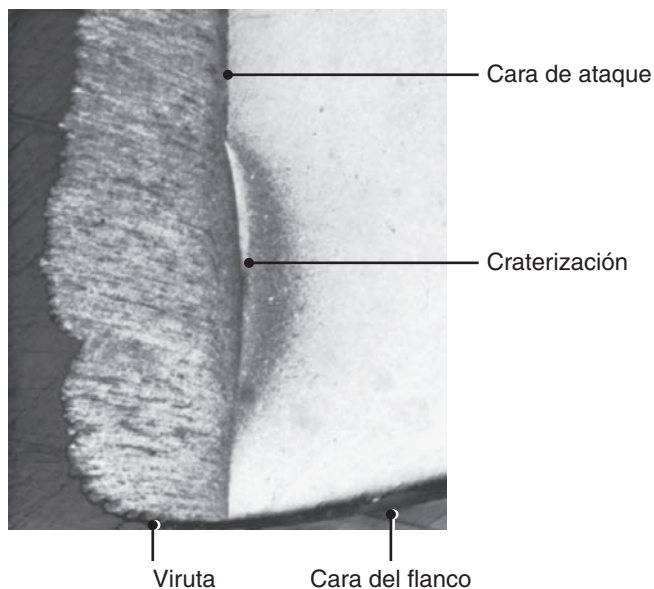


FIGURA 21.20 Interfaz de una herramienta de corte (a la derecha) y viruta (a la izquierda) en el maquinado de acero simple al carbono. La decoloración de la herramienta indica la presencia de altas temperaturas. Compárese esta figura con los perfiles de temperatura mostrados en la figura 21.12. *Fuente:* Cortesía de P. K. Wright.

El *desgaste de la punta* (fig. 21.15b) es el redondeo de una herramienta afilada, debido a los efectos mecánicos y térmicos. Esto desafilada la herramienta, afecta la formación de viruta y provoca rozamiento de la herramienta sobre la pieza de trabajo, elevando su temperatura y posiblemente induciendo esfuerzos residuales en la superficie maquinada. Un fenómeno relacionado con éste es el *redondeo del filo*, como se muestra en la figura 21.15b y c.

La elevación de la temperatura es importante, en particular para las herramientas de acero de alta velocidad, como se puede apreciar en la figura 22.1. Las herramientas también pueden sufrir *deformación plástica* por las elevaciones de temperatura en la zona de corte, que con facilidad puede llegar a 1000 °C (1800 °F) en el maquinado de los aceros y ser más alta para materiales más fuertes.

La *muesca* o *ranura* observada en las herramientas de corte, como se muestra en las figuras 21.15b y c y 21.18, se ha atribuido al hecho de que esta región es el límite en el que la viruta ya no se encuentra en contacto con la herramienta. Conocida como la **línea de profundidad de corte** (DOC, por sus siglas en inglés) con una profundidad VN, dicho límite oscila debido a las variaciones inherentes en la operación de corte. Además, esta región está en contacto con la superficie maquinada generada durante el corte anterior; la delgada capa endurecida por trabajo que se puede desarrollar contribuye a la formación de ranuras de desgaste. Si es lo suficientemente profunda, la muesca puede provocar un astillado grave de la punta de la herramienta por su reducida sección transversal, así como la sensibilidad a las muescas del material de la herramienta.

La cascarilla y las capas de óxido en la superficie de una pieza de trabajo también contribuyen al desgaste de muesca, ya que estas capas son duras y abrasivas. Por lo tanto, no deben realizarse cortes ligeros sobre piezas de trabajo oxidadas, y la profundidad de corte debe ser mayor que el espesor de la película de óxido o de la capa endurecida por trabajo. En la figura 21.3, por ejemplo, la profundidad de corte (t_o) debe ser mayor que el espesor de las cascarillas en la pieza de trabajo.

Además del desgaste, las herramientas pueden sufrir *astillado*, en donde se rompe un pequeño fragmento del filo de la herramienta. Este fenómeno, que de manera característica ocurre en los materiales frágiles para herramientas, como los cerámicos, es similar al astillado de la punta de un lápiz si está demasiado afilado. Los fragmentos astillados de la herramienta de corte pueden ser muy pequeños (**microastillado** o **macroastillado**), o pueden ser relativamente grandes, llamados de diversas maneras como **astillado grueso**, **fractura gruesa** y **falla catastrófica** (figs. 21.15d y 21.18).

El astillado también puede ocurrir en una región de la herramienta donde ya existe una pequeña grieta o defecto. A diferencia del desgaste, que es un proceso gradual, el astillado es una súbita pérdida de material de la herramienta y el cambio correspondiente de su forma; como es de esperarse, tiene un efecto dañino importante en el acabado superficial, la integridad de la superficie y la precisión dimensional de la pieza de trabajo.

Dos causas principales del astillado son:

- El **impacto mecánico** (es decir, el impacto debido al corte interrumpido, como sucede al torneear una flecha estriada en un torno).
- La **fatiga térmica** (es decir, las variaciones cíclicas en la temperatura de la herramienta en el corte interrumpido).

Es común que las *grietas térmicas* sean perpendiculares al filo de corte de la herramienta, como se muestra en la cara de ataque de la herramienta de carburo en las figuras 21.15d y 21.18a. Las variaciones importantes en la composición del material de trabajo, o en su estructura, también pueden causar astillado.

El astillado se puede reducir seleccionando materiales para herramientas con resistencia al alto impacto y al choque térmico, como se describe en el capítulo 22. Los ángulos grandes positivos de ataque pueden contribuir al astillado debido al pequeño ángulo comprendido en la punta de la herramienta, como se puede visualizar en la figura 21.3. Igualmente, es posible que la región de craterización avance hacia la punta de la herramienta, debilitándola por el reducido volumen del material y provocando astillado.

21.5.4 Supervisión de las condiciones de la herramienta

Con las máquinas herramienta controladas por computadora y con la manufactura automatizada, el desempeño confiable y repetible de las herramientas de corte es un factor crítico. Como se indica en los capítulos 23 a 25, las máquinas herramienta modernas

operan con muy poca supervisión directa por parte de un operador y por lo común están cerradas, imposibilitando o dificultando la supervisión del maquinado y las condiciones de la herramienta. Por lo tanto, es fundamental supervisar continua e indirectamente las condiciones de la herramienta de corte para observar, por ejemplo, el desgaste, el astillado o una falla gruesa.

En las máquinas herramienta modernas, los sistemas de supervisión de las condiciones de las herramientas se encuentran integrados en el control numérico computarizado y en los controles lógicos programables. Las técnicas para supervisar dichas condiciones por lo común caen dentro de dos categorías generales: directas e indirectas.

El **método directo** para revisar las condiciones de una herramienta de corte comprende mediciones ópticas del desgaste, como la observación periódica de los cambios en el perfil de la herramienta. Ésta es una técnica común y confiable, y se aplica utilizando un microscopio (**microscopio de fabricantes de herramientas**). Sin embargo, requiere que se detenga la operación de corte para examinar la herramienta. Otro método directo consiste en programar la herramienta para que entre en contacto con un sensor después de cada ciclo de maquinado; esto permite detectar herramientas rotas. Por lo general, el sensor tiene la apariencia de un tornillo que debe oprimir la punta de la herramienta.

Los **métodos indirectos** de observación de las condiciones de las herramientas comprenden la correlación de dichas condiciones con parámetros como las fuerzas de corte, la potencia, la elevación de la temperatura, el acabado superficial de la pieza de trabajo, la vibración y el traqueteo. Una técnica poderosa es la técnica de emisión acústica (AE, por sus siglas en inglés), que utiliza un transductor piezoeléctrico montado sobre un portaherramientas. El transductor detecta emisiones acústicas (por lo regular de más de 100 kHz), resultantes de las ondas de esfuerzos generadas durante el corte. Al analizar las señales, se pueden supervisar el desgaste y el astillado de la herramienta. Esta técnica es muy efectiva en las operaciones de maquinado de precisión, donde las fuerzas de corte son bajas debido a las pequeñas cantidades de material removido. Otro uso efectivo de la AE es la detección de fracturas en pequeñas herramientas de carburo a altas velocidades de corte.

Un sistema indirecto semejante para supervisar las condiciones de las herramientas consta de **transductores** que se instalan originalmente en las máquinas herramienta, o que se retroalimentan a las máquinas existentes. Estos transductores supervisan en forma continua el torque y las fuerzas durante el corte. Las señales se preamplifican y un microprocesador analiza e interpreta su contenido. El sistema es capaz de diferenciar las señales que provienen de diferentes fuentes, como la rotura, el desgaste o la falta de una herramienta, la sobrecarga de la máquina herramienta o la colisión entre componentes de la máquina. El sistema también puede compensar el desgaste de la herramienta de manera automática, mejorando así la precisión dimensional de la parte que se está maquinando.

El diseño de los transductores debe ser tal que: (a) no interfieran en la operación de maquinado; (b) la detección de señales sea precisa y repetible; (c) sean resistentes al abuso y al ambiente imperante en el taller, y (d) sean efectivos en costo. En el desarrollo de sensores se han obtenido continuos avances, incluyendo el uso de técnicas *infrarrojas* y de *fibras ópticas* para medir la temperatura durante el maquinado.

En las máquinas herramientas de control numérico computarizado de menor costo, la supervisión se realiza mediante el **tiempo del ciclo de la herramienta**. En el ambiente de la producción, una vez que se ha determinado la expectativa de vida útil de una herramienta de corte o de un inserto, se puede anotar en la unidad de control de la máquina, a fin de que se le pida al operador que cambie la herramienta o el cortador cada que se alcanza dicho tiempo. Este proceso no es costoso y resulta muy confiable, aunque no totalmente, debido a la variación estadística inherente en la vida de la herramienta.

21.6 | Acabado superficial e integridad

El acabado superficial influye no sólo en la precisión dimensional de las partes maquinadas, sino también en sus propiedades y en su desempeño durante el servicio. El término

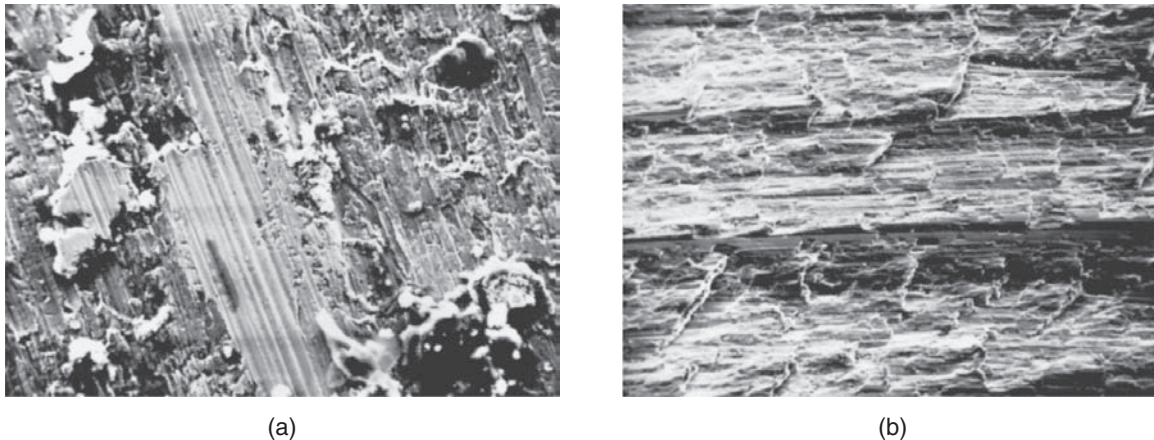


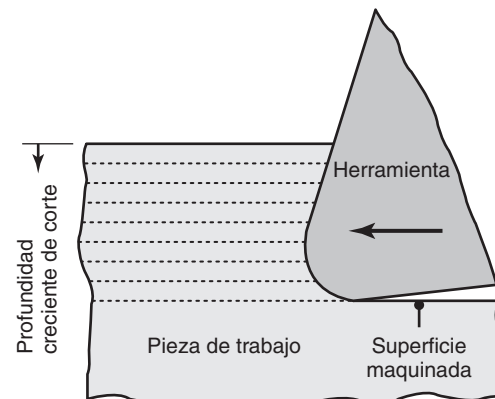
FIGURA 21.21 Superficies maquinadas, producidas sobre acero (amplificadas), observadas con un microscopio electrónico de barrido: (a) superficie cilindrada, y (b) superficie producida mediante cepillado. Fuente: Cortesía de J. T. Black y S. Ramalingam.

acabado superficial describe las características geométricas de una superficie (ver capítulo 33), en tanto que *integridad superficial* se refiere a las propiedades del material, como la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión, que se ven fuertemente influidas por la naturaleza de la superficie producida.

Con su efecto significativo sobre el perfil de la punta de la herramienta, el *borde acumulado* (o *recrecido*) tiene la mayor influencia sobre el acabado superficial. En la figura 21.21 se muestran las superficies obtenidas en dos diferentes operaciones de corte. Obsérvese el daño considerable que el BUE causa a las superficies; se manifiesta en marcas de rayado que se desvían de las ranuras rectas que deberían ser el resultado del maquinado normal, como se ve en la figura 21.2. Por lo general, las herramientas de cerámico y de diamante producen un mejor acabado superficial que otras, en gran parte debido a su menor tendencia a formar un BUE.

Una herramienta *desafilada*, o *mellada*, tiene un radio grande entre sus filos, al igual que la punta de un lápiz o el extremo de corte de un cuchillo desafilado. En la figura 21.22 se ilustra la relación entre el radio del filo de corte y la profundidad de corte en el corte ortogonal. Nótese que a pequeñas profundidades de corte, el ángulo de ataque se vuelve negativo y la herramienta simplemente puede deslizarse sobre la superficie de la pieza de trabajo en lugar de cortarla y producir virutas. Éste es un fenómeno parecido al

FIGURA 21.22 Esquema de una herramienta desafilada con respecto a la profundidad de corte en maquinado de corte ortogonal (exagerado). Obsérvese que la herramienta tiene un ángulo positivo de ataque, pero al disminuir la profundidad de corte, el ángulo de ataque se puede volver negativo. La herramienta simplemente se desliza sobre la pieza de trabajo (sin cortar) y pule su superficie; esta acción eleva la temperatura de la pieza y provoca esfuerzos residuales superficiales.



de tratar de raspar una capa delgada de la superficie de una barra de mantequilla con un cuchillo desafilado.

Si el *radio de la punta* de la herramienta (no confundir con el radio R en la fig. 21.15b) es grande en relación con la profundidad de corte, la herramienta simplemente roza sobre la superficie maquinada. El rozamiento genera calor e induce esfuerzos superficiales residuales, que a su vez pueden ocasionar daño superficial, como desgarramiento y agrietamiento. En consecuencia, la profundidad de corte debe ser mayor que el radio del filo de corte.

En una operación de cilindrado, al igual que en otros procesos de corte, la herramienta deja un perfil espiral (**marcas del avance**) sobre la superficie maquinada conforme se mueve a través de la pieza de trabajo, como se muestra en las figuras 21.2 y 21.23. Cuanto mayor sea el avance (f) y menor el radio de la punta de la herramienta (R), más prominentes serán estas marcas. Se puede demostrar que la rugosidad de la superficie para dicho caso está dada por:

$$R_a = \frac{f^2}{8R} \quad (21.24)$$

donde R_a es el valor medio aritmético, como se indica en la sección 33.3. Aunque no son significativas en las operaciones de maquinado de desbaste, las marcas del avance son importantes en el maquinado de acabado. Conforme se analicen, se darán mayores detalles sobre la rugosidad superficial para procesos individuales de maquinado.

En la sección 25.4 se describen con detalle la *vibración* y el *traqueteo*. Por ahora debe reconocerse que, si la herramienta vibra o traquetea durante el corte, afecta de manera adversa el acabado superficial de la pieza de trabajo. La razón es que una herramienta que vibra cambia periódicamente las dimensiones del corte. Un traqueteo excesivo también puede provocar astillado y falla prematura de las herramientas de corte más frágiles, como los cerámicos y el diamante.

Los factores que influyen en la *integridad superficial* son:

- Las temperaturas generadas durante el proceso y las posibles transformaciones metalúrgicas.
- Esfuerzos residuales superficiales.
- Deformación plástica severa y endurecimiento por deformación de las superficies maquinadas, desgarrado y agrietamiento.

Cada uno de estos factores puede tener efectos adversos importantes sobre la parte maquinada, pero es posible cuidar este aspecto mediante una selección cuidadosa y el mantenimiento de las herramientas de corte y control de las variables del proceso.

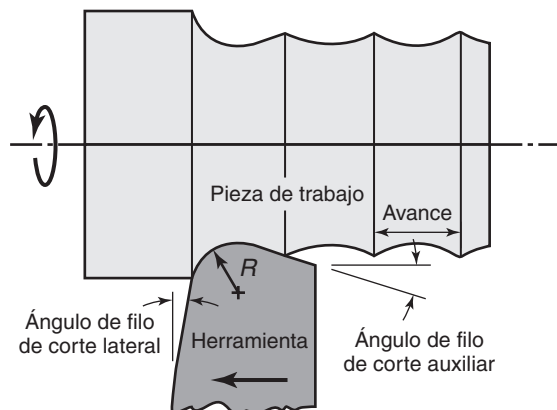


FIGURA 21.23 Esquema de las marcas de avance (exageradas) sobre una superficie que se está cilindrando.

Debe enfatizarse la diferencia entre *maquinado de acabado* y *maquinado de desbaste*. En el primero es esencial considerar el acabado superficial a producir, mientras que en el segundo el principal propósito es retirar una gran cantidad de material a una velocidad elevada; el acabado superficial no es una consideración fundamental, ya que se mejorará durante el maquinado de acabado. Desde luego, es importante que durante el maquinado de desbaste no se produzcan daños subsuperficiales que no se puedan eliminar durante el maquinado de acabado (ver fig. 21.21).

21.7 | Maquinabilidad

La *maquinabilidad* de un material se define por lo general en términos de cuatro factores:

1. El acabado superficial y la integridad superficial de la parte maquinada.
2. La vida útil de la herramienta.
3. La fuerza y potencia requeridas.
4. El nivel de dificultad de control de la viruta.

Entonces, una buena maquinabilidad indica un buen acabado superficial y una buena integridad superficial, una larga vida útil de la herramienta y bajos requerimientos de fuerza y de potencia. Por lo que se refiere al control de la viruta, y como se estableció antes en relación con las virutas continuas, las virutas largas, delgadas, filamentosas y rizadas pueden interferir de manera severa en la operación de corte al atorarse en la zona de corte.

La compleja naturaleza de las operaciones de corte hace difícil establecer relaciones que definan en forma cuantitativa la maquinabilidad de un material en particular. En la práctica de maquinado, por lo general, se considera que la vida útil de la herramienta y la rugosidad superficial son los factores más importantes de la maquinabilidad. Aunque ya no se usan mucho debido a su naturaleza cualitativa y engañosa, por muchos años ha existido la **capacidad (índice) de maquinabilidad** para cada tipo material y sus condiciones.

En estos índices, el material estándar es el acero AISI 1112 (desulfurado), con una capacidad de 100. Esto significa que para una vida útil de una herramienta de 60 min, este acero debe maquinarse a una velocidad de 100 pies/min (30 m/min). Ejemplos de índices comunes son: acero 3140 a 55; latón de corte libre a 300; 2011 aluminio forjado a 200; hierro gris perlítico a 70; y acero 17-7 endurecible por precipitación a 20.

Estos aspectos cualitativos de la maquinabilidad no son suficientes (desde luego) para guiar al operador de una máquina a fin de que determine los parámetros de maquinado para producir una parte en forma económica. De ahí que, en capítulos posteriores, presentamos varias tablas en las que, para diversos grupos de materiales, se dan *recomendaciones específicas* respecto de parámetros como el avance, la velocidad, la profundidad y las herramientas de corte y su forma, y el tipo de fluidos de corte.

21.7.1 Maquinabilidad de los metales ferrosos

En esta sección se describe la maquinabilidad de los aceros, aceros aleados, aceros inoxidables e hierros fundidos.

Aceros. Los aceros se encuentran entre los materiales más importantes de la ingeniería (como se indicó también en el capítulo 5), por lo que se ha estudiado ampliamente su maquinabilidad. Los aceros al carbono tienen un amplio intervalo de maquinabilidad, según su ductilidad y su dureza. Si son demasiado dúctiles, la formación de viruta puede producir un borde acumulado y provocar un acabado superficial deficiente; si el acero es demasiado duro, puede originar un desgaste abrasivo a la herramienta debido a la presencia de carburos en el acero. Desde el punto de vista de la maquinabilidad, son deseables los aceros al carbono trabajados en frío.

Un grupo importante de aceros es el de los **aceros de libre maquinado**, que contienen azufre y fósforo. El *azufre* forma inclusiones de sulfuro de manganeso (partículas de segunda fase), que actúan como elevadores de esfuerzo en la zona de cizallado primario.

El resultado es que las virutas producidas se rompen con facilidad y son pequeñas, mejorando así la maquinabilidad. El tamaño, forma, distribución y concentración de estas inclusiones influye de manera significativa en la maquinabilidad. Elementos como el *telurio* y el *selenio*, ambos químicamente similares al azufre, actúan como *modificadores de inclusiones* en los aceros desulfurados.

El *fósforo* tiene dos efectos principales en los aceros: (a) refuerza la ferrita, provocando un aumento de la dureza y una mejor formación de viruta y acabado superficial, y (b) incrementa la dureza, causando así la formación de virutas cortas en lugar de filamentosas continuas y mejorando la productividad. Obsérvese que puede ser difícil maquinar los aceros blandos por su tendencia a formar bordes acumulados y por el deficiente acabado superficial resultante.

En los **aceros al plomo**, un alto porcentaje de plomo se solidifica en las puntas de las inclusiones de sulfuro de manganeso. En los grados no desulfurados de acero, el plomo toma la forma de partículas finas dispersas. Es insoluble en hierro, cobre y aluminio y sus aleaciones. Debido a su baja resistencia al cizallamiento, el plomo actúa como lubricante *sólido* y se distribuye sobre la interfaz herramienta-viruta durante el corte.

Cuando la temperatura desarrollada se eleva de manera suficiente, como en el caso de altas velocidades de corte y avances, el plomo se funde directamente en frente de la herramienta, actuando como un lubricante *líquido*. Además de este efecto, el plomo reduce el esfuerzo cortante en la zona primaria de cizallamiento, disminuyendo así las fuerzas de corte y el consumo de potencia. El plomo se puede usar con todos los grados de acero y se identifica por la letra “L” entre el segundo y el tercer números de la identificación del acero (por ejemplo, 10L45). (Nótese que en los aceros inoxidables el uso similar de la letra *L* significa “bajo carbono”, una condición que mejora su resistencia a la corrosión).

Sin embargo, debido a que el plomo es una *toxina* bien conocida y un contaminante, existen serios problemas ambientales ocasionados por su uso en los aceros (se estima que cada año se consumen 4,500 toneladas de plomo en la producción de aceros). Por lo tanto, existe una tendencia continua hacia la eliminación del uso de plomo en los aceros (**aceros sin plomo**). El *bismuto* y el *estaño* lo han sustituido, aunque su desempeño no es tan elevado.

Los **aceros desoxidados con calcio** contienen hojuelas de óxidos de silicatos de calcio (CaSO), que a su vez reducen la resistencia de la zona secundaria de cizallamiento y disminuyen la fricción y el desgaste en la interfaz herramienta-viruta. Por lo tanto, también se reduce la elevación de la temperatura. En consecuencia, estos aceros producen menos craterización, sobre todo a altas velocidades de corte.

Los **aceros aleados** tienen una amplia variedad de composiciones y durezas. En consecuencia, no se puede generalizar su maquinabilidad, aunque tienen mayores niveles de dureza y otras propiedades mecánicas. Una tendencia importante en el maquinado de estos aceros es el torneado duro, descrito con detalle en la sección 25.6. Mediante herramientas de corte de nitruro de boro cúbico policristalino, los aceros aleados con niveles de dureza de 45 a 65 HRC se pueden maquinar con buen acabado, integridad superficial y precisión dimensional.

Efectos de diversos elementos en los aceros. La presencia de *aluminio* y *silicio* en los aceros siempre es nociva, porque estos elementos se combinan con el oxígeno para producir óxido de aluminio y silicatos, que son duros y abrasivos. El resultado es que aumenta el desgaste de la herramienta y se reduce la maquinabilidad.

El *carbono* y el *manganeso* tienen diversos efectos en la maquinabilidad de los aceros, dependiendo de su composición. Los aceros simples de bajo carbono (menos de 0.15% de C) pueden producir un acabado superficial deficiente al formar bordes acumulados o recocidos. Los aceros fundidos son más abrasivos, aunque su maquinabilidad es similar a la de los aceros forjados. Los aceros para herramientas y matrices son muy difíciles de maquinar y por lo general requieren recocido antes del maquinado. La maquinabilidad de la mayoría de los aceros se mejora mediante el trabajado en frío, que endurece el material y reduce la tendencia a la formación de bordes acumulados.

Otros elementos de aleación (como *níquel*, *cromo*, *molibdeno* y *vanadio*) que mejoran las propiedades de los aceros, por lo general reducen la maquinabilidad. El efecto del *boro* es despreciable. Los elementos gaseosos como el *hidrógeno* y el *nitrógeno* pueden tener consecuencias particularmente dañinas en las propiedades del acero. Se ha demostrado que el *oxígeno* tiene un fuerte efecto sobre la relación de aspecto de las inclusiones de sulfuro de manganeso: cuanto mayor es el contenido de oxígeno, menor será la relación de aspecto y mayor la maquinabilidad.

Sin embargo, al mejorar la maquinabilidad de los aceros, es importante considerar los posibles efectos nocivos de los elementos de aleación en las propiedades y la resistencia de la parte maquinada durante el servicio. Por ejemplo, a temperaturas elevadas el plomo provoca la *fragilización* de los aceros (fragilización líquido-metal y fragilización en caliente; ver sección 1.4.2), aunque a temperatura ambiente no tiene efectos sobre las propiedades mecánicas.

El azufre puede reducir en forma severa la capacidad de trabajado en caliente de los aceros, debido a la formación de sulfuro de hierro (a menos que exista suficiente manganeso para evitar dicha formación). A temperatura ambiente, las propiedades mecánicas de los aceros desulfurados dependen de la orientación de las inclusiones deformadas de sulfuro de manganeso (anisotropía). Los aceros refosforados son menos dúctiles y sólo se producen para mejorar la maquinabilidad.

Aceros inoxidables. Por lo general, es difícil maquinar los aceros austeníticos (serie 300). El traqueteo puede constituir un problema, requiriendo máquinas herramienta con mayor rigidez. Los aceros inoxidables ferríticos (serie 400) tienen buena maquinabilidad. Los aceros martensíticos (la serie 400) son abrasivos, tienden a formar bordes acumulados y requieren materiales para herramientas con alta resistencia en caliente y resistencia a la craterización. Los *aceros inoxidables endurecibles por precipitación* también son fuertes y abrasivos; por tanto, necesitan materiales para herramientas duros y resistentes a la abrasión.

Hierros fundidos. Por lo general, los *hierros grises* son maquinables, pero pueden ser abrasivos, dependiendo de su composición, sobre todo la perlita. Los carburos libres en las fundiciones reducen su maquinabilidad y provocan el astillado o la fractura de la herramienta. Los hierros *nodulares* y *maleables* son maquinables utilizando materiales duros para herramientas.

21.7.2 Maquinabilidad de los metales no ferrosos

A continuación se da un resumen de la maquinabilidad de metales y aleaciones no ferrosas, en orden alfabético del metal.

Aleaciones con base de cobalto, son abrasivas y altamente endurecibles por trabajo. Requieren materiales para herramientas afiladas y resistentes a la abrasión, así como bajos avances y velocidades.

Aleaciones y superaleaciones con base níquel, se endurecen por trabajo, son abrasivas y fuertes a altas temperaturas. Su maquinabilidad depende de sus condiciones y mejora con el recocido.

Aluminio, por lo general es muy fácil maquinarlo, aunque los grados más suaves tienden a formar un borde acumulado, lo que produce un acabado superficial deficiente. Por lo tanto, se recomiendan altas velocidades de corte, así como ángulos grandes de ataque y de alivio. Las aleaciones forjables de aluminio con alto contenido de *silicio* y las aleaciones de aluminio fundido suelen ser abrasivas, de ahí que requieran materiales más duros para herramientas. El control de las tolerancias dimensionales puede ser un problema en el maquinado del aluminio, ya que tiene un alto coeficiente de dilatación térmica y un módulo elástico relativamente bajo.

Berilio, por lo general es maquinable, pero debido a que las finas partículas producidas durante el maquinado son tóxicas, requiere maquinarse en un ambiente controlado.

Cobre, en la condición de forjado puede ser difícil de maquinar debido a la formación de bordes acumulados, aunque las aleaciones de cobre fundido se pueden maquinar fácilmente. Los latones pueden maquinarse sin problemas, sobre todo con la adición de plomo (*latón al plomo de libre maquinado*). Sin embargo, debe considerarse la toxicidad del plomo. Los bronce son más difíciles de maquinar que los latones.

Magnesio, se maquina con mucha facilidad, buen acabado superficial y una vida útil prolongada de la herramienta. Sin embargo, debe tenerse cuidado debido a su alta relación de oxidación (*pirofórica*) y al riesgo de incendio.

Molibdeno, es dúctil y se endurece por trabajo. Puede producir un acabado superficial deficiente; por lo tanto, son fundamentales las herramientas afiladas.

Tantalio, se endurece muy bien por trabajo, es dúctil y blando. Produce un acabado superficial deficiente y el desgaste de la herramienta es elevado.

Titanio y sus aleaciones, tienen conductividad térmica muy deficiente (la menor de todos los metales), lo que provoca un aumento significativo de la temperatura y borde acumulado. Son altamente reactivas y pueden ser difíciles de maquinar.

Tungsteno, es frágil, fuerte y muy abrasivo, de ahí que su maquinabilidad sea baja, aunque mejora en gran medida a temperaturas elevadas.

Zirconio, tiene buena maquinabilidad, pero requiere un fluido de corte del tipo refrigerante debido al riesgo de explosión e incendio.

21.7.3 Maquinabilidad de materiales diversos

Por lo general, los **termoplásticos** tienen baja conductividad térmica, un bajo módulo elástico y se suavizan por la temperatura. En consecuencia, maquinarlos requiere herramientas afiladas con ángulos positivos de ataque (para reducir las fuerzas de corte), ángulos grandes de alivio, pequeñas profundidades de corte y avance, velocidades relativamente altas y soporte apropiado de la pieza de trabajo. Puede ser necesario el enfriamiento externo de la zona de corte para evitar que las virutas se vuelvan gomosas y se peguen a las herramientas. El enfriamiento suele obtenerse mediante una corriente de aire, niebla de vapor o aceites solubles en agua.

Los **plásticos termofijos** son frágiles y sensibles a los gradientes térmicos durante el corte; en general, las condiciones de maquinado son similares a las de los termoplásticos.

Los **compósitos con matriz de polímero** son muy abrasivos debido a las fibras presentes, de ahí que sean difíciles de maquinar. El desgarre de las fibras, el jalado y la delaminación de los extremos son problemas significativos y pueden llevar a una severa reducción de la capacidad de carga del componente maquinado. El maquinado de estos materiales requiere un manejo cuidadoso y la remoción de los restos para evitar el contacto con ellos o la inhalación de las fibras.

Los **compósitos de matriz metálica y de matriz cerámica** pueden ser difíciles de maquinar, dependiendo de las propiedades del material de la matriz y de las fibras de refuerzo.

El **grafito** es abrasivo; requiere herramientas afiladas, duras y resistentes a la abrasión.

Los **cerámicos** tienen una maquinabilidad mejorada continuamente, en particular con el desarrollo de *cerámicos maquinables* y *nanocerámicos* (sección 8.2.5) y con la selección de los parámetros apropiados de procesamiento, como el *corte a régimen dúctil* (descrito en la sección 25.7).

La **madera** es un material ortotrópico con propiedades variables respecto de su dirección de grano. En consecuencia, el tipo de virutas y las superficies producidas varían de manera significativa, lo que depende también del tipo de madera y de sus condiciones. El trabajo de la madera, que data del año 3000 a.C., se mantiene en mayor medida como un arte. En general, dos requerimientos básicos son las herramientas afiladas y altas velocidades de corte.

21.7.4 Maquinado asistido térmicamente

Los metales y aleaciones que son difíciles de maquinar a temperatura ambiente pueden maquinarse con más facilidad a temperaturas elevadas. En el *maquinado asistido térmicamente*

camente (también llamado **maquinado en caliente**) se concentra una fuente de calor (como un soplete, bobina de inducción, corriente eléctrica, rayo láser, haz de electrones y arco de plasma) en un área justo delante de la herramienta de corte. Investigada por primera vez en la década de 1940, esta operación suele efectuarse por encima de la temperatura homóloga de $T/T_m = 0.5$ (ver sección 1.7 y las tablas 1.2 y 3.1). Así, por ejemplo, los aceros se maquinan en caliente por arriba del intervalo de temperatura de 650 °C a 750 °C (1200 °F a 1400 °F). Aunque es difícil y complicado efectuarla en las plantas de producción, las ventajas generales del maquinado en caliente son: (a) fuerzas reducidas de corte; (b) incremento de la vida útil de la herramienta; (c) mayores velocidades de remoción de material, y (d) reducción de la tendencia a la vibración y el traqueteo.

RESUMEN

- Con frecuencia, los procesos de maquinado son necesarios para proporcionar la precisión dimensional deseada, así como características geométricas y de acabado superficial a los componentes, en particular a los de formas complejas que no se pueden producir de manera económica o mediante otras técnicas de formado. En general estos procesos requieren mayor tiempo, desperdician material en la forma de virutas y pueden tener efectos adversos en las superficies producidas.
- Los tipos de viruta que por lo común se observan en el maquinado son continuo, de borde acumulado, discontinuo y aserrado. Variables importantes en el proceso de maquinado son la forma y el material de la herramienta; condiciones de corte como velocidad, avance y profundidad de corte; el uso de fluidos de corte; y las características del material de la pieza de trabajo y la máquina herramienta. Los parámetros sobre los que influyen estas variables son las fuerzas y el consumo de potencia; el desgaste de la herramienta; el acabado y la integridad superficiales; la elevación de la temperatura, y la precisión dimensional de la pieza de trabajo.
- El aumento de la temperatura es un factor importante, ya que puede tener efectos adversos sobre la vida útil de la herramienta y sobre la precisión dimensional y la integridad superficial de la parte maquinada.
- Dos tipos principales de desgaste de la herramienta son el desgaste del flanco y la craterización. El desgaste de la herramienta depende de las características del material de la pieza de trabajo y de la herramienta; el avance, la velocidad, la profundidad y los fluidos de corte; y las características de la máquina herramienta. La falla de la herramienta también puede ocurrir por muestado, astillado y fractura gruesa.
- El acabado superficial de los componentes maquinados puede dañar la integridad del producto. Variables importantes son la geometría y las condiciones de la herramienta de corte, el tipo de viruta producida y las variables del proceso.
- En general, la maquinabilidad se define en términos de acabado superficial, vida útil de la herramienta, fuerza y requerimientos de potencia y control de la viruta. La maquinabilidad de los materiales depende de su composición, propiedades y microestructura. Por lo tanto, es importante una selección apropiada y el control de las variables del proceso.

TÉRMINOS CLAVE

Acabado superficial	Ángulo de cizallamiento	Borde acumulado o recrecido
Acero desulfurado	Ángulo de fricción	Corte oblicuo
Acero refosforado	Ángulo de holgura	Corte ortogonal
Ángulo de alivio	Ángulo de inclinación	Craterización
Ángulo de ataque	Astillado de la herramienta	Desgaste del flanco

Ecuación de Taylor
Emisión acústica
Energía específica
Fuerza de corte
Fuerza de empuje
Índice de maquinabilidad
Integridad superficial
Línea de profundidad de corte
Máquina herramienta
Maquinabilidad

Maquinado
Maquinado en caliente
Marcas de avance
Muescado
Pelado
Plano de cizallamiento
Profundidad de desgaste
Rasurado
Relación de corte
Rizo de la viruta

Rompe virutas
Supervisión de las condiciones de la herramienta
Vida útil de la herramienta
Viruta
Viruta aserrada
Viruta continua
Viruta discontinua
Zona primaria de cizallamiento
Zona secundaria de cizallamiento

BIBLIOGRAFÍA

- Astakhov, V. P., *Metal Cutting Mechanics*, CRC Press, 1998.
 ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
 Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1989.
 Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
 Davis, J. R. (ed.), *Tool Materials*, ASM International, 1995.
 DeVries, W. R., *Analysis of Material Removal Processes*, Springer, 1992.
 Juneja, B. L., *Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools*, Wiley, 1987.
 Kalpakjian, S. (ed.), *Tool and Die Failures: Source Book*, ASM International, 1982.
Metal Cutting Tool Handbook, 7a. ed., Industrial Press, 1989.
 Meyers, A. L. y Slattery, T., *Basic Machining Reference Handbook*, Industrial Press, 1988.
 Oxley, P. L. B., *Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*, Wiley, 1989.
 Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles*, 2a. ed., Oxford, 2005.
 Stephenson, D. A. y Agapiou, J. S., *Metal Cutting Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1997.
 Stout, K. J., Davis, E. J. y Sullivan, P. J., *Atlas of Machined Surfaces*, Chapman and Hall, 1990.
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 1: *Machining* Society of Manufacturing Engineers, 1983.
 Trent, E. M. y Wright, P. K., *Metal Cutting*, 4a. ed., Butterworth Heinemann, 2000.
 Walsh, R. A., *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*, McGraw-Hill, 1994.

PREGUNTAS DE REPASO

- 21.1 Explique por qué las virutas continuas pueden no ser necesariamente deseables.
 21.2 Nombre los factores que contribuyen a la formación de virutas discontinuas.
 21.3 Explique la diferencia entre ángulos de ataque positivo y negativo. ¿Qué importancia tiene el ángulo de ataque?
 21.4 Comente el papel y la importancia del ángulo de alivio.
 21.5 Explique la diferencia entre virutas discontinuas y virutas segmentadas.
 21.6 ¿Por qué debería interesarnos la magnitud de la fuerza de empuje en el corte?
 21.7 ¿Cuáles son las diferencias entre el corte ortogonal y el oblicuo?
 21.8 ¿Existe alguna ventaja en tener un borde acumulado o recrecido en una herramienta? Explique su respuesta.
 21.9 ¿Cuál es la función de los rompevirutas? ¿Cómo funcionan?
 21.10 Identifique las fuerzas comprendidas en una operación de corte. De estas fuerzas, ¿cuáles contribuyen a la potencia requerida?
 21.11 Explique las características de los distintos tipos de desgaste de la herramienta.
 21.12 Liste los factores que contribuyen a un acabado superficial deficiente en el corte.
 21.13 Explique qué significa y qué implica el término *maquinabilidad*. ¿Por qué el titanio tiene una maquinabilidad deficiente?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

21.14 ¿Están relacionadas la ubicación de la temperatura máxima y de la craterización? De ser así, explique por qué.

21.15 ¿Es importante la ductilidad del material para la maquinabilidad? Explique su respuesta.

21.16 Explique por qué es importante estudiar los tipos de virutas producidas para entender las operaciones de corte.

21.17 ¿Por qué cree que la temperatura máxima en el corte ortogonal se localiza casi a la mitad de la interfaz herramienta-viruta? (*Sugerencia:* observe que las dos fuentes de calor son (a) cizallamiento en su plano primario, y (b) fricción en la interfaz herramienta-viruta).

21.18 La vida útil de una herramienta puede ser casi infinita a bajas velocidades de corte. ¿Entonces recomendaría que todo el maquinado se hiciera a bajas velocidades? Explique su respuesta.

21.19 Explique las consecuencias de permitir que se eleven las temperaturas a niveles altos durante el corte.

21.20 La fuerza de corte aumenta con la profundidad de corte y reduciendo el ángulo de ataque. Explique por qué.

21.21 ¿Por qué no siempre es recomendable aumentar la velocidad de corte para incrementar la velocidad de producción?

21.22 ¿Cuáles son las consecuencias si se astilla una herramienta de corte?

21.23 ¿Cuáles son los efectos de realizar una operación de corte con una herramienta desafilada? ¿Y con una muy afilada?

21.24 ¿A qué factores atribuye la diferencia de energías específicas cuando se maquinan los materiales mostrados en la tabla 21.2? ¿Por qué existe un intervalo de energías para cada grupo de materiales?

21.25 Explique por qué es posible retirar más material entre el reafilado de las herramientas, reduciendo la velocidad de corte.

21.26 Al observar que la dimensión d en la figura 21.4a es muy pequeña, explique por qué la rapidez de deformación cortante en el corte de metales es tan elevada.

21.27 Explique la importancia de la ecuación 21.7.

21.28 Comente sus observaciones en relación con las figuras 21.12 y 21.13.

21.29 Describa las consecuencias de exceder la profundidad permisible de desgaste (tabla 21.4) en diversos materiales para herramientas de corte.

21.30 Comente sus observaciones respecto de las variaciones de dureza mostradas en la figura 21.6a.

21.31 ¿Por qué en el corte la temperatura depende del avance, la velocidad y la profundidad de corte? Explique en términos de las variables correspondientes del proceso.

21.32 Observará que los valores de a y b en la ecuación 21.19b son mayores para los aceros de alta velocidad que para los carburos. ¿Por qué es así?

21.33 Como se muestra en la figura 21.14, el porcentaje de la energía total de corte que retira la viruta aumenta con la velocidad de corte. ¿Por qué?

21.34 Describa los efectos que una herramienta desafilada puede tener sobre las operaciones de corte.

21.35 Explique si es deseable tener valores elevados o bajos para (a) n , y (b) C en la ecuación de Taylor para la vida útil de la herramienta.

21.36 La curva de la vida útil para las herramientas de cerámicos de la figura 21.17 se encuentra a la derecha de la de otros materiales para herramienta. ¿Por qué?

21.37 ¿Por qué las temperaturas de la herramienta son bajas a velocidades mínimas de corte y elevadas a altas velocidades de corte?

21.38 ¿Se puede realizar el maquinado de alta velocidad sin el uso de un fluido de corte?

21.39 Dados sus conocimientos sobre el proceso básico de corte de metales, ¿cuáles son las propiedades físicas y químicas importantes de una herramienta de corte?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

21.40 Permite que $n = 0.5$ y $C = 300$ en la ecuación de Taylor para el desgaste de la herramienta. ¿Cuál es el incremento porcentual de la vida útil de la herramienta si se reduce la velocidad de corte (a) 30%, y (b) 50%?

21.41 Suponga que, en corte ortogonal, el ángulo de ataque es 15° y el coeficiente de fricción es 0.2. Mediante la ecuación 21.3, determine el incremento porcentual en el espesor de la viruta cuando se duplica la fricción.

21.42 Derive la ecuación 21.11.

21.43 Tomando el carburo como un ejemplo y mediante la ecuación 21.19b, determine cuánto debe reducirse el avance para mantener constante la temperatura cuando se triplica la velocidad de corte.

21.44 Utilizando las relaciones trigonométricas, derive una expresión para la relación de energía de cizallamiento respecto de la energía de fricción en el corte ortogonal, sólo en términos de los ángulos α , β y ϕ .

21.45 Se está efectuando una operación de corte ortogonal en las siguientes condiciones: $t_o = 0.1$ mm, $t_c = 0.2$ mm, ancho de corte = 5 mm, $V = 2$ m/s, ángulo de ataque = 10° , $F_c = 500$ N y $F_t = 200$ N. Calcule el porcentaje de la energía total que se disipa en el plano de cizallamiento.

21.46 Explique cómo haría para estimar los valores de C y n para los materiales de las cuatro herramientas mostradas en la figura 21.17.

21.47 Derive las ecuaciones 21.1.

21.48 Suponga que, en un corte ortogonal, el ángulo de ataque (α) es 25° y el ángulo de fricción (β) es 30° en la interfaz viruta-herramienta. Determine el porcentaje de cambio del espesor de la viruta si el ángulo de fricción es 50° . (Nota: no utilice las ecuaciones 21.3 o 21.4).

21.49 Demuestre que, para el mismo ángulo de cizallamiento, existen dos ángulos de ataque que dan la misma relación de corte.

21.50 Con los diagramas apropiados, demuestre cómo el uso de un fluido de corte puede cambiar la magnitud de la fuerza de empuje (F_t) en la figura 21.11.

21.51 Para una operación de cilindrado que usa una herramienta de corte de cerámico, si la velocidad aumenta 50%, ¿por cuál factor debe modificarse la relación de avance para obtener una vida útil constante de la herramienta? Utilice $n = 0.5$ y $y = 0.6$.

21.52 En el ejemplo 21.3, si se duplica la velocidad de corte (V), ¿será diferente la respuesta? Explique su respuesta.

21.53 Mediante la ecuación 21.24, seleccione un avance apropiado para $R = 1$ mm y una rugosidad deseada de $1 \mu\text{m}$. ¿Cómo ajustaría este avance para permitir que la punta de la herramienta se desgaste en tiempos de corte más largos? Explique su razonamiento.

21.54 Utilizando una herramienta de corte de carburo, la temperatura en una operación de corte con una velocidad de 300 pies/min y un avance de 0.002 pulgada/rev se mide como 1200°F . ¿Cuál es la temperatura aproximada si se duplica la velocidad? ¿Qué velocidad se requiere para reducir la temperatura máxima de corte a 900°F ?

21.55 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y que está entregando un cuestionario sobre los aspectos numéricos para poner a prueba los conocimientos de los estudiantes. Elabore dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

21.56 Como hemos visto, las virutas retiran la mayor parte del calor generado durante el maquinado. Si no tuvieran esta capacidad, ¿qué sugerencias haría para efectuar los procesos de maquinado sin calor excesivo? Explique su respuesta.

21.57 La vida útil de la herramienta se incrementa mucho al implantarse un medio efectivo de enfriamiento y lubricación. Diseñe métodos para proveer este fluido a la zona de corte y discuta las ventajas y limitaciones de su diseño.

21.58 Diseñe un arreglo experimental en el que se pueda simular el corte ortogonal en una operación de cilindrado en un torno.

21.59 ¿Cree que las virutas generadas durante el maquinado pueden utilizarse para fabricar productos útiles? Dé algunos ejemplos de posibles productos y comente sus características y diferencias si se fabricaran mediante otros

procesos de manufactura. ¿Qué tipos de virutas serían deseables para este propósito?

21.60 Se estableció que las herramientas de corte se pueden diseñar para que la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta se reduzca, ahuecando la cara de ataque de la herramienta a cierta distancia de la punta. Explique las posibles ventajas de dicha herramienta.

21.61 Se estableció que el mecanismo de formación de viruta también se puede observar raspando la superficie de una barra de mantequilla con un cuchillo afilado. Utilizando mantequilla a diferentes temperaturas, incluso congelada, efectúe un experimento como ése. Mantenga constante la profundidad de corte y sostenga el cuchillo a diferentes ángulos (para simular el ángulo de ataque de la herramienta), incluyendo el raspado oblicuo. Describa sus observaciones respecto del tipo de virutas producidas. También comente la fuerza que siente su mano al raspar y

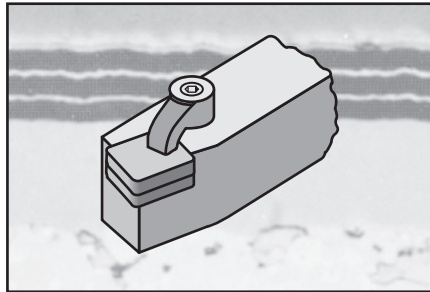
si observa algún traqueteo cuando la mantequilla está muy fría.

21.62 Algunos experimentos han demostrado que es posible producir virutas delgadas y anchas, hasta de 0.08 mm (0.003 pulgada) de espesor y 10 mm (4 pulgadas) de anchura, que serían similares a una hoja laminada. Los materiales han sido aluminio, magnesio y acero inoxidable. Un arreglo característico sería similar al del corte ortogonal, maquinando la periferia de una barra redonda

sólida con una herramienta recta, que se desplaza radialmente hacia dentro. Diga lo que piensa sobre la producción de láminas metálicas mediante este método, sus características superficiales y sus propiedades.

21.63 Diga lo que piensa sobre el reciclado de virutas producidas durante el maquinado en una planta. Incluya consideraciones respecto de las virutas producidas mediante corte en seco contra las producidas mediante maquinado con un fluido de corte.

Materiales para herramientas de corte y fluidos de corte



CAPÍTULO 22

Para seguir con la cobertura de los fundamentos de corte en el capítulo precedente, ahora describimos dos elementos esenciales en el maquinado (mecanizado): los materiales para las herramientas y los fluidos de corte. En específico:

- Tipos y características de los materiales para herramientas de corte.
- Propiedades y aplicaciones de los aceros de alta velocidad, los carburos, los cerámicos, el nitruro de boro cúbico y el diamante.
- Recubrimientos en herramientas, su composición y cómo funcionan.
- Tipos de fluidos de corte y sus aplicaciones.
- Tendencias en el maquinado casi seco y en seco.

22.1 | Introducción

La selección de los materiales que se utilizarán en las herramientas de corte para una aplicación en particular es uno de los factores más importantes en las operaciones de maquinado, como lo es la selección del material para moldes y matrices (dados) en los procesos de formado y moldeado. A lo largo de este capítulo discutiremos las propiedades básicas y las características de desempeño de los tipos más importantes de materiales para herramientas de corte, lo que nos ayudará en su selección. Sin embargo, como será obvio, la compleja naturaleza de este tema no siempre sirve al determinar los materiales apropiados para las herramientas, de ahí que también debamos confiar en guías y *recomendaciones* que se han acumulado en la industria durante muchos años. Comenzaremos con el capítulo 23, donde se presentará información sobre recomendaciones de materiales para herramientas, materiales de piezas de trabajo y operaciones específicas de maquinado.

Como se indicó en el capítulo precedente, la herramienta de corte se somete a (a) temperaturas elevadas; (b) esfuerzos de contacto elevados; (c) rozamiento a lo largo de la interfaz herramienta-viruta y a lo largo de la superficie maquinada. En consecuencia, el material de la herramienta de corte debe poseer las siguientes características:

- **Dureza en caliente:** para que se mantengan la dureza, resistencia y resistencia al desgaste de la herramienta a las temperaturas habituales en las operaciones de maquinado. Esto asegura que la herramienta no sufra alguna deformación plástica y, por ende, retenga su forma y filo. En la figura 22.1 se muestra la dureza del material para herramientas en función de la temperatura. Obsérvese la amplia respuesta de

- 22.1 Introducción 647
- 22.2 Aceros de alta velocidad 652
- 22.3 Aleaciones de cobalto fundido 653
- 22.4 Carburos 653
- 22.5 Herramientas recubiertas 656
- 22.6 Cerámicos con base de alúmina 661
- 22.7 Nitruro de boro cúbico 662
- 22.8 Cerámicos con base de nitruro de silicio 663
- 22.9 Diamante 663
- 22.10 Materiales para herramientas reforzados con triquitas 664
- 22.11 Costos y reacondicionamiento de las herramientas 664
- 22.12 Fluidos de corte 665

EJEMPLOS:

- 22.1 El papel que juegan los elementos de aleación en las herramientas de corte de aceros de alta velocidad 652
- 22.2 Efectos de los fluidos de corte en el maquinado 666

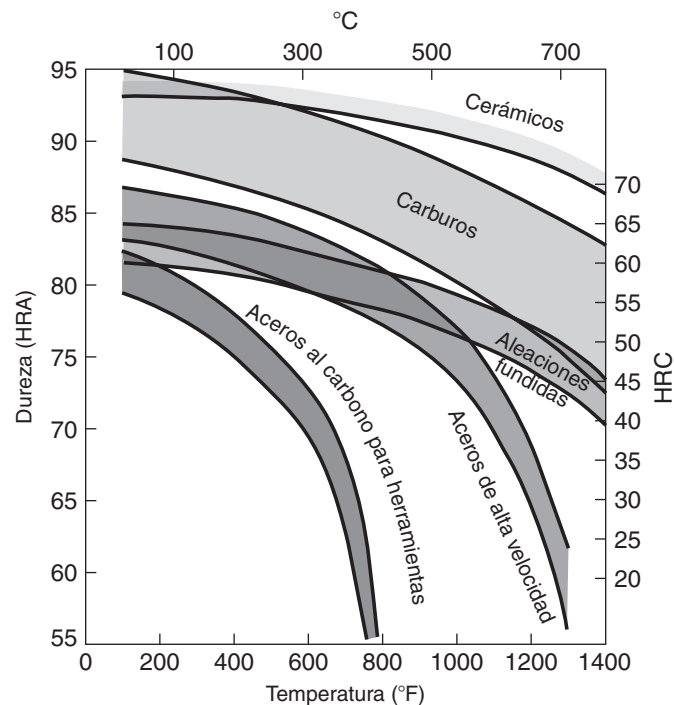


FIGURA 22.1 Dureza de diversos materiales para herramientas de corte en función de la temperatura (dureza en caliente). El amplio intervalo en cada grupo de materiales se debe a la variedad de composiciones de las herramientas y a los tratamientos disponibles para cada grupo.

estos materiales y (sin ser sorpresivo) lo bien que los cerámicos mantienen su dureza a temperaturas elevadas. Las herramientas de aceros al carbono se utilizaron como materiales para herramientas hasta el desarrollo de los aceros de alta velocidad a principios del siglo XX. Los aceros al carbono para herramientas comienzan a perder su dureza con rapidez, incluso a temperaturas moderadas, lo que significa que no se pueden emplear en maquinado a altas velocidades (y de ahí a altas temperaturas). En consecuencia, la capacidad de producción sería baja y los costos elevados.

- **Tenacidad y resistencia al impacto** (impacto mecánico): para que las fuerzas de impacto sobre la herramienta, que se repiten en operaciones de corte interrumpido (como el fresado, torneado de una flecha estriada en un torno, o debido a la vibración y el traqueteo durante el maquinado), no astillen o fracturen la herramienta.
- **Resistencia al impacto térmico:** para soportar los ciclos rápidos de temperatura encontrados en el corte interrumpido.
- **Resistencia al desgaste:** para obtener una vida útil aceptable de la herramienta antes de reemplazarla.
- **Estabilidad química y neutralidad:** con respecto al material a maquinar, para evitar o minimizar cualquier reacción adversa, adhesión y difusión en la herramienta-viruta que pudiera contribuir al desgaste de la herramienta.

Para responder a estos demandantes requerimientos, a lo largo de los años se han desarrollado diversos materiales para herramientas de corte con una amplia variedad de propiedades mecánicas, físicas y químicas, como se muestra en la tabla 22.1. Las propiedades

TABLA 22.1

Propiedades generales de los materiales para herramientas						
Propiedad	Aceros de alta velocidad	Aleaciones de cobalto fundido	Carburos		Cerámicos	Nitruro de boro cúbico
			WC	TiC		
Dureza	83–86 HRA	82–84 HRA 46–62 HRC	90–95 HRA 1800–2400 HK	91–93 HRA 1800–3200 HK	91–95 HRA 2000–3000 HK	4000–5000 HK 7000–8000 HK
Resistencia a la compresión, MPa	4100–4500	1500–2300	4100–5850	3100–3850	2750–4500	6900
psi × 10 ³	600–650	220–335	600–850	450–560	400–650	1000
Resistencia a la ruptura transversal, MPa	2400–4800	1380–2050	1050–2600	1380–1900	345–950	1350
psi × 10 ³	350–700	200–300	150–375	200–275	50–135	200
Resistencia al impacto, J	1.35–8	0.34–1.25	0.34–1.35	0.79–1.24	<0.1	<0.2
pulg.-lb	12–70	3–11	3–12	7–11	<1	<2
Módulo de elasticidad, GPa	200	—	520–690	310–450	310–410	850
psi × 10 ⁶	30	—	75–100	45–65	45–60	125
Densidad, kg/m ³	8600	8000–8700	10,000–15,000	5500–5800	4000–4500	3500
lb/pulg ³	0.31	0.29–0.31	0.36–0.54	0.2–0.22	0.14–0.16	0.13
Volumen de fase dura, %	7–15	10–20	70–90	—	100	95
Temperatura de fusión o de descomposición, °C	1300	—	1400	1400	2000	700
°F	2370	—	2550	2550	3600	1300
Conductividad térmica, W/m K	30–50	—	42–125	17	29	13
Coefficiente de expansión térmica, × 10 ⁻⁶ /°C	12	—	4–6.5	7.5–9	6–8.5	4.8
						1.5–4.8

*En general, los valores para el diamante policristalino son más bajos, excepto por la resistencia al impacto, que es mayor.

indicadas en la primera columna son útiles al determinar las características deseables de los materiales para herramientas para una aplicación en particular. Así, por ejemplo:

- La dureza y la resistencia son importantes en relación con la dureza y resistencia del material de la pieza de trabajo a maquinar.
- La resistencia al impacto es importante para producir cortes interrumpidos en el maquinado, como en el caso del fresado.
- La temperatura de fusión del material para herramientas es importante contra las temperaturas desarrolladas en la zona de corte.
- Las propiedades físicas de conductividad térmica y coeficiente de dilatación térmica son importantes para determinar la resistencia a la fatiga térmica y al impacto térmico de los materiales para herramientas.

Sin embargo, debe reconocerse que las propiedades deseables en las herramientas para una operación de maquinado particular pueden parecer contradictorias respecto de las propiedades de la herramienta de corte. Esta situación se puede ver con claridad en la tabla 22.2, observando las direcciones opuestas de las flechas horizontales largas. Como ejemplos: (a) los aceros de alta velocidad son tenaces, pero tienen una dureza en caliente limitada, y (b) los materiales cerámicos tienen alta resistencia a la temperatura y al desgaste, pero son frágiles y pueden astillarse. Obsérvese también que el costo de las herramientas aumenta conforme nos movemos hacia la derecha en la tabla 22.2: de aceros de alta velocidad (HSS, por sus siglas en inglés) a diamante (que es el más costoso).

En la tabla 22.3 se muestran las características de operación de los materiales para herramientas en el maquinado. En general, dichos materiales se dividen en las siguientes categorías, indicadas según el orden en que se desarrollaron e implantaron en la indus-

TABLA 22.2

Características generales de los materiales para herramientas de corte (estos materiales para herramientas tienen una amplia variedad de composiciones y propiedades. En muchas categorías de materiales para herramientas existen traslapes)							
	Aceros de alta velocidad	Aleaciones de cobalto fundido	Carburos no recubiertos	Carburos recubiertos	Cerámicos	Nitruro de boro cúbico policristalino	Diamante
Dureza en caliente	→						
Tenacidad	←						
Resistencia al impacto	←						
Resistencia al desgaste	→						
Resistencia al astillado	←						
Velocidad de corte	→						
Resistencia al impacto térmico	←						
Costo del material de la herramienta	→						
Profundidad de corte	De ligera a profunda	De ligera a profunda	De ligera a profunda	De ligera a profunda	De ligera a profunda	De ligera a profunda	Muy ligera para el diamante monocristalino
Método de procesamiento	Forjado, fundido, sinterizado HIP*	Fundido y sinterizado HIP	Prensado en frío y sinterizado	CVD o PVD†	Prensado en frío y sinterizado HIP	Sinterizado de alta presión y alta temperatura	Sinterizado de alta presión y alta temperatura

Fuente: R. Komanduri

*Prensado isostático en caliente.

†Deposición química de vapor, deposición física de vapor.

TABLA 22.3

Características generales de operación de los materiales para herramientas de corte			
Materiales para herramientas	Características generales	Modos de desgaste o falla de las herramientas	Limitaciones
Aceros de alta velocidad	Alta tenacidad, resistencia a la fractura, amplio intervalo de cortes de desbaste y acabado, buenos para cortes interrumpidos.	Desgaste del flanco, craterización.	Baja resistencia en caliente, capacidad limitada de endurecimiento y limitada resistencia al desgaste.
Carburos no recubiertos	Alta dureza para un amplio intervalo de temperaturas, tenacidad, resistencia al desgaste, variedad de aplicaciones amplia y versátil.	Desgaste del flanco, craterización.	No se puede usar a bajas velocidades debido al soldado en frío de las virutas y el microastillado.
Carburos recubiertos	Mejor resistencia al desgaste que los carburos no recubiertos, mejores propiedades térmicas y de fricción.	Desgaste del flanco, craterización.	No se puede usar a bajas velocidades debido al soldado en frío de las virutas y el microastillado.
Cerámicos	Alta dureza a temperaturas elevadas, alta resistencia al desgaste abrasivo.	Muescado de línea de profundidad de corte, microastillado, fractura gruesa.	Baja resistencia mecánica y baja resistencia a la fatiga termomecánica.
Nitruro de boro cúbico policristalino (cBN)	Alta resistencia en caliente, tenacidad, resistencia del filo de corte.	Muescado de línea de profundidad de corte, astillado, oxidación, grafitización.	Baja resistencia y baja estabilidad química a temperaturas altas.
Diamante	Alta dureza y tenacidad, resistencia al desgaste abrasivo.	Astillado, oxidación, grafitización.	Baja resistencia y baja estabilidad química a temperaturas altas.

Fuente: R. Komanduri y otras fuentes.

tria. Obsérvese que muchos de estos materiales también se utilizan para matrices y moldes en fundición, formado y moldeado de materiales metálicos y no metálicos.

1. Aceros de alta velocidad.
2. Aleaciones de cobalto fundido.
3. Carburos.
4. Herramientas recubiertas.
5. Cerámicos con base alúmina.
6. Nitruro de boro cúbico.
7. Cerámicos con base de nitruro de silicio.
8. Diamante.
9. Materiales reforzados con triquitas y nanomateriales.

Los aceros al carbono son los materiales para herramientas más antiguos y se han utilizado ampliamente en brocas, machuelos, brocas y rimas desde la década de 1880. Después se desarrollaron aceros de baja y media aleación para aplicaciones similares, pero con una vida útil más larga de la herramienta. Aunque son económicos y es fácil darles forma y afilarlos, estos aceros no tienen la suficiente dureza en caliente ni la resistencia al desgaste para cortar a altas velocidades, cuando la temperatura se eleva de manera significativa. Su uso se limita a operaciones de baja velocidad de corte, de ahí que no tengan una importancia particular en la manufactura moderna.

En este capítulo se describe lo siguiente:

- Las características, aplicaciones y limitaciones de estos materiales para herramientas en las operaciones de maquinado, incluyendo las características requeridas que hemos señalado y los costos correspondientes.

- El intervalo aplicable de las variables de proceso para un desempeño óptimo.
- Los tipos y características de los fluidos de corte y sus aplicaciones específicas en una amplia variedad de operaciones de maquinado.

22.2 | Aceros de alta velocidad

Las herramientas de *acero de alta velocidad* (HSS) se llaman así porque se desarrollaron para maquinar a mayores velocidades de las que era posible hacerlo antes. Producidos por primera vez a principios del siglo XX, los *aceros de alta velocidad* son los que tienen mayor aleación de todos los aceros para herramientas. Se pueden endurecer a diferentes profundidades, poseen buena resistencia al desgaste y son relativamente económicos. Debido a su tenacidad (de ahí su alta resistencia a la fractura), los aceros de alta velocidad son adecuados para: (a) herramientas de ángulos grandes y positivos de ataque (es decir, aquellas con pequeños ángulos comprendidos); (b) cortes interrumpidos, (c) máquinas herramienta con baja rigidez, sujetas a vibración y traqueteo, y (d) herramientas complejas y de una sola pieza, como brocas, rimas, machuelos y cortadores de engranes. Su limitación más importante (por su baja resistencia en caliente) es que las velocidades de corte son bajas, en relación con las de las herramientas de carburo, como se puede ver en la figura 22.1.

Existen dos tipos básicos de aceros de alta velocidad: **al molibdeno** (serie M) y **al tungsteno** (serie T). La serie M contiene hasta 10% de Mo, con Cr, V, W y Co como elementos de aleación. La serie T contiene de 12% a 18% de W, con Cr, V y Co como elementos de aleación. Los carburos formados en el acero constituyen de 10% a 20% en volumen. En general, la serie M tiene mayor resistencia a la abrasión que la serie T, sufre menos distorsión durante el tratamiento térmico y es menos costosa. En consecuencia, 95% de todos los aceros de alta velocidad para herramientas se producen con la serie M. La tabla 5.6 incluye tres de estos aceros y sus características.

Existen aceros de alta velocidad para herramientas ya conformadas (laminados o forjados), fundidas y para metalurgia de polvos (sinterización). Se pueden **recubrir** para mejorar su desempeño, como se indica en la sección 22.5. Los aceros de alta velocidad para herramientas también se pueden someter a *tratamientos superficiales* (como endurecimiento superficial para mejorar la dureza y la resistencia al desgaste, ver sección 4.10) o a tratamiento con vapor a temperaturas elevadas para desarrollar una capa dura de óxido negro (*azulado*) a fin de mejorar el desempeño, incluyendo una tendencia reducida a la formación de borde acumulado.

EJEMPLO 22.1 El papel que juegan los elementos de aleación en las herramientas de corte de acero de alta velocidad

Liste los principales elementos de aleación en los aceros de alta velocidad y describa sus efectos en las herramientas de corte.

Solución Los principales elementos de aleación en los HSS son el cromo, vanadio, tungsteno, cobalto y molibdeno.

Para apreciar su función en las herramientas de corte, consulte la sección 5.5.1 sobre los efectos de los diversos elementos en los aceros y observe lo siguiente:

Cromo: mejora la tenacidad, la resistencia al desgaste y la resistencia a temperaturas elevadas.

Vanadio: mejora la tenacidad, la resistencia a la abrasión y la dureza en caliente. El *tungsteno* y el *cobalto* tienen efectos similares: mejoran la resistencia y la dureza en caliente.

Molibdeno: mejora la resistencia al desgaste, la tenacidad y la resistencia y dureza a la temperatura elevada.

22.3 Aleaciones de cobalto fundido

Presentadas en 1915, las *aleaciones de cobalto fundido* tienen los siguientes intervalos de composición: de 38% a 53% de Co, de 30% a 33% de Cr y de 10% a 20% de W. Debido a su elevada dureza (comúnmente entre 58 y 64 HRC), tienen buena resistencia al desgaste y pueden mantener su dureza a temperaturas elevadas. No son tan tenaces como los aceros de alta velocidad y son sensibles a las fuerzas de impacto. En consecuencia, son menos adecuadas que los aceros de alta velocidad para las operaciones de corte interrumpido. Conocidas comúnmente como herramientas de *estelita*, estas aleaciones se funden y se rectifican para darles formas relativamente sencillas. En la actualidad sólo se utilizan en aplicaciones especiales que implican **cortes de desbaste**, profundos y continuos, con avances y velocidades relativamente elevadas, hasta del doble de las capacidades posibles con los aceros de alta velocidad. Como se indica en la sección 23.2, por lo general los cortes de desbaste comprenden grandes proporciones de avance y grandes profundidades de corte, con el propósito fundamental de retirar grandes cantidades de material, con poco cuidado por el acabado superficial. Por el contrario, los **cortes de acabado** se realizan con menores avances y profundidades de corte, y el acabado superficial es prioritario.

22.4 Carburos

Los dos grupos de materiales para herramientas descritos hasta este punto poseen la tenacidad y resistencia al impacto requeridos, pero también tienen limitaciones importantes, en particular respecto de la resistencia y la dureza en caliente. En consecuencia, no pueden utilizarse efectivamente donde existen altas velocidades de corte (y de ahí, altas temperaturas). Sin embargo, esta condición es necesaria a menudo para mejorar la productividad de la planta.

Para cumplir el reto de las velocidades de corte cada vez mayores se presentaron los *carburos* (también conocidos como *carburos cementados* o *sinterizados*) por primera vez en la década de 1930. Debido a su elevada dureza en un amplio intervalo de temperaturas (fig. 22.1), su alto módulo elástico, alta conductividad térmica y baja dilatación térmica, los carburos se encuentran entre los materiales para herramientas y matrices (dados) más importantes, versátiles y de costo efectivo para una amplia gama de aplicaciones. Los dos grupos más importantes de carburos utilizados en maquinado son el *carburo de tungsteno* y el *carburo de titanio*. Para diferenciarlos de las herramientas recubiertas que se describen en la sección 22.6, a las herramientas simples de carburo se les conoce comúnmente como **carburos no recubiertos**.

22.4.1 Carburo de tungsteno

Por lo común, el *carburo de tungsteno* (WC) consiste en partículas de carburo de tungsteno aglutinadas en una matriz de cobalto. Estas herramientas se manufacturan mediante técnicas de metalurgia de polvos (de ahí el término *carburos sinterizados* o *carburos cementados*), como se señala en el ejemplo 17.4. Primero, las partículas de carburo de tungsteno se combinan con *cobalto* en una mezcladora, produciendo un material compuesto con una matriz de cobalto que circunda a las partículas de carburo. Después, estas partículas, que tienen un tamaño de 1 a 5 μm (40 a 200 μpulg) se prensan y sinterizan para darles las formas de *inserto* deseadas. Con frecuencia, los carburos de tungsteno se integran con *carburo de titanio* y *carburo de niobio* para proporcionar propiedades especiales al material.

La cantidad de cobalto presente, que por lo común va de 6% a 16%, afecta de manera significativa las propiedades de las herramientas de carburo de tungsteno. Al aumentar el contenido de cobalto disminuyen la resistencia, dureza y resistencia al desgaste del WC, mientras que aumenta su tenacidad debido a la mayor tenacidad del cobalto. Por lo general, las herramientas de carburo de tungsteno se utilizan para cortar aceros, hierros fundidos y materiales no ferrosos abrasivos y han reemplazado ampliamente a las herramientas de HSS debido a su mejor desempeño.

Carburos micrograno. Las herramientas de corte también se producen con carburos de granos de tamaños submicroscópicos y ultrafinos (*micrograno*). El tamaño del grano se encuentra en el intervalo de 0.2 a 0.8 μm (8 a 30 μpulg). Si se comparan con los carburos tradicionales descritos antes, estos materiales para herramientas son más fuertes, duros y resistentes al desgaste, mejorando de esta manera la productividad. En una aplicación, con estos materiales se están produciendo microbrocas con diámetros del orden de 100 μm (0.004 pulgada), que se utilizan en la fabricación de tarjetas de circuitos microelectrónicos (capítulo 28).

Carburos con gradientes funcionales. En estas herramientas, la composición del carburo en el inserto tiene un gradiente a través de la profundidad cercana a su superficie, en lugar de ser uniformes, como los insertos comunes de carburo. El gradiente tiene una distribución gradual de composiciones y fases con funciones similares a las descritas como propiedades deseables de los recubrimientos para herramientas de corte. Las propiedades mecánicas graduadas eliminan las concentraciones de esfuerzos y promueven la vida útil y el desempeño de las herramientas. Sin embargo, son más costosas y no se pueden justificar en todas las aplicaciones.

22.4.2 Carburo de titanio

El *carburo de titanio* (TiC) consiste en una matriz de níquel-molibdeno. Tiene una resistencia al desgaste mayor que la del carburo de tungsteno, pero no es tan tenaz. El carburo de titanio es adecuado para maquinarse materiales duros (principalmente aceros e hierros fundidos) y para cortar a velocidades superiores a las apropiadas para el carburo de tungsteno.

22.4.3 Insertos

A las herramientas de acero de alta velocidad se les da forma en una sola pieza y se rectifican para proporcionarles diversas características geométricas (fig. 21.10a); dichas herramientas incluyen insertos, brocas y cortadores para fresado y para engranes. Una vez que se desgasta el filo de corte, la herramienta tiene que retirarse de su soporte y reafilarse.

Aunque por lo general existe un suministro de herramientas afiladas o reafiladas en los talleres de herramientas, las operaciones de cambio de herramientas son laboriosas e ineficientes. La necesidad de un método más efectivo ha llevado al desarrollo de *insertos*, que son herramientas individuales de corte con varios puntos de corte (fig. 22.2). Un inserto cuadrado tiene ocho puntos de corte y un inserto triangular tiene seis. En general, los insertos se sujetan sobre el *portaherramientas* con diversos mecanismos de sujeción (fig. 22.3). Aunque no se utilizan con tanta frecuencia de esta manera, los insertos también se pueden *soldar* al zanco de la herramienta, pero esta práctica se abandonó desde hace mucho tiempo.

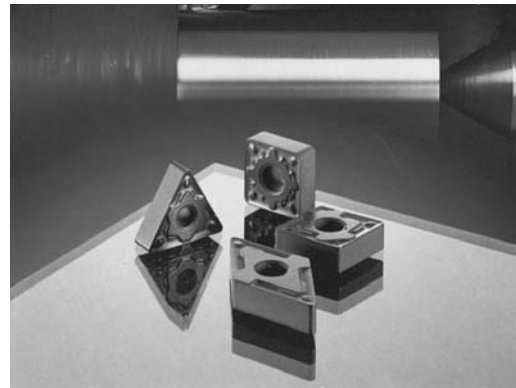


FIGURA 22.2 Insertos típicos de carburo con diversas formas y rompevirutas; también existen insertos redondos, como puede verse en las figuras 22.3c y 22.4. Los orificios en los insertos se han estandarizado para hacerlos intercambiables en los portaherramientas. *Fuente:* Cortesía de Kyocera Engineered Ceramics, Inc.

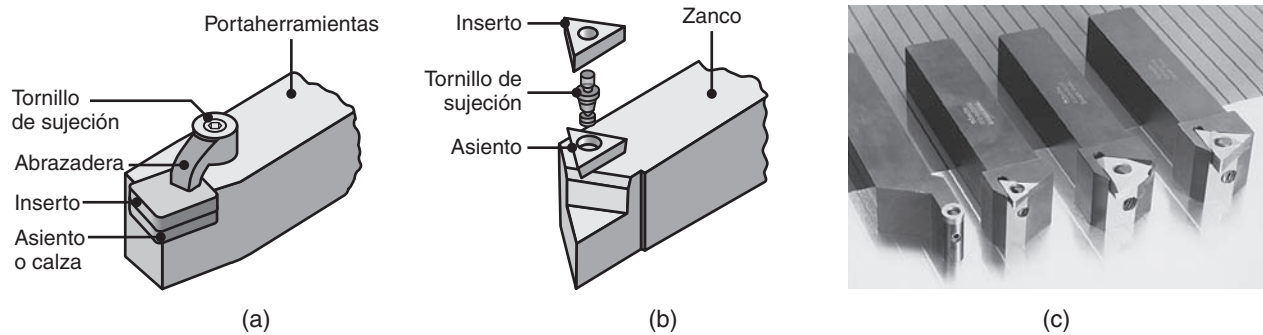


FIGURA 22.3 Métodos de montaje de insertos en portaherramientas: (a) Con abrazaderas, y (b) con tornillos de sujeción. (c) Ejemplos de insertos montados con tornillos de sujeción sin rosca, que se aseguran con tornillos laterales. *Fuente:* Cortesía de Valenite.

El método preferido para asegurar un inserto es la sujeción, ya que cada uno tiene varios puntos de corte y después de que se ha gastado un filo, el inserto se **indexa** (se gira en su soporte) para disponer de otro punto de corte. Además de los ejemplos de esta figura, existe una amplia variedad de otros portaherramientas para aplicaciones específicas, incluyendo los de inserción y remoción rápida.

Existen varias formas de insertos o pastillas de carburo, tales como cuadrado, triángulo, diamante y redonda. La resistencia del filo de corte de un inserto depende de su forma. Cuanto menor sea el ángulo comprendido o incluido (fig. 22.4), menor será la resistencia del filo. Para mejorar la resistencia del filo y evitar el astillado, por lo general todos los filos de los insertos se honean o asentan, achaflanar, o se producen con un descanso negativo (fig. 22.5). La mayoría de los insertos se honean a un radio de casi 0.025 mm (0.001 pulgada).

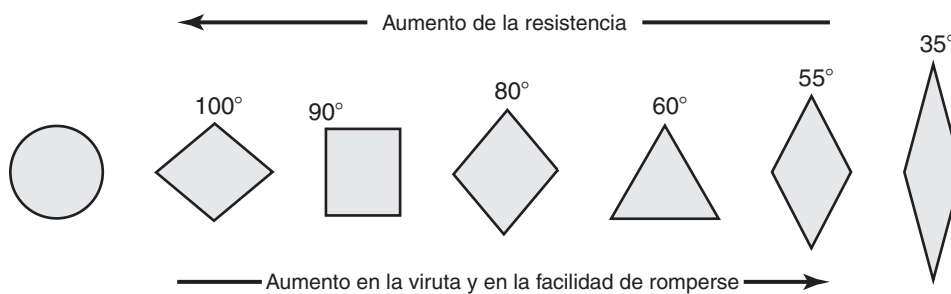


FIGURA 22.4 Resistencia relativa de los filos y tendencia al astillado de los insertos de diversas formas. La resistencia se refiere al filo de corte indicado por los ángulos comprendidos. *Fuente:* Cortesía de Kennametal, Inc.

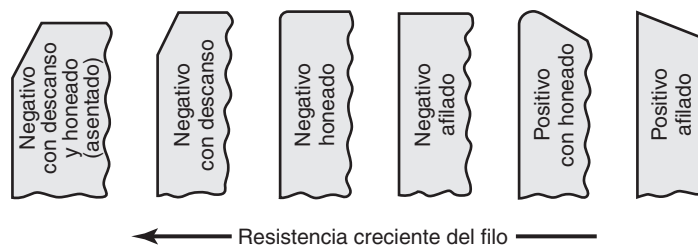


FIGURA 22.5 Preparación del filo en los insertos para mejorar su resistencia. *Fuente:* Cortesía de Kennametal, Inc.

TABLA 22.4

Clasificación ISO de las herramientas de corte de carburos de acuerdo con su uso			
Símbolo	Material de la pieza de trabajo	Código de color	Designación en orden creciente de la resistencia al desgaste y en orden decreciente de tenacidad en cada categoría (en incrementos de 5)
P	Metales ferrosos con virutas largas.	Azul	P01, P05–P50
M	Metales ferrosos con virutas largas o cortas, metales no ferrosos.	Amarillo	M10–M40
K	Metales ferrosos con virutas cortas, metales no ferrosos, materiales no metálicos.	Rojo	K01, K10–K40

Los **rompevirutas** (descritos en la sección 21.2.1) en los insertos tienen los propósitos de (a) controlar el flujo de la viruta durante el maquinado; (b) eliminar las virutas largas, y (c) reducir la vibración y el calor generado. Existen insertos comerciales de carburo con una amplia variedad de complejos rompevirutas, ejemplos de los cuales se muestran en la figura 22.2. La selección de un rompevirutas en particular depende de elementos como el avance y la profundidad de corte de la operación, el material de la pieza de trabajo, el tipo de viruta producida durante el corte y si se trata de un corte de desbaste o de acabado. Con el uso del diseño asistido por computadora y técnicas de análisis de elementos finitos se siguen desarrollando geometrías óptimas para los rompevirutas.

La **rigidez** de la máquina herramienta (sección 25.3) es muy importante cuando se utilizan herramientas de carburo. Los avances cortos, las velocidades bajas y el traqueteo son dañinos porque tienden a dañar el filo de corte de la herramienta. Los avances cortos, por ejemplo, concentran las fuerzas y temperaturas más cerca de los filos de la herramienta, aumentando su tendencia al astillado.

Las bajas velocidades de corte tienden a promover el soldado en frío de la astilla a la herramienta. Los fluidos de corte también deben aplicarse de manera continua y en grandes cantidades si se utilizan para minimizar el calentamiento y enfriar la herramienta en las operaciones de corte interrumpido.

22.4.4 Clasificación de los carburos

Con la manufactura global que cada vez crece más rápidamente y el mayor uso de las normas ISO (Organización Internacional para la Estandarización), los grados de carburo se clasifican mediante las letras P, M y K (como se muestra en las tablas 22.4 y 22.5) para numerosas aplicaciones, incluyendo los grados tradicionales C que se utilizan en Estados Unidos. Debido a la amplia variedad disponible de composiciones de los carburos, de aplicaciones de maquinado y de materiales de piezas de trabajo que comprenden, los esfuerzos de la clasificación ISO continúan siendo una tarea muy difícil. Esto es cierto en particular cuando se comparan los grados ISO con los grados tradicionales clasificados por el American National Standards Institute (ANSI), que van de los grados C1 a C8.

22.5 Herramientas recubiertas

Como se indicó en la parte I, el desarrollo de nuevas aleaciones y materiales de ingeniería es continuo desde la década de 1960. Estos materiales tienen una alta resistencia y tenacidad, aunque por lo general son abrasivos y químicamente reactivos con los materiales de las herramientas. La dificultad de maquinar estos materiales de manera efi-

TABLA 22.5

Clasificación de los carburos de tungsteno de acuerdo con sus aplicaciones de maquinado						
Norma ISO	Número de clasificación ANSI (grado)	Materiales a ser maquinados	Operación de maquinado	Tipo de carburo	Características de:	
					Corte	Carburo
K30–K40	C1	Hierro fundido, metales no ferrosos y materiales no metálicos que requieren resistencia a la abrasión	Desbaste	Grados resistentes al desgaste; en general sólo WC-Co con tamaños variables de granos		Incremento de dureza y resistencia al desgaste
K20	C2		Propósito general			
K10	C3		Acabado ligero			
K01	C4		Acabado de precisión			
P30–P50	C5	Aceros y aceros aleados que requieren resistencia a la craterización y a la deformación	Desbaste	Grados resistentes al desgaste; diversas composiciones de WC-Co con TiC y/o aleaciones de TaC		Incremento de dureza y resistencia al desgaste
P20	C6		Propósito general			
P10	C7		Acabado ligero			
P01	C8		Acabado de precisión			

Nota: Las comparaciones ISO y ANSI son aproximadas.

ciente y la necesidad de mejorar el desempeño en el maquinado de los materiales de ingeniería más comunes ha llevado a importantes desarrollos en *herramientas recubiertas*. Los recubrimientos tienen propiedades únicas, como:

- Menor fricción.
- Mayor adhesión.
- Mayor resistencia al desgaste y al agrietamiento.
- Actúan como una barrera para la difusión.
- Mayor dureza en caliente y resistencia al impacto.

Las herramientas recubiertas pueden tener una vida útil 10 veces más larga que la de las herramientas no recubiertas, permitiendo mayores velocidades de corte y reduciendo así tanto el tiempo requerido para las operaciones de maquinado como los costos de producción. Como se puede ver en la figura 22.6, el tiempo de maquinado se ha reducido de manera consistente en un factor de más de 100 desde 1900. Esta mejora ha tenido un impacto importante en la economía de las operaciones de maquinado, junto con desarrollos continuos en el diseño y la construcción de máquinas herramienta modernas y sus controles computarizados. El resultado es que ahora entre 40% y 80% de todas las operaciones de maquinado utilizan herramientas recubiertas, en particular en el torneado, fresado y taladrado. Algunas investigaciones indican que el uso de dichas herramientas tiene mayor preponderancia en las grandes compañías que en las pequeñas.

22.5.1 Materiales y métodos de recubrimiento

Los materiales que suelen utilizarse para recubrimiento son el nitruro de titanio (TiN), el carburo de titanio (TiC), el carbonitruro de titanio (TiCN) y el óxido de aluminio (Al_2O_3), cuyo espesor varía por lo general de 2 a 15 μm (80 a 600 μpulg); se aplican sobre las herramientas y los insertos mediante dos técnicas, descritas con mayor detalle en la sección 34.6.

1. Deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés), incluyendo la deposición química de vapor asistida por plasma.
2. Deposición física de vapor (PVD, por sus siglas en inglés).

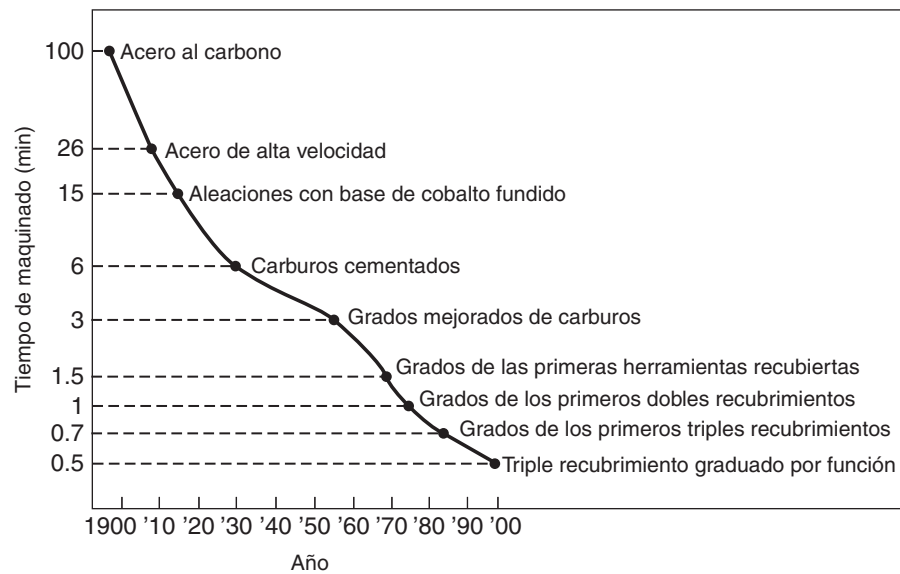


FIGURA 22.6 Tiempo relativo requerido para maquinar con diversos materiales para herramientas de corte, indicando el año en que dichos materiales se introdujeron por primera vez. Obsérvese que el tiempo de maquinado se ha reducido en dos órdenes de magnitud en 100 años. *Fuente:* Cortesía de Sandvik.

El proceso CVD es el método más utilizado para las herramientas de carburo con recubrimientos de fases múltiples y cerámicos; ambos se describen después en esta sección. Por otro lado, los carburos recubiertos mediante PVD con recubrimientos de TiN tienen más resistencia en el filo de corte, menos fricción y menor tendencia a formar un borde acumulado o recocado; son más lisos y su espesor es más uniforme, por lo general de 2 a 4 μm (80 a 160 μpulg). Otra tecnología (que se emplea en particular para los recubrimientos de fases múltiples) es la **deposición química de vapor de temperatura media** (MTCVD, por sus siglas en inglés), desarrollada para maquinar hierro dúctil (nodular) y aceros inoxidable y para proporcionar una resistencia mayor a la propagación de las grietas que la de los recubrimientos CVD.

Los recubrimientos para herramientas de corte y matrices (dados) deben tener las siguientes características generales:

- **Alta dureza** a elevadas temperaturas, para resistir el desgaste.
- **Estabilidad química y neutralidad** con respecto al material de la pieza de trabajo, para reducir el desgaste.
- **Baja conductividad térmica**, para evitar la elevación de la temperatura en el sustrato.
- **Compatibilidad y buena unión o adherencia** con el sustrato, para evitar la descamación o astillado.
- **Poca o nada de porosidad** en el recubrimiento, para mantener su integridad y resistencia.

La efectividad de los recubrimientos se ve realzada por la dureza, tenacidad y alta conductividad térmica del sustrato (que puede ser carburo o acero de alta velocidad). El honado de los filos de corte es un procedimiento importante para mantener la resistencia del recubrimiento; en caso contrario, éste se puede descascarar o astillar en los filos y esquinas.

Recubrimientos de nitruro de titanio. Los recubrimientos de nitruro de titanio tienen bajos coeficientes de fricción, dureza elevada, resistencia a temperaturas altas y buena adhesión al sustrato. En consecuencia, mejoran mucho la vida útil de las herramientas tanto de acero de alta velocidad como de carburo, los insertos para brocas y los cortadores. El

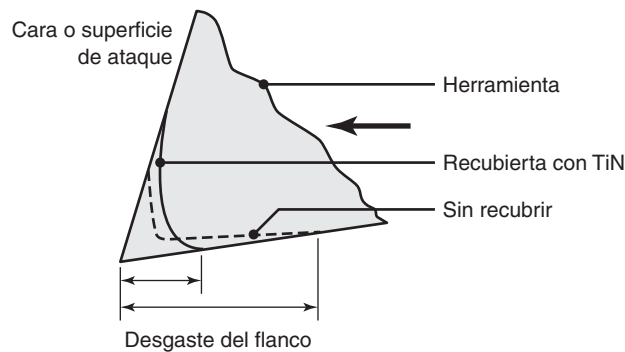


FIGURA 22.7 Esquema de los patrones característicos de desgaste en herramientas de acero de alta velocidad sin recubrir y con recubrimiento de nitruro de titanio. Obsérvese que el desgaste del flanco es significativamente menor en la herramienta recubierta.

desempeño de las herramientas recubiertas con nitruro de titanio (de color dorado) es bueno a mayores velocidades de corte y avances, en tanto que el desgaste del flanco es significativamente menor que el de las herramientas sin recubrimiento (fig. 22.7); las superficies de los flancos se pueden rectificar otra vez después del uso, ya que el nuevo rectificado de la herramienta no retira el recubrimiento de la cara de ataque de la herramienta. Sin embargo, las herramientas recubiertas no se comportan muy bien a bajas velocidades de corte porque el recubrimiento puede desgastarse debido a la adhesión de la viruta. Por lo tanto, es importante usar fluidos apropiados de corte para evitar la adhesión.

Recubrimientos de carburo de titanio. Los recubrimientos de carburo de titanio sobre insertos de carburo de tungsteno tienen alta resistencia al desgaste del flanco al maquinar materiales abrasivos.

Recubrimientos cerámicos. Debido a su neutralidad química, baja conductividad térmica, resistencia a las temperaturas elevadas y resistencia al desgaste del cráter y del flanco, los cerámicos son adecuados para recubrir materiales para herramientas. El recubrimiento cerámico más utilizado es el óxido de aluminio (Al_2O_3). Sin embargo, ya que son muy estables (no reactivos químicamente), por lo general, los recubrimientos de óxidos se unen con debilidad al sustrato.

Recubrimientos de fases múltiples. Las propiedades deseables de los recubrimientos, recién descritas, se pueden combinar y optimizar con el uso de recubrimientos de *fases múltiples* o *multifásicos*. Ahora existen herramientas de carburos con dos o tres capas de tales recubrimientos y son particularmente efectivas en el maquinado de hierros fundidos y aceros.

Por ejemplo, primero se puede depositar TiC sobre el sustrato, seguido de Al_2O_3 y después TiN . La primera capa debe unirse bien al sustrato; la exterior tiene que resistir el desgaste y presentar una baja conductividad térmica; la intermedia debe unirse bien y ser compatible con las otras dos.

Las aplicaciones típicas de las herramientas con recubrimientos de capas múltiples son las siguientes:

1. Corte de alta velocidad y continuo: $\text{TiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$.
2. Corte de trabajo rudo y continuo: $\text{TiC}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$.
3. Corte interrumpido ligero: $\text{TiC}/\text{TiC} + \text{TiN}/\text{TiN}$.

También existen recubrimientos en **capas múltiples alternas**. El espesor de estas capas es de 2 a 10 μm , menores que los recubrimientos regulares de fases múltiples (fig. 22.8). Se usan recubrimientos delgados porque su dureza aumenta al disminuir el tamaño de grano, un fenómeno similar al incremento de la resistencia de los metales cuando se reduce el tamaño de grano. Por lo tanto, las capas delgadas son más duras que las gruesas.

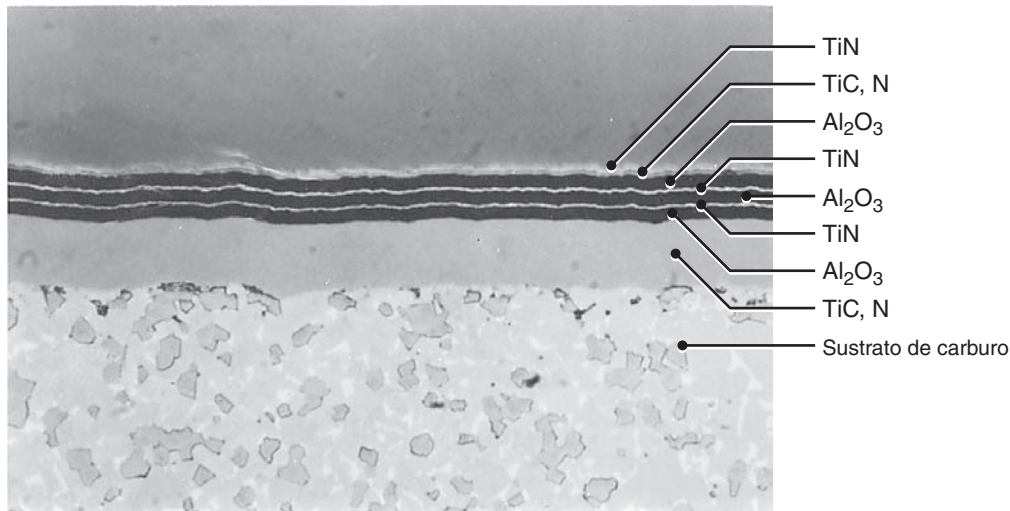


FIGURA 22.8 Recubrimientos de etapas múltiples sobre un sustrato de carburo de tungsteno. Capas muy delgadas de nitruro de titanio separan tres capas alternadas de óxido de aluminio. Se han producido insertos hasta con 13 capas de recubrimiento. El espesor de los recubrimientos se encuentra por lo común dentro del intervalo de 2 a 10 μm . Fuente: Cortesía de Kennametal, Inc.

Una herramienta típica recubierta con fases múltiples puede constar de las siguientes capas, empezando desde arriba, junto con sus funciones fundamentales:

1. TiN: baja fricción.
2. Al_2O_3 : alta estabilidad térmica.
3. TiCN: reforzado con fibra, tiene un buen equilibrio de resistencia al desgaste del cráter y del flanco, en particular para corte interrumpido.
4. Sustrato delgado de carburo: alta tenacidad a la fractura.
5. Sustrato grueso de carburo: duro y resistente a la deformación plástica a temperaturas elevadas.

Recubrimientos de diamante. En las secciones 8.7 y 34.13 se indican las propiedades y aplicaciones del diamante, los recubrimientos de diamante y el *carbón similar al diamante*, respectivamente, y en la sección 22.9 se describe su uso como recubrimiento para herramientas de corte, sobre todo en los insertos de carburo de tungsteno y nitruro de silicio. Las herramientas recubiertas con diamante son muy efectivas en el maquinado de metales no ferrosos y materiales abrasivos, como las aleaciones de aluminio que contienen silicio, materiales compósitos reforzados con fibras y con matriz metálica, y grafito. Su vida útil ha mejorado hasta 10 veces más respecto de otras herramientas recubiertas.

Existen **insertos recubiertos con diamante** comerciales, en los que, mediante las técnicas PVD y CVD, se depositan delgadas películas sobre sustratos. Las películas gruesas se obtienen haciendo crecer una hoja grande de diamante puro, que después se corta con láser para darle forma y soldarla a un inserto de carburo. También se han desarrollado *recubrimientos de diamante nanocristalino en multicapas*, con capas de unión de diamante que dan resistencia al recubrimiento. Como en todos los recubrimientos, es importante desarrollar una buena adherencia de la película de diamante al sustrato y minimizar la diferencia de expansión térmica entre el diamante y los materiales del sustrato.

22.5.2 Diversos materiales de recubrimiento

En la mejora del desempeño de las herramientas recubiertas se han producido importantes avances. El **carbonitruro de titanio** (TiCN) y el **nitruro de aluminio titanio** (TiAlN) son efectivos para cortar aceros inoxidables. El TiCN (que se deposita mediante técnicas

de deposición física de vapor) es más duro y tenaz que el TiN y se puede utilizar sobre herramientas de carburos y de acero de alta velocidad. El TiAlN es efectivo para maquinar aleaciones aeroespaciales. Los recubrimientos con base de cromo, como el **carburo de cromo** (CrC), son efectivos para maquinar metales más blandos que tienden a adherirse a la herramienta de corte, como el aluminio, cobre y titanio. Otros nuevos materiales son el **nitrato de zirconio** (ZrN) y el **nitrato de hafnio** (HfN). Se requieren considerables datos experimentales antes de que se puedan evaluar totalmente estos recubrimientos y su desempeño para aplicaciones apropiadas en el maquinado.

Los desarrollos más recientes incluyen (a) **recubrimientos nanocapa**, entre ellos carburo, boruro, nitrato, óxido o alguna combinación (ver también la sección 6.16), y (b) **recubrimientos de compósitos**, que utilizan varios materiales. La dureza de algunos de estos recubrimientos se aproxima a la del nitrato de boro cúbico; aunque aún se encuentran en etapas experimentales, se espera que tengan los beneficios combinados de diferentes tipos de recubrimientos, así como aplicaciones más amplias en las operaciones de maquinado.

22.5.3 Implantación de iones

En este proceso se introducen iones dentro de la superficie de la herramienta de corte, mejorando sus propiedades superficiales (sección 34.6) sin cambiar sus dimensiones. Se han utilizado con éxito herramientas de carburo con implantes de **iones de nitrógeno** en aceros aleados e inoxidables. La implantación de herramientas con **iones de xenón** también se encuentra en desarrollo.

22.6 Cerámicos base alúmina

Los materiales para herramientas fabricados de material **cerámico**, que se presentaron en la década de 1950, consisten fundamentalmente en **óxido de aluminio** de alta pureza de grano fino (ver también la sección 8.2). Se prensan en frío para darles la forma del inserto a alta presión y se sinterizan a elevada temperatura; al producto final se le conoce como **cerámicos blancos (prensados en frío)**. La adición de carburo de titanio y óxido de zirconio mejora propiedades como la tenacidad y la resistencia al impacto térmico.

Las herramientas de material **cerámico con base de alúmina** tienen una resistencia muy elevada a la abrasión y alta dureza en caliente (fig. 22.9). Químicamente, son más estables que los aceros de alta velocidad y que los carburos, por lo que tienden menos a adherirse a los metales durante el corte y a formar bordes acumulados o recrecidos. En

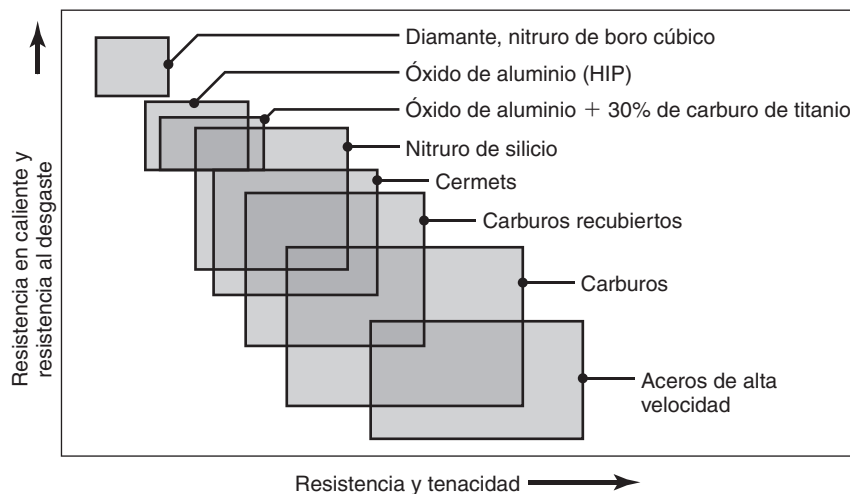


FIGURA 22.9 Intervalos de propiedades mecánicas para diversos grupos de materiales para herramientas. Ver también las tablas 22.1 a 22.5.

consecuencia, al cortar hierros fundidos y aceros se obtiene un buen acabado superficial con las herramientas a base de cerámicos. Sin embargo, éstos no tienen tenacidad y su uso puede provocar la falla prematura de la herramienta por astillado o por falla catastrófica.

Existen insertos cerámicos en formas similares a las de los insertos de carburo. Son efectivos en alta velocidad y en operaciones de corte interrumpido, como el acabado o semiacabado mediante torneado. Para reducir el impacto térmico, el corte debe realizarse en seco o con una copiosa cantidad de fluido de corte, aplicado como una corriente estable. Las aplicaciones inapropiadas o intermitentes del fluido pueden provocar un impacto térmico y la fractura de la herramienta a base de cerámicos.

La forma de la herramienta a base de cerámicos y su arreglo son importantes. Por lo general se prefieren ángulos negativos de ataque (ángulos comprendidos grandes) para evitar el astillado debido a la pobre resistencia a la tensión de los cerámicos. La falla de la herramienta se puede reducir aumentando la rigidez y la capacidad de amortiguamiento de las máquinas herramienta, montajes y dispositivos de sujeción del trabajo, reduciendo así la vibración y el traqueteo.

Cermets. Los *cermets* (de las palabras *cerámico* y *metal*) se utilizaron por primera vez en la década de 1950 y consisten en partículas de material cerámico en una matriz metálica. Se presentaron en la década siguiente y son materiales *cerámicos negros* o *prensados en caliente* (carbóxidos). Un cermet típico tiene 70% de óxido de aluminio y 30% de carburo de titanio; otros cermets contienen carburo de molibdeno, carburo de niobio y carburo de tantalio. Aunque poseen estabilidad química y resistencia a la formación de bordes acumulados, su fragilidad y alto costo han limitado su uso más amplio. Refinamientos posteriores de estas herramientas han mejorado su resistencia, tenacidad y confiabilidad. Su desempeño se encuentra entre el de los cerámicos y el de los carburos, y ha sido adecuado para cortes ligeros de desbaste y cortes de acabado de alta velocidad. Los rompevirutas son importantes para los insertos de cermets. Aunque se pueden recubrir, los beneficios de los cermets recubiertos son discutibles, ya que la mejora en la resistencia al desgaste parece marginal.

22.7 | Nitruro de boro cúbico

Después del diamante, el *nitruro de boro cúbico* (cBN) es el material más duro que existe. Presentado en 1962 con el nombre comercial de Borazón, se produce uniendo una capa de 0.5 mm a 1 mm (0.02 a 0.04 pulgada) de **nitruro de boro cúbico policristalino** a un sustrato de carburo mediante sinterización a alta presión y alta temperatura. En tanto que el carburo proporciona resistencia al impacto, la capa de cBN aporta una resistencia muy elevada al desgaste y resistencia del filo de corte (fig. 22.10). Las herramientas de nitruro de boro cúbico también se producen en tamaños pequeños, sin sustrato.

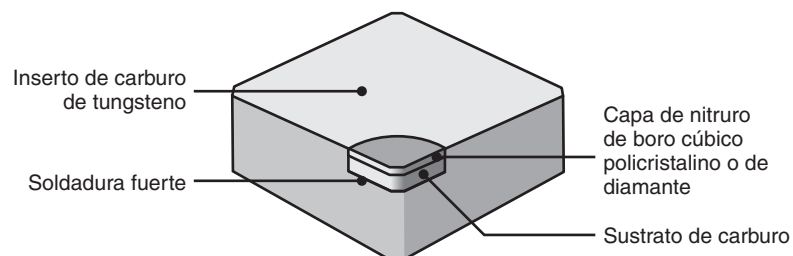


FIGURA 22.10 Inserto de nitruro de boro cúbico policristalino o de diamante sobre carburo de tungsteno.

A temperaturas elevadas, el cBN es químicamente inerte al hierro y al níquel (de ahí que no exista desgaste debido a la difusión). Su resistencia a la oxidación es elevada, por lo que resulta adecuado para cortar ferrosos endurecidos y aleaciones de alta temperatura (ver *maquinado duro* en la sección 25.6). También se utiliza como abrasivo. Como las herramientas de cBN son frágiles, la rigidez de la máquina y de los soportes es importante para impedir la vibración y el traqueteo. Pueden evitarse además el astillado y el agrietamiento por los impactos térmicos si el maquinado se realiza en seco (esto es, deben evitarse los fluidos de corte), sobre todo en las operaciones de corte interrumpido (como el fresado), que somete la herramienta a ciclos térmicos de manera repetitiva.

22.8 | Cerámicos con base de nitruro de silicio

Desarrollados en la década de 1970, los materiales para herramientas de *cerámico con base de nitruro de silicio* (SiN) consisten en nitruro de silicio con diversas adiciones de óxido de aluminio, óxido de itrio y carburo de titanio. Estas herramientas tienen tenacidad, dureza en caliente y buena resistencia al impacto térmico. Un ejemplo de material con base de SiN es el **sialón**, cuyo nombre proviene de los elementos que lo conforman: **silicio**, **aluminio**, **oxígeno** y **nitrógeno**. Posee una resistencia al impacto térmico mayor que el nitruro de silicio y se recomienda para maquinar hierros fundidos y superaleaciones con base de níquel a velocidades intermedias de corte. Sin embargo, debido a su afinidad química con el hierro a temperaturas elevadas, las herramientas con base de SiN no son adecuadas para maquinar aceros.

22.9 | Diamante

El diamante es la sustancia más dura que se conoce (ver también la sección 8.7); como herramienta de corte tiene propiedades deseables, entre ellas baja fricción, alta resistencia al desgaste y la capacidad de mantener su filo de corte. El diamante se utiliza cuando se requiere un buen acabado superficial y precisión dimensional, en particular con las aleaciones no ferrosas blandas y con los materiales abrasivos metálicos y no metálicos (sobre todo algunas aleaciones de aluminio-silicio). En la actualidad se usan ampliamente *diamantes sintéticos* o industriales, ya que el natural tiene defectos y su desempeño puede ser impredecible, como en el caso de los abrasivos empleados en ruedas de esmerilado.

Para aplicaciones especiales se pueden utilizar **diamantes monocristalinos** de varios quilates. Sin embargo, se han sustituido en gran medida por herramientas de **diamante policristalino** (PCD, por sus siglas en inglés), llamados *compactos*, que también se usan como matrices para estirado de alambre fino. Estas herramientas de diamante consisten en cristales sintéticos muy pequeños fundidos mediante un proceso de alta presión y alta



FIGURA 22.11 Insertos con puntas de nitruro de boro cúbico policristalino (fila superior) e insertos de cBN sólido policristalino (fila inferior). *Fuente:* Cortesía de Valenite.

temperatura, a un espesor de entre 0.5 mm y 1 mm (0.02 a 0.04 pulgada), aglutinados en un sustrato de carburo; este producto es similar a las herramientas cBN (fig. 22.11). La orientación aleatoria de los cristales de diamante evita la propagación de grietas a lo largo de la estructura, mejorando su tenacidad de manera significativa.

El diamante es frágil, por lo que son importantes la forma y el afilado de la herramienta. En general se utilizan ángulos pequeños de ataque para proveer un filo de corte fuerte (debido a los ángulos mayores comprendidos). Se tiene que poner atención particular en el montaje y la orientación apropiada de los cristales, a fin de obtener una vida útil óptima de la herramienta. El desgaste puede ocurrir por microastillado (a causa de los esfuerzos térmicos y la oxidación) y la transformación a carbono (provocada por el calor generado durante el corte). Las herramientas de diamante se pueden emplear en forma satisfactoria casi a cualquier velocidad, pero son más adecuadas para cortes de acabado ligero, ininterrumpido. Con el propósito de minimizar la fractura de la herramienta, el diamante monocristalino debe reafilarse en cuanto se desafilé. Debido a su fuerte afinidad química a temperaturas elevadas (lo que produce difusión), no se recomienda el diamante para maquinar aceros simples al carbono o aleaciones de titanio, níquel y cobalto. También se usa como abrasivo en las operaciones de rectificado y pulido y como *recubrimientos*.

22.10 Materiales para herramientas reforzados con triquitas

Para mejorar aún más el desempeño y la resistencia al desgaste de las herramientas de corte (en particular cuando se maquinan nuevos materiales y compósitos), se ha tenido un avance continuo en el desarrollo de nuevos materiales para herramientas con propiedades mejoradas, como:

- Alta tenacidad a la fractura.
- Resistencia al choque térmico.
- Resistencia en el filo de corte.
- Resistencia al deslizamiento.
- Dureza en caliente.

Los avances incluyen el uso de *triquitas* como fibras de refuerzo en los materiales para herramientas de corte. Ejemplos de esto son (a) las herramientas con base de nitruro de silicio reforzadas con triquitas de carburo de silicio, y (b) las herramientas con base de óxido de aluminio reforzadas con 25% a 40% de triquitas de carburo de silicio, en ocasiones con la adición de *óxido de zirconio* (ZrO_2). Por lo común, las triquitas tienen una longitud de 5 a 100 μm y un diámetro de 0.1 a 1 μm . La alta reactividad del carburo de silicio con los metales ferrosos hace que las herramientas reforzadas con SiC sean inadecuadas para maquinar hierros y aceros.

22.11 Costos y reacondicionamiento de las herramientas

Los *costos de las herramientas* varían ampliamente, dependiendo del material, el tamaño, la forma, los rompevirutas y la calidad. El costo de un *inserto* común de 0.5 pulgada (12.5 mm) es de alrededor de (a) \$2 a \$10 dólares para carburos sin recubrir; (b) \$6 a \$10 para carburos recubiertos; (c) \$8 a \$12 para cerámicos, (d) \$50 a \$60 para carburos recubiertos con diamante; (e) \$60 a \$90 para nitruro de boro cúbico, y (f) \$90 a \$100 para insertos con punta de diamante.

Después de revisar los costos comprendidos en el maquinado y considerando todos los aspectos implícitos en la operación total, se puede ver que el costo de un inserto indi-

vidual es insignificante. Se estima que los costos de herramental en el maquinado son de 2% a 4% de los costos de manufactura. Esta pequeña cantidad obedece al hecho de que una sola herramienta de corte puede retirar mucho material antes de ser indexada y finalmente reciclada. En la sección 21.5 se vio que la vida útil esperada de la herramienta puede estar en el intervalo de 30 a 60 minutos. Entonces, si se considera que un inserto cuadrado tiene ocho filos de corte, esto indica que la herramienta puede durar mucho tiempo antes de que se le retire de la máquina y se le reemplace.

Las herramientas de corte se pueden **reacondicionar** afilándolas mediante rectificadoras de herramientas y cortadores en un taller que tenga monturas especiales. Esta operación puede efectuarse en forma manual o en rectificadoras de herramientas y cortadores controlados por computadora. También se usan métodos avanzados de maquinado, como se indica en el capítulo 27. El reacondicionamiento de las herramientas recubiertas también se realiza recubriéndolas, por lo general en instalaciones especiales para estos propósitos. Es importante que las herramientas reacondicionadas tengan las mismas características geométricas que las originales. Con frecuencia tiene que decidirse si resulta económico reacondicionar una o dos veces las herramientas, sobre todo cuando los costos de los insertos comunes no constituyen un elemento básico en la operación total. El reciclamiento de las herramientas es un factor que siempre debe considerarse, en especial si contienen materiales costosos y estratégicamente importantes, como el tungsteno y el cobalto.

22.12 | Fluidos de corte

Los *fluidos de corte* se utilizan ampliamente en las operaciones de maquinado para obtener los siguientes resultados:

- Reducir la fricción y el desgaste, mejorando así la vida útil de la herramienta y el acabado superficial de la pieza de trabajo.
- Enfriar la zona de corte, mejorando así la vida útil de la herramienta y reduciendo la temperatura y la distorsión térmica de la pieza de trabajo.
- Reducir las fuerzas y el consumo de energía.
- Retirar las virutas de la zona de corte, evitando que interfieran en el proceso de corte, en particular en operaciones como el taladrado y el machueleado.
- Proteger la superficie maquinada de la corrosión ambiental.

Según el tipo de maquinado, el fluido de corte necesario puede ser un **refrigerante**, un **lubricante** o **ambos**. La efectividad de los fluidos de corte depende de factores como el tipo de operación de maquinado, los materiales de la herramienta y de la pieza de trabajo, la velocidad de corte y el método de aplicación. El agua es un excelente refrigerante y puede reducir de manera eficaz las altas temperaturas desarrolladas en la zona de corte; sin embargo, no es un lubricante efectivo, ya que no reduce la fricción. Además, provoca la oxidación de las piezas de trabajo y de los componentes de la máquina herramienta. Como hemos visto, la lubricación eficaz es un factor importante en las operaciones de maquinado.

La necesidad de un fluido de corte depende de la *severidad* de la operación de maquinado en particular, que puede definirse como el nivel de temperaturas y fuerzas encontradas, la tendencia a la formación de un filo acumulado, la facilidad con que las virutas producidas pueden retirarse de la zona de corte y cuán efectivamente se pueden aplicar los fluidos a la región apropiada de la interfaz herramienta-viruta. La severidad relativa de los procesos de maquinado se manifiesta así, en orden ascendente: aserrado, torneado, fresado, taladrado, corte de engranes, corte de roscas, machueleado y brochado interno.

Sin embargo, existen operaciones en las que la acción de enfriamiento de los fluidos de corte puede ser dañina: se ha demostrado que pueden hacer que la viruta se vuelva *más rizada*, concentrando entonces el calor cerca de la punta de la herramienta, lo que reduce la vida útil de ésta. Y aun más importante, en las operaciones de corte interrumpido, como el fresado con cortadores de dientes múltiples, el enfriamiento de la zona de

corte provoca ciclos térmicos en los dientes del cortador, lo que originaría *grietas térmicas* debidas a fatiga térmica o a impacto térmico.

Sin embargo, desde mediados de la década de 1990 ha habido una tendencia importante hacia el **maquinado casi en seco**, lo que significa un uso mínimo de fluidos de corte, así como el *maquinado en seco*; en la sección 22.12.1 se analizan estas tendencias.

Acción del fluido de corte. En la sección 33.6 se discuten con mayor detalle los mecanismos básicos de lubricación en las operaciones de trabajo de los metales. En este punto describiremos brevemente los mecanismos por los que los fluidos de corte afectan las operaciones de maquinado. No se comprende de inmediato cómo un fluido de corte puede penetrar la importante cara de ataque de la herramienta y afectar el proceso de corte. Los estudios han demostrado que dicho fluido gana el acceso a la interfaz herramienta-viruta deslizándose por los costados de la viruta mediante la *acción de capilaridad* de la red de asperezas de la superficie, que se engarzan una con otra en la interfaz. Debido al pequeño tamaño de esta red de capilaridad, el fluido de corte debe tener un tamaño molecular pequeño y poseer características humectantes apropiadas (tensión superficial). En consecuencia, por ejemplo, la grasa no puede ser un lubricante eficaz en el maquinado, pero los aceites de bajo peso molecular suspendidos en agua (emulsiones) son muy efectivos.

EJEMPLO 22.2 Efectos de los fluidos de corte en el maquinado

Se está realizando una operación de maquinado con un fluido de corte que es un lubricante eficaz. ¿Qué cambiaría en la mecánica de la operación de corte si se retirara el fluido?

Solución Como el fluido de corte es un buen lubricante, al retirarlo se produciría la siguiente cadena de eventos:

- a. Aumenta la fricción en la interfaz herramienta-viruta.
- b. Disminuye el ángulo del plano cortante, de acuerdo con la ecuación 21.3.
- c. Aumenta la deformación cortante, como se ve en la ecuación 21.2.
- d. La viruta se vuelve más gruesa.
- e. Es posible que se forme un borde acumulado.

Como consecuencia de estos cambios, ocurrirán los siguientes eventos:

- a. Aumentará la energía de cizallamiento o de cortante en la zona primaria.
- b. Aumentará la energía de fricción en la zona secundaria.
- c. Aumentará la energía total.
- d. Aumentará la temperatura en la zona de corte, provocando un mayor desgaste de la herramienta.
- e. Comenzará a deteriorarse el acabado superficial y será difícil mantener las tolerancias dimensionales debido al incremento de temperatura y a la expansión térmica de la pieza de trabajo durante el maquinado.

Tipos de fluidos de corte. En la sección 33.7 se describen las características y aplicaciones de los fluidos para el trabajo de los metales. Como un adelanto, a continuación se presentan los cuatro tipos de fluidos de corte que suelen utilizarse en las operaciones de maquinado:

1. **Aceites** (también llamados *aceites simples*), incluyendo aceites minerales, animales, vegetales, compuestos y sintéticos, que por lo general se utilizan en operaciones de baja velocidad donde el incremento de la temperatura no es significativo.

2. **Emulsiones** (también llamadas *aceites solubles*), que son una mezcla de aceite, agua y aditivos, se utilizan por lo regular en operaciones de alta velocidad porque el incremento de temperatura es significativo. La presencia del agua hace que las emulsiones sean refrigerantes muy eficaces.
3. Los **semisintéticos** son emulsiones químicas que contienen un poco de aceite mineral diluido en agua y aditivos que reducen el tamaño de las partículas de aceite, haciéndolas más eficaces.
4. Los **sintéticos** son productos químicos con aditivos, diluidos en agua y sin aceite.

Debido a la compleja interacción del fluido de corte, los materiales de la pieza de trabajo, la temperatura, el tiempo y las variables del proceso de corte, no se puede generalizar la aplicación de fluidos. En los capítulos 23 y 24 se dan recomendaciones sobre fluidos de corte para operaciones específicas de maquinado, recomendaciones que también hacen muchos proveedores de fluidos para el trabajo de los metales.

Métodos de aplicación de los fluidos de corte. Existen cuatro métodos básicos para aplicar los fluidos de corte en el maquinado:

1. **Inundación o enfriamiento por inundación.** Éste es el método más común (se muestra en la fig. 22.12), en el cual se indican buenas y malas prácticas de inundación. Los gastos comúnmente varían de 10 L/min (3 gal/min) para herramientas de un solo punto a 225 L/min (60 gal/min) para cortadores con dientes múltiples, como en el fresado. En algunas operaciones, como el taladrado y el fresado, se utilizan presiones del fluido de 700 a 14,000 kPa (100 a 2000 psi) a fin de retirar las virutas producidas para evitar que interfieran en la operación.
2. **Niebla o enfriamiento por niebla.** Este tipo de enfriamiento suministra fluido a las áreas inaccesibles, de modo semejante al uso de una lata de aerosol, y proporciona una mejor visibilidad de la pieza de trabajo que se está maquinando (si se compara con el enfriamiento por inundación). Es eficaz con fluidos con base de agua a presiones de aire de 70 a 600 kPa (10 a 80 psi). Sin embargo, tiene una capacidad de

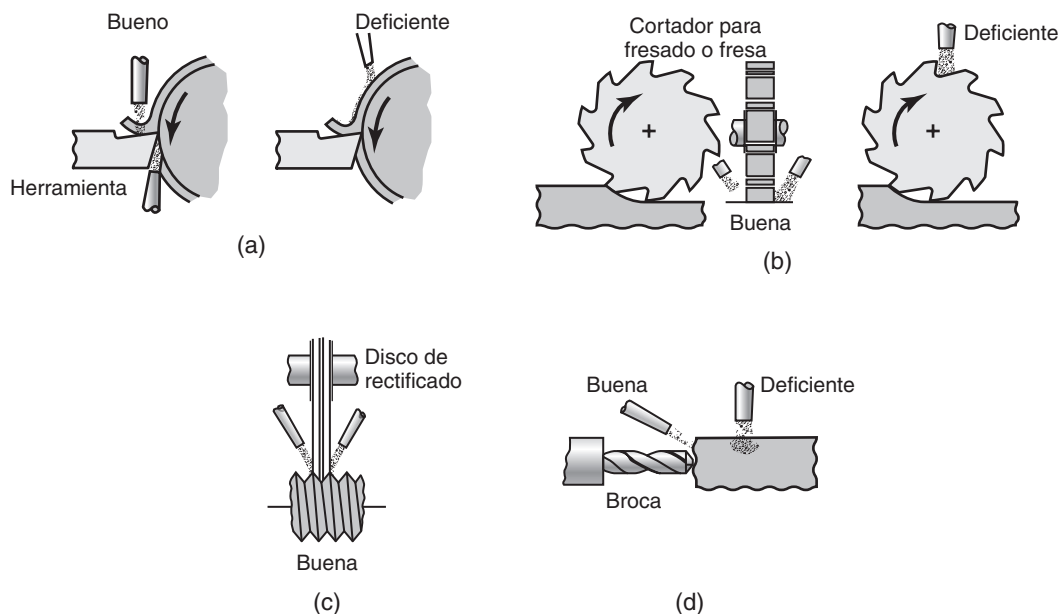


FIGURA 22.12 Esquema de métodos apropiados para la aplicación de fluidos de corte (inundación) en diversas operaciones de maquinado: (a) torneado; (b) fresado; (c) rectificado de roscas, y (d) taladrado.

enfriamiento limitada. La aplicación de la niebla requiere ventilación para evitar que el operador y otras personas cercanas inhalen partículas presentes en el fluido.

3. **Sistemas de alta presión.** Con la velocidad y potencia crecientes de las modernas máquinas herramienta controladas por computadora, la generación de calor se ha convertido en un factor importante. Es muy efectivo el uso de sistemas de enfriamiento refrigerados a alta presión para aumentar la velocidad de disipación de calor de la zona de corte. También se usan presiones elevadas para entregar el fluido de corte mediante boquillas especialmente diseñadas que dirigen un poderoso chorro de fluido a la zona, en particular dentro de la cara de relevo o de claro de la herramienta (ver fig. 21.3). Las presiones empleadas, que por lo general se encuentran en el intervalo de 5.5. a 35 MPa (800 a 5000 psi), actúan como rompevirutas en situaciones en las que las virutas producidas podrían ser largas y continuas, interfiriendo en la operación de corte. Para evitar daños a la superficie de la pieza de trabajo por el impacto de cualquier partícula presente en el chorro de alta presión, el tamaño de los contaminantes en el refrigerante no debe exceder las 20 μm (800 μpulg). El filtrado apropiado y continuo del fluido también es fundamental para mantener la calidad.
4. **Mediante el sistema de la herramienta de corte.** Se ha puntualizado la severidad de diversas operaciones de maquinado respecto de las dificultades de suministrar fluidos dentro de la zona de corte y retirando las virutas. Para una aplicación más eficaz, se pueden producir estrechos pasajes tanto en las herramientas de corte como en los portaherramientas para aplicar los fluidos de corte a alta presión. Hemos mostrado dos versiones de este método: (a) el taladrado de cañones, mostrado en la figura 23.24, con un pequeño orificio largo a través del cuerpo de la propia broca, y (b) barras de mandrinado, mostradas en la figura 23.17a, donde existe un largo orificio a través del zanco (portaherramientas) en el que se sujeta el inserto. Se han desarrollado diseños similares para herramientas de corte e insertos y para suministrar fluidos de corte a través del husillo de la máquina herramienta.

Efectos de los fluidos de corte. La selección de un fluido de corte también debe incluir factores como sus efectos sobre:

- El material de la pieza de trabajo y las máquinas herramienta.
- Consideraciones biológicas.
- El medio ambiente.

Al seleccionar un fluido de corte, se debe considerar si el componente maquinado se someterá a esfuerzos y a efectos adversos, lo que tal vez produzca agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Esto es importante, en particular para los fluidos de corte con aditivos de azufre y cloro. Por ejemplo, (a) no deben utilizarse fluidos que contengan azufre con las aleaciones de base níquel, y (b) no deben usarse fluidos que tengan cloro con el titanio. Los fluidos de corte también pueden afectar de manera adversa los componentes de la máquina herramienta, por lo que debe considerarse su compatibilidad con diversos materiales metálicos y no metálicos en la máquina herramienta. Las partes maquinadas tienen que limpiarse y lavarse para retirar cualquier residuo del fluido de corte, como se indica en la sección 34.16. Esta operación puede ser significativa en tiempo y costo. Por consiguiente, la tendencia es emplear fluidos de baja viscosidad, con base de agua, para facilitar la limpieza y el filtrado.

Es común que el operador de la máquina herramienta esté muy cerca de los fluidos de corte, por lo que los efectos de este contacto sobre su salud deben ser una preocupación primaria. La niebla, las emanaciones, el humo y los olores provenientes de los fluidos pueden provocar severas reacciones en la piel y problemas respiratorios, en particular si se usan fluidos con constituyentes químicos, como azufre, cloro, fósforo, hidrocarburos, biocidas y diversos aditivos. Se han obtenido grandes avances para asegurar que los flui-

dos de corte se utilicen con seguridad en las plantas manufactureras, teniendo en mente la reducción o eliminación de su uso mediante la adopción de las tendencias más recientes en las técnicas de maquinado en seco, o casi en seco (ver sección 21.12.1).

Los fluidos de corte (y otros fluidos para el trabajo de los metales que se utilizan en las operaciones de manufactura) pueden sufrir cambios químicos cuando se emplean repetidamente a lo largo del tiempo. Es posible que estos cambios se deban a los efectos ambientales o a la contaminación de diversas fuentes, incluyendo las virutas metálicas y las partículas finas producidas durante el maquinado, así como a las trampas de aceite (provenientes de fugas en los sistemas hidráulicos, aceites de los miembros deslizantes de las máquinas y sistemas lubricantes de las máquinas herramienta). Estos cambios comprenden el crecimiento de microbios (bacterias, moho y levadura), sobre todo en presencia de agua, convirtiéndose en un riesgo ambiental y afectando de manera adversa las características y la eficacia de los fluidos de corte.

Existen varias técnicas para clarificar los fluidos de corte utilizados, como el asentado, desnatado, centrifugado y filtrado. El reciclamiento comprende el tratamiento de los fluidos con diversos aditivos, agentes, biocidas y desodorizantes, así como el tratamiento de agua (para los fluidos con base de agua). Las prácticas de disposición de estos fluidos deben cumplir las leyes y reglamentos federales, estatales y locales.

22.12.1 Maquinado casi seco y en seco

Por razones económicas y ambientales, desde mediados de la década de 1990 hay una tendencia mundial a minimizar o eliminar el uso de los fluidos para el trabajo de los metales, tendencia que ha llevado a la práctica del *maquinado casi seco* (NDM, por sus siglas en inglés), con beneficios importantes como:

- Alivio del impacto ambiental causado por el uso de fluidos de corte, mejorando la calidad del aire en las plantas de manufactura y reduciendo los riesgos para la salud.
- Reducción del costo de las operaciones de maquinado, incluyendo el costo de mantenimiento, reciclado y disposición de los fluidos de corte.
- Mejoría adicional de la calidad superficial.

La importancia de este enfoque se evidencia al observar que, sólo en Estados Unidos, cada año se consumen millones de galones de fluidos para el trabajo de los metales. Además, se estima que dichos fluidos constituyen de 7% a 17% de los costos totales de maquinado.

El principio detrás del corte casi seco es la aplicación de una fina niebla de una mezcla de aire y fluido que contiene una cantidad muy pequeña de fluido de corte, incluyendo aceite vegetal. La mezcla se suministra a la zona de corte a través del husillo de la máquina herramienta, comúnmente por una boquilla de 1 mm de diámetro y a una presión de 600 kPa (85 psi). Se utiliza a un promedio de 1 a 100 cc/hr, que es (cuando mucho) un diezmilésimo de los utilizados en el enfriamiento por inundación. En consecuencia, al proceso también se le conoce como *lubricación con cantidad mínima* (MQL, por sus siglas en inglés).

El *maquinado en seco* también es una alternativa viable. Con importantes avances en las herramientas de corte, se ha demostrado que es eficaz en diversas operaciones de maquinado (particularmente torneado, fresado y corte de engranes) en aceros, aceros aleados y hierros fundidos, aunque no para las aleaciones de aluminio.

Una de las funciones del lubricante en el corte de metales consiste en retirar las virutas de la zona de corte. Esto parece ser problemático en el maquinado en seco. Sin embargo, se han creado diseños de herramientas que permiten aplicar aire presurizado, con frecuencia a través del zanco de la herramienta. El aire comprimido no cumple ningún propósito de lubricación, sólo provee un enfriamiento limitado, pero es muy eficaz para retirar las virutas de la interfaz de corte.

Maquinado criogénico. Los más recientes desarrollos en el maquinado incluyen el uso de gases criogénicos, como *nitrógeno* y *bióxido de carbono*, como refrigerantes en el maquinado. Con boquillas de diámetro pequeño y a una temperatura de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-320\text{ }^{\circ}\text{F}$), el nitrógeno líquido se inyecta en la zona de corte. Debido a la reducción de temperatura, se mantiene la dureza de la herramienta y se refuerza su vida útil, permitiendo así mayores velocidades de corte. Asimismo, las virutas son más frágiles, de ahí que se aumente la maquinabilidad, y el nitrógeno simplemente se evapora, por lo que no existe impacto ambiental adverso.

RESUMEN

- A lo largo del último siglo se ha desarrollado una amplia variedad de materiales para herramientas de corte, y los más utilizados han sido los aceros de alta velocidad, los carburos, los cerámicos, el nitruro de boro cúbico y el diamante. Los materiales para herramientas tienen una vasta gama de propiedades mecánicas y físicas, como dureza en caliente, tenacidad, estabilidad química, neutralidad y resistencia al astillado y el desgaste.
- Se han desarrollado diversos recubrimientos para herramientas con mejoras importantes en la vida útil de las mismas, el acabado superficial y la economía de las operaciones de maquinado. Los materiales de recubrimiento comunes son el nitruro de titanio, el carburo de titanio, el carbonitruro de titanio y el óxido de aluminio; los recubrimientos de diamante también han ganado aceptación. Se tiende hacia los recubrimientos de fases múltiples para mejorar aún más el desempeño.
- La selección de los materiales apropiados para las herramientas depende no sólo del material a maquinar, sino también de los parámetros del proceso y de las características de la máquina herramienta.
- Los fluidos de corte son importantes en las operaciones de maquinado porque reducen la fricción, el desgaste, las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia. En general, las operaciones de corte más lentas y las que se realizan con altas presiones de la herramienta de corte requieren un fluido con buenas características de lubricación. En las operaciones de alta velocidad, donde la elevación de la temperatura puede ser significativa, se necesitan fluidos con buena capacidad de enfriamiento y alguna lubricidad. En la selección de los fluidos de corte deben considerarse sus posibles efectos adversos sobre las partes maquinadas, las máquinas herramientas y sus componentes, el personal y el ambiente.

TÉRMINOS CLAVE

Aceros de alta velocidad	Costos de herramientas	Maquinado en seco
Aleaciones de cobalto fundido	Diamante policristalino	Nanocristalino
Carburo de titanio	Estabilidad química	Niebla
Carburo de tungsteno	Estelita	Nitruro de boro cúbico
Carburos	Fluidos de corte	Nitruro de boro cúbico policristalino
Carburos micrograno	Herramientas de diamante	Nitruro de titanio
Carburos no recubiertos	Herramientas recubiertas	Reacondicionamiento de herramientas
Cerámicos	Herramientas reforzadas con triquitas	Recubrimientos de diamante
Cerámicos con base de alúmina	Insertos	Recubrimientos de fases múltiples
Cerámicos con base de nitruro de silicio	Inundación	Refrigerantes
Cermets	Lubricantes	Resistencia al desgaste
Cortes de acabado	Maquinado casi seco	Rompevirutas
Cortes de desbaste	Maquinado criogénico	Sialón
		Tenacidad

BIBLIOGRAFÍA

- ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
- ASM Handbook, Vol. 3: *Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special Purpose Metals*, ASM International, 1980.
- ASM Specialty Handbook: *Tool Materials*, ASM International, 1995.
- Byers, J. P. (ed.), *Metalworking Fluids*, Marcel Dekker, 1994.
- Kalpakjian, S. (ed.), *Tool and Die Failures: Source Book*, ASM International, 1982.
- Komanduri, R., *Tool Materials*, en *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4a. ed., Vol. 24, 1997.
- Machinery's Handbook*, Industrial Press, revisado periódicamente.
- Machining Data Handbook*, 3a. ed., 2 vols., Machinability Data Center, 1980.
- Nachtman, E. S. y Kalpakjian, S., *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations*, Marcel Dekker, 1985.
- Roberts, G. A., Krauss, G. y Kennedy, R., *Tool Steels*, 5a. ed., ASM International, 1997.
- Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles*, 2a. ed., Oxford, 2005.
- Schey, J. A., *Tribology in Metalworking-Friction: Wear and Lubrication*, ASM International, 1983.
- Sluhan, C. (ed.), *Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application*, Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- Stephenson, D. A. y Agapiou, J. S., *Metal Cutting Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1996.
- Trent, E. M. y Wright, P. K., *Metal Cutting*, 4a. ed., Butterworth-Heinemann, 1999.
- Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., Vol. 1: *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 1983.

PREGUNTAS DE REPASO

- 22.1 ¿Cuáles son las propiedades importantes requeridas en los materiales para herramientas de corte?
- 22.2 ¿Cuáles son las diferencias en composición y propiedades entre las herramientas de acero al carbono y de acero de alta velocidad?
- 22.3 ¿Cuál es la composición de una herramienta característica de carburo?
- 22.4 ¿Por qué se desarrollaron los insertos para herramientas de corte?
- 22.5 ¿Por qué se recubren las herramientas? ¿Cuáles son los materiales comunes para recubrimiento? ¿Qué es un recubrimiento de fases múltiples? ¿Cuáles son sus ventajas?
- 22.6 Explique las aplicaciones y limitaciones de las herramientas a base de cerámicos.
- 22.7 ¿Cuál es la composición del sialón?
- 22.8 ¿Cómo se reacondicionan las herramientas de corte?
- 22.9 Liste las funciones principales de los fluidos de corte.
- 22.10 Explique cómo penetran los fluidos de corte en la zona de corte.
- 22.11 Liste los métodos mediante los cuales se aplican los fluidos de corte en las operaciones de maquinado.
- 22.12 Describa las ventajas y limitaciones de las herramientas de diamante (a) monocristalino, y (b) policristalino.
- 22.13 ¿Cuál es el material más duro que se conoce después del diamante?
- 22.14 ¿Qué es un cermet? ¿Cuáles son sus ventajas?
- 22.15 Explique la diferencia entre la serie M y la serie T de los aceros de alta velocidad.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 22.16 Explique por qué se han desarrollado tantos tipos de materiales para herramientas de corte a lo largo de los años. ¿Por qué aún siguen desarrollándose?
- 22.17 ¿Qué propiedades de los materiales para herramientas son adecuadas para las operaciones de corte interrumpido? ¿Por qué?
- 22.18 Indique las razones para recubrir herramientas de corte con múltiples capas de diferentes materiales.
- 22.19 Liste los elementos de aleación utilizados en los aceros de alta velocidad. Explique por qué son tan eficaces en las herramientas de corte.
- 22.20 Como se indicó en la sección 22.1, los materiales para herramientas de corte pueden tener propiedades en conflicto con las operaciones de maquinado. Describa sus observaciones respecto de esta materia.
- 22.21 Comente los propósitos de los chaflanes en los insertos y sus características de diseño.
- 22.22 Explique el impacto económico de la tendencia mostrada en la figura 22.6.
- 22.23 ¿Por qué la temperatura tiene un efecto tan importante en la vida útil de las herramientas?

22.24 Las herramientas de corte de cerámicos y cermets tienen ciertas ventajas sobre las herramientas de carburos. Entonces, ¿por qué no las han reemplazado totalmente?

22.25 ¿Pueden tener efectos adversos los fluidos de corte? De ser así, ¿cuáles son?

22.26 Describa las tendencias que observó en la tabla 22.2.

22.27 ¿Por qué son importantes la estabilidad química y la neutralidad en las herramientas de corte?

22.28 ¿Cómo haría para medir la efectividad de los fluidos de corte? Explique cualquier dificultad que pudiera encontrar.

22.29 Los recubrimientos de nitruro de titanio en las herramientas reducen el coeficiente de fricción en la interfaz herramienta-viruta. ¿Qué importancia tiene esto?

22.30 Describa las condiciones necesarias para el uso óptimo de las capacidades de las herramientas de corte de diamante y de nitruro de boro cúbico.

22.31 Liste y comente las ventajas de recubrir las herramientas de acero de alta velocidad.

22.32 Explique los límites de aplicación cuando se comparan las herramientas de corte de carburo de tungsteno con las de carburo de titanio.

22.33 En general, se prefieren los ángulos negativos de ataque para las herramientas a base de cerámicos, de diamante y de nitruro de boro cúbico. ¿Por qué?

22.34 ¿Cree que existe relación entre el costo de una herramienta de corte y su resistencia en caliente? Explique su respuesta.

22.35 Realice una investigación en la bibliografía técnica y dé algunos valores característicos de las velocidades de corte para las herramientas de acero de alta velocidad y para varios materiales de la pieza de trabajo.

22.36 En la tabla 22.1, las últimas dos propiedades listadas pueden ser importantes para la vida útil de la herramienta de corte. ¿Por qué?

22.37 Se ha indicado que los recubrimientos de nitruro de titanio permiten que las velocidades de corte y los avances sean mayores que con herramientas no recubiertas. Investigue en la bibliografía técnica y elabore una tabla que muestre el incremento porcentual de las velocidades y avances que podrían obtenerse al recubrir las herramientas.

22.38 Notará en la figura 22.1 que todos los materiales para herramientas tienen una amplia variedad de durezas para una temperatura particular, especialmente los carburos. Describa los factores que sean responsables de esta gama.

22.39 Liste y explique los factores que deben considerarse en la decisión de reacondicionar, reciclar o desechar una herramienta de corte.

22.40 En relación con la tabla 22.1, establezca qué materiales para herramientas serían adecuados para las operaciones de corte interrumpido. Explique su respuesta.

22.41 ¿Cuál de las propiedades indicadas en la tabla 22.1 es, según su opinión, la menos importante en las herramientas de corte? Explique su respuesta.

22.42 Si el objetivo de una broca es el trabajo en madera, ¿con qué material es más probable que se fabrique? (*Sugerencia:* En el trabajo en madera, es raro que las temperaturas se eleven a 400 °C). ¿Existe alguna razón por la cual una broca como la indicada no pueda utilizarse para taladrar algunos orificios en un metal? Explique su respuesta.

22.43 ¿Cuáles son las consecuencias de un recubrimiento que tenga un coeficiente de dilatación térmica diferente al del sustrato?

22.44 Discuta las ventajas y limitaciones relativas al maquinado casi seco. Considere todos los aspectos técnicos y económicos.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

22.45 Revise el contenido de la tabla 22.1. Grafique varias curvas para mostrar relaciones entre intervalos, si existe alguna, entre parámetros como la dureza, la resistencia a la ruptura transversal y la resistencia al impacto. Comente sus observaciones.

22.46 Obtenga datos sobre las propiedades térmicas de diferentes fluidos de corte. Identifique los que sean refrige-

rantes eficaces (como los fluidos con base de agua) y los que sean buenos lubricantes (como los aceites).

22.47 En la primera columna de la tabla 22.2 se muestran siete propiedades importantes de las herramientas de corte. Agregue datos numéricos para cada propiedad de cada uno de los materiales indicados en la tabla. Describa sus observaciones, incluyendo cualquier dato que se traslape.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

22.48 Describa con detalle lo que piensa en relación con los factores técnicos y económicos comprendidos en la selección de materiales para herramientas.

22.49 Una de las principales preocupaciones con los refrigerantes es la degradación ocasionada por el ataque biológico de las bacterias. A menudo se les agregan biocidas químicos para prolongar su vida útil, pero estos biocidas complican la disposición de los refrigerantes. Investigue en la bibliografía respecto de los últimos desarrollos sobre el uso de biocidas benignos con el medio ambiente en los fluidos de corte.

22.50 Póngase en contacto con varios proveedores de herramientas de corte, o busque en sus sitios de Internet. Liste los costos de herramientas de corte comunes para diversos tamaños, formas y características.

22.51 Como puede ver, en la actualidad existen varios tipos de materiales para herramientas de corte para las ope-

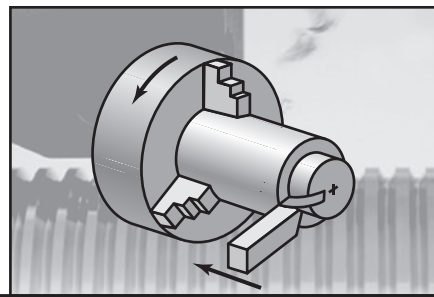
raciones de maquinado. Sin embargo, aún se realizan muchas investigaciones y desarrollos destinados a estos materiales. Liste las razones por las que piensa que se efectúan dichos estudios. Comente cada una de esas razones, con una aplicación o ejemplo específico.

22.52 Suponga que está a cargo de un laboratorio para el desarrollo de fluidos de corte nuevos o mejorados. Con base en los temas presentados en este capítulo y en el anterior, sugiera una lista de temas para que investiguen los miembros de su equipo. Explique por qué eligió esos temas.

22.53 Realice una investigación en la bibliografía técnica y describa las tendencias en los nuevos materiales para herramientas de corte y recubrimientos. ¿Cuáles se están poniendo a disposición de la industria?

CAPÍTULO 23

Procesos de maquinado utilizados para producir formas redondas: torneado y producción de orificios



- 23.1 Introducción 674
- 23.2 Proceso de torneado 676
- 23.3 Tornos y operaciones en el torno 686
- 23.4 Mandrinado y máquinas para mandrinar 703
- 23.5 Taladrado, brocas y taladros 704
- 23.6 Rimado y rimas 714
- 23.7 Machueleado y machuelos 716

EJEMPLOS:

- 23.1 Velocidad de remoción de material y fuerza de corte en el torneado 685
- 23.2 Partes típicas fabricadas en máquinas herramienta de torneado CNC 693
- 23.3 Maquinado de formas complejas 694
- 23.4 Velocidad de remoción de material y torque en el taladrado 710

ESTUDIO DE CASO:

- 23.1 Retenedor de tornillo para huesos 717

Con los dos capítulos anteriores como antecedente, en éste se describen los procesos de maquinado que tienen la capacidad de generar formas redondas, las cuales pueden ser formas u orificios redondos en lo exterior (o simétricos respecto de un eje). Se hace énfasis en:

- Las características de los tornos y las operaciones de torneado.
- Los procesos de remoción externa e interna de material.
- El tipo de herramientas de corte utilizadas en estas operaciones.

Partes comunes fabricadas mediante este método: componentes de máquinas, monobloques y cabezas para motores, partes con formas complejas y tolerancias cerradas, así como partes roscadas externa e internamente.

Procesos alternativos: fundición de precisión, metalurgia de polvos, moldeo por inyección de polvos, maquinado abrasivo y laminación de roscas.

23.1 | Introducción

En este capítulo se describen los procesos de maquinado con la capacidad de producir partes que básicamente tienen forma redonda. Los productos comunes fabricados mediante este método pueden ser tan pequeños como los tornillos miniatura para las bisagras de los armazones de anteojos, o tan grandes como las flechas de las turbinas para plantas de energía hidroeléctrica, los rodillos de los molinos de laminación, los cilindros y los barriles para cañones.

Uno de los procesos de maquinado más básicos es el *torneado*, en el cual la parte rota mientras se está maquinando. Por lo común, el material inicial es una pieza de trabajo que se ha fabricado mediante otros procesos, como fundición, forjado, extrusión, estirado o metalurgia de polvos, según se describe en las partes II y III. Los procesos de torneado, que suelen efectuarse en un *torno* o *máquina herramienta* similar, se muestran en la figura 23.1 y en la tabla 23.1. Estas máquinas son muy versátiles y tienen la capacidad de producir una amplia variedad de formas, como se indica a continuación:

- **Torneado:** produce piezas de trabajo rectas, cónicas, curvadas o ranuradas (fig. 23.1a a la d), como ejes o flechas, husillos y pasadores.

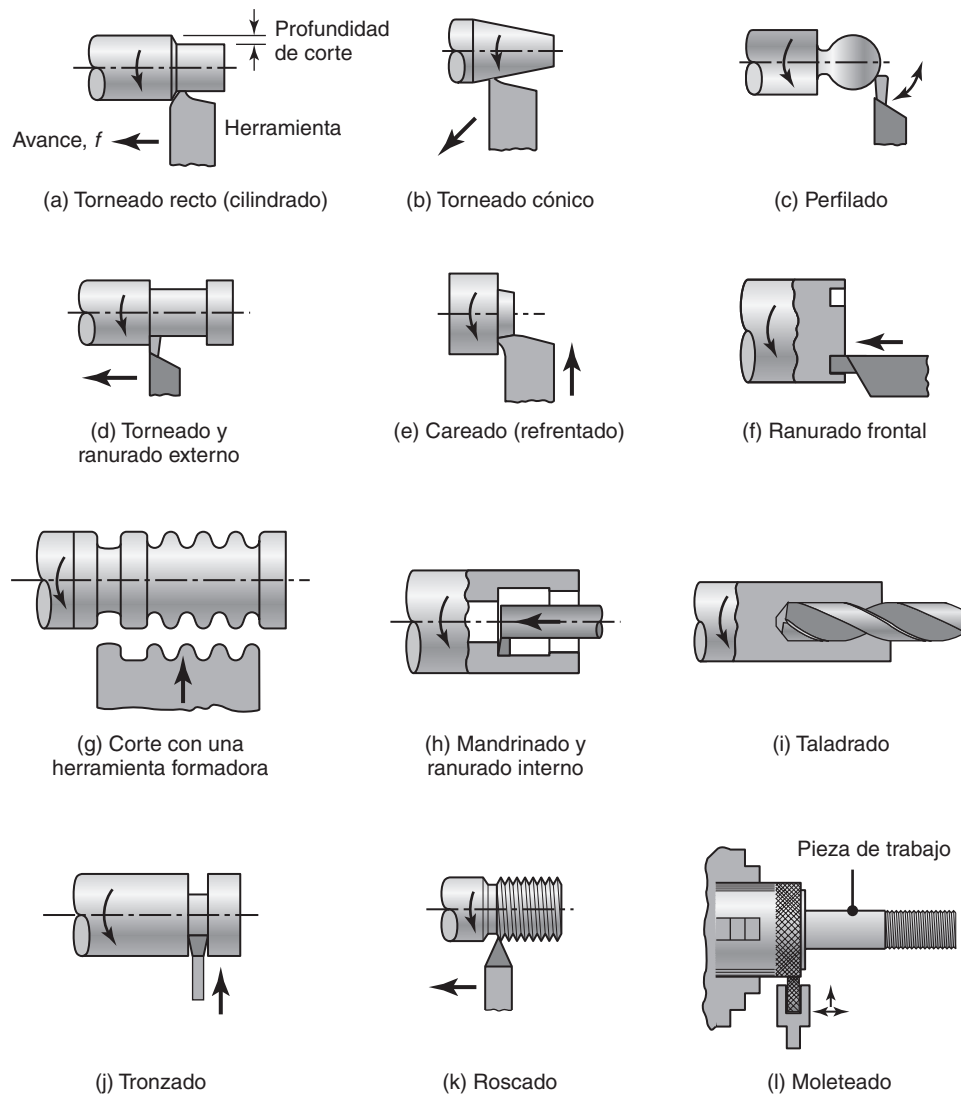


FIGURA 23.1 Diversas operaciones de corte que se pueden realizar en un torno. Obsérvese que todas las partes son circulares, propiedad a la que se conoce como simetría respecto de un eje. Las herramientas utilizadas, su forma y los parámetros de procesamiento, se describen a lo largo de este capítulo.

- **Careado (refrentado):** produce una superficie plana al final de la parte, perpendicular a su eje (fig. 23.1e), útil para partes que se ensamblan con otros componentes. El *ranurado frontal* crea ranuras para aplicaciones como los asientos para sellos en forma de anillos en O (*O-rings*) (fig. 23.1f).
- **Corte con herramientas de forma o formadora** (fig. 23.1g): produce diversas formas simétricas respecto del eje para efectos funcionales o estéticos.
- **Mandrinado o perforado:** agranda un orificio o cavidad cilíndrica fabricada mediante un proceso previo o produce ranuras circulares internas (fig. 23.1h).
- **Taladrado:** produce un orificio (fig. 23.1i), que después puede mandrinarse para mejorar su precisión dimensional y acabado superficial.

TABLA 23.1

Características generales de los procesos de maquinado y tolerancias dimensionales características		
Proceso	Características	Tolerancias dimensionales características, $\pm$ mm (pulgadas)
Torneado	Operaciones de torneado y careado (refrentado) en todos los tipos de materiales, utiliza herramientas de una sola punta o de forma, los tornos mecánicos requieren mano de obra experta, baja velocidad de producción (pero velocidad media a alta con tornos de torreta y máquinas automáticas) que requiere mano de obra menos experta.	Fino: 0.025–0.13 (0.001–0.005) Basto: 0.13 (0.005)
Mandrinado	Superficies o perfiles internos con características similares al torneado, es importante la rigidez de la barra para mandrinar para evitar traqueteo.	0.025 (0.001)
Taladrado	Orificios redondos de varios tamaños y profundidades, alta velocidad de producción, la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la ubicación de los orificios y la precisión especificada, requiere mandrinado y escariado para mejorar precisión.	0.075 (0.003)
Fresado	Gran variedad de formas que comprenden contornos, superficies planas y ranuras; versátil; velocidad de producción baja a media; requiere mano de obra calificada.	0.13–0.25 (0.005–0.01)
Planeado	Superficies planas grandes y perfiles de contornos rectos en piezas de trabajo largas, producción de bajas cantidades, la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la forma de la parte.	0.08–0.13 (0.003–0.005)
Cepillado de mesa fija	Superficies planas y perfiles de contornos rectos en piezas de trabajo relativamente pequeñas, producción de bajas cantidades, la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la forma de la parte.	0.05–0.13 (0.002–0.003)
Brochado	Superficies internas y externas, ranuras y contornos; buen acabado superficial; herramientas costosas; alta velocidad de producción; la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la forma de la parte.	0.025–0.15
Aserrado	Cortes rectos y de contornos en formas planas o estructurales; no adecuado para materiales duros, a menos que la sierra tenga dientes de carburo o estén recubiertos con diamante, baja velocidad de producción, por lo general se requiere mano de obra poco calificada.	0.8

- **Seccionado:** también conocido como **tronzado**, corta una pieza del extremo de una parte, como se hace en la producción de masas o piezas en bruto para su procesamiento adicional como productos discretos (fig. 23.1j).
- **Roscado:** produce roscas externas o internas (fig. 23.1k).
- **Moleteado:** produce rugosidad con una forma regular sobre las superficies cilíndricas, como en la fabricación de perillas (fig. 23.1l).

Por lo general, las operaciones de corte resumidas se realizan en un **torno** (fig. 23.2), para el que existen varios diseños, tamaños, capacidades y características controladas por computadora (como se ve en la sección 23.3 y el capítulo 25). En las figuras 21.2 y 23.3 se muestra cómo el torneado se efectúa a diversas (1) velocidades de rotación, N , de la pieza de trabajo sujeta en un husillo; (2) profundidades de corte, d , y (3) avances, f , dependiendo de los materiales de dicha pieza y de las herramientas de corte, el acabado superficial y la precisión dimensional requeridas, así como de las características de la máquina herramienta.

En este capítulo se describen los parámetros y las capacidades del proceso, las herramientas de corte y las características de las máquinas herramienta que se utilizan para producir varias partes con formas redondas. Por último, se presentan consideraciones de diseño para mejorar la productividad de cada grupo de procesos.

23.2 | Proceso de torneado

La mayoría de las operaciones de torneado comprenden el uso de herramientas de corte de un solo punto de corte, con la geometría de una típica herramienta de corte derecho

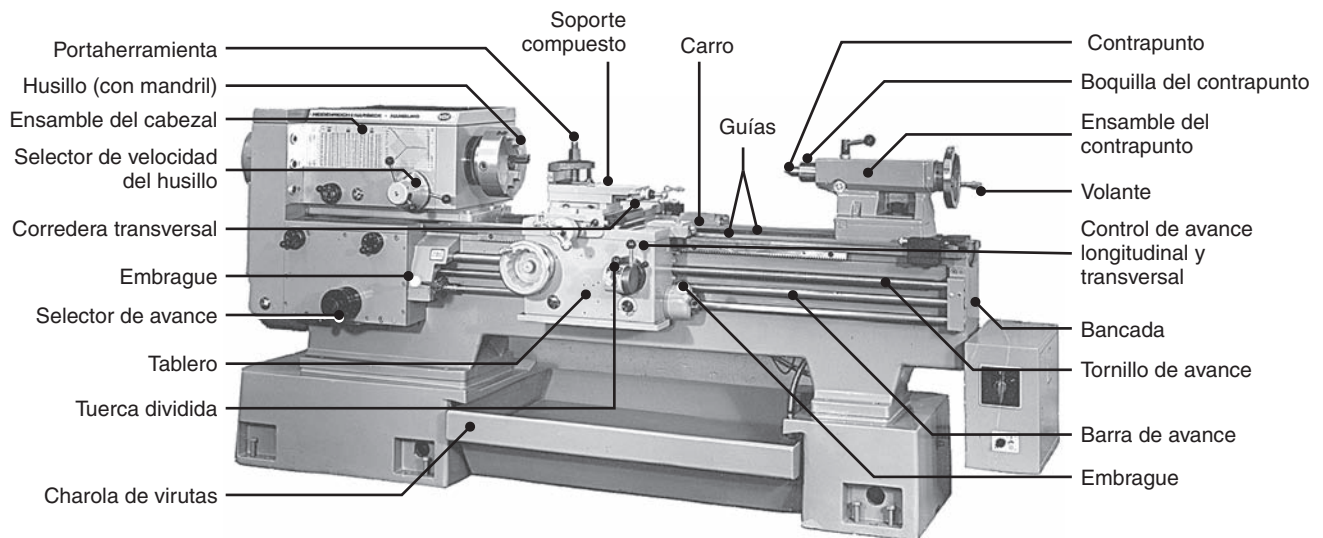


FIGURA 23.2 Vista general de un torno común que muestra varios componentes. *Fuente:* Cortesía de Heidenreich & Harbeck.

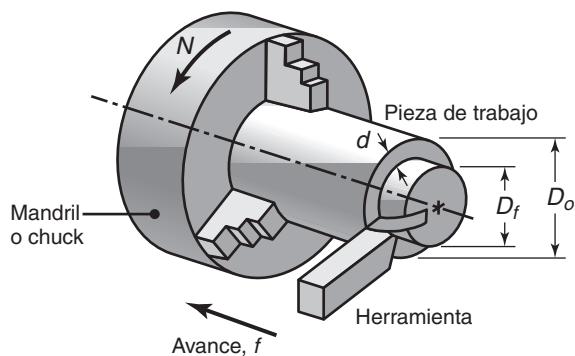


FIGURA 23.3 Esquema de la operación básica de torneado, que muestra la profundidad de corte (d), el avance (f) y la velocidad rotacional del husillo (N) en rev/min. La velocidad de corte es la velocidad superficial de la pieza de trabajo en la punta de la herramienta.

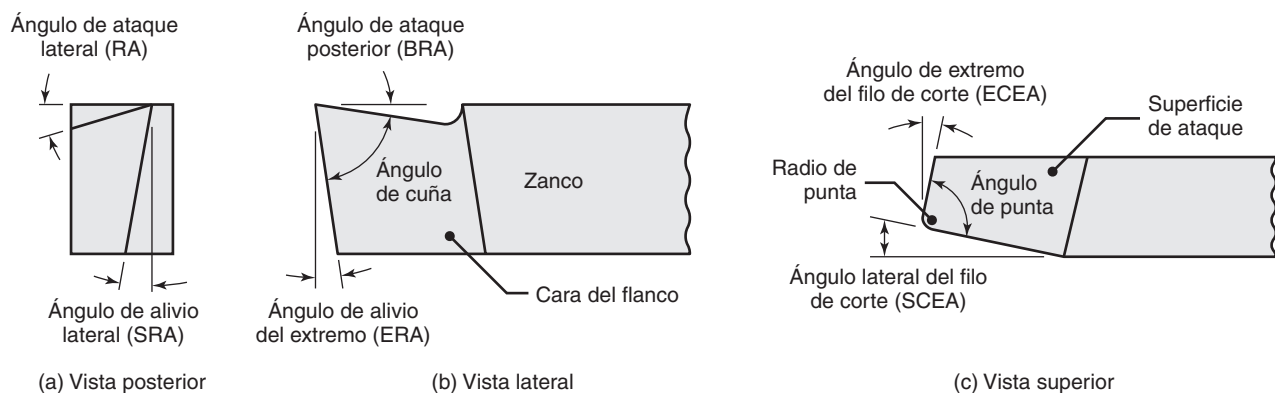


FIGURA 23.4 Designaciones de herramienta de corte derecho. El término *derecho* se refiere al avance de las herramientas de derecha a izquierda, como se muestra en la figura 23.3.

como se muestra en las figuras 21.10 y 23.4. Dichas herramientas se describen mediante una nomenclatura estandarizada. Cada grupo de materiales de la pieza de trabajo tiene un grupo óptimo de ángulos de herramienta, que se han desarrollado en gran medida a través de la experiencia (tabla 23.2).

TABLA 23.2

Recomendaciones generales de ángulos de herramientas en torneado										
Material	Acero de alta velocidad					Insertos de carburo				
	Ataque posterior	Ataque lateral	Alivio del extremo	Alivio lateral	Filo de corte lateral y de extremo	Ataque posterior	Ataque lateral	Alivio del extremo	Alivio lateral	Filo de corte lateral y de extremo
Aleaciones de aluminio y magnesio	20	15	12	10	5	0	5	5	5	15
Aleaciones de cobre	5	10	8	8	5	0	5	5	5	15
Aceros	10	12	5	5	15	-5	-5	5	5	15
Aceros inoxidables	5	8-10	5	5	15	-5-0	-5-5	5	5	15
Aleaciones para alta temperatura	0	10	5	5	15	5	0	5	5	45
Aleaciones refractarias	0	20	5	5	5	0	0	5	5	15
Aleaciones de titanio	0	5	5	5	15	-5	-5	5	5	5
Hierros fundidos	5	10	5	5	15	-5	-5	5	5	15
Termoplásticos	0	0	20-30	15-20	10	0	0	20-30	15-20	10
Termofijos	0	0	20-30	15-20	10	0	15	5	5	15

En el capítulo 21 se describieron los parámetros básicos de proceso que influyen en forma directa sobre los procesos de maquinado y la importancia de controlarlos para optimizar la productividad. En esta sección se indican los parámetros del proceso de torneado, como la geometría de las herramientas y la velocidad de remoción de material, y se informa sobre las prácticas recomendadas de corte, incluyendo los materiales de las herramientas de corte, el avance, la profundidad y la velocidad de corte, así como el uso de fluidos de corte.

Geometría de las herramientas. Los diversos ángulos en una herramienta de un solo punto de corte tienen funciones importantes en las operaciones de maquinado. Se miden en un sistema de coordenadas que consta de los tres ejes principales del zanco de la herramienta, como se puede ver en la figura 23.4. Sin embargo, obsérvese que estos ángulos pueden ser diferentes, respecto de la pieza de trabajo, después de instalar la herramienta en el portaherramientas.

- El **ángulo de ataque** es importante para controlar la dirección del flujo de las virutas y la resistencia de la punta de la herramienta. Los ángulos de ataque positivos mejoran la operación de corte, reduciendo las fuerzas y temperaturas; sin embargo, también producen un ángulo pequeño comprendido en la punta de la herramienta (como en las figs. 21.3 y 23.4) que puede hacer que ésta se astille y falle de manera prematura, dependiendo de la tenacidad de su material.
- El **ángulo de ataque lateral** es más importante que el **ángulo de ataque posterior**, aunque generalmente este último controla la dirección del flujo de las virutas. Para maquinar metales y utilizar insertos de carburo, por lo común estos ángulos van de -5° a 5° .
- El **ángulo de filo de corte** afecta la formación de virutas, la resistencia de la herramienta y las fuerzas de corte en varios grados. Por lo general, son de alrededor de 15° .
- El **ángulo de alivio** controla la interferencia y fricción en la interfaz de la herramienta y la pieza de trabajo. Si es demasiado grande, la punta de la herramienta se puede astillar; si es demasiado pequeño, el desgaste del flanco puede ser excesivo. Por lo general, los ángulos de alivio son de 5° .
- El **radio de punta** afecta el acabado superficial y la resistencia de la punta de la herramienta. Cuanto más pequeño sea este radio (herramienta filosa), el acabado superficial de la pieza de trabajo será más rugoso y la resistencia de la herramienta será inferior. Sin embargo, los radios de punta grandes pueden hacer que la herramienta *traquetea*, como se describe en la sección 25.4.

Velocidad de remoción de material. La *velocidad de remoción de material* (MRR, por sus siglas en inglés) en torneado es el volumen de material removido por unidad de tiempo, con unidades de mm^3/min o pulg^3/min . Respecto de las figuras 21.2 y 23.3, obsérvese que por cada revolución de la pieza de trabajo se remueve una capa de material en forma de anillo, que tiene un área transversal equivalente al producto de la distancia que la herramienta recorre en una revolución (avance, f) y la profundidad de corte, d . El volumen de este anillo es producto del área transversal (f)(d) y la circunferencia promedio del anillo, πD_{prom} , en la que:

$$D_{\text{prom}} = \frac{D_o + D_f}{2}$$

En el caso de cortes ligeros en piezas de trabajo de diámetro grande, el diámetro promedio se puede reemplazar con D_o .

La velocidad de rotación de la pieza de trabajo es N y la velocidad de remoción de material por revolución es $(\pi)(D_{\text{prom}})(d)(f)$. Puesto que existen N revoluciones por minuto, la velocidad de remoción es:

$$\text{MRR} = \pi D_{\text{prom}} d f N \quad (23.1a)$$

La precisión dimensional de esta ecuación se puede verificar sustituyendo las dimensiones en el lado derecho. Por ejemplo, $(\text{mm})(\text{mm})(\text{mm}/\text{rev})(\text{rev}/\text{min}) = \text{mm}^3/\text{min}$, que indica que la remoción de material es volumétrica. Nótese que la ecuación 23.1a también se puede escribir como:

$$\text{MRR} = d f V \quad (23.1b)$$

donde V es la velocidad de corte y MRR tiene la misma unidad de mm^3/min .

El tiempo de corte, t , para una pieza de trabajo de longitud l se puede calcular considerando que la herramienta avanza a una velocidad de $fN = (\text{mm}/\text{rev})(\text{rev}/\text{min}) = \text{mm}/\text{min}$. Como la distancia avanzada es l milímetros, el tiempo de corte es:

$$t = \frac{l}{fN} \quad (23.2)$$

El tiempo de corte no incluye el tiempo requerido para la *aproximación y retracción de la herramienta*. Dado que el tiempo invertido en los ciclos sin corte de una operación de maquinado es improductivo y perjudica la economía general, el tiempo empleado en aproximar y retirar las herramientas de la pieza de trabajo es un factor que debe considerarse. Las máquinas herramienta están diseñadas y construidas para minimizar este tiempo. Un método para lograrlo consiste en hacer avanzar con rapidez las herramientas durante los ciclos sin corte, seguidos de un movimiento más lento conforme la herramienta se adentra en la pieza de trabajo.

En la tabla 23.3 se resumen las ecuaciones anteriores y la terminología utilizada.

Fuerzas en torneado. En la figura 23.5 se muestran las tres fuerzas principales que actúan sobre una herramienta de corte, por lo cual es importante considerarlas tanto en el diseño de las máquinas herramienta como en la deflexión de las herramientas y las piezas de trabajo para las operaciones de maquinado de precisión. La máquina herramienta y sus componentes deben tener la capacidad de soportar estas fuerzas sin provocar deflexiones, vibraciones ni traqueteos significativos en toda la operación.

La **fuerza de corte** (F_c) actúa hacia abajo sobre la punta de la herramienta y, por lo tanto, tiende a desviar ésta hacia abajo y la pieza de trabajo hacia arriba. La fuerza de corte suministra la energía requerida para la operación de corte y se puede calcular mediante la información proporcionada en la tabla 21.2, a partir de la energía por unidad de volumen que se describe en la sección 21.3. El producto de la fuerza de corte y su radio desde el centro de la pieza de trabajo determina el *torque* en el husillo. El producto del torque y la velocidad del husillo determina la *potencia* requerida en la operación de torneado.

TABLA 23.3

Resumen de parámetros y fórmulas de torneado

N = Velocidad de giro de la pieza de trabajo, rpm

f = Avance, mm/rev o pulg/rev

v = Velocidad de avance, o velocidad lineal de la herramienta a lo largo de la pieza de trabajo, mm/min o pulg/min

$$= fN$$

V = Velocidad superficial (tangencial) de la pieza de trabajo, m/min o pies/min

$$= \pi D_o N \text{ (para velocidad máxima)}$$

$$= \pi D_{prom} N \text{ (para velocidad promedio)}$$

l = Longitud de corte, mm o pulgadas

D_o = Diámetro original de la pieza de trabajo, mm o pulgadas

D_f = Diámetro final de la pieza de trabajo, mm o pulgadas

D_{prom} = Diámetro promedio de la pieza de trabajo, mm o pulgadas

$$= (D_o + D_f)/2$$

d = Profundidad de corte, mm o pulgadas

$$= (D_o - D_f)/2$$

t = Tiempo de corte, s o min

$$= l/fN$$

MRR = mm³/min o pulg³/min

$$= \pi D_{prom} d f N$$

Torque = N • m o libras • pie

$$= F_c D_{prom}/2$$

Potencia = kW o hp

$$= (\text{Torque})(\omega), \text{ en la que } \omega = 2\pi N \text{ rad/min}$$

Nota: Las unidades provistas son las que se utilizan generalmente; sin embargo, en las fórmulas, deben usarse y verificarse las unidades apropiadas.

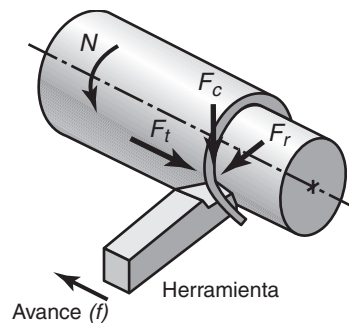


FIGURA 23.5 Fuerzas que actúan sobre una herramienta de corte en el torneado. F_c es la fuerza de corte, F_t es la fuerza de empuje o de avance (en la dirección del avance), y F_r es la fuerza radial que tiende a apartar la herramienta de la pieza de trabajo que se está maquinando.

La **fuerza de empuje** (F_t) actúa en la dirección longitudinal. También se le conoce como **fuerza de avance**, porque ocurre en la dirección de avance de la herramienta; esta fuerza tiende a empujar la herramienta hacia la derecha y a alejarla del plato. La **fuerza radial** (F_r) actúa en la dirección radial y tiende a alejar la herramienta de la pieza de trabajo. Debido a los muchos factores comprendidos en el proceso de corte, es difícil calcular las fuerzas F_t y F_r de manera directa; por lo general, si se desea, se determinan de manera experimental.

Cortes de desbaste y operaciones de acabado. El procedimiento usual en el maquinado consiste primero en efectuar uno o más *cortes de desbaste* a altas velocidades de avance y grandes profundidades de corte (y, por lo tanto, a altas velocidades de remoción de material), pero con poca consideración de la tolerancia dimensional y rugosidad de la superficie. Estos cortes van seguidos de *operaciones de acabado*, a un avance y profundidad de corte más bajos para producir un buen acabado superficial.

Materiales, avances y velocidades de corte de las herramientas. En el capítulo 22 se describieron las características generales de los materiales para las herramientas de corte. En la figura 23.6 se proporciona una amplia variedad de velocidades de corte y avances aplicables a dichos materiales, como guía general de las operaciones de torneado. En la tabla 23.4 se hacen recomendaciones específicas en cuanto a los parámetros del proceso de torneado para diversos materiales de piezas de trabajo y herramientas de corte.

Fluidos de corte. Muchos materiales metálicos y no metálicos se pueden maquinar sin fluidos de corte, pero en la mayoría de los casos la aplicación de un fluido mejora la operación de manera significativa. En la tabla 23.5 se dan recomendaciones generales sobre fluidos de corte apropiados para diversos materiales de piezas de trabajo. Sin embargo, existe una tendencia importante hacia el **maquinado casi seco** o **seco** con importantes beneficios, como se describe en la sección 22.12.1.

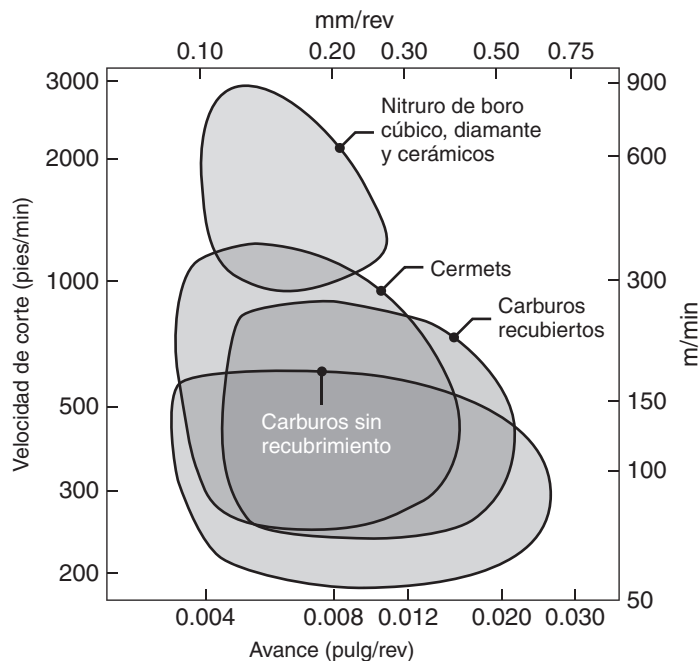


FIGURA 23.6 Velocidades y avances de corte aplicables a una variedad de materiales para herramientas.

TABLA 23.4

Recomendaciones generales para operaciones de torneado

Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Condiciones iniciales de propósito general			Intervalo para rectificado y acabado		
		Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
Aceros de bajo carbono y de libre maquinado	Carburo sin recubrimiento	1.5–6.3 (0.06–0.25)	0.35 (0.014)	90 (300)	0.5–7.6 (0.02–0.30)	0.15–1.1 (0.006–0.045)	60–135 (200–450)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	245–275 (800–900)	"	"	120–425 (400–1400)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	185–200 (600–650)	"	"	90–245 (300–800)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	105–150 (350–500)	"	"	60–230 (200–750)
	Cerámico de Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	395–440 (1300–1450)	"	"	365–550 (1200–1800)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	215–290 (700–950)	"	"	105–455 (350–1500)
Aceros de medio y alto carbono	Carburo sin recubrimiento	1.2–4.0 (0.05–0.20)	0.30 (0.012)	75 (250)	2.5–7.6 (0.10–0.30)	0.15–0.75 (0.006–0.03)	45–120 (150–400)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	185–230 (600–750)	"	"	120–410 (400–1350)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	120–150 (400–500)	"	"	75–215 (250–700)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90–200 (300–650)	"	"	45–215 (150–700)
	Cerámico de Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	335 (1100)	"	"	245–455 (800–1500)
	Cermet	"	0.25 (0.010)	170–245 (550–800)	"	"	105–305 (350–1000)
Fundición de hierro gris	Carburo sin recubrimiento	1.25–6.3 (0.05–0.25)	0.32 (0.013)	90 (300)	0.4–12.7 (0.015–0.5)	0.1–0.75 (0.004–0.03)	75–185 (250–600)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	200 (650)	"	"	120–365 (400–1200)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90–135 (300–450)	"	"	60–215 (200–700)
	Cerámico de Al ₂ O ₃	"	0.25 (0.010)	455–490 (1500–1600)	"	"	365–855 (1200–2800)
	Cerámico de SiN	"	0.32 (0.013)	730 (2400)	"	"	200–990 (650–3250)

Acero inoxidable, austenítico	Carburo con triple recubrimiento	1.5-4.4 (0.06-0.175)	0.35 (0.014)	150 (500)	0.5-12.7 (0.02-0.5)	0.08-0.75 (0.003-0.03)	75-230 (250-750)
	Carburo con recubri- miento de TiN Cermat	"	"	85-160 (275-525)	"	"	55-200 (175-650)
Aleaciones para alta temperatura, base níquel			0.30 (0.012)	185-215 (600-700)	"	"	105-290 (350-950)
	Carburo sin recubrimiento	2.5 (0.10)	0.15 (0.006)	25-45 (75-150)	0.25-6.3 (0.01-0.25)	0.1-0.3 (0.004-0.012)	15-30 (50-100)
	Carburo con recubri- miento de cerámico	"	"	45 (150)	"	"	20-60 (65-200)
	Carburo con recu- brimiento de TiN	"	"	30-55 (95-175)	"	"	20-85 (60-275)
	Cerámico de Al ₂ O ₃	"	"	260 (850)	"	"	185-395 (600-1300)
Aleaciones de titanio	Cerámico de SiN	"	"	215 (700)	"	"	90-215 (300-700)
	cBN policristalino	"	"	150 (500)	"	"	120-185 (400-600)
	Carburo sin recu- brimiento	1.0-3.8 (0.04-0.15)	0.15 (0.006)	35-60 (120-200)	0.25-6.3 (0.01-0.25)	0.1-0.4 (0.004-0.015)	10-75 (30-250)
Aleaciones de aluminio Libre maquinado	Carburo con recu- brimiento de TiN	"	"	30-60 (100-200)	"	"	10-100 (30-325)
	Carburo sin recubrimiento	1.5-5.0 (0.06-0.20)	0.45 (0.018)	490 (1600)	0.25-8.8 (0.01-0.35)	0.08-0.62 (0.003-0.025)	200-670 (650-2000)
	Carburo con recu- brimiento de TiN Cermat	"	"	550 (1800)	"	"	60-915 (200-3000)
	Diamante policristalino	"	"	490 (1600)	"	"	215-795 (700-2600)
	Diamante policristalino	"	"	760 (2500)	"	"	305-3050 (1000-10,000)
Alto silicio		"	"	530 (1700)	"	"	365-915 (1200-3000)
							(Continúa)

TABLA 23.4 (Continuación)

Recomendaciones generales para operaciones de torneado							
Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Condiciones iniciales de propósito general			Intervalo para rectificado y acabado		
		Profundidad de corte, mm (pulgadas)	Avance, mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
Aleaciones de cobre	Carburo sin recubrimiento	1.5–5.0 (0.06–0.20)	0.25 (0.010)	260 (850)	0.4–7.51 (0.015–0.3)	0.15–0.75 (0.006–0.03)	105–535 (350–1750)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	365 (1200)	"	"	215–670 (700–2200)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	215 (700)	"	"	90–305 (300–1000)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90–275 (300–900)	"	"	45–455 (150–1500)
	Cermet	"	"	245–425 (800–1400)	"	"	200–610 (650–2000)
Aleaciones de tungsteno	Diamante policristalino	"	"	520 (1700)	"	"	275–915 (900–3000)
	Carburo sin recubrimiento	2.5 (0.10)	0.2 (0.008)	75 (250)	0.25–5.0 (0.01–0.2)	0.12–0.45 (0.005–0.018)	55–120 (175–400)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	85 (275)	"	"	60–150 (200–500)
	Carburo con recubrimiento de TiN	1.2 (0.05)	0.12 (0.005)	170 (550)	0.12–5.0 (0.005–0.20)	0.08–0.35 (0.003–0.015)	90–230 (300–750)
Termoplásticos y termofijos	Diamante policristalino	"	"	395 (1300)	"	"	150–730 (500–2400)
	Carburo con recubrimiento de TiN	1.9 (0.075)	0.2 (0.008)	200 (650)	0.12–6.3 (0.005–0.25)	0.12–1.5 (0.005–0.06)	105–290 (350–950)
Compósitos, grafito reforzado	Diamante policristalino	"	"	760 (2500)	"	"	550–1310 (1800–4300)

Fuente: Con base en datos de Kennametal, Inc.

Nota: Las velocidades de corte para herramientas de acero de alta velocidad son aproximadamente la mitad de las de los carburos sin recubrimiento.

TABLA 23.5

Recomendaciones generales de fluidos de corte para maquinado (ver también capítulo 33)	
Material	Tipo de fluido
Aluminio	D, MO, E, MO + FO, CSN
Berilio	MC, E, CSN
Cobre	D, E, CSN, MO + FO
Magnesio	D, MO, MO + FO
Níquel	MC, E, CSN
Metales refractarios	MC, E, EP
Aceros	
al carbono y baja	D, MO, E, CSN, EP
aleación inoxidable	D, MO, E, CSN
Titanio	CSN, EP, MO
Zinc	C, MC, E, CSN
Zirconio	D, E, CSN

Nota: CSN = químicos y sintéticos; D = seco; E = emulsión; EP = presión extrema; FO = aceite grasoso y MO = aceite mineral.

EJEMPLO 23.1 Velocidad de remoción de material y fuerza de corte en el torneado

Una barra de acero inoxidable 304 de 6 pulgadas de largo y 0.5 pulgada de diámetro se está reduciendo a 0.480 pulgada de diámetro mediante torneado en un torno. El husillo gira a $N = 400$ rpm y la herramienta avanza a una velocidad axial o de avance de 8 pulg/min. Calcule la velocidad de corte, la velocidad de remoción de material, la potencia disipada y la fuerza de corte.

Solución La velocidad de corte es la velocidad tangencial de la pieza de trabajo. La velocidad máxima de corte se localiza en el diámetro exterior (D_o) y se obtiene a partir de la expresión

$$V = \pi D_o N$$

Por lo que

$$V = (\pi)(0.500)(400) = 628 \text{ pulg/min} = 52 \text{ pies/min}$$

La velocidad de corte en el diámetro maquinado es

$$V = (\pi)(0.480)(400) = 603 \text{ pulg/min} = 50 \text{ pies/min}$$

A partir de la información proporcionada, obsérvese que la profundidad de corte es

$$d = \frac{0.500 - 0.480}{2} = 0.010 \text{ pulgadas}$$

y la velocidad es

$$f = \frac{8}{400} = 0.02 \text{ pulg/rev}$$

Así que de acuerdo con la ecuación 23.1a, la velocidad de remoción de material es

$$\text{MRR} = (\pi)(0.490)(0.010)(0.02)(400) = 0.12 \text{ pulg}^3/\text{min}$$

También se puede utilizar la ecuación 23.1b, por medio de la cual encontramos que $MRR = (0.01)(0.02)(52)(12) = 0.12 \text{ pulg}^3/\text{min}$. El tiempo real de corte, de acuerdo con la ecuación 23.2, es

$$t = \frac{6}{(0.02)(400)} = 0.75 \text{ min}$$

La potencia requerida se puede calcular de acuerdo con la tabla 21.2 y tomando un valor promedio para acero inoxidable de $4 \text{ W} \cdot \text{s}/\text{mm}^3 = 4/2.73 = 1.47 \text{ hp} \cdot \text{min}/\text{pulg}^3$. Por lo tanto, la potencia disipada es

$$\text{Potencia} = (1.47)(0.123) = 0.181 \text{ hp}$$

Puesto que $1 \text{ hp} = 396,000 \text{ pulgadas-libras}/\text{min}$, la potencia disipada es $71,700 \text{ pulgadas-libras}/\text{min}$.

La fuerza de corte (F_c) es la fuerza tangencial ejercida por la herramienta. La potencia es el producto del torque (T) y la velocidad de rotación en radianes por unidad de tiempo; por lo que,

$$T = \frac{(71,700)}{(2\pi)(400)} = 29 \text{ libras} \cdot \text{pulgadas}$$

Puesto que $T = F_c D_{\text{prom}}/2$,

$$F_c = \frac{29}{0.490/2} = 118 \text{ lb}$$

23.3 | Tornos y operaciones en el torno

Por lo general, se considera que los *tornos* son las máquinas herramienta más antiguas. Aunque los tornos para trabajos en madera se desarrollaron originalmente durante el periodo de 1001 a 1000 a.C., los tornos para trabajos en metales con tornillos reguladores no se construyeron sino hasta finales del siglo XVIII. El más común se conocía como *torno mecánico*, porque se accionaba mediante poleas aéreas y bandas desde los motores circundantes en el piso de la fábrica. En la actualidad, todos estos tornos están equipados con motores eléctricos individuales.

La velocidad máxima del husillo de los tornos es por lo regular de unos 4000 rpm, pero en el caso de tornos grandes puede ser de sólo 200 rpm. En aplicaciones especiales, las velocidades pueden llegar hasta 10,000 rpm, 40,000 rpm o más, para maquinado de muy alta velocidad. El costo de los tornos va de alrededor de \$2000 dólares para los de tipo banco, hasta de unos \$100,000 dólares para las unidades grandes.

Aunque simple y versátil, un torno mecánico requiere un maquinista experto, porque todos los controles se manipulan en forma manual. Por lo tanto, es poco eficaz en operaciones repetitivas y líneas de producción grandes. El resto de esta sección describe los diversos tipos de automatización que por lo general se adicionan para mejorar la eficacia.

23.3.1 Componentes del torno

Los tornos están equipados con varios componentes y accesorios, como se muestra en la figura 23.2. Sus características y funciones se describen a continuación.

Bancada. La bancada soporta los componentes principales del torno. Las bancadas tienen una masa grande y se construyen de manera rígida, por lo común de hierro gris o hierro fundido nodular. (Ver también la sección 25.3 sobre materiales nuevos para estructuras de máquinas herramienta). La parte superior de la bancada tiene dos **guías** o **correderas** con diversas secciones transversales que se endurecen y maquinan para mejorar la resistencia al desgaste y la precisión dimensional durante el torneado. En los *tornos de bancada dividida* se puede extraer una sección de la bancada frente al cabezal, a fin de acomodar piezas de trabajo de diámetro más grande.

Carro. El carro o ensamble del carro se desliza a lo largo de las guías y consta de un ensamble de la *corredera transversal*, *portaherramientas* y *tablero*. La herramienta de corte se monta en el *portaherramientas*, por lo general con un *apoyo compuesto* que gira para colocar y ajustar la herramienta. La *corredera transversal* se mueve radialmente adentro y afuera, controlando la posición radial de la herramienta de corte en operaciones como el careado (refrentado) (fig. 23.1e). El *tablero* está equipado con mecanismos para movimiento manual y mecanizado del carro y la *corredera transversal* por medio del *tornillo de avance*.

Cabezal. El cabezal se fija a la bancada y está equipado con motores, poleas y bandas en V que suministran energía a un *husillo* a diversas velocidades de rotación o de giro. Éstas se pueden ajustar mediante selectores de control manual o controles eléctricos. La mayoría de los cabezales están equipados con un juego de engranes y algunos tienen varios accionamientos que proporcionan al husillo una gama de velocidades continuamente variables. Poseen además un *husillo hueco* en el que se montan dispositivos de sujeción del trabajo (como los *mandriles* y las *boquillas*, ver sección 23.3.2); a través de estos husillos se pueden alimentar barras o tubos largos para diversas operaciones de torneado. La precisión del husillo es importante para la precisión del torneado, sobre todo en el maquinado de alta velocidad; los rodamientos de bolas o cónicos precargados suelen utilizarse para soportar de manera rígida el husillo.

Carro de contrapunto. El carro de contrapunto, que puede deslizarse a lo largo de las guías y sujetarse en cualquier posición, soporta el otro extremo de la pieza de trabajo. Está equipado con un centro que puede fijarse (*contrapunto fijo*) o quedar libre para rotar con la pieza de trabajo (*contrapunto vivo*). En el *manguito o boquilla del contrapunto* (parte cilíndrica hueca con orificio cónico) del carro de contrapunto se pueden montar brocas o escariadores (rimas) para taladrar orificios axiales en la pieza de trabajo.

Barra de avance y tornillo guía. La barra de avance se acciona mediante un juego de engranes a través del cabezal. La barra gira durante la operación del torno y proporciona movimiento al carro y a la *corredera transversal* por medio de engranes, un embrague de fricción y un cuñero de posicionamiento a lo largo de la barra. Al cerrar una *tuerca dividida* alrededor del tornillo de avance, ésta se acopla con el carro; también se utiliza para cortar roscas con precisión.

Especificaciones de los tornos. En general, un torno se especifica por:

- Su *volteo*, diámetro máximo de la pieza de trabajo que se puede maquinar (tabla 23.6).
- La distancia máxima entre el cabezal y el contrapunto (distancia entre puntos).
- La longitud de la bancada.

Por ejemplo, un torno puede tener las siguientes dimensiones: 360 mm (14 pulgadas) de volteo, que es el diámetro máximo admisible, por 760 mm (30 pulgadas) entre los centros, por 1830 mm (6 pies) de longitud de bancada. Como se describe a continuación, existen tornos de numerosos estilos y tipos de construcción y potencia. Los diámetros máximos de la pieza de trabajo pueden ser hasta de 2 m (78 pulgadas).

23.3.2 Dispositivos de sujeción del trabajo y accesorios

Los dispositivos de sujeción del trabajo son importantes, sobre todo en las máquinas herramienta y en operaciones de maquinado, ya que deben sujetar la pieza de trabajo con seguridad. Como se muestra en la figura 23.3, un extremo de la pieza se sujeta al husillo del torno mediante un mandril o “chuck”, boquilla o plato de arrastre (ver fig. 23.7d).

Por lo general, un *mandril* está equipado con tres o cuatro *mordazas*. Los mandriles de *tres mordazas* suelen tener un diseño de desplazamiento engranado que hace que las mordazas se centren por sí mismas. Se utilizan para piezas de trabajo redondas (como material en barra, tubos y tubería), que se pueden centrar hasta una distancia de 0.025 mm

TABLA 23.6

Capacidades típicas y máximas dimensiones de piezas de trabajo para máquinas herramienta			
Máquina herramienta	Dimensión máxima (m)	Potencia (kW)	Máximas rpm
Tornos (diámetro máximo admisible/longitud)			
De banco	0.3/1	<1	3000
Mecánico	3/5	70	4000
Torreta o revólver	0.5/1.5	60	3000
Tornillo automático	0.1/0.3	20	10,000
Máquinas de mandrinado (diámetro de trabajo/longitud)			
Husillo vertical	4/3	200	300
Husillo horizontal	1.5/2	70	1000
Taladradoras			
Banco y columna (diámetro de broca)	0.1	10	12,000
Radial (distancia de columna a husillo)	3	—	—
Control numérico (avance de la mesa)	4	—	—

Nota: Existen capacidades mayores para aplicaciones especiales.

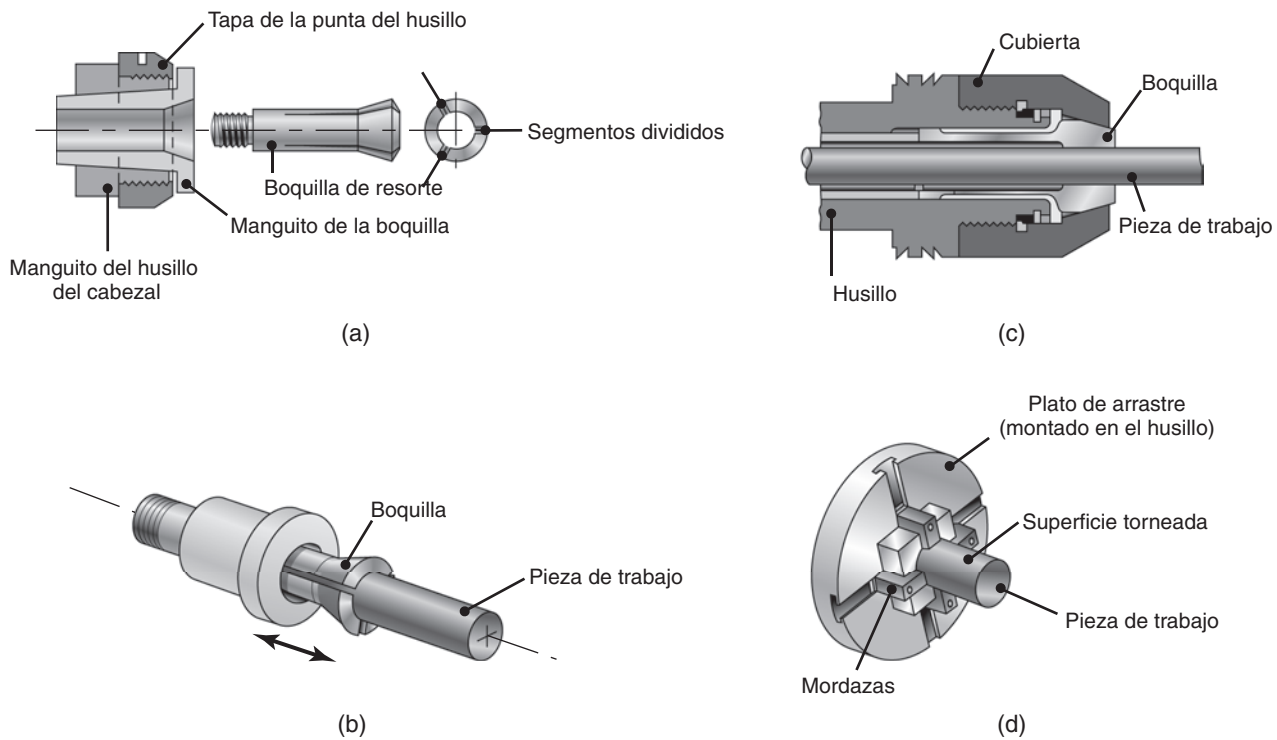


FIGURA 23.7 (a) y (b) Esquemas de una boquilla tipo inserción. La pieza de trabajo se coloca en el orificio de la boquilla y las superficies cónicas de ésta se fuerzan hacia el interior, jalándola con una barra de inserción dentro del manguito o manga. (c) Boquilla de tipo empuje. (d) Sujeción de una pieza de trabajo en un plato de arrastre.

(0.001 pulgada). Los mandriles de *cuatro mordazas* (independientes) tienen mordazas que se pueden mover y ajustar de manera independiente entre sí, por lo que se pueden emplear en piezas cuadradas, rectangulares o de formas poco comunes. Como su construcción es más robusta que los mandriles de tres mordazas, se usan en piezas pesadas o para trabajo que requiere múltiples fijaciones en el mandril, en las que la concentricidad es importante.

Las mordazas en algunos tipos de mandriles pueden invertirse para permitir la sujeción de las piezas de trabajo sobre las superficies exteriores o interiores de las piezas de trabajo huecas, como tubos y tubería. También existen mordazas fabricadas de acero de bajo carbono (*mordazas blandas*) que se pueden maquinar para darles las formas deseadas. Debido a su baja resistencia y dureza, las mordazas blandas se adaptan a pequeñas irregularidades en las piezas de trabajo y, por lo tanto, proporcionan una mejor sujeción. Los mandriles se pueden accionar *eléctrica* o *manualmente* mediante una llave de mandril. Dado que requiere más tiempo accionar los mandriles manuales, por lo general se utilizan para líneas de producción limitadas y en cuartos de herramientas.

Existen mandriles en diversos diseños y tamaños. Su selección depende del tipo y la velocidad de operación, el tamaño de la pieza de trabajo, los requisitos de producción y precisión dimensional y las fuerzas requeridas de las mordazas. Al controlar la magnitud de estas fuerzas, un operador puede asegurar que la parte no se deslice en el mandril durante el maquinado. Las altas velocidades del husillo pueden reducir las fuerzas (de sujeción) de las mordazas de manera significativa debido al efecto de las *fuerzas centrífugas*; este efecto es importante sobre todo en el torneado de precisión de tubos. Los mecanismos actuadores modernos de mordazas permiten una mayor fuerza de sujeción para desbaste y menor fuerza en operaciones de acabado.

Para cumplir las crecientes demandas de rigidez, precisión, versatilidad, potencia y altas velocidades de corte en las máquinas herramienta modernas, se han registrado avances importantes en el diseño de los dispositivos de sujeción de trabajos. Los **mandriles** o **chucks de potencia** (también llamados **mandriles de sujeción motorizados**), accionados neumática o hidráulicamente, se utilizan en equipo automatizado para altas velocidades de producción, incluyendo la carga de partes mediante robots industriales. También existen diversos tipos de *chucks* de potencia con mecanismos tipo palanca o cuña para accionar las mordazas; estos mandriles tienen movimientos (golpes) de las mordazas que por lo general se limitan a unos 13 mm (0.5 pulgada).

Una **boquilla** es básicamente un buje cónico dividido de modo longitudinal. La pieza de trabajo (por lo general, con un diámetro máximo de 1 pulgada) se coloca en el interior de la boquilla y ésta se jala (*boquilla de inserción*; fig. 23.7a y b) o se empuja (*boquilla de empuje*; fig. 23.7c) de manera mecánica en el husillo. Las superficies cónicas contraen radialmente los segmentos de la boquilla, sujetando la pieza de trabajo. Las boquillas se utilizan para piezas redondas y de otras formas (por ejemplo, cuadradas o hexagonales) y están disponibles en una amplia variedad de dimensiones progresivas.

Una ventaja de utilizar una boquilla (en vez de un mandril de tres o cuatro mordazas) es que se sujeta a casi toda la circunferencia de la parte, haciendo que se adapte bien, en particular a partes con pequeñas secciones transversales. Dado que el movimiento radial de los segmentos de la boquilla es pequeño, por lo general las piezas de trabajo deben estar dentro del límite de 0.125 mm (0.005 pulgada), que es el tamaño nominal de la boquilla.

Los **platos de arrastre** se utilizan para sujetar piezas de trabajo de forma irregular; son redondos y tienen diversas ranuras y orificios a través de los cuales se atornilla o sujeta la pieza (fig. 23.7d). Los **mandriles de centro** (fig. 23.8) se colocan en el interior de piezas de trabajo huecas o tubulares y se utilizan para sujetar las piezas que requieren maquinado en ambos extremos o en sus superficies cilíndricas. Algunos mandriles de centro se montan entre los puntos del torno.

Accesorios. Diversos dispositivos están disponibles como accesorios y aditamentos para tornos; entre ellos se encuentran los siguientes:

- Topes del carro y de la corredera transversal, con diversos diseños para detener el carro a una distancia predeterminada a lo largo de la bancada.

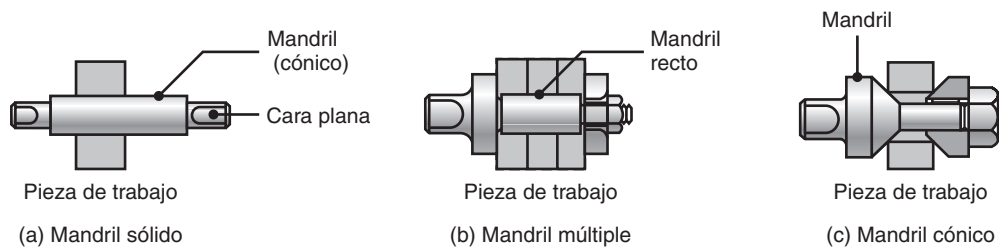


FIGURA 23.8 Diversos tipos de mandriles para sujetar las piezas de trabajo para torneado. Por lo general, estos mandriles se montan entre centros en un torno. Obsérvese que en (a) se pueden maquinar las superficies cilíndricas y el extremo de la pieza, en tanto que en (b) y (c) sólo se pueden maquinar las superficies cilíndricas.

- Dispositivos para tornear partes con diversas conicidades.
- Aditamentos de fresado, aserrado, corte de engranes y rectificado.
- Diversos aditamentos para mandrinado, taladrado y corte de roscas.

23.3.3 Operaciones en el torno

En una operación típica de cilindrado, la pieza de trabajo se sujeta con cualquiera de los dispositivos de sujeción ya descritos. Las partes largas y delgadas deben soportarse con un *apoyo (luneta) fijo* y un *apoyo deslizable*, colocados en la bancada, ya que en caso contrario las fuerzas de corte la curvarían. Estos apoyos están equipados por lo general con tres dedos o rodillos ajustables que soportan la pieza, mientras permiten que gire con libertad. Los apoyos fijos se sujetan directamente sobre las *guías* del torno (como se muestra en la fig. 23.2), en tanto que los *apoyos deslizables* se sujetan sobre el carro y avanzan con éste.

La herramienta de corte se sujeta al portaherramientas, que se acciona con el tornillo de avance y remueve material al avanzar a lo largo de la bancada. Una herramienta *derecha* se mueve hacia el cabezal y una herramienta *izquierda* avanza hacia el contrapunto. Las operaciones de careado (refrentado) se efectúan moviendo la herramienta en forma radial con la corredera transversal sujetando también el carro para mejorar la precisión dimensional.

Las **herramientas de forma o formadoras** se utilizan para producir diversas formas en piezas de trabajo sólidas y redondas (fig. 23.1g), moviendo la herramienta radialmente hacia el interior mientras la parte está girando. El corte de formas no es apropiado para ranuras profundas y angostas o esquinas filosas, porque la vibración y el traqueteo pueden causar un acabado superficial pobre. Como regla: (a) la sección de la parte a la que se da forma no debe ser mayor a más o menos 2.5 veces el diámetro mínimo de la parte; (b) es necesario ajustar la velocidad de corte de manera adecuada, y (c) se deben emplear fluidos de corte. También deben considerarse factores como la rigidez de las máquinas herramienta y los dispositivos de sujeción del trabajo.

El **mandrinado** en un torno es similar al cilindrado. Se realiza dentro de piezas de trabajo huecas o en un orificio previamente producido mediante taladrado u otros medios. Los orificios sin forma se pueden enderezar por mandrinado. La pieza se sujeta en un plato o en algún otro dispositivo adecuado de sujeción de trabajo. En la sección 23.4 se describe el mandrinado de piezas de trabajo grandes.

El **taladrado** (sección 23.5) se puede efectuar en un torno montando la broca en un broquero, en la boquilla del contrapunto. La pieza de trabajo se sujeta en un sujetador en el cabezal y la broca se hace avanzar girando el volante del carro del contrapunto. Es posible que los orificios taladrados así no tengan suficiente concentricidad por la tendencia del taladro a desviarse radialmente. Se puede mejorar la concentricidad del orificio taladrado si después se mandrina; también se puede **escariar** (sección 23.6) en tornos, de manera similar al taladrado, mejorando así las tolerancias dimensionales y el acabado superficial.

A las herramientas para *tronzado (seccionado)*, *ranurado*, *corte de roscas* y muchas otras operaciones se les da forma para cada propósito en particular o se encuentran disponibles como insertos. El *moletado* se efectúa en un torno con rodillos endurecidos (ver fig. 23.11), en el que la superficie de los rodillos es una réplica del perfil a generar. Los rodillos se presan radialmente contra la pieza de trabajo giratoria, en tanto que la herramienta se mueve de modo axial a lo largo de la parte.

23.3.4 Tipos de tornos

Existen muchos otros tipos de tornos, cuyas descripciones se presentan a continuación.

Tornos de banco. Como su nombre indica, estos tornos se colocan en un banco de trabajo o en una mesa. Su potencia es baja, por lo general cuentan con avance manual y se utilizan para maquinar pequeñas piezas de trabajo. Los *tornos de los cuartos de herramientas* tienen alta precisión, permitiendo el maquinado de partes a tolerancias dimensionales cerradas.

Tornos de propósito especial. Estos tornos se utilizan en aplicaciones (como ruedas para vías férreas, cañones de armas y rodillos de molinos de laminación) con piezas de trabajo hasta de 1.7 m de diámetro por 8 m de longitud (66 pulgadas a 25 pies) y capacidades de 450 kW (600 hp).

Tornos copiadores. Estos tornos poseen aditamentos especiales que tienen la capacidad de torneear partes con varios contornos. También conocidos como *tornos duplicadores* o *tornos de contorneado*, la herramienta de corte sigue una trayectoria igual a la del contorno de la plantilla, como un lápiz que sigue la forma de un estencil de plástico. Sin embargo, las operaciones que comúnmente se realizan en los tornos copiadores se han reemplazado en gran medida con los *tornos de control numérico* y los *centros de torneado*, como se describe en la sección 25.2.

Tornos automáticos. Los tornos se han automatizado progresivamente con los años; los controles manuales de las máquinas se han reemplazado con diversos mecanismos que permiten que las operaciones de maquinado sigan cierta secuencia prescrita. En un *torneado totalmente automático*, las partes se hacen avanzar y se retiran de manera automática, mientras que en las máquinas *semiautomáticas* el operador realiza estas funciones. Los tornos automáticos pueden tener un husillo horizontal o vertical y son adecuados para producción de medio a alto volumen.

Los tornos que no tienen carro de contrapunto se conocen como *máquinas de fijación en mandril* o simplemente "*mandriles*". Se utilizan para maquinar piezas individuales de formas regulares e irregulares y son de tipo husillo simple o husillos múltiples. En otro tipo de torno automático, la barra de material avanza periódicamente en el torno, la parte se maquina y se corta cuando está terminada en el extremo de la barra.

Máquinas automáticas para barras. También conocidas como *máquinas roscadoras automáticas*, estas máquinas herramienta están diseñadas para maquinado de altas velocidades de producción de tornillos y partes roscadas similares. Todas sus operaciones se realizan de manera automática, con las herramientas sujetas a una torreta especial. Después de maquinar cada parte o tornillo con las dimensiones finales, la barra de material avanza automáticamente a través del orificio en el husillo y después se corta. Estas máquinas se pueden equipar con husillos simples o múltiples. Las capacidades de dicha barra van de 3 mm a 150 mm (1/8 a 6 pulgadas) de diámetro. El largo del material es soportado por accesorios especiales conforme entra en el orificio del husillo.

Las *máquinas automáticas de barra de husillo simple* son similares a los tornos de torreta y están equipadas con diversos mecanismos accionados por levas. Existen dos tipos de máquinas de husillo simple. En las *automáticas tipo suizo*, la superficie cilíndrica de la barra sólida de material se maquina con una serie de herramientas que se mueven radialmente y en el mismo plano hacia la pieza de trabajo. La barra se sujeta cerca del husillo del cabezal, lo que minimiza las deflexiones debido a las fuerzas de corte. Estas máquinas herramienta pueden maquinar con alta precisión partes de diámetro pequeño.

La otra máquina de husillo simple (*tipo americana*) es similar a un torno de torreta pequeño, automático. La torreta está en un plano vertical y todos los movimientos de los componentes de la máquina se controlan mediante levas. En la actualidad, las máquinas automáticas para barra están equipadas con controles numéricos por computadora, eliminando el uso de levas y la operación se programa para un producto específico (ver sección 37.3).

Por lo general, las **máquinas automáticas de barra de husillos múltiples** tienen de cuatro a ocho husillos arreglados en círculo en un tambor grande, cada uno portando una pieza de trabajo individual. Las herramientas de corte se arreglan en diversas posiciones en la máquina y se mueven en direcciones axial y radial. Cada parte se maquina por etapas, conforme se mueve de una estación a la siguiente. Puesto que todas las operaciones se realizan de manera simultánea, se reduce el tiempo del ciclo por parte.

Tornos de torreta (revólver). Estas máquinas herramienta tienen la capacidad de efectuar múltiples operaciones de corte, como torneado, mandrinado, corte de roscas y careado (refrentado) (fig. 23.9). Se montan diversas herramientas de corte (hasta seis) en la *torreta principal* hexagonal, que gira después de completar cada operación específica de corte. El torno suele tener una *torreta cuadrada* en la corredera transversal, para montar hasta cuatro herramientas de corte. La pieza de trabajo (por lo común, un material en barra larga y redonda) avanza una distancia predeterminada a través del plato. Después de maquinar la parte, se corta con una herramienta montada en la torreta cuadrada, que se mueve de modo radial sobre la pieza de trabajo. Luego la barra avanza la misma distancia predeterminada y se maquina la siguiente parte.

Los tornos de torreta (revólver), tipo barra o mandril, son versátiles y las operaciones se pueden efectuar manualmente, utilizando el torniquete (rueda revólver o cabestrante) o de modo automático. Una vez ajustadas de manera adecuada, estas máquinas no requieren operadores con mucha experiencia. También existen *tornos de torreta vertical*, que son más adecuados para piezas de trabajo cortas, pesadas, con diámetros tan grandes como 1.2 m (48 pulgadas).

El torno de torreta mostrado en la figura 23.9 se conoce como torno de torreta **tipo ariete** (en el cual un ariete se desliza en una base por separado sobre la silleta). La corta carrera del ariete de la torreta limita esta máquina a piezas de trabajo relativamente cortas y a cortes ligeros para producción de cantidades pequeñas y medianas. En otro estilo (**tipo silleta**), la torreta principal se instala directamente sobre la silleta, que se desliza

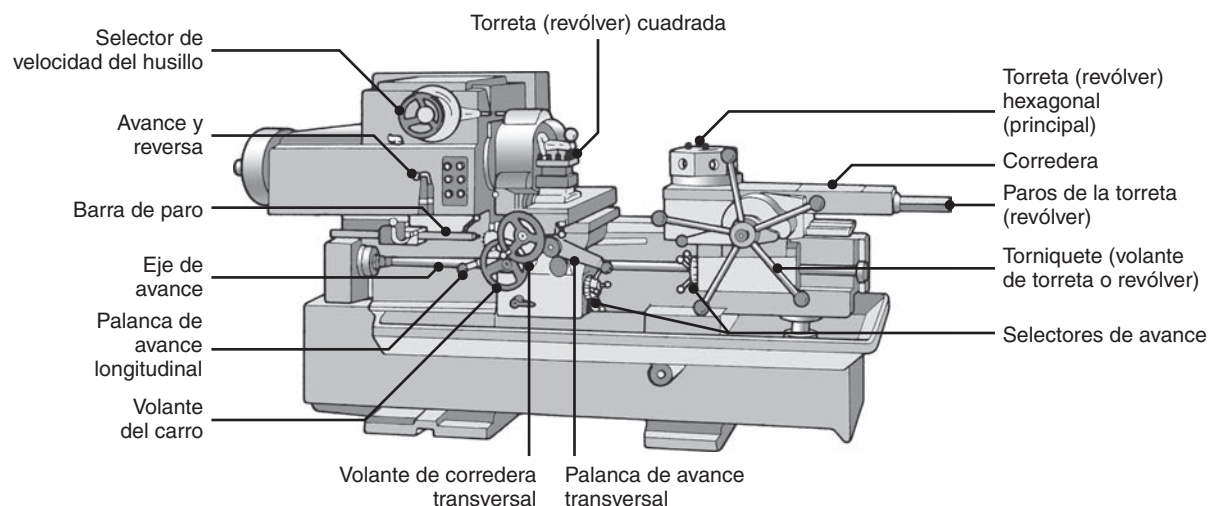


FIGURA 23.9 Esquema de los componentes de un torno de torreta (revólver). Obsérvese las dos torretas (revólveres): cuadrada y hexagonal (principal).

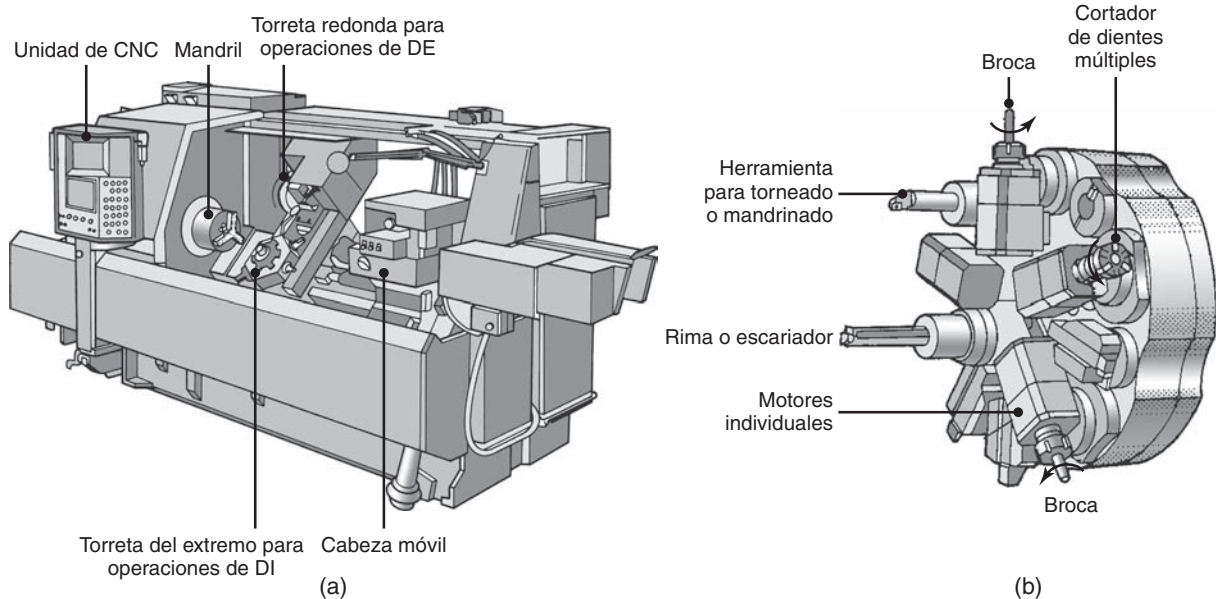


FIGURA 23.10 (a) Torno de control numérico por computadora. Obsérvese las dos torretas (revólveres) en esta máquina. Estas máquinas tienen mayor potencia y velocidad de husillo que los otros tornos para aprovechar las nuevas herramientas de corte con propiedades mejoradas. (b) Torreta (revólver) común equipada con 10 herramientas, algunas de las cuales son mecánicas.

a lo largo de la bancada. La longitud de la carrera se limita sólo por la longitud de la bancada. La construcción de este tipo de torno es más robusta y se utiliza para maquinar piezas de trabajo grandes. Dado lo pesado de los componentes, las operaciones del torno tipo silleta son más lentas que las de tipo ariete.

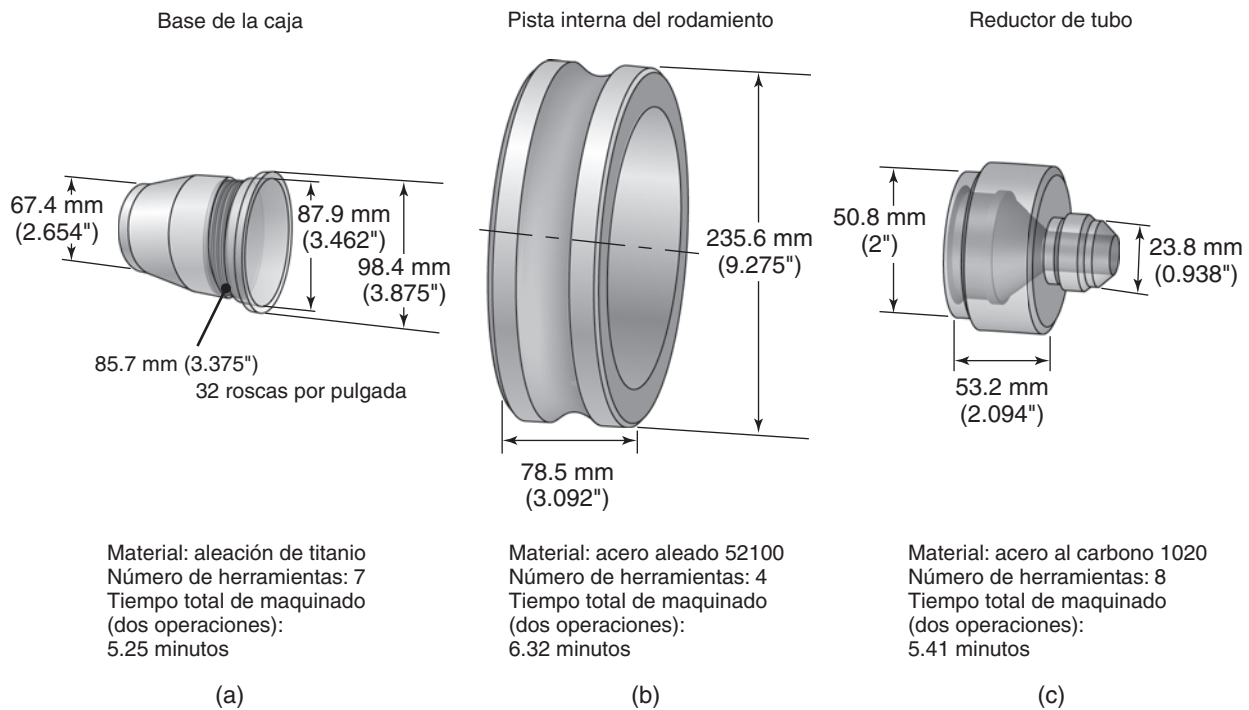
Tornos controlados por computadora. En la mayoría de los tornos avanzados, el movimiento y control de la máquina herramienta y sus componentes se logra mediante *controles numéricos computarizados* (CNC). En la figura 23.10a se muestran las características de dichos tornos; por lo general, están equipados con una o más torretas, cada una de las cuales tiene varias herramientas y realiza diversas operaciones en diferentes superficies de la pieza de trabajo (fig. 23.10b). Los diámetros de esta pieza pueden ser hasta de 1 m (36 pulgadas).

Para aprovechar los materiales de las nuevas herramientas de corte, los tornos controlados por computadora han sido diseñados para operar más rápido y tienen mayor potencia disponible en comparación con otros tornos. Están equipados con *cambiadores automáticos de herramientas* (ATC, por sus siglas en inglés). La repetitividad de sus operaciones es confiable, su precisión dimensional es la deseada y requieren mano de obra menos experta (una vez que la máquina se ajusta). Son adecuados para la producción de volumen bajo a medio.

EJEMPLO 23.2 Partes típicas fabricadas en máquinas herramienta de torneado con CNC

En la figura 23.11 se ilustran las capacidades de las máquinas herramienta de torneado con CNC. Se indica el material y la cantidad de herramientas de corte utilizadas, así como los tiempos de manufactura de cada parte. Estas partes también se pueden producir en tornos manuales o de torreta, aunque no de manera tan eficaz o consistente.

Fuente: Cortesía de Monarch Machine Tool Company.

**FIGURA 23.11** Partes comunes fabricadas en tornos CNC.**EJEMPLO 23.3** Maquinado de formas complejas

En el ejemplo 23.2 se observa que las partes son simétricas respecto de su eje. Las capacidades del torneado con CNC se pueden ilustrar aun más haciendo referencia a la figura 23.12, que muestra tres partes adicionales de mayor complejidad: una flecha de una bomba, un cigüeñal y una parte tubular con rosca interna redonda. Como en la mayoría de las operaciones, el maquinado de estas partes consta de cortes de desbaste y de acabado.

1. *Flecha de bomba* (fig. 23.12a). Esta parte, así como una amplia variedad de partes similares con características externas e internas, incluyendo árboles de levas, se produjo en un torno CNC con dos torretas, de construcción similar a la de la máquina mostrada en la figura 23.10a. Cada torreta puede sujetar hasta ocho herramientas. Para producir esta forma en particular, la torreta superior se programa de manera que su movimiento radial se sincronice con la rotación de la flecha (fig. 23.12b).

El ángulo de torneado del husillo se supervisa directamente, ya que un procesador efectúa un cálculo a alta velocidad y el CNC emite un comando a la torreta de leva en términos de dicho ángulo. Recibe retroalimentación de posición absoluta utilizando un sistema de graduación de alta precisión. El CNC compara el valor real con el instruido y realiza una compensación automática mediante una función integrada de aprendizaje. La torreta tiene un diseño de peso ligero para facilitar la operación reduciendo las fuerzas de inercia.

Esta flecha se puede fabricar con aluminio o acero inoxidable. Los parámetros de maquinado del aluminio se dan en la tabla 23.7 (ver parte (a) en la primera columna de la tabla). Estos parámetros se pueden comparar con los datos proporcionados en la tabla 23.4, que sólo tienen una amplia variedad apro-

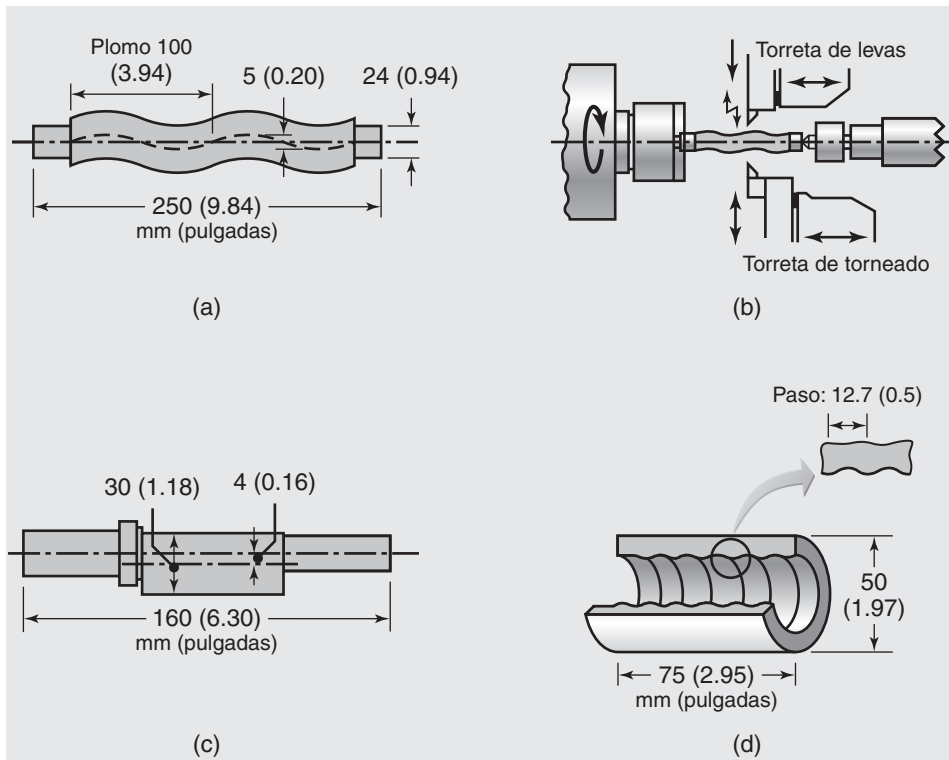


FIGURA 23.12 Ejemplos de formas más complejas que se pueden producir en un torno CNC.

ximada como guía. Los insertos fueron de carburo K10 (C3) sin recubrimiento, con un diamante policristalino compactado (ver fig. 22.10). El maquinado del diámetro exterior en la tabla mostrada se refiere a los dos extremos cilíndricos rectos de la parte. El tiempo total de maquinado de una flecha de aluminio fue de 24 minutos. El del acero inoxidable fue de 55 minutos, porque su velocidad de corte es considerablemente inferior a la del aluminio.

2. *Cigüeñal* (fig. 23.12c). Esta parte se fabrica con hierro fundido dúctil (nodular) y los parámetros de maquinado se muestran en la parte (b) de la tabla 23.7. El inserto fue de carburo K10. El tiempo de maquinado fue de 25 minutos, mismo lapso que la parte ya descrita.
3. *Parte tubular con roscas internas redondas* (fig. 23.12d). Esta parte, fabricada con acero inoxidable 304, se maquinó conforme a las condiciones indicadas para la parte (c) en la tabla 23.7. La pieza en bruto inicial fue una pieza tubular recta similar a un buje. Las herramientas de corte fueron de cermet y carburo recubierto. La barra de mandrilado se fabricó con carburo de tungsteno para conseguir mayor rigidez y, por lo tanto, mejor precisión dimensional y acabado superficial. Para la parte roscada, la precisión dimensional fue de ± 0.05 mm (0.002 pulgada), con acabado superficial de $R_a = 2.5$ μ m (100 μ m).

El tiempo de maquinado de esta parte fue de 1.5 minutos, que es mucho menor que los tiempos de las dos anteriores. La razón es que (a) esta parte es más corta; (b) se remueve menos material; (c) no tiene las características de excentricidad de las primeras dos partes (así que el movimiento radial de la herramienta de corte no es una función de la posición angular de la parte), y (d) la velocidad de corte es superior.

Fuente: Con base en la bibliografía técnica proporcionada por Okuma Corp.

TABLA 23.7

Operación	Velocidad en rpm	Velocidad de corte	Profundidad de corte	Avance	Herramienta
Parte a y b: DE					
Desbaste	1150	160 m/min (525 fpm)	3 mm (0.12 pulgada)	0.3 mm/rev (0.012 pulgada/rev)	K10 (C3)
Acabado	1750	250 (820)	0.2 (0.008)	0.15 (0.006)	K10 (C3)
Plomo					
Desbaste	300	45 (148)	3 (0.12)	0.15 (0.006)	K10 (C3)
Acabado	300	45 (148)	0.1 (0.004)	0.15 (0.006) diamante	Compactado de
Parte c: eje excéntrico					
Desbaste	200	5–11 (16–136)	1.5 (0.059)	0.2 (0.008)	K10 (C3)
Acabado	200	5–11 (16–136)	0.1 (0.004)	0.05 (0.0020)	K10 (C3)
Parte d: rosca interna					
Desbaste	800	70 (230)	1.6 (0.063)	0.15 (0.006)	Carburo recubierto
Acabado	800	70 (230)	0.1 (0.004)	0.15 (0.006)	Cermet

23.3.5 Capacidades del proceso de torneado

En la tabla 23.8 se muestran las *capacidades relativas de producción* en el torneado (así como en otras operaciones de maquinado que se describen en el resto de este capítulo y en el capítulo 24). Estas capacidades influyen de manera fundamental en las operaciones de maquinado. Obsérvese que existen diferencias importantes en la capacidad de pro-

TABLA 23.8

Velocidades normales de producción para diversas operaciones de maquinado

Operación	Velocidad
Torneado	
Torno mecánico	Muy baja a baja
Torno copiador (trazador)	Baja a media
Torno de torreta (revólver)	Baja a media
Torno controlado por computadora	Baja a media
Mandriles con un solo husillo	Media a alta
Mandriles con múltiples husillos	Alta a muy alta
Mandrinado	Muy baja
Taladrado	Baja a media
Fresado	Baja a media
Planeado	Muy baja
Corte de engranes	Baja a media
Brochado	Media a alta
Aserrado	Muy baja a baja

Nota: Las capacidades de producción indicadas son relativas. *Muy baja* es alrededor de una o más partes por hora; *media* es alrededor de 100 partes por hora, y *muy alta* es 1000 o más partes por hora.

ducción de estos procesos, las cuales se deben no sólo a las características inherentes de los procesos y las máquinas herramienta, sino también a muchos otros factores, como los tiempos de ajuste y los tipos y tamaños de las piezas de trabajo por maquinar.

Los valores dados en la tabla 23.8 son relativos y puede haber variaciones significativas en aplicaciones particulares. Por ejemplo, los rodillos de alto carbono de acero fundido (para molinos de laminación) sometidos a tratamiento térmico se pueden maquinar en tornos especiales mediante herramientas de cermet a velocidades de remoción de material tan altas como $6000 \text{ cm}^3/\text{min}$ ($370 \text{ pulg}^3/\text{min}$). También conocido como *maquinado de alta velocidad de remoción*, sus requisitos son (a) rigidez muy alta de la máquina herramienta para evitar la ruptura de la herramienta debido al traqueteo, y (b) alta potencia de hasta 450 kW (600 hp).

El acabado superficial (fig. 23.13) y la precisión dimensional (fig. 23.14) obtenidos en el torneado y en las operaciones relacionadas con él dependen de factores como las características y la condición de la máquina herramienta, su rigidez, vibración y traqueteo, los parámetros del proceso, la geometría y el desgaste de la herramienta, el uso de los fluidos de corte, la maquinabilidad del material de la pieza de trabajo y la experiencia del operador. El resultado (y no es de sorprender) es que puede obtenerse una amplia variedad de acabados superficiales, como se muestra en la figura 23.13. (Ver también fig. 27.4).

23.3.6 Consideraciones de diseño y lineamientos para operaciones de torneado

Es importante considerar diversos factores cuando se diseñen partes a maquinar de manera económica mediante operaciones de torneado. Como el maquinado en general (a) requiere tiempo considerable, lo que incrementa el costo de producción; (b) desperdicia material, y (c) no es tan económico como el formado o moldeado de partes, debe evitarse hasta donde sea posible. Cuando sean necesarias las operaciones de torneado, deben seguirse los siguientes lineamientos generales de diseño:

1. Las partes se deben diseñar de modo que puedan fijarse y sujetarse con facilidad en los dispositivos de sujeción del trabajo. Es difícil soportar de manera apropiada las piezas de trabajo delgadas y esbeltas para que puedan tolerar las fuerzas de sujeción y de corte. (Ver también *fijación flexible*, sección 37.8).
2. La precisión dimensional y el acabado superficial especificados deben ser tan amplios como se permita para que la parte siga funcionando adecuadamente.
3. Se deben evitar esquinas filosas, conicidades, escalones y variaciones dimensionales importantes en la parte.
4. Las piezas en bruto a maquinar se deben aproximar tanto como sea posible (como por formado de forma casi neta), de modo que se reduzca el tiempo del ciclo de producción.
5. Las partes se deben diseñar de manera que las herramientas de corte puedan avanzar a través de la pieza de trabajo sin obstrucciones.
6. Las características de diseño deben facilitar el uso de herramientas estándar de corte, insertos y portaherramientas, disponibles comercialmente.
7. Los materiales de la pieza de trabajo deben seleccionarse en función de su maquinabilidad (sección 21.7) hasta donde sea posible.

Guías para las operaciones de torneado. En la tabla 23.9 se proporciona una guía general de las causas probables de problemas en las operaciones de torneado. Recuerdese que los capítulos 21 y 22 describen los factores que influyen en los parámetros listados.

Además de las diversas recomendaciones en cuanto a herramientas y parámetros de los procesos descritos, un factor importante es la presencia de *vibración* y *traqueteo* (sección 25.4). La vibración durante el corte puede provocar acabado superficial defi-

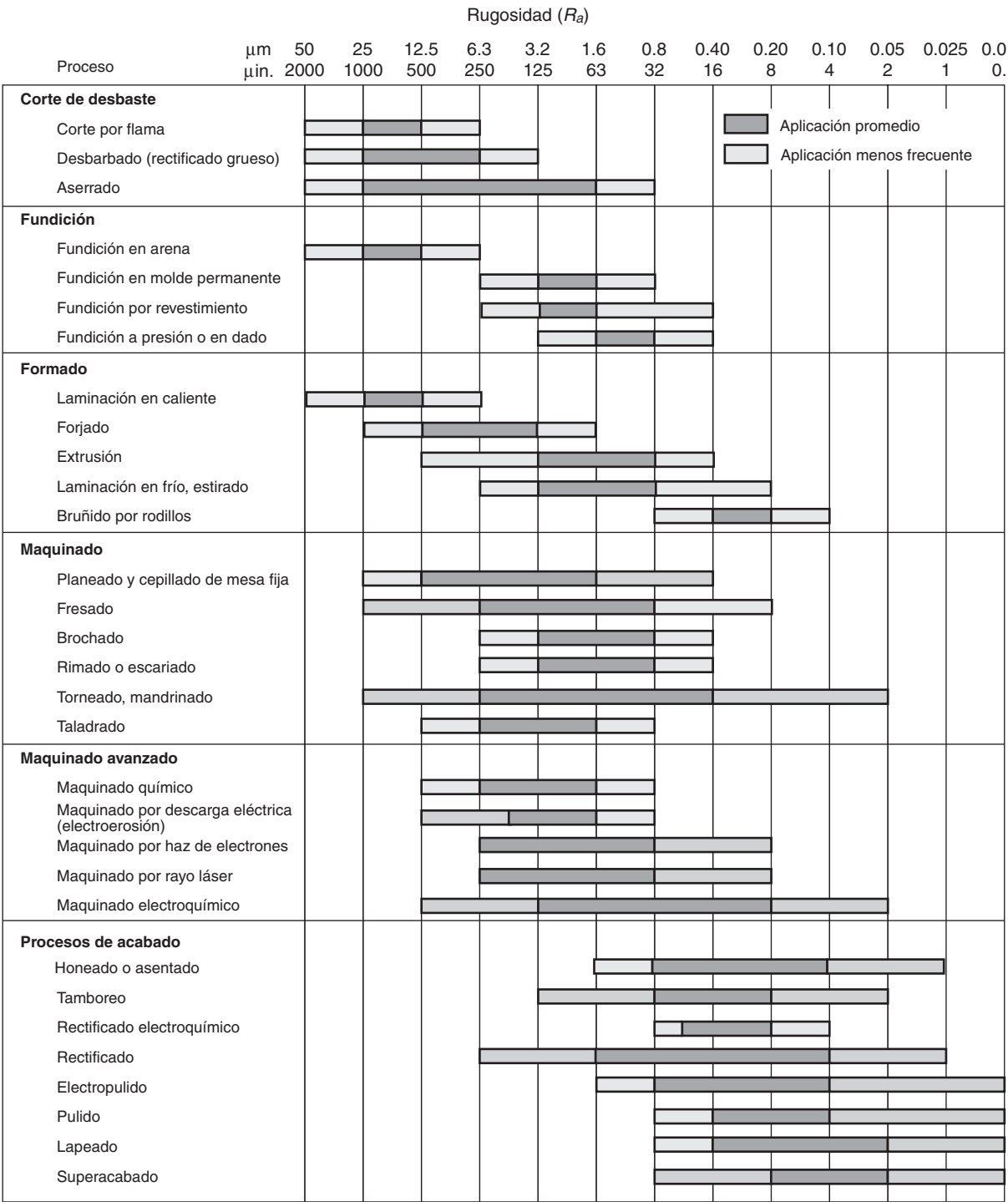


FIGURA 23.13 Rugosidades de superficies obtenidas en diversos procesos. Obsérvese la amplia variedad dentro de cada grupo, sobre todo en torneado y mandrinado.

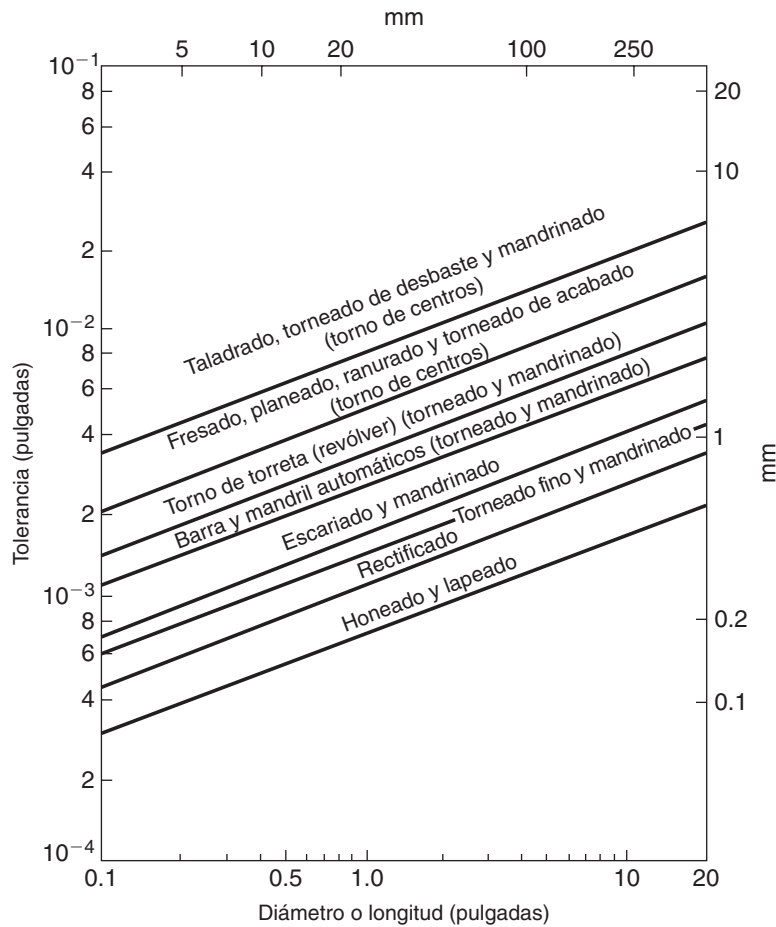


FIGURA 23.14 Intervalo de tolerancias dimensionales obtenidas en diversos procesos de maquinado en función del tamaño de la pieza de trabajo. Obsérvese que existe un orden de magnitud de diferencia entre las piezas de trabajo pequeñas y grandes.

TABLA 23.9

Guía general de resolución de problemas para operaciones de torneado

Problema	Causas probables
Ruptura de la herramienta	El material de la herramienta carece de tenacidad, ángulos inapropiados de la herramienta, la máquina herramienta carece de rigidez, rodamientos y componentes de las máquinas desgastados, parámetros de maquinado demasiado altos.
Desgaste excesivo de la herramienta	Parámetros de maquinado demasiado altos, material inadecuado de la herramienta, fluido de corte ineficaz, ángulos inadecuados de la herramienta.
Acabado superficial rugoso	Borde acumulado o recrecido en la herramienta; avance demasiado alto; herramienta demasiado filosa, astillada o desgastada; vibración y traqueteo.
Variación dimensional	Falta de rigidez de la máquina herramienta y dispositivos de sujeción de trabajo, aumento excesivo de temperatura, desgaste de herramienta.
Traqueteo de la herramienta	Falta de rigidez de la máquina herramienta y los dispositivos de sujeción del trabajo, excesiva proyección de la herramienta, parámetros de maquinado no determinados adecuadamente.

ciente, precisión dimensional pobre, desgaste excesivo de las herramientas y falla prematura de las mismas. La siguiente lista indica algunos lineamientos generalmente aceptados para operaciones de torneado. Sin embargo, debido a la complejidad del problema, varios de ellos tienen que implementarse a base de prueba y error.

1. Minimizar que sobresalga la herramienta.
2. Soportar la pieza rígidamente.
3. Utilizar máquinas herramienta con alta rigidez y alta capacidad de amortiguamiento.
4. Cuando las herramientas empiezan a vibrar y traquetear, debe modificarse uno o más de los parámetros del proceso, como la geometría de la herramienta, la velocidad y la profundidad de corte, el avance, o el uso del fluido de corte. (Ver también el *control adaptable*, sección 37.4).

23.3.7 Sistemas de recolección de virutas

Las virutas generadas durante el maquinado se deben recolectar y desechar de manera adecuada. Su volumen puede ser muy alto, sobre todo en las operaciones de maquinado de ultra alta velocidad y maquinado de alta velocidad de remoción. Por ejemplo, en una operación de taladrado en acero, durante el cual sólo se remueve 1 pulg³ de metal, el volumen suelto de las virutas puede ser de 40 a 800 pulg³, dependiendo del tipo de virutas. De igual manera, el fresado de acero de 1 pulg³ produce de 30 a 45 pulg³ de virutas, en tanto que el hierro fundido genera de 7 a 15 pulg³ de virutas.

También conocida como **manejo de virutas**, la operación comprende la recolección eficaz de virutas de su fuente en la máquina herramienta y su remoción del área de trabajo. Las virutas largas y fibrosas son más difíciles de recolectar que las cortas, que se producen mediante herramientas con rompevirutas (ver figs. 21.7 y 22.2). Por lo tanto, el tipo de viruta generada (*control de virutas*) es un aspecto integral de este sistema de recolección.

Las virutas se pueden recolectar mediante cualquiera de los siguientes métodos:

- Dejando que la gravedad las haga caer en una banda transportadora de acero.
- Arrastrando las virutas de un tanque de sedimentación.
- Usando barrenas con tornillos de avance (similares a los molinos de carne).
- Utilizando transportadores magnéticos (para virutas ferrosas).
- Empleando métodos de vacío para remoción de virutas.

Las máquinas herramienta modernas están diseñadas con características de manejo automatizado de virutas. Cabe mencionar que puede haber fluido de corte mezclado y adherido a las virutas, por lo que son importantes la filtración y el drenado adecuados. El fluido de corte y el lodo se pueden separar mediante *escurridores de virutas* (centrífugos). Por lo general, los sistemas de procesamiento de virutas requieren considerable espacio de piso y pueden costar desde \$60,000 dólares, para los talleres pequeños, hasta alrededor de \$1 millón de dólares, para las plantas grandes.

Las virutas recolectadas se pueden reciclar si es económico hacerlo. Antes de su remoción de una planta de manufactura, las virutas se pueden reducir hasta una quinta parte del volumen suelto mediante *compactación* (trituration) en briquetas o por *fragmentación*. Las virutas secas son más valiosas para el reciclaje por la reducción de contaminación ambiental. El método elegido para la disposición de las virutas depende de la economía y del cumplimiento de las normas locales, estatales y federales. La tendencia es reciclar todas las virutas, así como los fluidos de corte y el lodo utilizados.

23.3.8 Corte de cuerdas (rosas) para tornillos

Las cuerdas o rosas para tornillo son muy comunes. Una *cuerda para tornillo* se puede definir como una cresta de sección transversal uniforme que sigue una trayectoria helicoidal o espiral en la parte exterior o interior de una superficie cilíndrica (*rosca recta*) o cónica (*rosca cónica*). Los tornillos y tuercas de las máquinas tienen rosas rectas, como

las barras roscadas para aplicaciones y como el tornillo de avance en los tornos y en diversos componentes de maquinaria (fig. 23.2). Las roscas o cuerdas pueden ser *derechas* o *izquierdas*. Las roscas cónicas se utilizan comúnmente para tubos de agua y gas y para accesorios de plomería, que requieren una conexión resistente al agua o al aire.

Tradicionalmente las cuerdas se maquinan, pero cada vez con mayor frecuencia se forman mediante **laminación de cuerdas** (que se describe en la sección 13.5). En la actualidad, las cuerdas laminadas constituyen la cantidad más grande de partes roscadas producidas. También se puede fundir partes roscadas, pero existen limitaciones a la precisión dimensional, el acabado superficial y las dimensiones mínimas. Las velocidades de producción no son tan altas como las obtenidas en otros procesos.

Las cuerdas se pueden maquinar de manera externa o interna con una herramienta de corte por un proceso llamado *corte de roscas* o *roscado*. Las roscas o cuerdas internas también pueden producirse con una herramienta especial roscada conocida como *machuelo*, y el proceso recibe el nombre de *machueleado* (sección 23.7). Asimismo, es posible cortar roscas externas con una *matriz* o por medio de fresado. Aunque se suma considerablemente al costo, las roscas pueden rectificarse después para alta precisión dimensional y acabado superficial, en aplicaciones como el accionamiento de tornillos en las máquinas.

Corte de cuerdas o roscas de tornillos en un torno. En la figura 23.15a se muestra una operación común de corte de cuerdas o roscas en un torno. La herramienta de corte, cuya forma depende del tipo de rosca a cortar, se monta en un sujetador y se

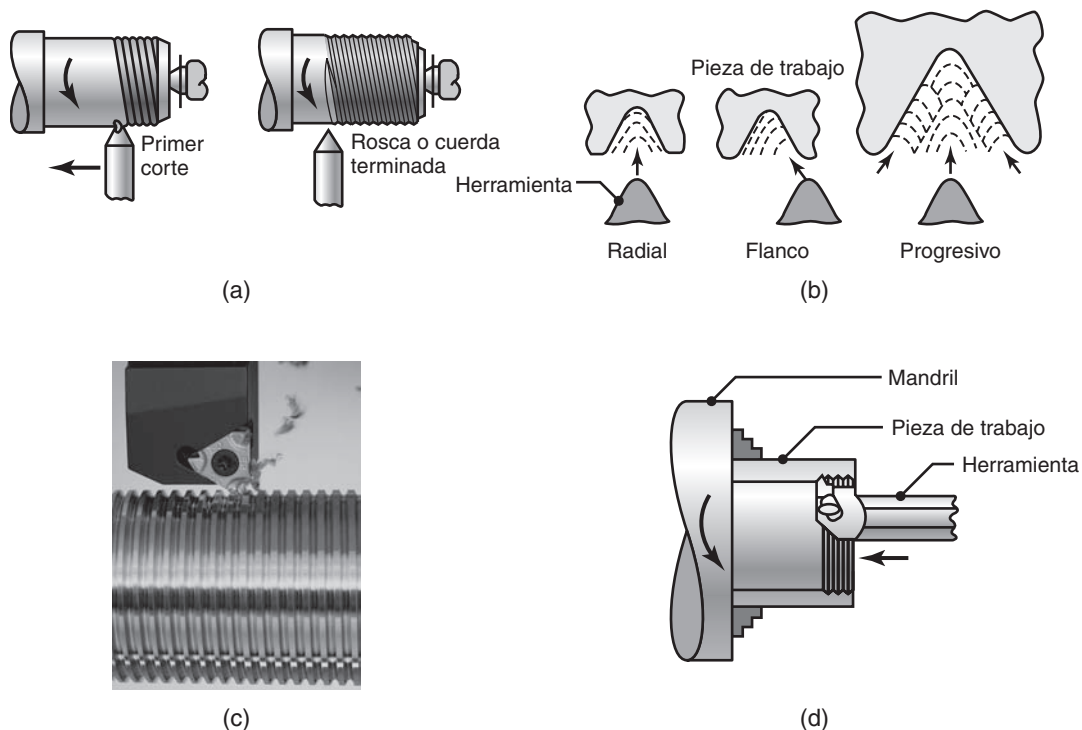


FIGURA 23.15 (a) La generación de cuerdas o roscas en un torno con herramienta de corte de una sola punta. (b) Roscado con herramienta de una sola punta en varios pases, que normalmente se utiliza para roscas o cuerdas grandes. Las flechas pequeñas en las figuras muestran la dirección de avance, y las líneas punteadas, la posición del buril conforme avanza el tiempo. Nótese que en el *corte radial*, la herramienta se hace avanzar directamente dentro de la pieza; en el *corte de flancos*, la herramienta avanza sobre la pieza a lo largo de la cara derecha de la rosca; en el *corte progresivo*, la herramienta primero avanza directamente sobre la pieza en el centro de la rosca, después a sus lados y por último en la raíz. (c) Inserto común con recubrimiento de carburo en el proceso de roscado en un eje redondo. (d) Generación de roscas con un inserto de carburo. Fuente: (c): Cortesía de Iscar Metals Inc.

mueve a lo largo de la pieza de trabajo con el *tornillo de avance* en el torno. Este movimiento se logra mediante el acoplamiento de una *tuerca dividida* (también conocida como *media tuerca*) en el interior del tablero del torno (ver fig. 23.2).

El movimiento axial de la herramienta respecto de la rotación de la pieza de trabajo determina el *avance* de la rosca del tornillo (es decir, la distancia axial recorrida en una revolución completa del tornillo). Para una velocidad fija del husillo, cuanto más lento es el movimiento de la herramienta, más fina será la rosca. En el corte de roscas, la herramienta de corte se puede alimentar radialmente sobre la pieza cortando ambos lados de la rosca al mismo tiempo, como en el corte de formas ya descrito. Sin embargo, este método suele producir un acabado superficial deficiente.

Por lo general, se requiere cierto número de pases en la secuencia mostrada en la figura 23.15b para producir roscas con buena precisión dimensional y buen acabado superficial. La figura 23.15c presenta un inserto de carburo para el corte de roscas de tornillo (*inserto de roscas*) maquinando roscas en un eje redondo, y la figura 23.15d muestra un proceso interno de corte de roscas de tornillo. El corte de roscas en un torno es un método antiguo y versátil, pero es lento y requiere un operador con experiencia considerable. En consecuencia, excepto por las líneas pequeñas de producción, el proceso se ha reemplazado en gran medida con otros métodos, como la laminación de roscas o cuerdas, el maquinado automático de tornillos y el uso de tornos CNC.

La velocidad de producción en el corte de cuerdas de tornillos puede aumentar con herramientas conocidas como *almohadillas* o *peines para roscar* (fig. 23.16a y b). Por lo general, estas herramientas tienen cuatro cortadores con múltiples dientes y se pueden ajustar radialmente. Después de cortar las roscas, los cortadores se abren de modo automático (de ahí el nombre alternativo de *dados de autoapertura*) girándolos alrededor de su eje para retirar la parte. También existen *dados sólidos de roscado* (fig. 23.16c) para cortar cuerdas de tornillo rectas o cónicas. Estos dados o matrices se utilizan sobre todo para roscar o hacer cuerdas en los extremos de tubos y tubería y no son adecuados para el trabajo de producción.

Consideraciones de diseño. Las consideraciones de diseño que se deben tener en cuenta para producir cuerdas o roscas de tornillo de alta calidad y económicas son las siguientes:

- El diseño debe permitir la terminación de las roscas antes de que lleguen a un hombro. Las roscas internas en los orificios ciegos deben tener un tramo sin roscar en la parte inferior. El término *orificio ciego* se refiere a un orificio que no pasa a través de todo el espesor de la pieza de trabajo. (Por ejemplo, ver fig. 23.1i).
- Se deben eliminar los orificios cónicos ciegos para machuelear.
- Deben especificarse bisels en los extremos de las secciones roscadas para minimizar las roscas con forma de aleta con rebabas.
- No se deben interrumpir secciones roscadas con ranuras, orificios u otras discontinuidades.

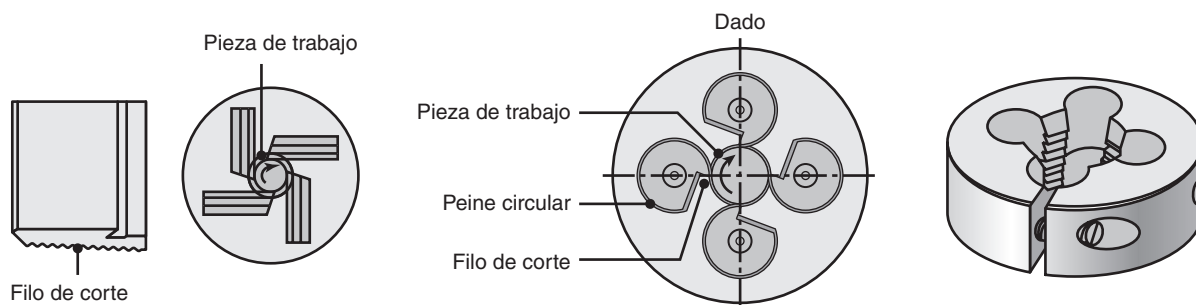


FIGURA 23.16 (a) Peines rectos para cortar roscas en un torno. (b) Peines circulares. (c) Una terraja.

- Siempre que sea posible, deben utilizarse herramientas e insertos estándar de rosado.
- Las partes de pared delgada deben tener suficiente espesor y resistencia para resistir las fuerzas de sujeción y corte. Una regla práctica común es que la longitud mínima de contacto de un sujetador debe ser 1.5 veces el diámetro.
- Las partes deben diseñarse de manera que todas las operaciones de corte se puedan completar en un solo montaje.

23.4 | Mandrinado y máquinas para mandrinar

El *mandrinado* se efectúa para agrandar un orificio producido antes por medio de otro proceso o para producir perfiles circulares internos en piezas de trabajo huecas (fig. 23.1h). Las herramientas de corte son similares a las utilizadas en torneado y se montan en una *barra de mandrinado* (fig. 23.17a) para que cubran toda la longitud del orificio o barreno. Dicha barra debe ser suficientemente rígida para minimizar la deflexión de la herramienta, mantener así la precisión dimensional y evitar vibración y traqueteo. Sería deseable un material con alto módulo elástico (como el carburo de tungsteno). Se han diseñado y construido barras de mandrinado con capacidad para amortiguar la vibración (fig. 23.17b).

Las operaciones de mandrinado en piezas de trabajo un tanto pequeñas se pueden efectuar en un torno; las piezas se maquinan en **mandrinadoras**. Estas máquinas herramienta son horizontales o verticales y tienen la capacidad de realizar diversas operaciones, como torneado, careado (refrentado), ranurado y biselado. En las **mandrinadoras horizontales**, la pieza de trabajo se monta en una mesa que se puede mover horizontalmente en direcciones axial y radial. La herramienta de corte se monta en un husillo que gira en el cabezal y tiene la capacidad de hacer movimientos verticales y longitudinales. También se pueden montar brocas, escariadores, machuelos y fresas en el husillo de la máquina. Una **mandrinadora vertical** (fig. 23.18) es similar a un torno, tiene un eje vertical de rotación de la pieza de trabajo y puede aceptar piezas con diámetros hasta de 2.5 m (98 pulgadas).

Por lo general, la herramienta de corte es de una sola punta, fabricada con acero de alta velocidad M2 y M3, o carburo P10 (C7) y P01 (C8). Se monta en la cabeza de la herramienta, que puede moverse de manera vertical (para mandrinado y torneado) y radial (para careado [refrentado]) guiado por la corredera transversal. El cabezal puede girar a fin de producir orificios cónicos (ahusados). Las velocidades y los avances de corte son similares a los de torneado. (Para capacidades de operaciones de mandrinado, ver tabla 23.8).

Existen máquinas de mandrinado con varias características. Las capacidades de las máquinas son hasta de 150 kW (200 hp) y cuentan con controles numéricos por compu-

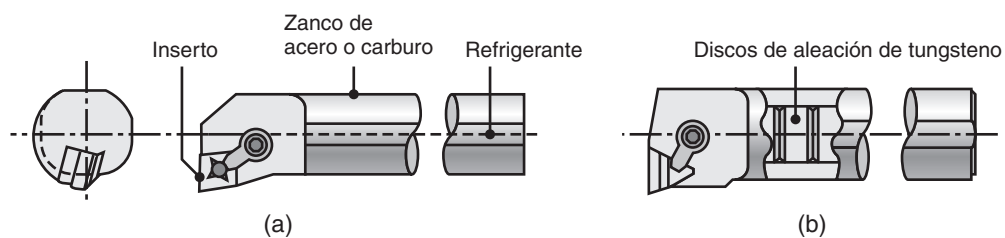


FIGURA 23.17 (a) Esquema de una barra para mandrinar de acero con un inserto de carburo. Nótese el orificio pasado en la barra para la aplicación de fluido de corte. (b) Esquema de una barra para mandrinar con “discos de inercia” de aleación de tungsteno sellados en la barra para contrarrestar la vibración y el traqueteo durante el mandrinado. Este sistema es eficaz para relaciones de longitud a diámetro hasta de 6 en barras para mandrinar.

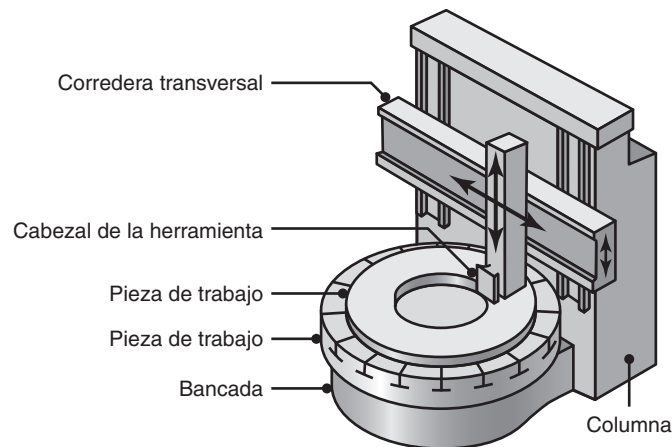


FIGURA 23.18 Esquema de una fresadora de mandrinado vertical o de columna. Dicha máquina puede manejar piezas de trabajo con tamaños hasta de 2.5 m (98 pulgadas) de diámetro.

tadora, que permiten programar todos los movimientos de la máquina. Se requiere poca participación del operador y se mejora la consistencia y productividad.

Los **mandrinadores de plantilla** o máquinas perforadoras verticales son máquinas verticales de mandrinado con rodamientos de alta precisión. Aunque existen diversos tamaños y se utilizan en cuartos de herramientas para hacer plantillas y aditamentos, en la actualidad están siendo reemplazados por máquinas de control numérico más versátiles.

Consideraciones de diseño para mandrinado. Los lineamientos para operaciones de mandrinado eficaces y económicas son similares a los de torneado. Además, se deben considerar los siguientes factores:

- Cada que sea posible, se deben especificar orificios pasados en lugar de orificios ciegos. Recuérdese que el término *orificio ciego* se refiere a un orificio que no pasa a través de todo el espesor de la pieza de trabajo.
- Cuanto mayor es la relación de longitud a diámetro del orificio, más difícil será mantener las dimensiones, por las deflexiones de la barra de mandrinado debidas a las fuerzas de corte, así como por la mayor tendencia a la vibración y el traqueteo.
- Se deben evitar superficies internas interrumpidas, como ranuras internas u orificios radiales que atraviesen el espesor de la parte.

23.5 | Taladrado, brocas y taladros

Al inspeccionar varios productos grandes o pequeños, obsérvese que la vasta mayoría tiene diversos orificios. Por ejemplo, nótese (a) el número de remaches en las alas y el fuselaje de un avión; (b) los pernos en monobloques y cabezas de motores, y (c) diversos productos de consumo e industriales. Por lo general, los orificios se utilizan para ensamble con sujetadores (como pernos, tornillos y remaches, cada uno de los cuales requiere un orificio) o para propósitos de diseño (como reducción de peso, ventilación, acceso al interior de las partes, por apariencia).

La **producción de orificios** es una de las operaciones más importantes de manufactura y el **taladrado** es un proceso básico y común de producción de orificios. Otras operaciones para producir orificios son el troquelado (como se describe en la sección 16.2) y

diversos procesos de maquinado avanzado (capítulo 27). El costo de la producción de orificios se encuentra entre los más elevados de maquinado en la producción de motores automotrices.

23.5.1 Brocas

En general, las *brocas* poseen altas relaciones de longitud a diámetro (fig. 23.19), por lo que tienen la capacidad de producir orificios relativamente profundos. Sin embargo, son de alguna manera flexibles y se deben utilizar con cuidado para taladrar orificios con precisión y evitar su ruptura. Además, las virutas que se producen dentro del orificio se mueven en dirección opuesta al movimiento de avance de la broca. Por lo tanto, la disposición de las virutas y la eficacia de los fluidos de corte pueden ocasionar serias dificultades en el taladrado.

Por lo general, las brocas dejan una *rebaba* en la superficie inferior tras la penetración, lo que hace necesarias operaciones de rebabeo (sección 26.8). Además, debido a su movimiento giratorio, el taladrado produce orificios con paredes que tienen marcas circunferenciales. En contraste, los orificios troquelados tienen marcas longitudinales (ver fig. 16.5a). Esta diferencia es significativa en términos de las propiedades de fatiga del orificio, como se describe en la sección 33.2.

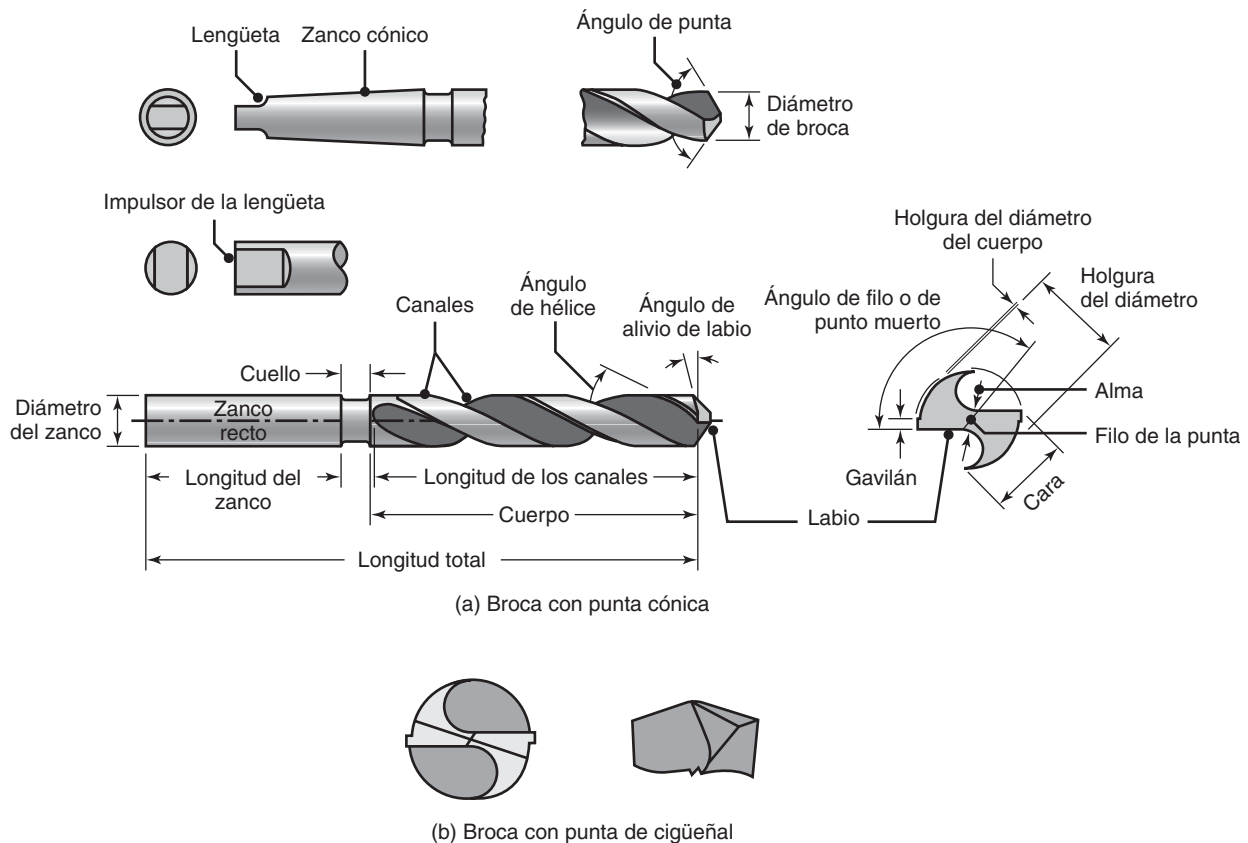


FIGURA 23.19 Dos tipos comunes de brocas: (a) Broca con punta cónica. La función del par de gavilanes es proporcionar una superficie de soporte para la broca contra las paredes del orificio conforme penetra en la pieza de trabajo. Existen brocas con cuatro gavilanes (*margen doble*) para su mejor guía y precisión. También existen brocas con características de rompevirutas. (b) Broca con punta de cigüeñal. Estas brocas tienen buena capacidad de centrado y, dado que las brocas tienden a romperse con facilidad, son adecuadas para producir orificios profundos.

El diámetro de un orificio producido por taladrado es ligeramente más grande que el diámetro de la broca (*sobredimensión*), como puede notarse al observar que una broca se retira con facilidad del orificio que acaba de producir. La medida de la sobredimensión depende de la calidad de la broca y del equipo utilizado, así como de las prácticas empleadas para el maquinado. Además, dependiendo de sus propiedades térmicas, algunos materiales metálicos o no metálicos se dilatan en forma considerable debido al calor que produce el taladrado, por lo que el diámetro final del orificio puede ser más pequeño que el diámetro de la broca. Para mejorar el acabado superficial y la precisión dimensional, los orificios taladrados se pueden someter a operaciones posteriores, como *escariado* y *honeado*. En la tabla 23.10 se muestran las capacidades de las operaciones de taladrado y mandrinado.

Broca helicoidal. La broca más común es la *broca helicoidal de punta estándar* (fig. 23.19a). La geometría de su punta es tal que el ángulo normal de ataque y la velocidad del filo de corte varían con la distancia a partir del centro de la broca. Las características principales de esta broca son (con los intervalos típicos de ángulos entre paréntesis): (a) *ángulo de la punta* (118° a 135°); (b) *ángulo de alivio del labio* (7° a 15°); (c) *ángulo de filo o borde biselado* (125° a 135°), y (d) *ángulo de la hélice* (15° a 30°).

Dos canales (*estrías*) espirales recorren la longitud de la broca, por donde se guían hacia arriba las virutas generadas. Los canales también sirven como pasajes que permiten que el fluido de corte llegue a los filos o bordes de corte. Algunas brocas tienen orificios longitudinales (por ejemplo, ver la broca mostrada en la fig. 23.22a) a través de los cuales se fuerzan fluidos, mejorando la lubricación y el enfriamiento, así como la eliminación de las virutas. Existen brocas con **rompevirutas** rectificadas a lo largo de los filos de corte. Esta característica es importante en el taladrado con maquinaria automatizada, donde resulta fundamental la remoción continua de virutas largas sin ayuda del operador.

Con base en la experiencia, se han desarrollado diversos ángulos en una broca; están diseñados para producir orificios precisos, minimizar las fuerzas de taladrado y torque y optimizar la vida de la broca. Los cambios pequeños en la geometría de la broca pueden tener un efecto significativo en su desempeño, sobre todo en la región de filo o borde biselado, que representa alrededor de 50% de la fuerza de empuje en el taladrado. Por ejemplo, un ángulo de alivio del labio demasiado pequeño (fig. 23.19a) incrementa la fuerza de empuje, genera calor excesivo y aumenta el desgaste. Por el contrario, un ángulo demasiado grande puede causar astillado o ruptura de la arista de corte. Además de las brocas de punta convencional, se han desarrollado muchas otras geometrías de puntas de brocas con el fin de mejorar su desempeño y aumentar la velocidad de penetración. Para producir estas geometrías se utilizan técnicas y equipo especiales de rectificado.

Otros tipos de brocas. En la figura 23.20 se muestran diversos tipos de brocas. Una *broca escalonada* produce orificios con dos o más diámetros diferentes. Se utiliza una *broca de núcleo o sondeo* para agrandar un orificio existente. Las *brocas de abocardar y avellanar* producen depresiones en la superficie para acomodar las cabezas de tornillos y

TABLA 23.10

Capacidades generales de las operaciones de taladrado y mandrinado			
Tipo de herramienta de corte	Intervalo de diámetros (mm)	Profundidad/Diámetro del orificio	
		Típico	Máximo
Helicoidal	0.5–150	8	50
Paleta	25–150	30	100
Cañones	2–50	100	300
Trepanado	40–250	10	100
Mandrinado	3–1200	5	8

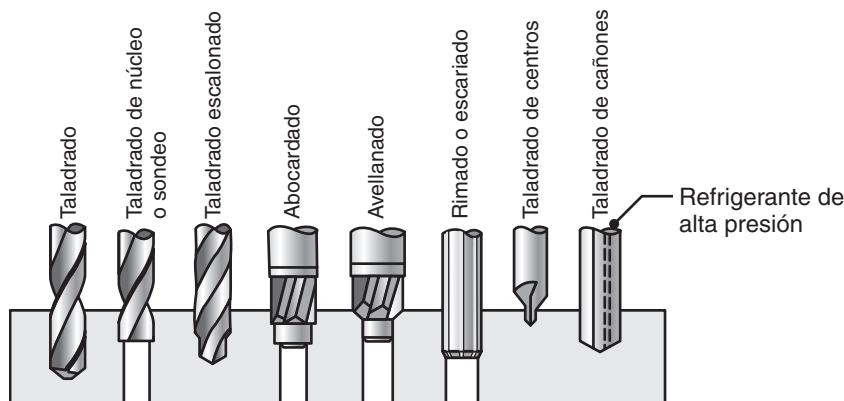


FIGURA 23.20 Diversos tipos de brocas y operaciones de taladrado y escariado.

pernos bajo el nivel de la superficie de la pieza de trabajo. Una *broca de centros* es corta y se utiliza para producir un orificio en el extremo final de una pieza de material, de manera que se pueda montar entre los centros del cabezal y el cabezal móvil o contrapunto de un torno (fig. 23.2). Se emplea una *broca de punto o piloto* para marcar (iniciar) un orificio en la ubicación deseada de una superficie.

Las *brocas de paleta o tipo espada* (fig. 23.21a) poseen puntas o barrenas removibles y producen orificios profundos de diámetro grande. Tienen las ventajas de mayor rigidez (debido a la ausencia de estrías en el cuerpo de la broca), facilidad de rectificar los filos de corte y menor costo. Una broca similar es la *broca de estrías rectas* (fig. 23.21b).

Existen brocas de carburo sólido y con punta de carburo (fig. 23.21c y d) para taladrar materiales duros (como hierros fundidos), metales de alta temperatura, materiales abrasivos (como concreto y ladrillo; *brocas para mampostería*) y materiales compósitos con refuerzos de fibras abrasivas (como vidrio y grafito).

Taladrado de cañones. Desarrollado originalmente para taladrar cañones de armas, el *taladrado de cañones* se utiliza para taladrar orificios profundos y requiere una broca

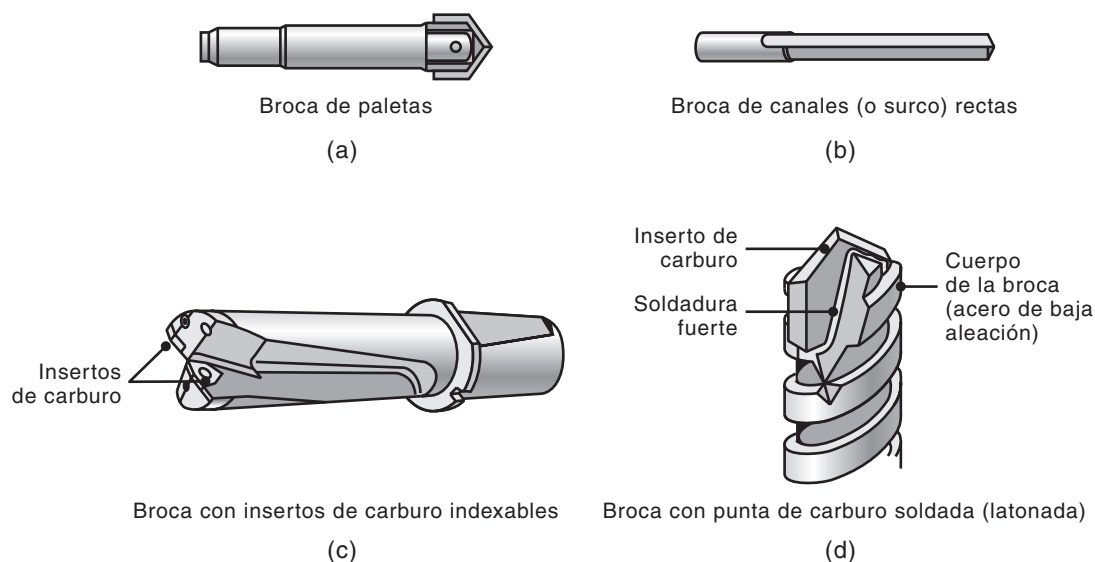


FIGURA 23.21 Diversos tipos de brocas.

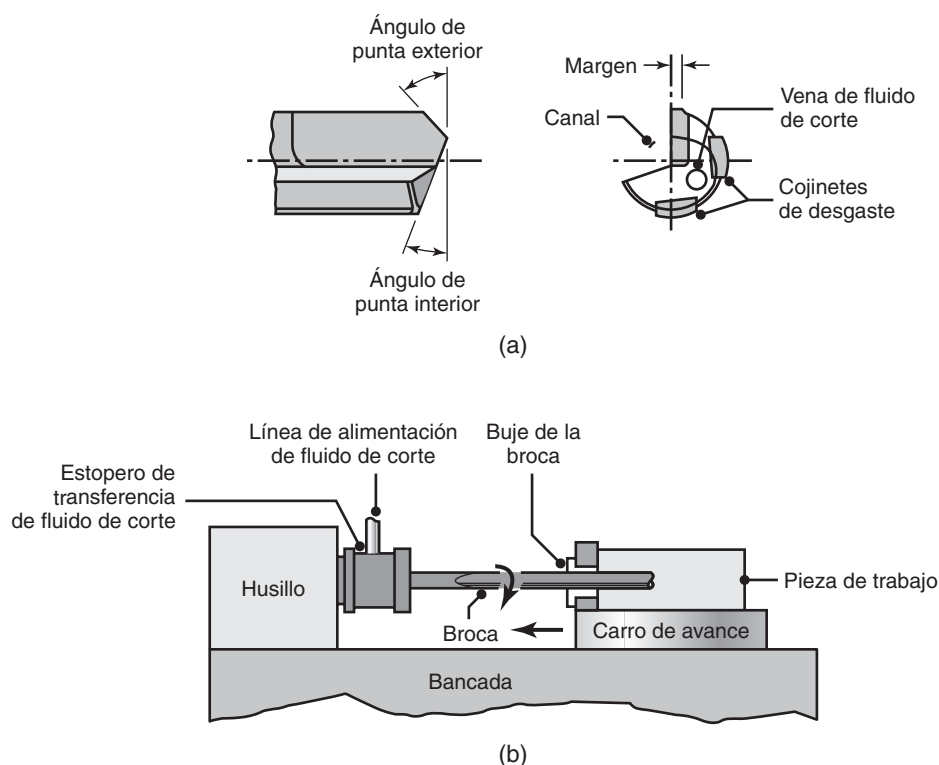


FIGURA 23.22 (a) Broca de cañón que muestra varias características. (b) Esquema de la operación de taladrado de cañón.

especial (fig. 23.22). La relación de profundidad a diámetro de los orificios producidos puede ser de 300:1 o incluso más. La fuerza de empuje (la fuerza radial que tiende a oprimir las guías laterales de la broca) se equilibra mediante placas de soporte en la broca que se desliza a lo largo de la superficie interna del orificio. Por lo tanto, la broca de cañón se centra por sí misma, característica importante al taladrar orificios rectos y profundos. Una variación de este proceso es el **trepanado de cañones** (ver la siguiente subsección), que utiliza una herramienta de corte similar a la broca de cañón, excepto porque la herramienta tiene un orificio central.

Por lo general, las velocidades de corte en el taladrado de cañones son altas, y los avances, bajos. Las tolerancias son de alrededor de 0.025 mm (0.001 pulgada). El fluido de corte se fuerza a alta presión a través de un orificio (pasaje) longitudinal en el cuerpo de la broca (fig. 23.22a). Además de su función de lubricar y enfriar la pieza de trabajo, el fluido drena las virutas con la operación de taladrado. La herramienta no tiene que retraerse para eliminar las virutas, como generalmente se hace con las brocas helicoidales.

Trepanado. En el *trepanado*, la herramienta de corte (fig. 23.23a) produce un orificio removiendo una pieza con forma de disco (*núcleo*), generalmente de placas planas. Por lo tanto, se produce un orificio sin reducir a virutas todo el material retirado, como es el caso en el taladrado. El proceso se basa en el término griego *trypanon*, que significa “perforar un orificio”. El proceso de trepanado se puede utilizar para hacer discos hasta de 250 mm (10 pulgadas) de diámetro a partir de láminas planas, placas o miembros estructurales como vigas I. También puede emplearse para realizar ranuras circulares en las que se van a colocar anillos tipo O (de manera similar a la fig. 23.1f). Es posible efectuar el trepanado en tornos, taladradoras de columnas, u otras máquinas herramienta que usen herramientas de una sola punta o de puntas múltiples, como se muestra en la figura 23.23b.

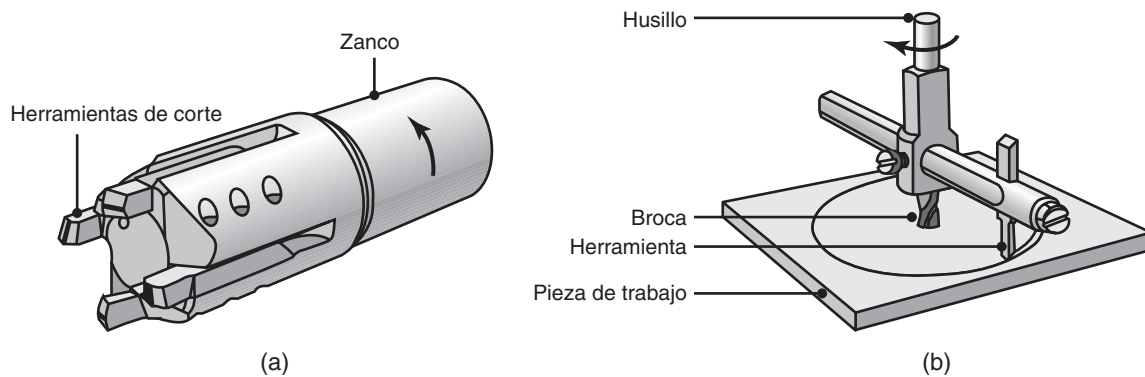


FIGURA 23.23 (a) Herramienta de trepanado. (b) Trepanado con un cortador simple montado en una broca.

23.5.2 Velocidad de remoción de material en el taladrado

La *velocidad de remoción de material* (MRR, por sus siglas en inglés) en el taladrado es el volumen de material removido por unidad de tiempo. Para una broca con un diámetro D , el área transversal del orificio taladrado es $\pi D^2/4$. La velocidad de la broca, perpendicular a la pieza de trabajo, es el producto del avance, f (la distancia que la broca penetra por cada revolución), y la velocidad de rotación, N , en la que $N = V/\pi D$. Por lo que,

$$\text{MRR} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) f N \quad (23.3)$$

Se puede verificar la precisión dimensional de esta ecuación, como se hizo para la ecuación 23.1, considerando que $\text{MRR} = (\text{mm}^2)(\text{mm/rev})(\text{rev/min}) = \text{mm}^3/\text{min}$, que es la unidad correcta para el volumen removido por unidad de tiempo.

23.5.3 Fuerza de empuje y torque

La *fuerza de empuje* en el taladrado actúa perpendicular al eje del orificio; si esta fuerza es excesiva, puede provocar que la broca se doble o se rompa; también puede distorsionar la pieza de trabajo, en particular si no tiene suficiente rigidez (por ejemplo, estructuras delgadas de lámina metálica), o hacer que la pieza se deslice dentro del aditamento de sujeción del trabajo.

La fuerza de empuje depende de factores como (a) la resistencia del material de la pieza de trabajo; (b) el avance; (c) la velocidad de rotación; (d) el diámetro de la broca; (e) la geometría de la broca, y (f) los fluidos de corte. Es difícil calcular con precisión las fuerzas de empuje en la broca; por lo general, van de unos cuantos newtons, para brocas pequeñas, hasta 100 kN (23.5 klb) para taladrar materiales de alta resistencia con brocas grandes. Existen datos experimentales disponibles como ayuda en el diseño y uso de brocas y equipo de taladrado.

Torque. En el taladrado, resulta fundamental conocer la magnitud del *torque* para estimar el requerimiento de potencia; sin embargo, es difícil de calcular debido a los muchos factores implicados. El torque se puede estimar a partir de los datos proporcionados en la tabla 21.2, considerando que la potencia disipada durante el taladrado es el producto del torque y la velocidad de rotación y que primero tenemos que calcular la velocidad de remoción de material. El torque en el taladrado puede ser hasta de 4000 N · m (3000 lb-pie).

EJEMPLO 23.4 Velocidad de remoción de material y torque en el taladrado

Se está taladrando un orificio en un bloque de aleación de magnesio con una broca de 10 mm, con un avance de 0.2 mm/rev y con el husillo funcionando a $N = 800$ rpm. Calcule la velocidad de remoción de material y el torque en la broca.

Solución Primero se calcula la velocidad de remoción de material a partir de la ecuación 23.3:

$$\text{MRR} = \left[\frac{(\pi)(10)^2}{4} \right] (0.2)(800) = 12,570 \text{ mm}^3/\text{min} = 210 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Según la tabla 21.2, tomemos una unidad promedio de potencia de $0.5 \text{ W} \cdot \text{s}/\text{mm}^3$ para aleaciones de magnesio. Así que la potencia requerida es

$$\text{Potencia} = (210)(0.5) = 105 \text{ W}$$

La potencia es producto del torque en el taladro y la velocidad de rotación, que en este caso es $(800)(2\pi)/60 = 83.8$ radianes por segundo. Considerando que $\text{W} = \text{J/s}$ y $\text{J} = \text{N} \cdot \text{m}$, encontramos que

$$T = \frac{105}{83.8} = 1.25 \text{ N} \cdot \text{m}$$

23.5.4 Materiales y dimensiones de las brocas

Por lo regular, las brocas se producen con aceros de alta velocidad (M1, M7 y M10) y carburos sólidos o con puntas de carburo (generalmente fabricadas con carburo K20 [C2]), como las que se muestran en la figura 23.21c y d. En la actualidad, es común recubrir las brocas con nitruro de titanio o carbonitruro de titanio para aumentar su resistencia al desgaste (sección 22.5). Las brocas recubiertas con diamante policristalino se utilizan para producir orificios para sujeción en plásticos reforzados con fibras. Debido a su alta resistencia al desgaste, se pueden taladrar varios miles de orificios con poco daño al material.

Aunque se encuentran en desarrollo continuo, los tamaños estándar de las brocas helicoidales se dan básicamente en las siguientes series:

Numérica: Del No. 97 (0.0059 pulgada) al No. 1 (0.228 pulgada).

Letra: De la A (0.234 pulgada) a la Z (0.413 pulgada).

Fraccional: Zanco recto de $\frac{1}{64}$ a $1\frac{1}{4}$ pulgadas (en incrementos de $\frac{1}{64}$ de pulgada) a $1\frac{1}{2}$ pulgadas (en incrementos de $\frac{1}{32}$ de pulgada) y brocas más grandes en incrementos más grandes. Zanco cónico de $\frac{1}{8}$ a $1\frac{3}{4}$ pulgadas (en incrementos de $\frac{1}{64}$ de pulgada) a 3.5 pulgadas (en incrementos de $\frac{1}{16}$ de pulgada).

Milimétricas: De 0.05 mm (0.002 pulgada) en incrementos de 0.01 mm.

23.5.5 Prácticas de taladrado

Por lo general, las brocas y herramientas similares para la producción de orificios se sujetan mediante los *portabrocas* o *broqueros*, que se pueden sujetar con o sin chavetas. Existen diversos mandriles y boquillas especiales con varias características de cambio rápido que no requieren detener el husillo para su uso en maquinaria de producción.

Como no tienen una acción de centrado, las brocas tienden a “caminar” sobre la superficie de la pieza de trabajo al inicio de la operación. Este problema es particularmente severo con brocas largas de diámetro pequeño y puede producir fallas. Para iniciar un orificio de manera apropiada, se debe guiar la broca mediante aditamentos (como un buje) a fin de evitar que se curve de modo lateral. Se puede hacer un orificio inicial pequeño

con una *broca de centro* (por lo general con un ángulo de punto de 60°), o rectificar en forma de *S (punta helicoidal o espiral)* la punta de la broca. Esta forma tiene una característica de autocentrado, eliminando la necesidad de efectuar el taladrado de centros, y produce orificios precisos y con mejor vida de la broca. Estos factores son muy importantes en la producción automatizada con máquinas de CNC, en las que la práctica usual es utilizar una broca de punto o piloto. Para mantener la broca más centrada, se hacen coincidir los ángulos de la punta de la broca de punto y de la broca. Otras opciones para minimizar el desplazamiento de la broca consisten en usar un punzón de centrado para producir una impresión inicial en la que comienza el taladrado, o incluso para incorporar hoyuelos u otras características en la pieza en bruto fundida o forjada.

Recomendaciones de taladrado. En la tabla 23.11 se dan los intervalos recomendados para velocidades y avances de taladrado. La velocidad es la velocidad superficial de la broca en su periferia. Por lo tanto, una broca de 0.5 pulgada (12.7 mm) que gira a

300 rpm tiene una velocidad superficial de $\left(\frac{0.5}{2} \text{ pulgada}\right) (300 \text{ rev/min})(2\pi \text{ rad/rev})$ $\left(\frac{1}{12} \text{ de pie/pulgada}\right) = 39 \text{ pies/min} = 12 \text{ m/min}$. Cuando los orificios de taladrado son menores a 1 mm (0.040 pulgada) de diámetro, las velocidades de rotación pueden ser hasta de 30,000 rpm, dependiendo del material de la pieza de trabajo.

El *avance* en taladrado es la distancia que la broca avanza por revolución dentro de la pieza de trabajo. Por ejemplo, en la tabla 23.11 se recomienda que para la mayoría de los materiales, una broca de 1.5 mm (0.060 pulgada) de diámetro debe avanzar a 0.025 mm/rev. Si la columna de velocidad en la tabla indica que la broca tiene que rotar a, por decirlo así, 2000 rpm, entonces debe avanzar en la pieza de trabajo a una velocidad lineal de $(0.025 \text{ mm/rev})(2000 \text{ rev/min}) = 50 \text{ mm/min} = 2 \text{ pulgadas/min}$.

La *remoción de virutas* durante el taladrado puede ser difícil, en especial para orificios profundos en materiales blandos y dúctiles de piezas de trabajo. La broca debe retraerse (*dentelleo*) periódicamente para retirar las virutas que se acumulen a lo largo de los canales. De lo contrario, puede romperse debido al toque excesivo, o “caminar” fuera de la ubicación y producir un orificio malformado. En la tabla 23.12 se da una guía general de las posibles causas de problemas en las operaciones de taladrado.

Reacondicionamiento de brocas. Las brocas se reacondicionan rectificándolas manualmente o utilizando aditamentos especiales. Es importante su reacondicionamiento adecuado, en particular si se usan para manufactura automatizada en máquinas de

TABLA 23.11

Recomendaciones generales de velocidades y avances en taladrado						
Material de la pieza de trabajo	Diámetro de la broca					
	Velocidad superficial		Avance, mm/rev (pulgadas/rev)		rpm	
	m/min	pies/min	1.5 mm (0.060 pulgada)	12.5 mm (0.5 pulgada)	1.5 mm	12.5 mm
Aleaciones de aluminio	30–120	100–400	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	6400–25,000	800–3000
Aleaciones de magnesio	45–120	150–400	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	9600–25,000	1100–3000
Aleaciones de cobre	15–60	50–200	0.025 (0.001)	0.25 (0.010)	3200–12,000	400–1500
Aceros	20–30	60–100	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	4300–6400	500–800
Aceros inoxidables	10–20	40–60	0.025 (0.001)	0.18 (0.007)	2100–4300	250–500
Aleaciones de titanio	6–20	20–60	0.010 (0.0004)	0.15 (0.006)	1300–4300	150–500
Hierros fundidos	20–60	60–200	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	4300–12,000	500–1500
Termoplásticos	30–60	100–200	0.025 (0.001)	0.13 (0.005)	6400–12,000	800–1500
Termofijos	20–60	60–200	0.025 (0.001)	0.10 (0.004)	4300–12,000	500–1500

Nota: Conforme aumenta la profundidad del orificio, se deben reducir las velocidades y avances. La selección de velocidades y avances también depende del acabado superficial específico requerido.

TABLA 23.12

Guía general de resolución de problemas para operaciones de taladrado	
Problema	Causas probables
Ruptura de la broca	Broca desafilada, agarrotamiento de la broca en el orificio por atascamiento de virutas en los canales, avance demasiado alto, ángulo de alivio demasiado pequeño.
Desgaste excesivo de la broca	Velocidad de corte demasiado alta, fluido de corte ineficaz, ángulo de ataque demasiado alto, broca quemada y disminución de la resistencia al afilarse.
Orificio ahusado	Broca mal alineada o doblada, ángulos de los gavilanes desiguales, alma descentrada.
Orificio sobre-dimensionado	Igual que la anterior, husillo de la máquina flojo, filo del cortador descentrado, fuerza lateral en la pieza de trabajo.
Mal acabado de la superficie del orificio	Broca desafilada, fluido de corte ineficaz, soldadura del material de la pieza de trabajo en el margen de la broca, broca rectificadora inadecuadamente, alineación incorrecta.

control numérico por computadora. El rectificado manual es difícil y requiere experiencia considerable para producir filos o aristas de corte simétricos. El rectificado en aditamentos es preciso y se efectúa en rectificadoras especiales controladas por computadora. Las brocas cubiertas se pueden recubrir.

Medición de la vida de una broca. La vida de una broca, como la vida de un machuelo, se mide generalmente por el número de orificios taladrados antes de desafilarse. El procedimiento de prueba consiste en sujetar un bloque de material en un dinamómetro apropiado o transductor de fuerza y taladrar una cantidad de orificios en tanto se registra el torque o la fuerza de empuje durante cada operación sucesiva. Después de haber taladrado cierta cantidad de orificios, el torque y la fuerza empiezan a aumentar debido a que la herramienta se desafila. La *vida de una broca* se define como la cantidad de orificios taladrados hasta que empieza esta transición. También se pueden utilizar otras técnicas, como la supervisión de vibración y de emisiones acústicas (sección 21.5.4), para determinar la vida de la broca.

23.5.6 Taladros

Los taladros se utilizan en operaciones de taladrado de orificios y para machuelear, escariar y perforar diámetros pequeños. El taladro más común es la **taladradora de columna o vertical**, cuyos principales componentes se muestran en la figura 23.24a. La pieza de trabajo se coloca en una mesa ajustable, ya sea sujetándola directamente en las ranuras y orificios del mueble, o utilizando una prensa de banco, que a su vez se sujeta a la mesa. La broca se baja con un volante manual, o mediante un avance accionado de manera mecánica a velocidades preestablecidas. El avance manual requiere cierta experiencia en la determinación de la velocidad adecuada.

Por lo general, las taladradoras de columna se denominan por el diámetro más grande de la pieza de trabajo que se puede acomodar en la mesa y suelen ir de 150 mm a 1250 mm (6 a 50 pulgadas). Para mantener las velocidades de corte adecuadas en los filos de corte de las brocas, la velocidad del husillo en las taladradoras tiene que ser ajustable para poder utilizar diferentes tamaños de brocas. Los ajustes se hacen por medio de poleas, caja de engranes o motores de velocidad variable.

Los tipos de taladradoras van desde simples *taladradoras tipo banco*, utilizadas para taladrar orificios de diámetro pequeño, hasta *taladradoras radiales* grandes (fig. 23.24b), que pueden soportar piezas de trabajo grandes. La distancia entre la columna y el centro del husillo puede ser hasta de 3 m (10 pies). El cabezal de taladrado de las *taladradoras universales* puede girarse para taladrar orificios en ángulo. Los desarrollos en las taladradoras incluyen máquinas de tres ejes con control numérico por computadora, en las que las operaciones se efectúan automáticamente y en la secuencia deseada con el

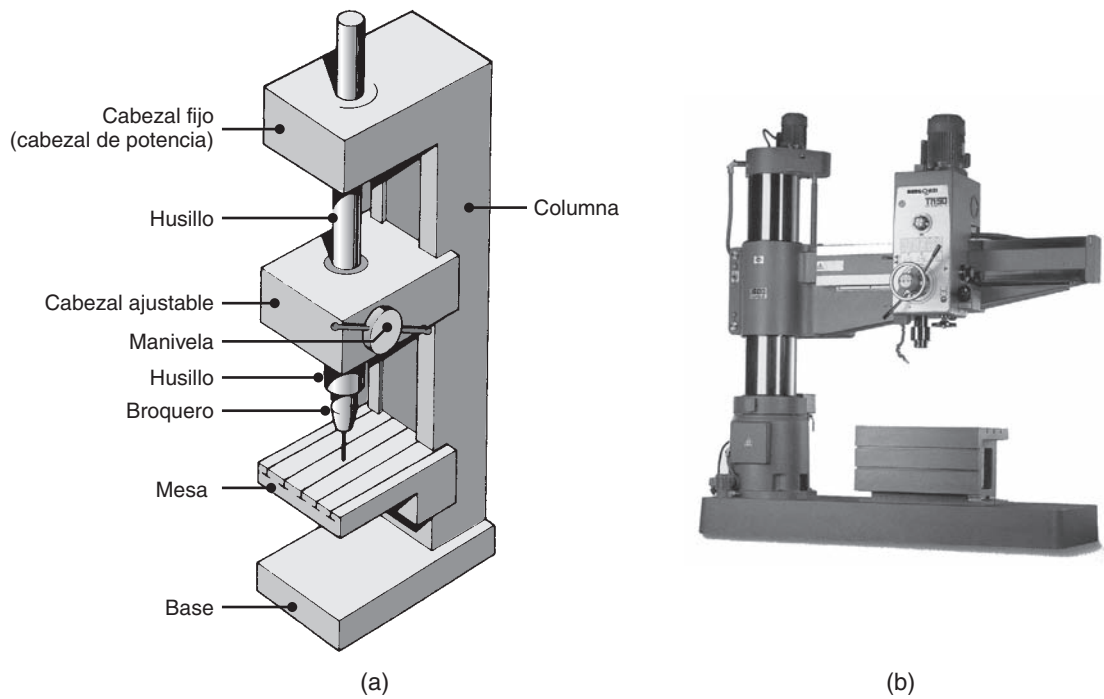


FIGURA 23.24 (a) Esquema de los componentes de un taladro de columna vertical. (b) Taladro radial. Fuente: (b) Cortesía de Willis Machinery and Tools.

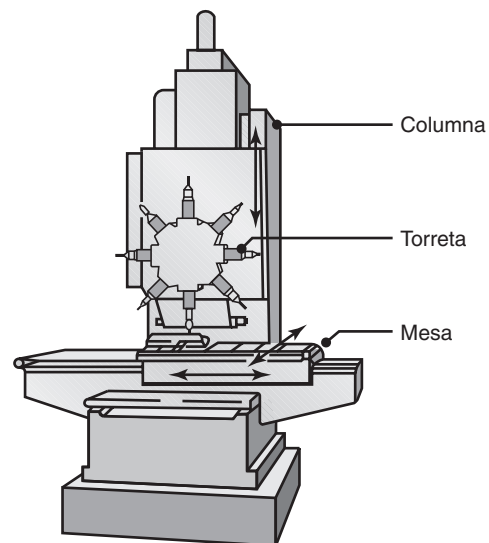


FIGURA 23.25 Taladro de tres ejes con control numérico por computadora. La torreta o carrusel sostiene hasta ocho diferentes herramientas, como brocas, machuelos y rimas.

uso de una torreta (fig. 23.25). Obsérvese que la torreta (revólver) sostiene diferentes herramientas de taladrado.

Las taladradoras con husillos múltiples (**taladradoras múltiples**) se utilizan en operaciones de alta velocidad de producción. Estas máquinas tienen la capacidad de taladrar, en un ciclo, hasta 50 orificios de diversos tamaños, profundidades y ubicaciones. También se pueden usar en operaciones de escariado y abocardado. Sin embargo, con los avances en las máquinas herramienta, en la actualidad las taladradoras múltiples han sido reemplazadas por las *taladradoras de torreta de control numérico*. Las taladradoras especiales, como las empleadas para producir orificios en bisagras continuas (*bisagras para pianos*), utilizan brocas helicoidales de 1 mm (0.040 pulgada) de diámetro. Por lo general, estas máquinas son horizontales y producen orificios en segmentos hasta de 3 m (10 pies) de largo en un ciclo.

Los *dispositivos de sujeción del trabajo* para taladrar son fundamentales para asegurar que la pieza de trabajo se ubique de manera adecuada; también evitan que se deslice o gire durante el taladrado. Existen dispositivos de sujeción del trabajo en varios diseños; las características importantes son (a) localización de tres puntos para obtener precisión, y (b) la sujeción tridimensional del trabajo, a fin de asegurar su fijación. (Ver también la sección 37.8).

23.5.7 Consideraciones de diseño para taladrado

Los lineamientos básicos de diseño para taladrado son los siguientes:

- Los diseños deben permitir que los orificios se taladren en superficies planas y perpendiculares al movimiento de la broca. De lo contrario, ésta tiende a doblarse y el orificio no se ubica con precisión. Las superficies de salida de la broca también deben ser planas.
- Se deben evitar o minimizar las superficies interrumpidas de orificios para mejorar la precisión dimensional, la vida de la broca e impedir vibraciones.
- Los fondos de los orificios deben coincidir, si es posible, con los ángulos estándar de la punta de la broca; deben evitarse los fondos planos o de formas irregulares.
- Son preferibles los orificios pasados a los ciegos. Si se requieren orificios con diámetros grandes, la pieza de trabajo debe tener un orificio preexistente, de preferencia producido durante la fabricación de la parte (por fundición, metalurgia de polvos o formado). En caso de que no sea práctico hacer orificios, deben producirse hoyuelos para reducir la tendencia a que la broca “camine”.
- Las partes deben diseñarse de manera que todo el taladrado se pueda efectuar con un mínimo de fijación y sin tener que reposicionar la pieza de trabajo.
- Los orificios ciegos deben taladrarse con mayor profundidad que los que se obtengan con las operaciones de rimado o machueleado que se puedan realizar posteriormente.

23.6 | Rimado y rimas

El *rimado* (escariado) es una operación utilizada para (a) hacer que un orificio ya existente sea más preciso dimensionalmente que el obtenido sólo con taladrado, y (b) mejorar su acabado superficial. Los orificios más precisos en las piezas de trabajo suelen producirse mediante la siguiente secuencia de operaciones:

- | | |
|-------------|--------------|
| 1 Centrado | 3 Mandrinado |
| 2 Taladrado | 4 Rimado |

Para obtener precisión y acabado superficial todavía mejores, los orificios se pueden *bruñir* o *rectificar* u *honear* internamente (secciones 26.6 y 26.10).

Una *rima* (fig. 23.26a) es una herramienta con múltiples filos de corte, con bordes rectos o helicoidalmente estriados o acanalados que remueven muy poco material. Por lo

común, en metales blandos, una rima remueve un mínimo de 0.2 mm (0.008 pulgada) en el diámetro de un orificio taladrado y para metales más duros alrededor de 0.13 mm (0.005 pulgada). Los intentos por retirar capas más pequeñas pueden ser perjudiciales, ya que se dañaría la rima o se bruñiría la superficie del orificio (ver también fig. 21.22 como analogía). En este caso, es preferible el honeado. Por lo general, las velocidades de la rima son la mitad de la de la broca del mismo tamaño y tres veces la velocidad de avance.

Las *rimas manuales* son rectas y tienen un extremo cónico en el primer tercio de su longitud. Existen diversas *rimas* o *escariadores* (también conocidas como *rimas de broquero*, porque se montan en un broquero o mandil y se accionan mediante una máquina) de dos tipos: (1) las *rimas tipo rosa* tienen filos de corte con amplios márgenes y sin alivio o desahogo (fig. 23.26a). Éstas retiran una cantidad considerable de material y nivelan un orificio para el rimado de estrías. (2) Las *rimas estriadas o acanaladas* tienen pequeños márgenes y alivio con un ángulo de ataque de 5°. Por lo general, se utilizan para cortes ligeros de alrededor de 0.1 mm (0.004 pulgada) en el diámetro del orificio.

Las *rimas huecas* (que se montan en un eje) son empleadas por lo general para orificios mayores a 20 mm (0.75 pulgada). Las *rimas de expansión* son ajustables para pequeñas variaciones en el tamaño del orificio y también para compensar por el desgaste de los filos de corte de la rima. Las *rimas ajustables* (fig. 23.26b) se pueden ajustar para diámetros específicos de orificios y, por lo tanto, son versátiles.

Las rimas deben sostenerse con rigidez (en un mandril o *chuck*), o pueden *flotar* en sus aditamentos de sujeción para asegurar la alineación o *pilotearse* en bujes guía colocados arriba y debajo de la pieza de trabajo. Un mayor desarrollo en el rimado consiste en la *broca-rima* (*rma de ensueño*), herramienta que combina taladrado y rimado. La punta de la herramienta produce un orificio por taladrado y el resto de la misma efectúa una operación de rimado. Un desarrollo similar comprende taladrado y rimado en una carrera utilizando una sola herramienta.

Por lo general, las rimas se fabrican con aceros de alta velocidad (M1, M2 y M7) o carburos sólidos (K20; C2), o tienen filos de corte de carburo. El mantenimiento y reacondicionamiento de las rimas es importante para dar precisión y acabado superficial al orificio.

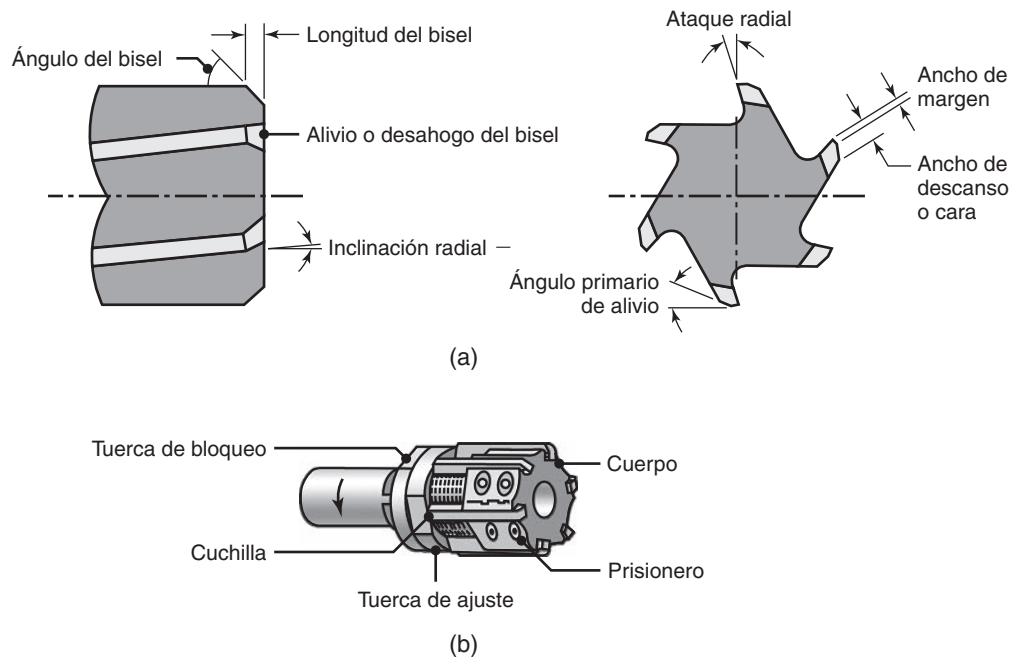


FIGURA 23.26 (a) Terminología de una rima helicoidal. (b) Rima ajustable de cuchilla insertada.

23.7 Machueleado y machuelos

Las roscas internas en las piezas de trabajo se pueden producir mediante *machueleado*. Un *machuelo* es una herramienta de roscado que produce virutas mediante múltiples dientes de corte (fig. 23.27a). En general, existen machuelos con dos, tres o cuatro canales. El machuelo de producción más común es el de punta espiral de dos canales, que fuerza las virutas hacia el interior del orificio, de manera que es necesario retraer el machuelo sólo al final del corte. Los machuelos de tres canales son más fuertes, debido a que existe más material en el canal. Los tamaños de los machuelos son hasta de 100 mm (4 pulgadas).

Los *machuelos cónicos* están diseñados para reducir el torque requerido para el machueleado de orificios pasados. Los *machuelos de fondo* se emplean en el machueleado de orificios o agujeros ciegos hasta su profundidad total. Los *machuelos colapsables* se utilizan en orificios de diámetro grande; después de completar el machueleado, el machuelo se desmonta mecánicamente y se retira del orificio sin rotación.

La remoción de virutas puede ser un problema significativo durante el machueleado, debido a los pequeños espacios comprendidos. Si las virutas no se retiran de manera adecuada, el torque excesivo que se produce puede romper el machuelo. El uso de un fluido de corte y la inversión y remoción periódica del machuelo del orificio son medios efectivos de remoción de virutas y de mejora de la calidad del orificio machueleado. Para mejorar la productividad del machueleado, se puede combinar con el taladrado en una sola herramienta (*broca-machuelo*); ésta tiene una sección de taladrado en la punta, seguida de una sección de machueleado.

El machueleado se puede efectuar de manera *manual* o con máquinas como (a) taladros; (b) tornos; (c) máquinas roscadoras automáticas, y (d) máquinas fresadoras verticales CNC que combinan la rotación correcta relativa y el avance longitudinal. Existen máquinas especiales de machueleado con características para múltiples operaciones de machueleado. Los cabezales con husillos múltiples de machuela se utilizan ampliamente, sobre todo en la industria automotriz, en la que de 30% a 40% de las operaciones de maquinado comprenden el machuelado de orificios. En la figura 23.27b se muestra un sistema para el machueleado automático de tuercas.

Con la lubricación adecuada, la vida de un machuelo puede ser hasta de 10,000 orificios; se puede determinar con la misma técnica utilizada para medir la vida de una broca. Es común fabricar machuelos con aceros de alta velocidad (M1, M2, M7 y M10). La productividad en las operaciones de machueleado se puede mejorar mediante *machueleado de alta velocidad*, con velocidades superficiales hasta de 100 m/min (350 pies/min). También se han mejorado los sistemas de machueleado de *autoinversión* de manera significativa y en la actualidad se usan con máquinas herramienta controladas por computadora. Las velocidades de operación pueden ser tan altas como 5000 rpm, aunque las velocidades de corte reales en la mayoría de las aplicaciones son considerablemente bajas. Los tiempos de los ciclos suelen ser de 1 a 2 segundos.

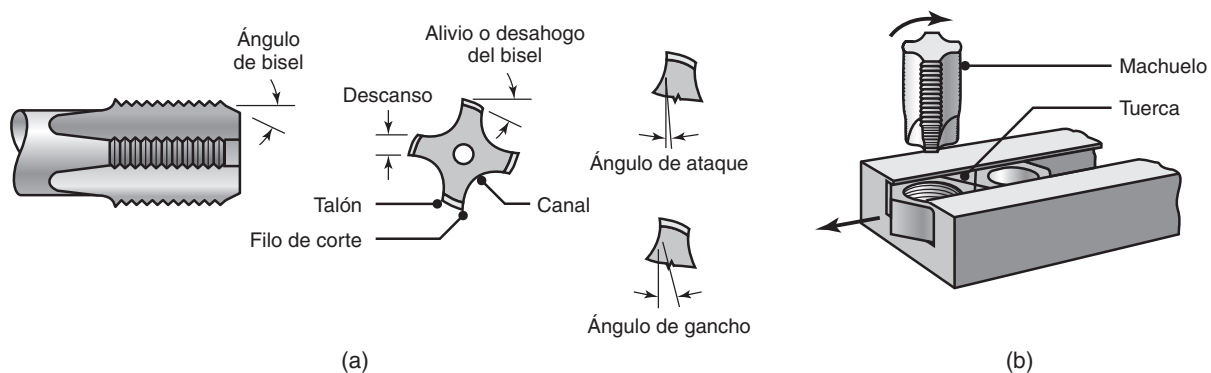


FIGURA 23.27 (a) Terminología de un machuelo. (b) Machueleado de tuercas de acero en producción.

En la actualidad, algunos sistemas de machueleado pueden dirigir el fluido de corte a una zona de corte a través del husillo y un orificio en el machuelo, que también ayuda a desechar las virutas del orificio que se está machueleando. El **machueleado sin virutas** es un proceso de laminación interna de roscas utilizando un machuelo formador (sección 13.5).

ESTUDIO DE CASO 23.1 Retenedor de tornillo para huesos

En la figura 23.28a se muestra un implante de espina cervical. En caso de que un paciente requiera una fusión del hueso cervical en uno o más niveles vertebrales, este implante puede actuar como estabilizador interno, limitando la cantidad de movimiento en esta región para ayudar a promover una fusión exitosa. La placa se fija en la parte anterior de la espina con tornillos para hueso, que pasan a través de la placa y dentro del hueso. La superficie inferior de la placa es muy rugosa, lo que ayuda a mantener la placa en su lugar mientras se insertan los tornillos para hueso.

Una inquietud con este tipo de implante es la posibilidad de que los tornillos para hueso se aflojen con el tiempo, debido a la carga normal repetitiva del paciente. En casos extremos esto puede provocar que el tornillo se salga, haciendo que la cabeza del tornillo ya no se alinee con la placa; tal condición es obviamente poco deseable. Este implante utiliza un retén para evitar que el tornillo del hueso se salga de la placa.

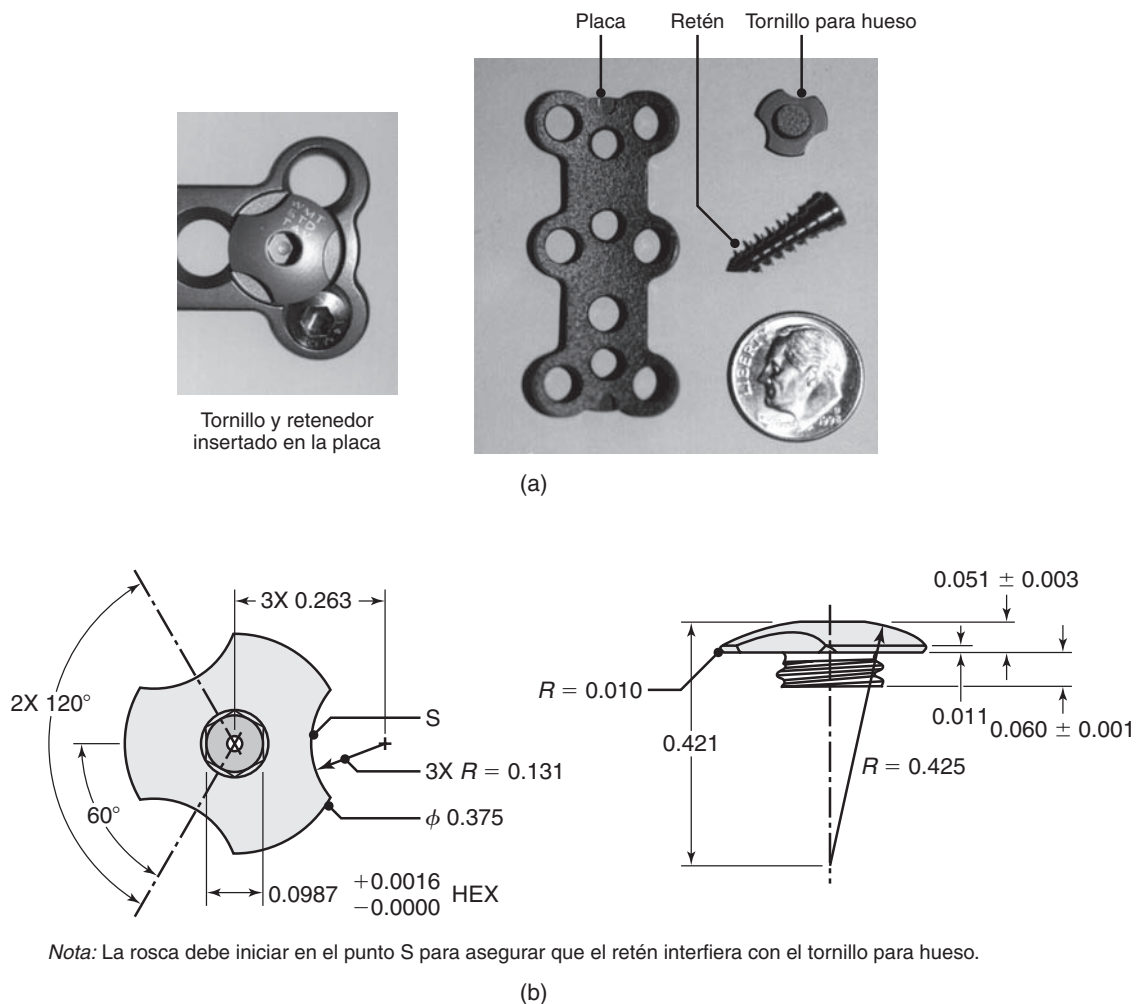


FIGURA 23.28 Implante de espina cervical. Todas las dimensiones en pulgadas.

En la mitad derecha de la figura 23.28b se muestra el dibujo de la parte correspondiente al retén.

El retén tiene varias características de diseño que son fundamentales para su correcto funcionamiento y sin complicar el procedimiento quirúrgico. Para facilitar su uso en cirugía, la placa se suministra con los retenes ya colocados y muescas circulares alineadas con los orificios de los tornillos para hueso. Esto permite al cirujano insertar dichos tornillos sin interferencia del retén. Una vez insertados, el médico gira el retén algunos grados para capturar cada una de las cabezas de los tornillos. Para asegurar la orientación adecuada del retén en la placa, la rosca de su vástago debe iniciar en la misma ubicación axial que el punto S en la figura 23.28b.

En la figura 23.28b se muestran los pasos de manufactura para producir esta parte. Primero se coloca una barra Ti-6Al-4V de 0.5 pulgada de diámetro en un torno CNC y se refrenta; después se tornea el área roscada hasta obtener el diámetro necesario para maquinar las roscas. Se tornea la rosca en el vástago, pero con una longitud mayor que la finalmente requerida, debido a las dificultades para conseguir roscas de alta calidad al inicio del maquinado. Luego se tornea la tapa al diámetro requerido y se maquina el radio de 0.10 pulgada en la parte inferior de la cabeza. La parte se extrae, inspecciona y coloca en otro torno CNC, en el que se refrenta hasta la longitud requerida. Se maquina el radio esférico en la tapa, se taladra el orificio central y se somete a brochado la cabeza hexagonal. Se extrae e inspecciona la tapa. Si no se ha alcanzado la longitud deseada, se lapea (sección 26.7) a la dimensión final.

En este punto, el retén se coloca en una máquina fresadora CNC por medio de un aditamento diseñado en forma especial, que consta básicamente de un orificio cónico, roscado. Una vez que la tapa se coloca en el aditamento, se maquina las tres muescas circulares conforme al dibujo. Después el retén se rebabea y se tamborea, para remover todas las esquinas filosas, y se limpia el fondo con chorro de granalla, para que coincida con el de la parte superior de la placa. Por último, se anodizan las partes (sección 34.10) y se pasivan para obtener la biocompatibilidad deseada.

Fuente: Cortesía de J. Mankowski y B. Pyszka, Master Metal Engineering Inc., y C. Lyle y M. Handwerker, Wright Medical Technology, Inc.

RESUMEN

- Los procesos de maquinado que comúnmente producen perfiles circulares externos e internos son el torneado, mandrinado, taladrado y machueleado. Debido a la naturaleza tridimensional de estas operaciones, el movimiento de las virutas y su control son factores que deben considerarse. La remoción de virutas puede ser un problema significativo (sobre todo en el taladrado y machueleado) y hacer que se rompa la herramienta.
- La optimización de cada proceso de maquinado requiere la comprensión de las relaciones entre los parámetros de diseño (forma, precisión dimensional y acabado superficial de la parte), los parámetros del proceso (velocidad de corte, avance y profundidad de corte), material y forma de la herramienta, uso de fluidos de corte y secuencia de las operaciones por realizar.
- El maquinado de alta velocidad, el torneado duro y el maquinado de ultraprecisión son desarrollos importantes que han ayudado a reducir los costos de maquinado y a producir partes con acabado superficial y precisión dimensional excepcionales.
- Las partes a maquinar pueden haberse producido por fundición, forjado, extrusión o metalurgia de polvos. Cuanto más aproximada sea la pieza en bruto a maquinar a la forma final deseada (forma casi neta), serán menores el número y la extensión de los procesos de maquinado posteriores.

TÉRMINOS CLAVE

Ángulo de alivio	Herramientas formadoras	Reacondicionamiento de brocas
Ángulo de ataque	Machueleado	Rima
Ángulo de ataque lateral	Mandril	Rimado (escariado)
Ángulo de ataque posterior	Mandril de potencia	Roscado
Ángulo de filo de corte	Mandrinado	Roscas de tornillos en torno
Bancada	Mandrinador de orificios	Taladrado
Barra de avance	Manejo de virutas	Taladradora de cañones
Boquilla	Máquina automática para barra	Taladradora de columna
Broca helicoidal	Maquinado casi en seco	Torneado
Cabezal	Maquinado de alta velocidad	Torneado de diamante
Careado (refrentado)	Maquinado de ultraprecisión	Tornillo de avance
Carro	Maquinado duro	Torno de torreta
Contrapunto	Maquinado en seco	Torno mecánico
Corte de régimen dúctil	Moleteado	Tornos
Cortes de acabado	Plato o perro de arrastre	Tronzado
Cortes de desbaste	Producción de orificios	Velocidad de remoción de material
Fuerza de avance	Radio de punta	Vida de la broca

BIBLIOGRAFÍA

- Arnone, M., *High Performance Machining*, Hanser, 1998.
- ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
- Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1989.
- Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
- Byers, J. P. (ed.), *Metalworking Fluids*, Marcel Dekker, 1994.
- Handbook of High-Speed Machining Technology*, Chapman and Hall, 1985.
- Hoffman, E. G., *Jigs and Fixture Design*, 4a. ed., Industrial Press, 1996.
- Juneja, B. L., *Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools*, Wiley, 1987.
- Krar, S. F. y Check, A. F., *Technology of Machine Tools*, 5a. ed., Glencoe Macmillan/McGraw-Hill, 1996.
- Machinery's Handbook*, Industrial Press, modificado periódicamente.
- Machining Data Handbook*, 3a. ed., 2 vols. Machinability Data Center, 1980.
- Metal Cutting Tool Handbook*, 7a. ed., Industrial Press, 1989.
- Meyers, A. L. y Slattery, T., *Basic Machining Reference Handbook*, Industrial Press, 1988.
- Nachtman, E. S. y Kalpakjian, S., *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations*, Marcel Dekker, 1985.
- Rechetov, D. N. y Portman, V. T., *Accuracy of Machine Tools*, ASME International, 1989.
- Sluhan, C. (ed.), *Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application*, Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- Stephenson, D. A. y Agapiou, J. S., *Metal Cutting Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1996.
- Stout, K. J., Davis, E. J. y Sullivan, P. J., *Atlas of Machined Surfaces*, Chapman and Hall, 1990.
- Tool and Manufacturing Engineering Handbook*, 4a. ed., Vol. 1: *Machining*. Society of Manufacturing Engineers, 1983.
- Walsh, R. A., *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*, McGraw-Hill, 1994.
- Weck, M., *Handbook of Machine Tools*, 4 vols., Wiley, 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

- 23.1 Describa los tipos de operaciones de maquinado que se efectúan en un torno.
- 23.2 Explique las funciones de los diferentes ángulos en una herramienta de corte de una sola punta.
- 23.3 ¿Por qué se desarrollaron los mandriles o *chucks* de potencia?
- 23.4 ¿Por qué (a) el mandrinado, y (b) el machueleado en un torno pueden ser operaciones difíciles?
- 23.5 ¿Por qué hay más de una torreta en los tornos de torreta?
- 23.6 Describa las diferencias entre el mandrinado de una pieza de trabajo en un torno y el mandrinado en una fresadora de mandrinado horizontal.
- 23.7 ¿Cómo se determina la vida útil de una broca?
- 23.8 ¿Por qué se realizan operaciones de rimado?
- 23.9 Describa la diferencia entre un apoyo fijo y un apoyo deslizante. Dé una aplicación para cada uno de ellos.
- 23.10 Explique las funciones de la silleta en un torno.
- 23.11 Describa las ventajas relativas de dados (a) de autoapertura, y (b) sólidos para roscado.
- 23.12 ¿Cuál es la diferencia entre una fresadora de mandrinado y un torno?
- 23.13 Explique cómo se cortan las roscas externas en un torno.
- 23.14 ¿Cuál es la diferencia entre un orificio ciego y un orificio pasado? ¿Cuál es su significado?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 23.15 Explique las razones de los diversos lineamientos de diseño para torneado.
- 23.16 Observará que se han utilizado los términos “resistencia de la herramienta” y “resistencia del material de la herramienta”. ¿Considera que hay alguna diferencia entre ellos? Explique su respuesta.
- 23.17 Explique por qué la secuencia de taladrado, mandrinado y rimado produce un orificio más preciso que el trabajado sólo por taladrado y rimado.
- 23.18 Explique por qué las operaciones de maquinado pueden ser necesarias incluso en partes de forma neta o casi neta fabricadas mediante fundición de precisión, formado o metalurgia de polvos.
- 23.19 ¿Cuáles son las consecuencias del taladrado con una broca que no se afila de manera adecuada?
- 23.20 Se está torneando una barra redonda irregular y muy oxidada. ¿Recomendaría una profundidad de corte pequeña o grande? Explique sus razones.
- 23.21 Describa los problemas, en su caso, que pudieran encontrarse en la sujeción de una pieza de trabajo fabricada con un metal blando en un plato de tres mordazas.
- 23.22 ¿Cambia la fuerza o el torque en el taladrado conforme aumenta la profundidad del orificio? Explique su respuesta.
- 23.23 Explique las similitudes y diferencias entre los lineamientos de diseño para torneado y para mandrinado.
- 23.24 ¿Cuáles son las ventajas y aplicaciones de tener un husillo hueco en el cabezal de un torno?
- 23.25 Explique cómo haría para producir una conicidad en una pieza de trabajo redonda en un torno.
- 23.26 Suponga que se le pide realizar una operación de mandrinado en una pieza de trabajo hueca de diámetro grande. ¿Utilizaría una fresadora de mandrinado horizontal o vertical? Explique su respuesta.
- 23.27 Explique las razones de la tendencia principal a producir roscas mediante laminación contra el corte de las mismas. ¿Cuáles serían las diferencias (en su caso) en los tipos de roscas producidos y sus características de desempeño?
- 23.28 En algunos materiales, el orificio taladrado puede ser más pequeño que el diámetro de la broca. Explique este fenómeno e identifique las propiedades correspondientes del material que podrían influir.
- 23.29 Describa sus observaciones respecto del contenido de las tablas 23.2 y 23.4 y explique por qué se hacen dichas recomendaciones en particular.
- 23.30 Se ha visto que la velocidad, el avance y la profundidad de corte son los parámetros principales en una operación de torneado. En términos relativos, ¿en qué valores se deberían establecer estos parámetros para (a) una operación de desbaste, y (b) una operación de acabado?
- 23.31 Explique la justificación económica para comprar un torno de torreta o revólver en vez de uno convencional.
- 23.32 La nota al pie de la tabla 23.11 indica que (en el taladrado) conforme aumenta el diámetro del orificio, se deben reducir las velocidades y los avances. Explique por qué.
- 23.33 En la manufactura moderna con máquinas herramienta controladas por computadora, ¿qué tipos de virtudes metálicas serían poco deseables y por qué?

23.34 Liste y explique los factores que contribuyen a un acabado superficial deficiente en los procesos descritos en este capítulo.

23.35 La severidad operativa para el rimado es mucho menor que la del machueleado, aunque ambos son procesos de remoción interna de material que pueden resultar difíciles. ¿Por qué?

23.36 Revise la figura 23.6 y comente los factores implicados en la determinación de la altura de las zonas (de velocidad de corte) para diversos materiales para herramientas.

23.37 Ya se indicó que algunos mandiles o *chucks* se accionan mediante potencia. Realice un estudio en la bibliografía técnica y describa el diseño básico de dichos mandriles.

23.38 ¿Qué operaciones se pueden efectuar comúnmente en una taladradora de columna, pero no en un torno?

23.39 Explique cómo se mantienen centradas las brocas de cañones durante el taladrado. ¿Por qué existe un canal longitudinal hueco en una broca de cañón?

23.40 Comente la magnitud del ángulo de cuña en la herramienta mostrada en la figura 23.4.

23.41 Si se utilizan insertos en una broca, ¿es importante el material del zanco? Si es así, ¿qué propiedades son básicas? Explique su respuesta.

23.42 En relación con la figura 23.10b (además de las herramientas mostradas), describa otros tipos de herramientas de corte que se puedan colocar en portaherramientas para efectuar otras operaciones de maquinado.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

23.43 Calcule las mismas cantidades que en el ejemplo 23.1 para aleación de titanio de alta resistencia y $N = 800$ rpm.

23.44 Estime el tiempo de maquinado requerido para desbastar en un torno una barra de aleación de cobre recocido de 0.4 m de largo, de entre 55 mm y 60 mm de diámetro, utilizando una herramienta de acero de alta velocidad. (Ver tabla 23.4.) Calcule el tiempo requerido para una herramienta de carburo sin recubrimiento.

23.45 Una barra de hierro fundido de alta resistencia de 5 pulgadas de diámetro se está torneando en un torno a una profundidad de corte $d = 0.050$ pulgada. El torno está equipado con un motor eléctrico de 15 hp y tiene una eficiencia mecánica de 80%. La velocidad del husillo es de 500 rpm. Estime el avance máximo antes de que el torno empiece a atascarse.

23.46 Una broca de 0.4 pulgada de diámetro se utiliza en una taladradora de columna o vertical que opera a 300 rpm. Si el avance es de 0.005 pulgada/rev, ¿cuál es la MRR? ¿Cuál es la MRR si se duplica el diámetro de la broca?

23.47 En el ejemplo 23.4, suponga que el material de la pieza de trabajo es aleación de aluminio de alta resistencia y el husillo está corriendo a $N = 600$ rpm. Estime el torque requerido para esta operación.

23.48 En una operación de taladrado, una broca de 0.5 pulgada se está utilizando en una pieza de trabajo de acero de bajo carbono. El orificio es ciego y se machueleará a una profundidad de 1 pulgada. La operación de taladrado ocurre con un avance de 0.010 pulgada/rev y una velocidad de husillo de 700 rpm. Estime el tiempo requerido para taladrar el orificio antes de machuelearlo.

23.49 Se va a torneear una parte cilíndrica de acero inoxidable de baja resistencia de 3 pulgadas de diámetro en un torno a 600 rpm, con una profundidad de corte de 0.2 pulgada y un avance de 0.025 pulgada/rev. ¿Cuáles deberían ser los caballos de fuerza mínimos del torno?

23.50 Se va a reducir el diámetro de un cilindro de aluminio de 6 pulgadas de diámetro y 10 pulgadas de longitud, a un diámetro de 4.5 pulgadas. Utilizando las condiciones comunes de maquinado provistas en la tabla 23.4, estime el tiempo de maquinado si se usa una herramienta de carburo con recubrimiento de TiN.

23.51 Para los datos en el problema 23.50, calcule la potencia requerida.

23.52 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y está aplicando un examen sobre los aspectos numéricos para evaluar los conocimientos de los alumnos. Elabore dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

23.53 ¿Consideraría los procesos de maquinado descritos en este capítulo como procesamiento de forma neta (que ya no requiere más procesamiento)? ¿Procesamiento de forma casi neta? Explique con ejemplos adecuados.

23.54 Si un perno se rompe dentro de un orificio de modo que se quede sin cabeza, se retira primero taladrando

un orificio en el vástago del perno y después utilizando una herramienta especial para extraerlo. Inspeccione dicha herramienta y explique cómo funciona. ¿Podría pensar en otros medios de extracción del perno roto del orificio? Explique su respuesta.

23.55 Describa la máquina herramienta y las monturas necesarias para maquinar bates de béisbol de material cilíndrico de madera.

23.56 Una tendencia importante en las operaciones de maquinado es el uso creciente de montajes flexibles. Investigue en Internet en relación con los montajes flexibles y comente su diseño y operación.

23.57 Revise la figura 23.7d y explique si sería posible maquinar ejes excéntricos (como el mostrado en la fig. 23.12c) con tal arreglo. ¿Qué pasa si la parte es larga en comparación con su sección transversal?

23.58 Ya se vio que las barras de mandrinado se pueden diseñar con capacidades de amortiguamiento interno para reducir o eliminar la vibración y el traqueteo durante el mandrinado. Consultando la bibliografía técnica y del fabricante, describa los detalles de los diseños para dichas barras de mandrinado.

23.59 ¿Sería difícil utilizar los procesos de maquinado descritos en este capítulo en diversos materiales no metálicos blandos o similares al hule? Explique sus ideas, comentando el papel de las propiedades físicas y mecánicas de dichos materiales en la operación de maquinado y cualquier dificultad en la producción de las formas y precisiones dimensionales deseadas.

23.60 Con los dibujos apropiados, describa los principios de diversos métodos de fijación y dispositivos de sujeción de trabajo que se puedan utilizar para los procesos descritos en este capítulo. Incluya la localización de tres puntos y la sujeción tridimensional del trabajo para las operaciones de taladrado y similares.

23.61 Haga una tabla completa que comprenda las capacidades de los procesos de maquinado descritos en este capítulo. Utilizando varias columnas, describa las máquinas herramienta implicadas, el tipo de herramientas de corte y los materiales de las herramientas utilizadas, las formas de las partes producidas, los tamaños comunes máximo y mínimo, el acabado superficial, las tolerancias dimensionales y las capacidades de producción.

23.62 Revise varios utensilios en una cocina común e identifique los que tengan alguna similitud con los procesos descritos en este capítulo. Comente su principio de operación.

23.63 En la figura 23.14 se mostraron las tolerancias que se pueden obtener por medio del proceso descrito en ella. Dé ejemplos específicos de partes y aplicaciones en las que las precisiones dimensionales ultraelevadas sean fundamentales.

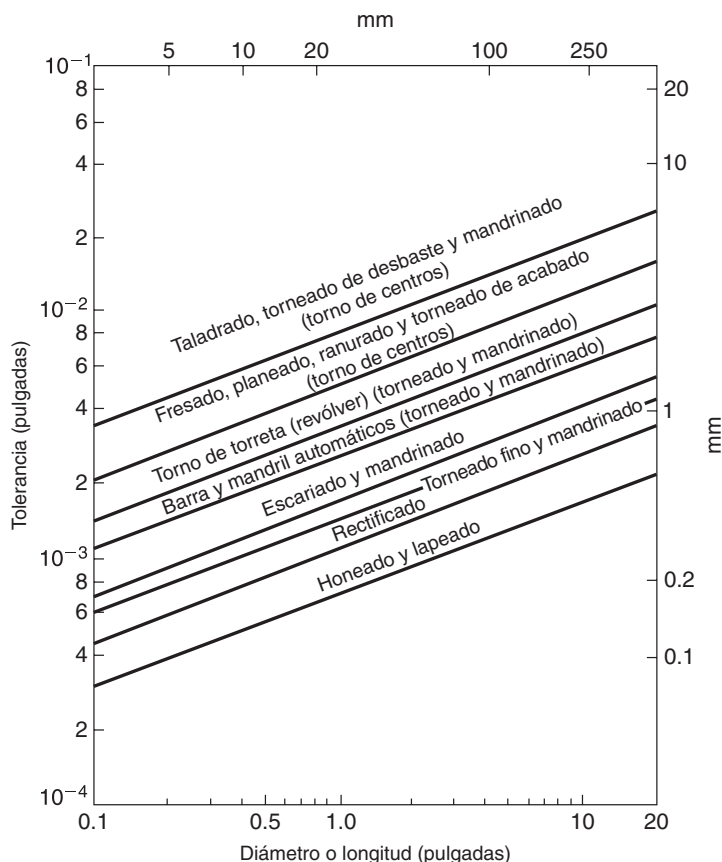
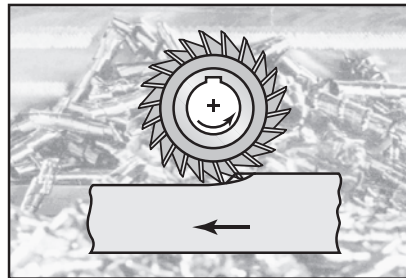


FIGURA P23.63

Procesos de maquinado utilizados para producir diferentes formas: fresado, brochado, aserrado y limado; manufactura de engranes



CAPÍTULO 24

En este capítulo se describen los procesos para producir diversas formas complejas. En especial, se tratan los siguientes temas:

- Operaciones de fresado.
- Maquinado de superficies planas y largas y de perfiles.
- Brochado para producir perfiles externos e internos.
- Operaciones de aserrado y limado.
- Producción de engranes mediante maquinado.

Partes comunes fabricadas: partes con características complejas internas y externas en diversas superficies, estrías y engranes.

Procesos alternativos: fundición a presión en matriz, fundición de precisión, forjado de precisión, metalurgia de polvos y moldeo por inyección de polvos.

24.1 | Introducción

Además de fabricar partes con diversos perfiles externos o internos, las operaciones de maquinado pueden producir muchas partes con formas más complejas (fig. 24.1). En este capítulo se describen distintos procesos de corte y máquinas herramienta que tienen la capacidad de elaborar esas formas mediante herramientas de corte de una sola punta y de dientes múltiples (ver también la tabla 23.1). El capítulo se inicia con uno de los procesos más versátiles, el *fresado*, en el que el cortador rotatorio retira material mientras avanza a lo largo de diversos ejes respecto de la pieza de trabajo.

Más adelante se describen otros procesos de maquinado (como el *cepillado de mesa móvil* y *de mesa fija* y el *brochado*), en el que la herramienta o la pieza de trabajo avanza a lo largo de una trayectoria recta que produce superficies planas y de diversas formas. Después se estudian los procesos de *aserrado*, que suelen utilizarse para preparar piezas en bruto a partir de barras y placas planas que posteriormente se pueden someter a operacio-

- 24.1 Introducción 723
- 24.2 Fresado y fresadoras 724
- 24.3 Cepillado 741
- 24.4 Brochado y brochadoras 742
- 24.5 Aserrado 745
- 24.6 Limado 748
- 24.7 Manufactura de engranes mediante maquinado 749

EJEMPLOS:

- 24.1 Velocidad de remoción de material, potencia, torque y tiempo de corte en fresado plano 728
- 24.2 Velocidad de remoción de material, potencia requerida y tiempo de corte en fresado de careado 732
- 24.3 Brochado de estrías internas 745

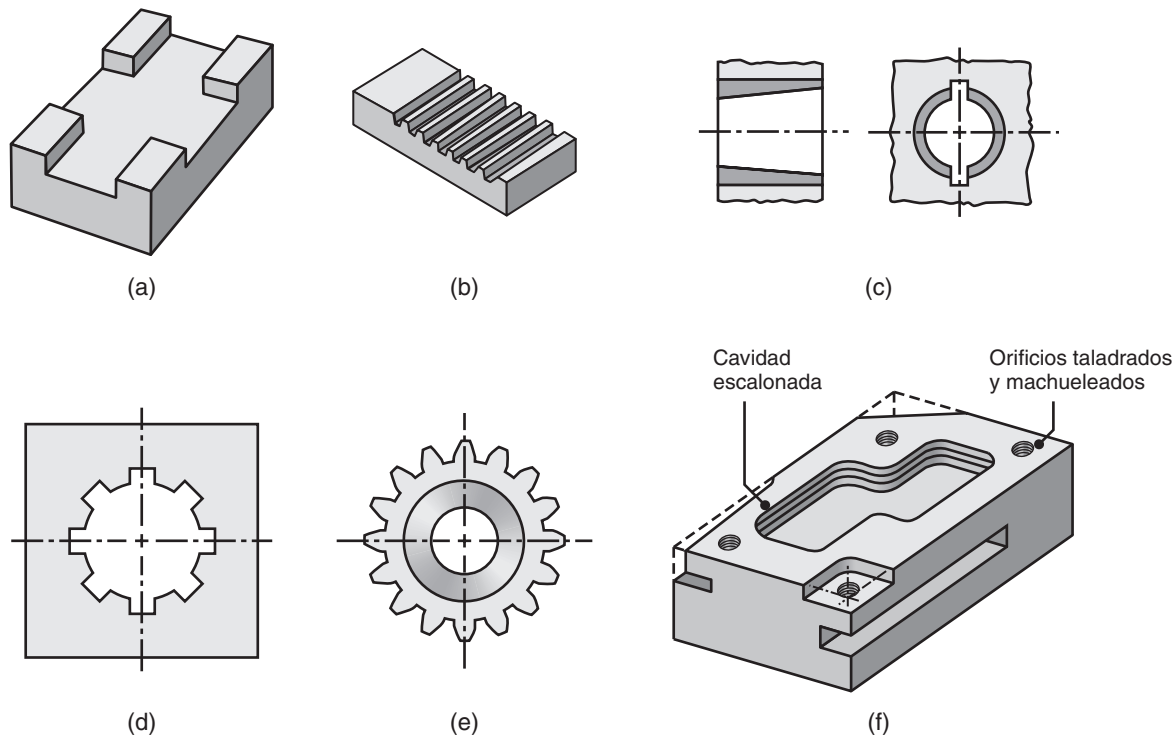


FIGURA 24.1 Partes y formas comunes que se pueden producir mediante los procesos de maquinado descritos en este capítulo.

nes de formado, maquinado y soldadura. También se trata en forma breve el *limado*, que se usa para remover pequeñas cantidades de material, por lo general de bordes y esquinas.

Por último se trata la *manufactura de engranes*, mediante procesos en los que los dientes de los engranes se producen por fundición, metalurgia de polvos y deformación plástica, así como por forjado. En este capítulo se describe la producción de engranes por medio de diversos procesos de maquinado que utilizan cortadores especiales, así como la calidad y las propiedades de los engranes elaborados con estos procesos.

24.2 Fresado y fresadoras

El *fresado* incluye diversas operaciones de maquinado muy versátiles que tienen lugar en varias configuraciones (fig. 24.2) usando una *fresa*, una herramienta multifilo que produce numerosas virutas en una sola revolución.

24.2.1 Fresado periférico

En este proceso (también conocido como *fresado simple*), el eje de rotación del cortador es paralelo a la superficie de trabajo, como se muestra en la figura 24.2a. El cuerpo del cortador, que por lo general se fabrica con acero de alta velocidad, tiene varios dientes a lo largo de su circunferencia; cada diente actúa como una herramienta de corte de una sola punta. Cuando el cortador es más largo que la anchura del corte, el proceso se conoce como *fresado plano*. Los cortadores para fresado periférico pueden tener *dientes rectos* o *helicoidales* (fig. 24.2a), que producen una acción ortogonal u oblicua, respectivamente. Por lo común, son preferibles los dientes helicoidales a los rectos porque el diente ataca en forma parcial la pieza de trabajo conforme va girando. En consecuencia, la fuerza de corte y el torque en el cortador son inferiores, lo que ocasiona una operación más suave y reduce el traqueteo. (Ver también fig. 21.9).

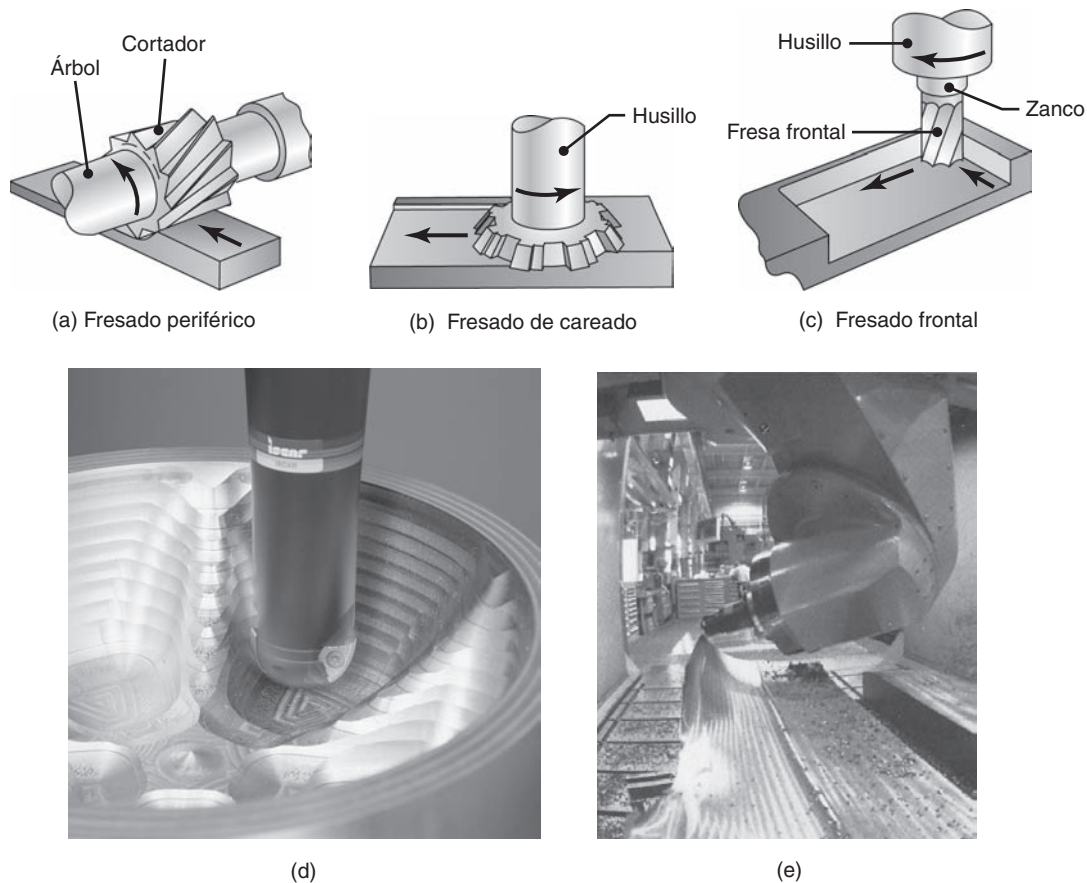


FIGURA 24.2 Algunos tipos básicos de cortadores y operaciones de fresado. (a) Fresado periférico. (b) Fresado de careado o refrentado. (c) Fresado frontal. (d) Fresa de punta esférica con insertos indexables con cubierta de carburo maquinando una cavidad en una matriz. (e) Fresado de una superficie esculpida con una fresa frontal, utilizando una máquina de control numérico de cinco ejes. Fuente: (d) Cortesía de Iscar Metals, Inc. (e) Cortesía de The Ingersoll Milling Machine Co.

Fresado convencional y fresado concurrente. En la figura 24.3a se observa que el cortador puede rotar en el sentido de las manecillas del reloj o en sentido opuesto; esto es significativo en la operación. En el *fresado convencional* (también conocido como *fresado hacia arriba*), el máximo espesor de las virutas se da al final del corte, cuando el diente abandona la superficie de la pieza de trabajo. Las ventajas del fresado convencional son que (a) el ataque del diente no es una función de las características de la superficie de la pieza de trabajo, y (b) la contaminación o cascarilla (capa de óxido) en la superficie no afecta de manera adversa la vida de la herramienta. Éste es el método más común de fresado. El proceso de corte es fino, siempre que los dientes del cortador estén bien afilados. De lo contrario, el diente roza contra la superficie antes de empezar a cortar. También puede haber una tendencia a que la herramienta vibre y la pieza de trabajo se jale hacia arriba (debido a la dirección de la rotación del cortador), por lo que es necesaria una sujeción apropiada.

En el *fresado concurrente* (también conocido como *fresado hacia abajo*), el corte empieza en la superficie de la pieza de trabajo donde la viruta es más gruesa. La ventaja es que el componente hacia abajo de la fuerza de corte mantiene la pieza en su lugar, en particular las partes más delgadas. Sin embargo, dadas las fuerzas de impacto que se producen cuando los dientes atacan la pieza, la operación debe mantener rígida la sujeción del trabajo y eliminar el retroceso del engrane en el mecanismo de avance de la mesa. El fresado concurrente no es apropiado para el maquinado de piezas de trabajo que tienen cascarilla en la superficie, como los metales trabajados en caliente, los forjados y las fun-

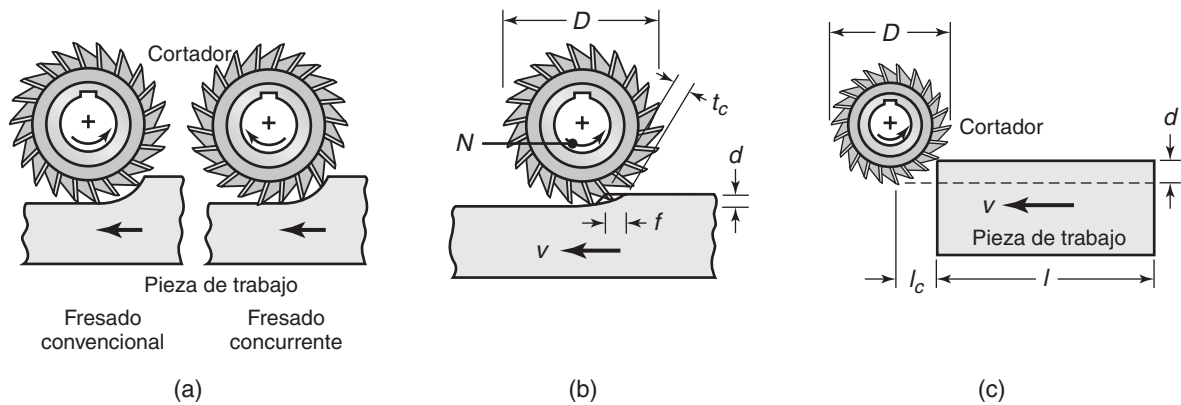


FIGURA 24.3 (a) Esquema del fresado convencional y del fresado concurrente. (b) Operación de fresado plano que muestra la profundidad de corte, d ; avance por diente, f ; profundidad de corte de la viruta, t_c , y velocidad de la pieza de trabajo, v . (c) Esquema de la distancia de desplazamiento del cortador, l_c , para alcanzar la profundidad de corte total.

diciones. La cascarilla es dura y abrasiva y produce desgaste excesivo, así como daños a los dientes del cortador, lo que acorta la vida de la herramienta.

Parámetros del fresado. La velocidad de corte (V) en el fresado periférico es la velocidad superficial del cortador, o

$$V = \pi DN \quad (24.1)$$

donde D es el diámetro del cortador y N la velocidad rotacional del mismo (fig. 24.4).

Obsérvese que el espesor de la viruta en el fresado plano varía a lo largo de su longitud debido al movimiento longitudinal relativo entre el cortador y la pieza de trabajo. Para un cortador de dientes rectos, el *espesor no deformado de la viruta* (profundidad de corte de la viruta) aproximado (t_c) se puede calcular a partir de la ecuación

$$t_c = 2f\sqrt{\frac{d}{D}} \quad (24.2)$$

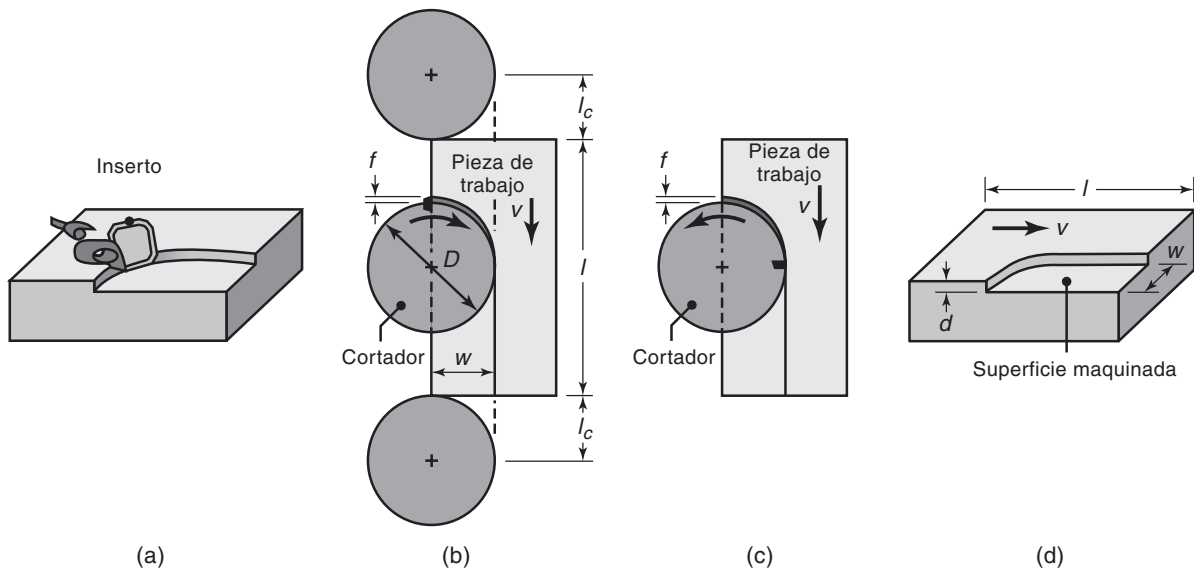


FIGURA 24.4 Operación de fresado de careado que muestra (a) la acción de un inserto en el fresado de careado; (b) fresado concurrente; (c) fresado convencional; (d) dimensiones en el fresado de careado. La anchura de corte, w , no es necesariamente la misma que el radio del cortador.

donde f es el avance por diente del cortador, es decir, la distancia que avanza la pieza de trabajo por diente del cortador, en mm/diente o pulgadas/diente, y d es la profundidad de corte. Al aumentar t_c , se incrementa la fuerza en el diente del cortador.

El avance por diente se determina con la ecuación:

$$f = \frac{v}{Nn} \quad (24.3)$$

donde v es la velocidad lineal (*velocidad de avance*) de la pieza de trabajo y n la cantidad de dientes en la periferia del cortador. La precisión dimensional de esta ecuación se puede verificar utilizando las unidades adecuadas para los términos individuales; así, por ejemplo, (mm/diente) = (m/min)(10³ mm/m)/(rev/min)(número de dientes/rev).

El tiempo de corte (t) se obtiene mediante la expresión

$$t = \frac{l + l_c}{v} \quad (24.4)$$

donde l es la longitud de la pieza de trabajo (fig. 24.3c) y l_c la extensión horizontal del primer contacto del cortador con la pieza de trabajo. Con base en la suposición de que $l_c \ll l$ (aunque por lo general éste no es el caso), la *velocidad de remoción de material* (MRR) es

$$\text{MRR} = \frac{lv_d}{t} = wdv \quad (24.5)$$

en la que w es la anchura de corte que (en el fresado plano) es la misma que la anchura de la pieza de trabajo. Como se indica en la sección 23.2, la distancia que el cortador avanza en el ciclo sin corte de la operación de fresado es una consideración económica importante y debe minimizarse, por medios tales como un avance más rápido de los componentes de la máquina herramienta. En la tabla 24.1 se resumen las ecuaciones anteriores y la terminología empleada.

TABLA 24.1

Resumen de parámetros y fórmulas del fresado periférico

N = Velocidad rotacional del cortador de fresado, rpm
F = Avance, mm/diente o pulgadas/diente
D = Diámetro del cortador, mm o pulgadas
n = Número de dientes del cortador
v = Velocidad lineal de la pieza de trabajo o velocidad de avance, mm/min o pulgadas/min
V = Velocidad superficial del cortador, m/min. o pies/min. = DN
f = Avance por diente, mm/diente o pulgadas/diente = v/Nn
l = Longitud de corte, mm o pulgadas
t = tiempo de corte, s o min = $(l + l_c)/v$, en la que l_c = medida del primer contacto del cortador con la pieza de trabajo
MRR = mm ³ /min. o pulg ³ /min. = wdv , en la que w es el ancho del corte
Torque = N·m o lb·pie = $F_c D/2$
Potencia = kW o hp = (Torque)(ω), en la que $\omega = 2\pi N$ radianes/min

Se puede medir y calcular el *requerimiento de potencia* en el fresado periférico, pero es difícil hacerlo con las *fuerzas* que actúan en el cortador (tangencial, radial y axial; ver también fig. 23.5) debido a las diversas variables implicadas, en particular la geometría de la herramienta de corte. Estas fuerzas se pueden medir de manera experimental para diversas condiciones. Sin embargo, el *torque* en el husillo del cortador también puede calcularse a partir de la potencia. (Ver el siguiente ejemplo.) Aunque el torque es producto de la fuerza tangencial en el cortador y el radio del mismo, la fuerza tangencial por diente dependerá de cuántos dientes participan en el corte.

EJEMPLO 24.1 Velocidad de remoción de material, potencia, torque y tiempo de corte en fresado plano

Se está realizando una operación de fresado plano en un bloque de acero blando recocido de 12 pulgadas de largo y 4 pulgadas de ancho, con un avance de $f = 0.01$ pulgadas/diente y una profundidad de corte de $d = \frac{1}{8}$ de pulgada. El cortador tiene $D = 2$ pulgadas de diámetro y 20 dientes rectos, gira a $N = 100$ rpm y por definición es más ancho que el bloque a maquinar. Calcule la velocidad de remoción de material, la potencia y el torque requeridos para esta operación y el tiempo de corte.

Solución De acuerdo con la información proporcionada, la velocidad lineal de la pieza de trabajo (v) se puede calcular mediante la ecuación 24.3:

$$v = fNn = (0.01)(100)(20) = 20 \text{ pulgadas/min}$$

De la ecuación 24.5, se calcula que la velocidad de remoción de material es:

$$\text{MRR} = (4)\left(\frac{1}{8}\right)(20) = 10 \text{ pulg}^3/\text{min}$$

Como la pieza de trabajo es acero blando recocido, estimemos que la potencia unitaria con base en la tabla 21.2 es $1.1 \text{ hp} \cdot \text{min}/\text{pulg}^3$. Por lo tanto, la potencia requerida se puede calcular como:

$$\text{Potencia} = (1.1)(10) = 11 \text{ hp}$$

El torque que actúa sobre el husillo del cortador también se puede calcular considerando que la potencia es producto de la velocidad rotacional del husillo y el torque (en radianes por unidad de tiempo). Por lo que:

$$\begin{aligned} \text{Torque} &= \frac{\text{Potencia}}{\text{Velocidad Rotatoria}} \\ &= \frac{(11 \text{ hp})(33,000 \text{ lb-pie/min} \cdot \text{hp})}{(100 \text{ rpm})(2\pi)} = 578 \text{ lb-pie.} \end{aligned}$$

El tiempo de corte se obtiene mediante la ecuación 24.4, en la que se puede demostrar la cantidad l_c con relaciones geométricas simples y para $D \gg d$, para aproximarse a:

$$l_c = \sqrt{Dd} = \sqrt{(2)\left(\frac{1}{8}\right)} = 0.5 \text{ pulgadas}$$

Por lo tanto, el tiempo de corte es:

$$t = \frac{12 + 0.5}{20} = 0.625 \text{ min} = 37.5 \text{ s}$$

24.2.2 Fresado de careado o refrentado

En el *fresado de careado* o *refrentado* (fig. 24.4), el cortador se monta en un husillo que tiene un eje de rotación perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo (fig. 24.2b) y remueve material en la forma mostrada en la figura 24.4a. El cortador gira a una velocidad rotacional N y la pieza se mueve a lo largo de una trayectoria recta a una velocidad lineal v . Cuando la rotación del cortador es semejante a la de la figura 24.4b, la operación es *fresado concurrente*; cuando lo hace en la dirección opuesta (fig. 24.4c), la operación es *fresado convencional*. Los dientes de corte, como los insertos de carburo, se montan en el cuerpo del cortador como se muestra en la figura 24.5 (ver también fig. 22.3c).

Dado el movimiento relativo entre los dientes del cortador y la pieza de trabajo, el fresado de careado deja *marcas de avance* en la superficie maquinada (fig. 24.6) similares a las de las operaciones de torneado (fig. 21.2). Obsérvese que la rugosidad de la superficie de la pieza depende de la geometría de la esquina del inserto y del avance por diente.

En la figura 24.7 se muestra la terminología de un cortador de fresado de careado o refrentado, así como los diversos ángulos. Como se puede ver en la vista lateral del inserto en la figura 24.8, el *ángulo de avance* del inserto en el fresado de careado influye de manera directa sobre el *espesor no deformado de la viruta*, como sucede en las operaciones de torneado. Al aumentar el ángulo de avance (positivo, como se muestra en la fig. 24.8b), disminuye el espesor no deformado de la viruta (como sucede con el espesor de la viruta) y se incrementa la longitud de contacto (anchura de la viruta). El ángulo de avance también influye en las fuerzas de fresado: es evidente que al disminuir dicho ángulo, se presenta un componente de fuerza vertical cada vez más pequeño (fuerza axial sobre el husillo del cortador). Por lo general, los *ángulos principales* para la mayoría de los cortadores de fresado de careado van de 0° a 45° . En la figura 24.8 se observa que el área transversal de la viruta sin deformar permanece constante.

Existe una amplia variedad de cortadores para fresado. El diámetro del cortador debe elegirse de manera que no interfiera en los aditamentos y otros componentes en el arreglo. En una operación común de fresado de careado, la relación del diámetro del cortador (D) a la anchura del corte (w) no debe ser menor a 3:2.



FIGURA 24.5 Cortador de fresado de careado con insertos indexables. *Fuente:* Cortesía de Ingersoll Cutting Tool Company.

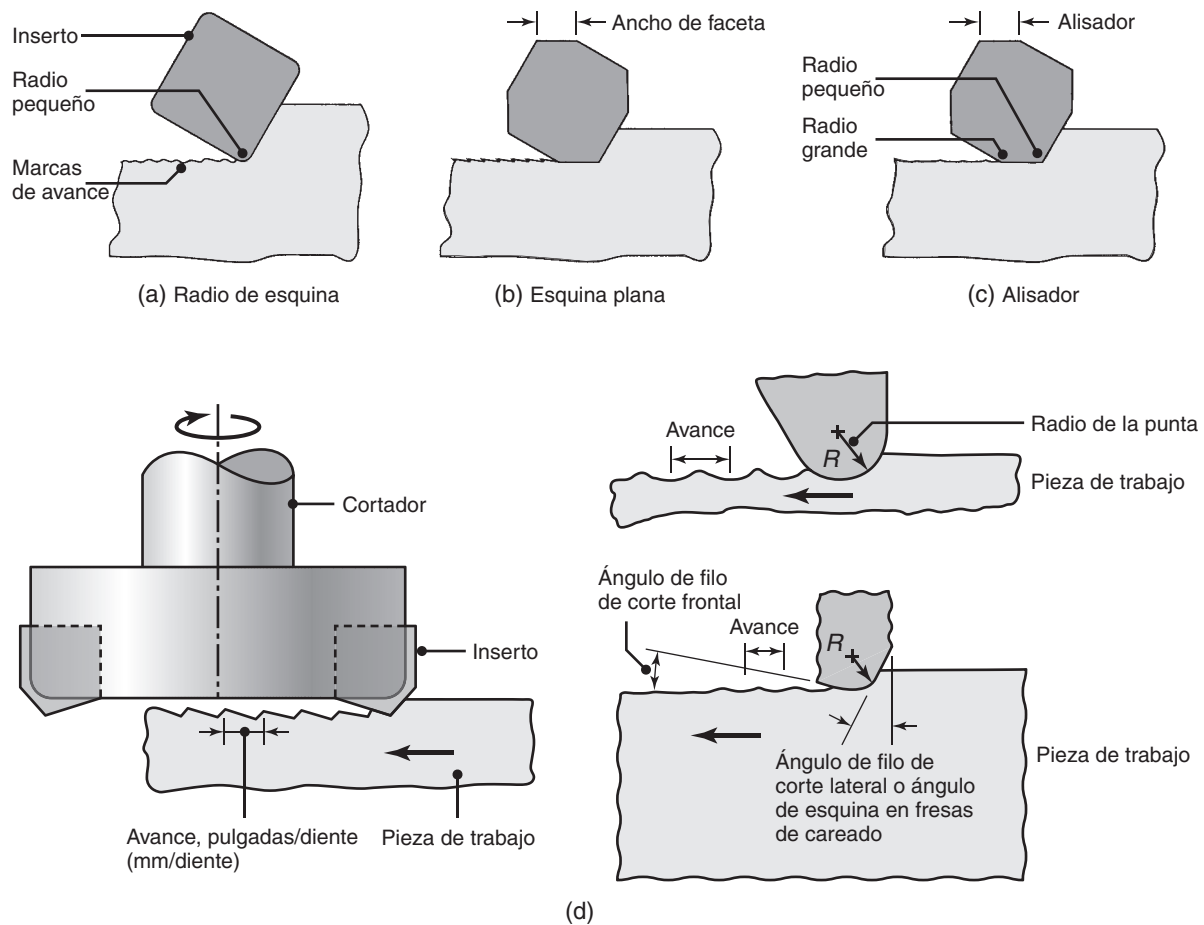


FIGURA 24.6 Esquema del efecto de la forma del inserto sobre las marcas de avance en una superficie de fresado de careado: (a) radio pequeño de esquina; (b) esquina plana en inserto, y (c) alisador, el cual consta de un radio pequeño seguido de un radio grande que deja marcas de avance más finas. (d) Marcas de avance debido a diversas formas de insertos.

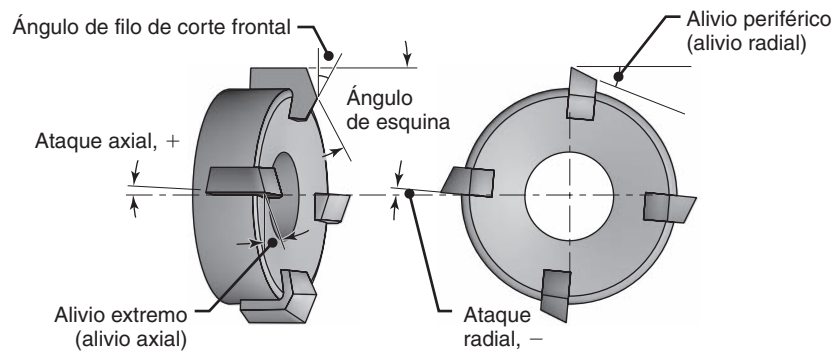


FIGURA 24.7 Terminología del cortador de fresado de careado.

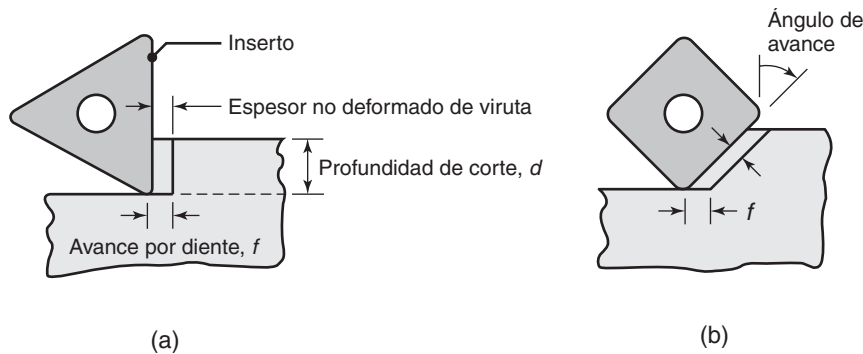


FIGURA 24.8 Efecto del ángulo de avance sobre el espesor no deformado de la viruta en el fresado de careado. Obsérvese que al aumentar el ángulo de avance, disminuye el espesor de la viruta, pero se incrementa la longitud de contacto (es decir, la anchura de la viruta). Los filos del inserto deben ser suficientemente grandes para soportar el aumento de la longitud de contacto.

La relación del diámetro del cortador respecto de los ángulos del inserto y su posición relativa respecto de la superficie a fresar es importante porque determina el ángulo al cual un inserto *entra* y *sale* de la pieza de trabajo. En la figura 24.4b de fresado concurrente se observa que (si el inserto tiene ángulos cero de ataque radial y axial, ver fig. 24.7) la superficie de ataque del inserto ataca directamente la pieza. Sin embargo, en la figura 24.9a y b se advierte que el mismo inserto puede atacar la pieza a diferentes ángulos, dependiendo de las posiciones relativas del cortador y la anchura de la pieza de trabajo. En la figura 24.9a se ve que la punta del inserto hace el primer contacto, de manera que existe la posibilidad de que se astille el filo de corte. Por otro lado, en la figura 24.9b, los primeros contactos (en la entrada, reentrada y las dos salidas) se encuentran en ángulo y lejos de la punta del inserto. Por lo tanto, existe una menor tendencia a que el inserto falle, ya que las fuerzas en el inserto varían con más lentitud. De acuerdo con la figura 24.7, los ángulos de ataque radial y axial también tienen efecto sobre esta operación.

En la figura 24.9c se muestran los ángulos de salida de varias posiciones del cortador. Nótese que en los primeros dos ejemplos el inserto sale de la pieza de trabajo en un ángulo, provocando que la fuerza en el inserto se reduzca a cero a una velocidad menor (deseable) que en el tercer ejemplo, en el que el inserto sale de la pieza de manera repentina (lo cual es poco deseable para la vida de la herramienta).

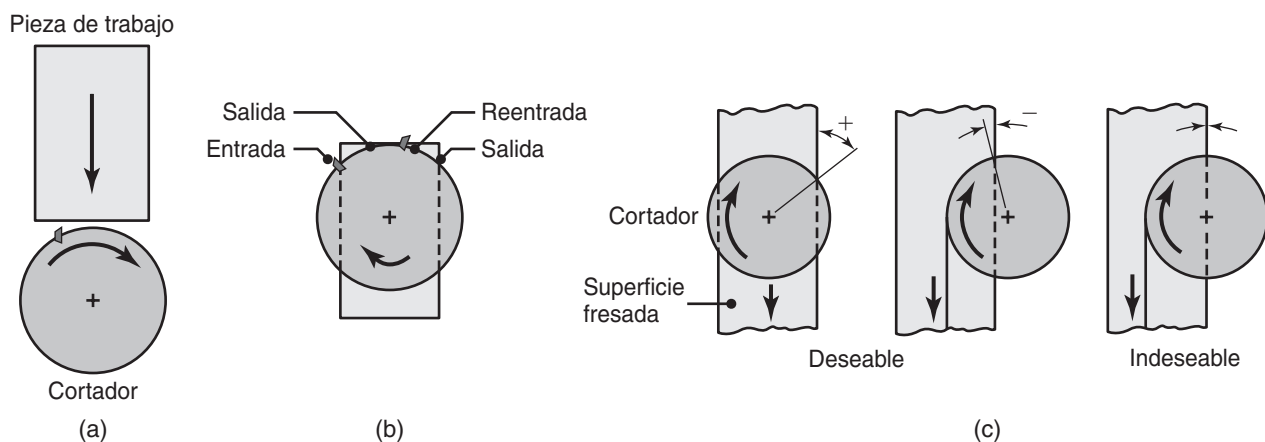


FIGURA 24.9 (a) Posición relativa del cortador e inserto al entrar en contacto inicialmente con la pieza de trabajo en el fresado de careado. (b) Posiciones del inserto hacia el extremo del corte. (c) Ejemplos de ángulos de salida del inserto, que muestran posiciones deseables (ángulo positivo o negativo) e indeseables (ángulo cero). En todas las figuras, el husillo del cortador está perpendicular a la página y gira en el sentido de las manecillas del reloj.

EJEMPLO 24.2 Velocidad de remoción de material, potencia requerida y tiempo de corte en fresado de careado

En relación con la figura 24.4, suponga que $D = 150$ mm, $w = 60$ mm, $l = 500$ mm, $d = 3$ mm, $v = 0.6$ m/min y $N = 100$ rpm. El cortador tiene 10 insertos y el material de la pieza de trabajo es una aleación de aluminio de alta resistencia. Calcule la velocidad de remoción de material, el tiempo de corte, el avance por diente y la potencia requerida.

Solución Primero obsérvese que la sección transversal de corte es $wd = (60)(3) = 180$ mm². Si se considera que la velocidad de la pieza de trabajo, v , es 0.6 m/min = 600 mm/min, la velocidad de remoción de material (MRR) se puede calcular como:

$$\text{MRR} = (180)(600) = 108,000 \text{ mm}^3/\text{min}$$

El tiempo de corte se obtiene mediante:

$$t = \frac{l + 2l_c}{v}$$

En la figura 24.4 se observa que, para este problema, $l_c = \frac{D}{2} = 75$ mm. Por lo tanto, el tiempo de corte es:

$$t = \frac{500 + 150}{10} = 65 \text{ s} = 1.08 \text{ min}$$

El avance por diente se puede obtener de la ecuación 24.3. Si se considera que $N = 100$ rpm = 1.67 rev/s, se encontrará que:

$$f = \frac{10}{(1.67)(10)} = 0.6 \text{ mm/diente}$$

Para este material, considérese que la potencia unitaria, de acuerdo con la tabla 21.2, es de $1.1 \text{ W} \cdot \text{s}/\text{mm}^3$. Por lo tanto, la potencia es:

$$\text{Potencia} = (1.1)(1800) = 1980 \text{ W} = 1.98 \text{ kW}$$

24.2.3 Fresado frontal

El *fresado frontal* es una operación de maquinado importante y común debido a su versatilidad y capacidad para producir diversos perfiles y superficies curvadas. El cortador, conocido como **fresa frontal** (fig. 24.2c), tiene un zanco recto (para dimensiones pequeñas) o un zanco cónico (para dimensiones más grandes) y se monta en el husillo de la fresadora. Las fresas frontales se pueden fabricar con aceros de alta velocidad o con insertos de carburo, similares a los del fresado de careado. Por lo general, el cortador gira en un eje perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo y también se puede inclinar para maquina superficies cónicas o curvadas.

Existen fresas frontales con extremos hemisféricos (*fresas de punta esférica*) para la producción de superficies esculpidas, como en matrices y moldes. Las *fresas frontales huecas* tienen dientes internos de corte y se utilizan para maquina la superficie cilíndrica de piezas de trabajo sólidas y redondas. El fresado frontal puede producir varias superficies a cualquier profundidad, como las de tipo curvado, escalonadas y de cavidades (fig. 24.2d). El cortador puede retirar material con su filo de corte del extremo y con las horizontales, como se puede ver en la figura 24.2c. Las máquinas de husillo vertical y husillo horizontal, así como los centros de maquinado, pueden emplearse para piezas de trabajo de fresado frontal de diversas formas y tamaños. Las máquinas pueden programarse de manera que el cortador siga una serie compleja de trayectorias que optimicen toda la operación de maquinado, a fin de mejorar la productividad y obtener un costo mínimo.

Fresado frontal de alta velocidad. En la sección 25.5 se describen el maquinado de alta velocidad y sus aplicaciones. El *fresado frontal de alta velocidad* se ha convertido en un proceso importante con diversas aplicaciones, como el fresado de componentes grandes de aluminio para aeronaves y estructuras de panal con velocidades de husillo de 20,000 a 60,000 rpm. Las máquinas deben tener alta rigidez y precisión, requiriendo por lo general rodamientos hidrostáticos (de aire) y dispositivos de sujeción de trabajo de alta calidad. Los husillos poseen una precisión rotatoria de $10\ \mu\text{m}$, por lo que la superficie de la pieza de trabajo también es muy precisa. A velocidades tan altas de remoción de material, la recolección y el desecho de las virutas pueden representar un problema significativo, como se explicó en la sección 23.3.7.

La producción de cavidades en matrices para conformado de metales (**estampado de matrices**), como en el forjado o el formado de láminas metálicas, también se efectúa mediante fresado frontal de alta velocidad, utilizando a menudo fresas frontales de punta esférica con recubrimiento de TiAlN (fig. 24.10). Las máquinas tienen movimientos de *cuatro* o *cinco ejes* (por ejemplo, ver fig. 24.18) y pueden manejar matrices hasta de $3\ \text{m} \times 6\ \text{m}$ (9 pies $\times$ 18 pies) con un peso de 60 toneladas. Así, no es de sorprender que dichas matrices lleguen a costar alrededor de 2 millones de dólares. Las ventajas de las máquinas de cinco ejes son que (a) tienen la capacidad de maquinar formas muy complejas en un solo arreglo; (b) pueden emplear herramientas de corte más cortas (reduciendo así la tendencia a la vibración), y (c) permiten taladrar orificios a varios ángulos compuestos.



FIGURA 24.10 Fresas frontales de punta esférica. Estos cortadores tienen la capacidad de producir contornos elaborados y con frecuencia se utilizan en el maquinado de matrices y moldes. (Ver también fig. 24.2d). Fuente: Cortesía de Dijet, Inc.

24.2.4 Otras operaciones de fresado y cortadores de fresado

Se utilizan muchas otras operaciones y cortadores de fresado para maquinar piezas de trabajo. En el **fresado combinado de fresas paralelas**, se montan dos o más cortadores en un eje para maquinar dos superficies paralelas en la pieza (fig. 24.11a). El **fresado de forma** produce perfiles curvados empleando cortadores que tienen dientes muy afilados (fig. 24.11b). Dichos cortadores también sirven para cortar dientes de engranes, como se describe en la sección 24.7. Las operaciones de **acanalado** y **cortado** se realizan usando *cortadores circulares*, como se muestra en la figura 24.11c y d, respectivamente. Los dientes se pueden alternar en forma ligera, como los de una hoja de sierra (sección 24.5), para proveer espacio al cortador cuando produce ranuras profundas. Las *sierras de cortado* son relativamente delgadas, por lo general menores a 5 mm ($\frac{3}{16}$ de pulgada). Los *cortadores de ranura T* se utilizan para fresar ranuras T, como las que se encuentran en las mesas de trabajo de máquinas herramienta para sujetar piezas de trabajo. Como se muestra en la figura 24.12a, primero se fresa una ranura con una fresa frontal; después el cortador maquina en un pase el perfil completo de la ranura T.

Los *cortadores de ranura para chaveta* se utilizan en la elaboración de ranuras de chavetas semicilíndricas (Woodruff) para ejes. Los *cortadores de fresado angular* (ángulo simple o doble ángulo) se emplean para producir superficies cónicas con varios ángulos. Las *fresas huecas* (fig. 24.12b) son huecas y se montan en un eje; esto permite utilizar el mismo eje para cortadores de diferentes tamaños. El uso de fresas huecas es similar al de fresas frontales. El fresado con un solo diente de corte montado en un husillo de alta velocidad se conoce como *fresado de un solo filo*; por lo general, sirve en operaciones de fresado de careado y mandrinado. A esta herramienta se le puede dar forma como una herramienta de corte de una sola punta y puede colocarse en varias posiciones radiales en el husillo, en un arreglo similar al mostrado en la figura 23.23b.

24.2.5 Portaherramientas

Los cortadores de fresado se clasifican en cortadores de árbol o cortadores tipo zanco. Los **cortadores de árbol** se montan en un *árbol* (ver figs. 24.11 y 24.15a) para operaciones como fresado periférico, de careado, combinado de fresas paralelas y de forma. En los **cortadores tipo zanco**, el cortador y el zanco se hacen de una pieza; las fresas frontales son

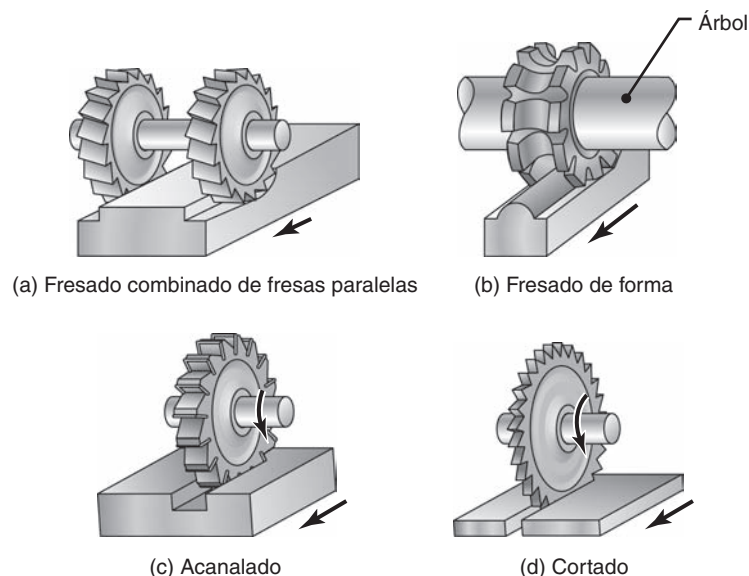


FIGURA 24.11 Cortadores para (a) fresado combinado de fresas paralelas; (b) fresado de forma; (c) acanalado, y (d) cortado con un cortador de fresado.

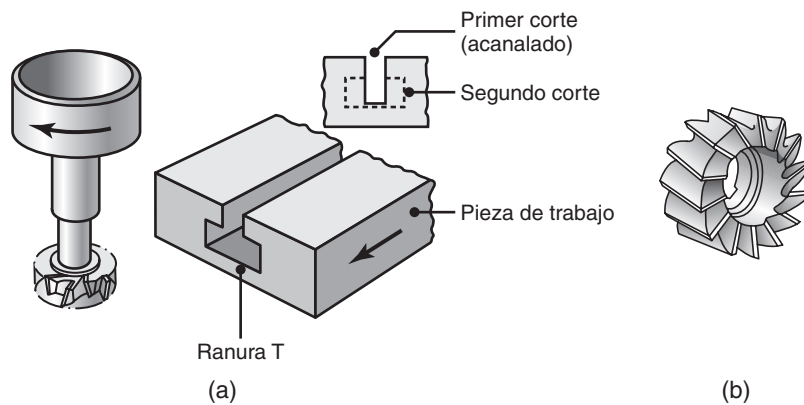


FIGURA 24.12 (a) Corte de ranura T con un cortador de fresado. (b) Fresa hueca.

los ejemplos más comunes. Las fresas frontales pequeñas poseen zancos rectos, pero las más grandes tienen zancos cónicos para montarlas mejor en el husillo de la máquina, a fin de resistir las fuerzas y torque más altos comprendidos en el corte. Los cortadores con zancos rectos se montan en boquillas de pinzas o en sujetadores especiales de fresas frontales; los que tienen zancos cónicos se montan en portaherramientas cónicos.

Además de los tipos mecánicos, también existen portaherramientas y ejes hidráulicos. La rigidez de los cortadores y portaherramientas es importante para proporcionar calidad a la superficie y reducir la vibración y el traqueteo durante las operaciones de fresado.

24.2.6 Capacidades del proceso de fresado

Además de las diversas características de los procesos de fresado descritas hasta ahora, sus capacidades incluyen parámetros como acabado superficial, tolerancias dimensionales, capacidad de producción y consideraciones de costos. En las tablas 23.1 y 23.8, las figuras 23.13 y 23.14 y el capítulo 40, se presenta información sobre las capacidades del proceso.

En la tabla 24.2 se presentan los intervalos convencionales de velocidades y avances de corte para el fresado. Dependiendo del material de la pieza de trabajo y sus condiciones, el material de la herramienta de corte y los parámetros del proceso, las velocidades de corte varían ampliamente, desde 30 hasta 3000 m/min (90 a 10,000 pies/min). Por lo general, el avance por diente va de alrededor de 0.1 mm (0.004 pulgada) a 0.5 mm (0.02 pulgada) y las profundidades de corte van de 1 mm a 8 mm (0.04 a 0.30 pulgada). Para recomendaciones sobre el fluido de corte, ver la tabla 23.5.

En la tabla 24.3 se proporciona una **guía general de resolución de problemas**; en las figuras 24.13 y 24.14 se ilustran los últimos cuatro casos de dicha tabla. El *contragolpeteo* comprende marcas de avance doble producidas por el extremo posterior del cortador. En la tabla 24.3 se observa que algunas recomendaciones (como el cambio de parámetros de fresado o de herramientas de corte) son más fáciles de seguir que otras (como los cambios de ángulos de las herramientas y la geometría del cortador, además de la rigidez de los husillos y los dispositivos de sujeción del trabajo).

24.2.7 Lineamientos de diseño y operación para fresado

En general, los lineamientos para torneado y mandrinado provistos en las secciones 23.3.6 y 23.4 también se aplican a las operaciones de fresado. Algunos factores adicionales relativos a dichas operaciones son los siguientes:

- Hasta donde sea posible, deben utilizarse cortadores de fresado estándares, dependiendo de las características de diseño de las partes. Tienen que evitarse cortadores especiales costosos.
- Deben especificarse chaflanes o biseles en vez de radios; si se especifican radios, será difícil hacer que coincidan diversas superficies de intersección.

- Deben evitarse las cavidades y bolsas internas con esquinas puntiagudas, dada la dificultad para fresarlas, ya que los dientes o insertos de corte tienen un radio de filo finito. Cuando sea posible, el radio de la esquina debe coincidir con la geometría del cortador de fresado.
- Las piezas de trabajo deben ser suficientemente rígidas para minimizar las deflexiones que pudieran producir las fuerzas de sujeción y corte.

Los lineamientos para evitar la vibración y el traqueteo en el fresado son similares a los del torneado. Además, deben considerarse las siguientes prácticas:

- Los cortadores deben montarse tan cerca como sea posible de la base del husillo, para reducir las deflexiones de las herramientas.
- Los portaherramientas y dispositivos de fijación deben ser tan rígidos como sea posible.
- En casos de vibración y traqueteo, deben modificarse las condiciones de forma y proceso de la herramienta y utilizarse cortadores con menos dientes de corte o con espaciado aleatorio de dientes.

TABLA 24.2

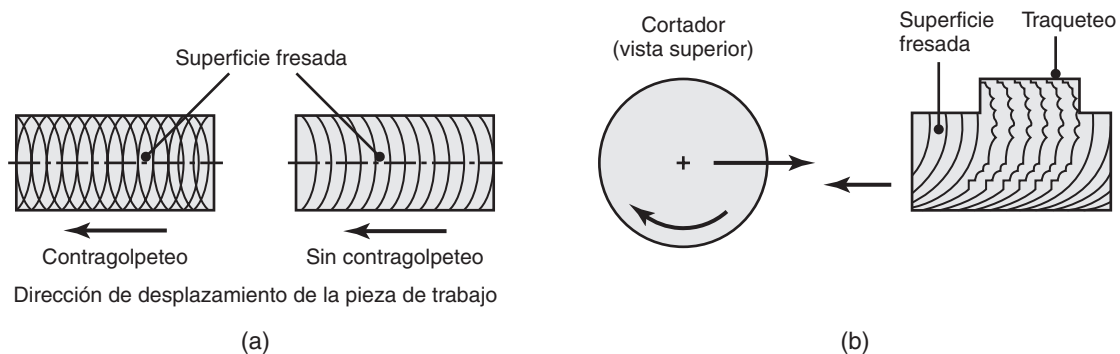
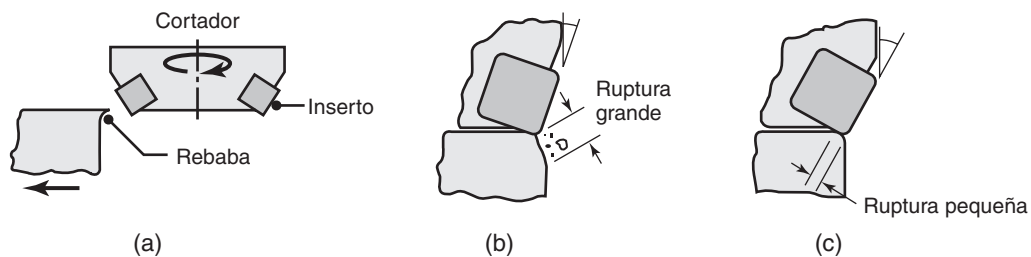
Recomendaciones generales para operaciones de fresado					
Material	Herramienta de corte	Condiciones iniciales de propósito general		Variedad de condiciones	
		Avance mm/diente (pulgadas /diente)	Velocidad m/min (pies/min)	Avance mm/diente (pulgadas /diente)	Velocidad m/min (pies/min)
Aceros de bajo carbono y de maquinado libre	Carburo sin recubrimiento, carburo recubierto, cermet	0.13–0.20 (0.005–0.008)	120–180 (400–600)	0.085–0.38 (0.003–0.015)	90–425 (300–1400)
Aceros aleados					
Blandos	Cermet sin recubrimiento, recubiertos	0.10–0.18 (0.004–0.007)	90–170 (300–550)	0.08–0.30 (0.003–0.012)	60–370 (200–1200)
Duros	Cermet, PcBN	0.10–0.15 (0.004–0.006)	180–210 (600–700)	0.08–0.25 (0.003–0.010)	75–460 (250–1500)
Hierro fundido, gris					
Blando	Cermet sin recubrimiento, recubiertos, SiN	0.10–0.20 (0.004–0.008)	120–760 (400–2500)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	90–1370 (300–4500)
Duro	Cermet, SiN, PcBN	0.10–0.20 (0.004–0.008)	120–210 (400–700)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	90–460 (300–1500)
Acero inoxidable, Austenítico	Cermet sin recubrimiento, recubiertos	0.13–0.18 (0.005–0.007)	120–370 (400–1200)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	90–500 (300–1800)
Aleaciones de alta temperatura	Cermet sin recubrimiento, recubiertos, SiN, PcBN	0.10–0.18 (0.004–0.007)	30–370 (100–1200)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	30–550 (90–1800)
Aleaciones de titanio	Cermet sin recubrimiento, recubiertos	0.13–0.15 (0.005–0.006)	50–60 (175–200)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	40–140 (125–450)
Aleaciones de aluminio					
Maquinado libre	PCD sin recubrimiento, recubiertos	0.13–0.23 (0.005–0.009)	610–900 (2000–3000)	0.08–0.46 (0.003–0.018)	300–3000 (1000–10,000)
Alto silicio	PCD	0.13 (0.005)	610 (2000)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	370–910 (1200–3000)
Aleaciones de cobre	PCD sin recubrimiento, recubiertos	0.13–0.23 (0.005–0.009)	300–760 (1000–2500)	0.08–0.46 (0.003–0.018)	90–1070 (300–3500)
Plásticos	PCD sin recubrimiento, recubiertos	0.13–0.23 (0.005–0.009)	270–460 (900–1500)	0.08–0.46 (0.003–0.018)	90–1370 (300–4500)

Fuente: Con base en datos de Kennametal, Inc.

Nota: Las profundidades de corte, d , van generalmente de 1 a 8 mm (0.04 a 0.3 pulgadas). PcBN: Nitruro de boro cúbico policristalino. PCD: Diamante policristalino. Ver también la tabla 23.4 para intervalos de velocidades de corte dentro de los grupos de materiales para herramientas.

TABLA 24.3

Guía general de resolución de problemas para operaciones de fresado	
Problema	Causas probables
Ruptura de la herramienta	El material de la herramienta carece de tenacidad, ángulos inapropiados de la herramienta, parámetros de maquinado demasiado elevados.
Desgaste excesivo de la herramienta	Parámetros de maquinado demasiado elevados, material inadecuado de la herramienta, ángulos inapropiados de la herramienta, fluido de corte inadecuado.
Acabado rugoso de la superficie	Avance por diente demasiado alto, muy pocos dientes en el cortador, herramienta astillada o desgastada, acumulación del borde, vibración y traqueteo.
Tolerancias demasiado amplias	Falta de rigidez del husillo y sujeción del trabajo, aumento excesivo de temperatura, herramienta desafilada, virutas congestionando el cortador.
Superficie bruñida de la pieza de trabajo	Herramienta desafilada, profundidad de corte demasiado baja, ángulo de alivio radial muy pequeño.
Contragolpeteo	Herramientas de corte desafiladas, inclinación en husillo del cortador, ángulos negativos de la herramienta.
Marcas de traqueteo	Rigidez insuficiente en el sistema; vibraciones externas; avance, profundidad de corte y anchura de corte demasiado grandes.
Formación de rebabas	Filos de corte desafilados o demasiado honeados, ángulo incorrecto de entrada o salida, avance y profundidad de corte demasiado altos, forma incorrecta del inserto.
Ruptura	Ángulo de avance demasiado bajo, geometría incorrecta del filo de corte, ángulo incorrecto de entrada o salida, avance y profundidad de corte demasiado altos.

**FIGURA 24.13** Características de superficie maquinada en el fresado de careado. Ver también figura 24.6.**FIGURA 24.14** Defectos de los filos en el fresado de careado: (a) formación de rebabas a lo largo del filo de la pieza de trabajo; (b) ruptura a lo largo del filo de la pieza de trabajo, y (c) forma en que se puede evitar aumentando el ángulo de avance (ver también última fila en la tabla 24.3).

24.2.8 Fresadoras

Dado que tienen la capacidad de realizar varias operaciones de corte, las fresadoras se encuentran entre las máquinas herramienta más versátiles y útiles. La primera fue construida en 1820 por Eli Whitney (1765-1825). En la actualidad existe una gran selección de fresadoras con diversos usos. A continuación se describen las características de las fresadoras estándar. Sin embargo, muchas de estas máquinas y operaciones están siendo reemplazadas con *controles por computadora y centros de maquinado*.

Máquinas tipo columna y codo. Utilizadas para operaciones de fresado de propósito general, las *máquinas tipo columna y codo* son las fresadoras más comunes. El husillo en el que se monta el cortador de fresado puede ser *horizontal* (fig. 24.15a), para fresado periférico, o *vertical*, para operaciones de fresado de careado y frontal, mandrinado y taladrado (fig. 24.15b). Los componentes básicos de estas máquinas son:

- *Mesa de trabajo*: en la que se sujeta la pieza de trabajo utilizando ranuras T. La mesa se mueve longitudinalmente en relación con las fresas paralelas.
- *Carro*: soporta la mesa y puede moverse en dirección transversal.
- *Codo*: soporta el carro y da movimiento vertical a la mesa, de manera que la profundidad de corte puede ajustarse y es posible acomodar piezas de trabajo con diversas alturas.
- *Brazo superior*: se utiliza en máquinas horizontales; es ajustable para acomodar diferentes longitudes de eje.
- *Cabezal*: contiene el husillo y el sujetador del cortador. En máquinas verticales, la cabeza puede fijarse o ajustarse verticalmente y girarse en un plano vertical sobre la columna para cortar superficies cónicas.

Las *fresadoras simples* tienen tres ejes de movimiento, que por lo general se mueven manual o mecánicamente. En las *fresadoras tipo columna y codo universales*, la mesa puede girar en el plano horizontal. De esta manera se pueden maquinar formas complejas (como canales helicoidales a diversos ángulos) para producir partes como engranes, brocas, machuelos y cortadores.

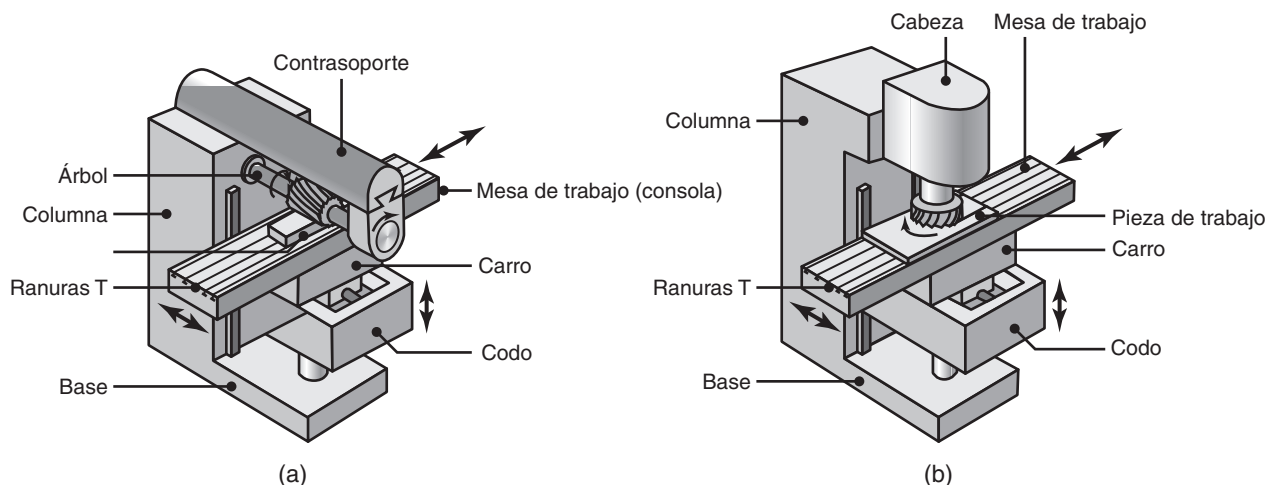


FIGURA 24.15 Esquema de (a) fresadora tipo columna y codo de husillo horizontal, y (b) fresadora tipo columna y codo de husillo vertical. Fuente: G. Boothroyd.

Fresadoras tipo bancada. En las *máquinas tipo bancada*, la mesa de trabajo se monta directamente en la bancada, que reemplaza al codo y puede moverse sólo en forma longitudinal (fig. 24.16). Estas máquinas no son tan versátiles como otros tipos, pero tienen alta rigidez y por lo general se utilizan para trabajo de alta producción. Los husillos pueden ser horizontales o verticales y tipo dúplex o triples (con dos o tres husillos), para maquinado simultáneo de dos o tres superficies de una pieza de trabajo.

Otros tipos de fresadoras. Existen muchos otros tipos de fresadoras (ver también *centros de maquinado*, sección 25.2). Las *fresadoras tipo cepilladora*, que son similares a las máquinas tipo bancada, están equipadas con diversas cabezas y cortadores para fresar diferentes superficies. Se utilizan en piezas de trabajo pesadas y son más eficaces que las cepilladoras (sección 24.3) cuando se usan con propósitos semejantes. Las *máquinas de mesa giratoria* son similares a las fresadoras verticales y están equipadas con una o más cabezas para operaciones de fresado de careado.

Las máquinas de fresado están siendo reemplazadas con rapidez por *máquinas de control numérico por computadora* (CNC), que son versátiles y tienen la capacidad de fresar, taladrar, mandrinar y machuelear con precisión repetitiva (fig. 24.17). También existen *fresadoras de perfiles*, que cuentan con cinco ejes de movimiento (fig. 24.18); obsérvese los tres movimientos lineales y los dos movimientos angulares de los componentes de la máquina.

Dispositivos y accesorios de sujeción del trabajo. La pieza de trabajo a fresar debe sujetarse con seguridad a la mesa de trabajo para resistir las fuerzas de corte y evitar su deslizamiento durante el fresado. Con este propósito se utilizan diversos montajes y tornillos de banco. (Ver también la sección 37.8 de *fijación flexible*.) Se montan y sujetan a la mesa mediante las ranuras T mostradas en la figura 24.15a y b. Los tornillos de banco se emplean para trabajo de pequeña producción en partes pequeñas. Los montajes se usan para trabajo de mayor producción y se pueden automatizar por medios mecánicos e hidráulicos.

Los *accesorios* para fresadoras incluyen diversos soportes y accesorios para el cabezal de la máquina (así como para la mesa de trabajo) diseñados con el propósito de adaptarlos a diferentes operaciones de fresado. Por lo general, el accesorio más común en los talleres ha sido el *cabezal divisor (de índice) universal*. De accionamiento manual, este aditamento gira (indexa) la pieza de trabajo a ángulos especificados entre los pasos individuales de maquinado. Por lo común se ha utilizado para fresar partes con superficies poligonales y para maquinar dientes de engranes. En la actualidad, los cabezales

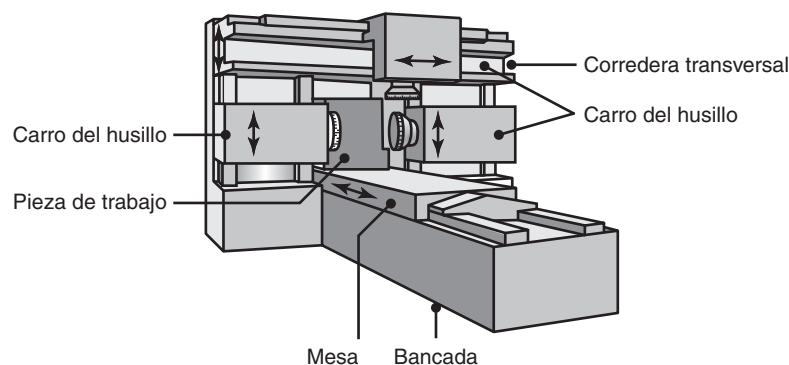


FIGURA 24.16 Esquema de una fresadora tipo bancada.

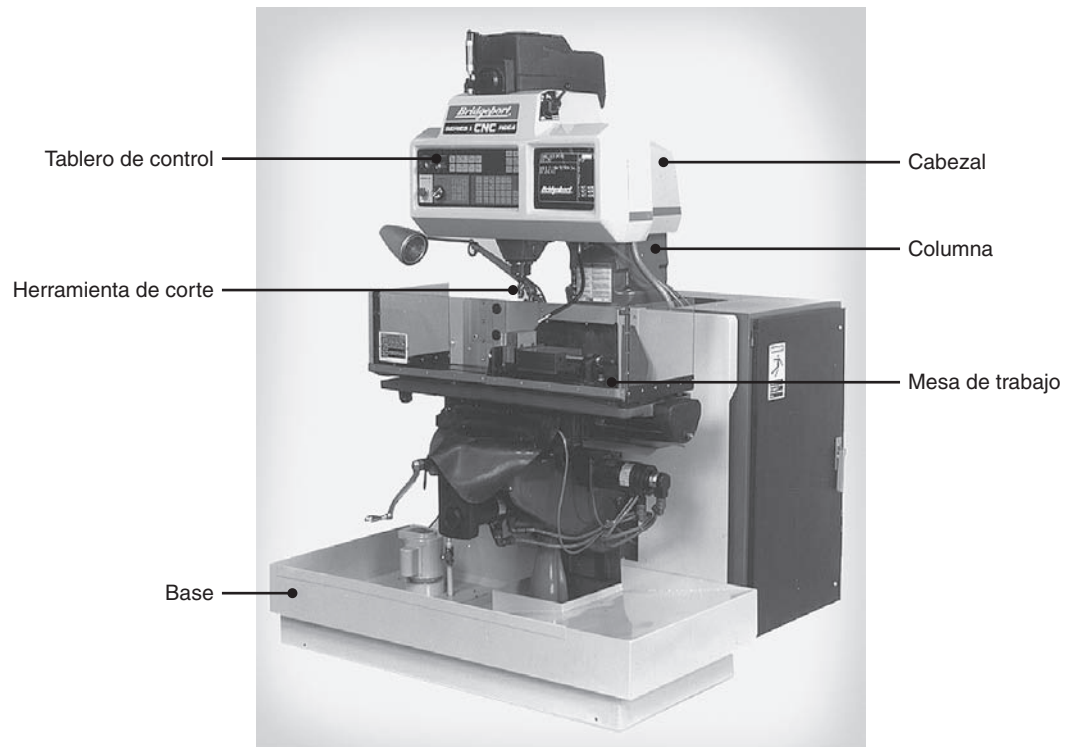


FIGURA 24.17 Fresadora de husillo vertical de control numérico por computadora (CNC). Ésta es una de las máquinas herramienta más versátiles. La fresadora de husillo vertical original utilizada en talleres de trabajo se sigue conociendo como “Bridgeport”, en honor de su fabricante en Bridgeport, Connecticut. *Fuente:* Cortesía de Bridgeport Machines Division, Textron Inc.

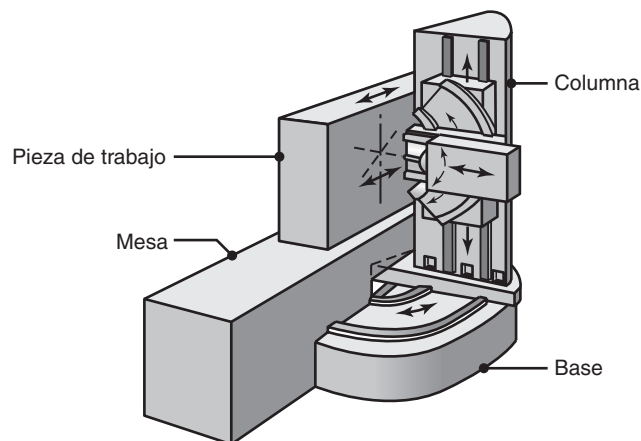


FIGURA 24.18 Esquema de una fresadora de perfiles de cinco ejes. Obsérvese que existen tres movimientos lineales principales y dos angulares de los componentes de la máquina.

divisores sólo se usan para pequeñas cantidades en talleres de trabajo; han sido reemplazados por los controles CNC y los centros de maquinado.

24.3 Cepillado

Cepillado de mesa móvil. Ésta es una operación de maquinado relativamente simple mediante la cual se producen superficies planas, así como secciones transversales con canales y muescas, a lo largo de la pieza de trabajo (fig. 24.19). Por lo general, el cepillado se realiza en piezas tan grandes como $25\text{ m} \times 15\text{ m}$ ($75\text{ pies} \times 40\text{ pies}$), aunque es más común una longitud de 10 m. En una **cepilladora**, la pieza se monta sobre una mesa que se desplaza hacia delante y hacia atrás a lo largo de una trayectoria recta. Una corredera transversal horizontal, equipada con uno o más cabezales de herramientas, se puede mover de modo vertical a lo largo de las guías de la columna. Las herramientas de corte se montan en los cabezales y el maquinado se efectúa en trayectoria recta. Para evitar que los filos de corte de la herramienta se astillen al rozarlos con la pieza de trabajo durante la carrera de retorno, las herramientas se inclinan o elevan mecánica o hidráulicamente.

Debido al movimiento alternativo de la pieza de trabajo, es importante el tiempo que transcurre sin corte durante la carrera de retorno. Por consiguiente, estas operaciones no son eficaces ni económicas (excepto por la producción en bajas cantidades, que suele ser el caso para piezas grandes y largas). La eficacia de la operación puede mejorarse equipando las cepilladoras con portaherramientas y herramientas que corten en ambas direcciones de avance de la mesa. Además, dada la longitud de la pieza de trabajo, es fundamental equipar las herramientas de corte con rompevirutas. De lo contrario, las virutas generadas pueden ser muy largas, lo que interfiere en la operación y constituye un riesgo de seguridad.

Las velocidades de corte en las cepilladoras pueden ser hasta de 120 m/min (400 pies/min) con capacidades de potencia hasta de 110 kW (150 hp). Las velocidades recomendadas para hierros fundidos y aceros inoxidable van de 3 a 6 m/min (10 a 20 pies/min) y hasta de 90 m/min (300 pies/min) para aleaciones de aluminio y magnesio. Por lo general, los avances son de 0.5 a 3 mm/carrera (0.02 a 0.125 pulgada/carrera). Los materiales más comunes de las herramientas son aceros de alta velocidad M2 y M3 y carburos K20 (C2) y P20 (C6).

Cepillado de mesa fija. El maquinado por *cepillado de mesa fija* es básicamente el mismo que el de mesa móvil, excepto que (a) la que se desplaza es la herramienta y no la pieza de trabajo, y (b) las piezas son más pequeñas, por lo general de menos de $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ ($3\text{ pies} \times 6\text{ pies}$) de área superficial. En una **cepilladora de mesa fija horizontal**, la herramienta de corte se desplaza hacia delante y hacia atrás a lo largo de la trayectoria recta. La herramienta se sujeta al cabezal de la herramienta, que se monta en la corredera. Ésta tiene un movimiento alternativo. En la mayoría de las máquinas, el corte se efectúa durante

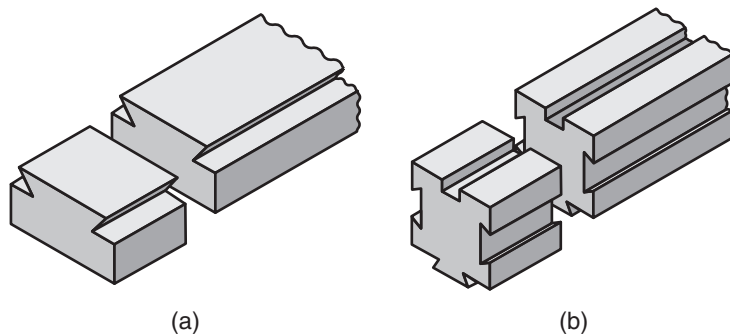


FIGURA 24.19 Partes comunes que se pueden fabricar en un cepillo.

el movimiento de avance de la corredera (*corte de empuje*); en otras, se realiza durante la carrera de retorno de la corredera (*corte de arrastre*). Las cepilladoras de mesa fija verticales (**ranuradoras**) se utilizan para maquinar muescas, ranuras de chavetas y matrices. Debido a las bajas capacidades de producción, en la actualidad sólo las cepilladoras de mesa fija para propósitos especiales (como las de engranes, sección 24.7.2) son de uso común.

24.4 | Brochado y brochadoras

La operación de *brochado* es semejante al cepillado de mesa fija con un cortador largo de dientes múltiples y se utiliza para maquinar superficies internas y externas, como orificios de sección circular, cuadrada o irregular (fig. 24.20). En una **brocha** (fig. 24.21a), la profundidad total del material removido en una carrera es la suma de las profundidades de corte de cada diente de la brocha. Una brocha grande puede remover material hasta una profundidad de 38 mm (1.5 pulgadas) en una carrera. El brochado es un proceso de producción importante y puede fabricar partes con buen acabado superficial y precisión dimensional. Compite de manera favorable con otros procesos (como mandrinado, fresado, cepillado de mesa fija y rimado) para elaborar formas similares. Aunque las brochas pueden ser costosas, el costo se justifica con las líneas de producción de grandes cantidades.

Brochas. En la figura 24.21b se presenta la terminología de una brocha típica. El *ángulo de ataque* (gancho) depende del corte del material (como sucede en el torneado y otras operaciones de corte) y por lo general va de 0° a 20°. El *ángulo de holgura* es comúnmente de 1° a 4°; los dientes de acabado tienen ángulos más pequeños. Un ángulo de holgura demasiado pequeño hace que los dientes rocen con la superficie brochada. El *paso* de los dientes depende de factores como la longitud de la pieza de trabajo (longitud de corte), la resistencia de los dientes y el tamaño y la forma de las virutas.

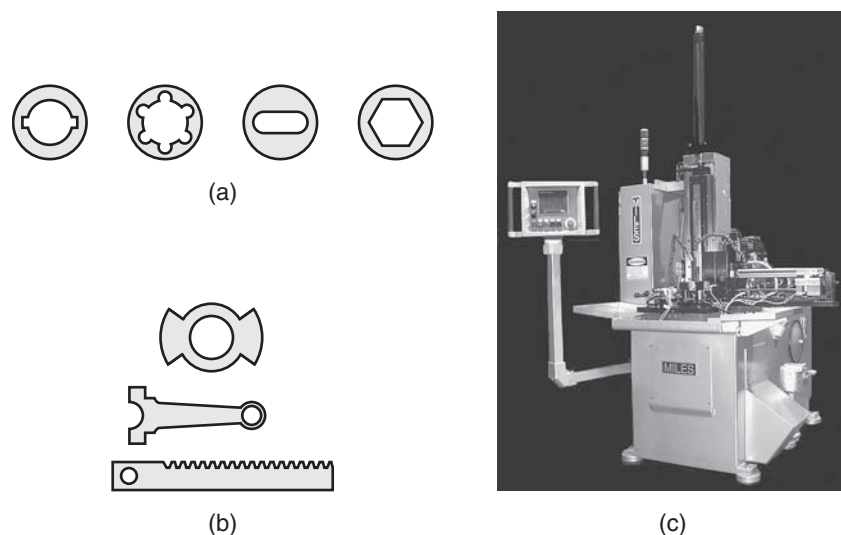


FIGURA 24.20 (a) Partes comunes producidas mediante brochado interno. (b) Partes fabricadas mediante brochado de la superficie. (c) Máquina de brochado vertical. Fuente: (a) y (b) Cortesía de General Broach and Engineering Company; (c) Cortesía de Ty Miles, Inc.

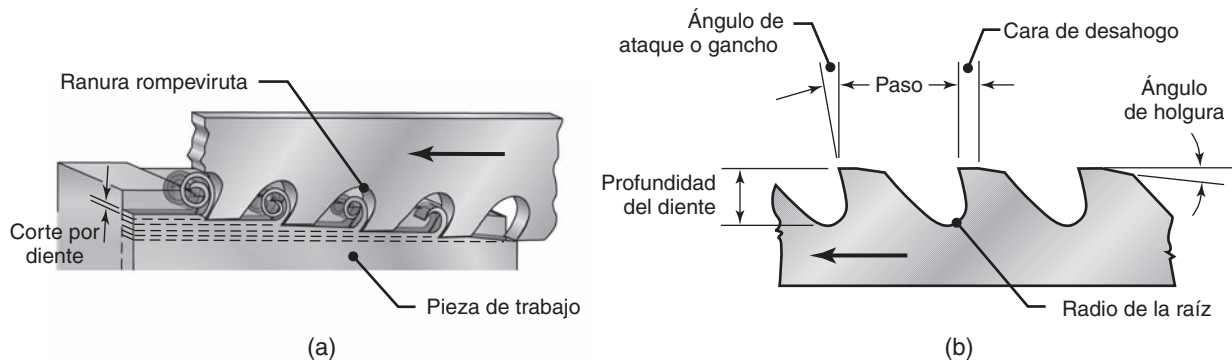


FIGURA 24.21 (a) Acción de corte de una brocha que muestra diversas características. (b) Terminología de una brocha.

La profundidad de los dientes y el paso deben ser suficientemente grandes para manejar las virutas generadas durante el brochado, en particular con piezas de trabajo grandes. Por lo menos dos dientes deben estar en contacto con la pieza en todo momento. La siguiente fórmula se puede utilizar a fin de obtener el paso para una brocha que corte una superficie de longitud l :

$$\text{Paso} = k\sqrt{l} \quad (24.6)$$

donde k es una constante, igual a 1.76 cuando l está en mm y a 0.35 cuando l está en pulgadas. Un paso promedio para brochas pequeñas va de 3.2 mm a 6.4 mm (0.125 a 0.25 pulgada) y para las grandes, de 12.7 mm a 25 mm (0.5 a 1 pulgada). La profundidad de corte por diente depende del material de la pieza de trabajo y del acabado superficial requerido. Por lo general, va de 0.025 mm a 0.075 mm (0.001 a 0.003 pulgada) para brochas de tamaño mediano, aunque pueden ser mayores a 0.25 mm (0.01 pulgada) para brochas más grandes.

Existen brochas con diversos perfiles de dientes, incluyendo algunas con *rompevirutas* (fig. 24.22). Entre las brochas de *superficie* figuran las *planas* (para corte de superficies planas), *de ranuras*, *de contorno*, *de cola de milano*, *de anillo* (para formas externas de precisión) y *de fresas paralelas*. Respecto de los tipos de brochas *internas*, las hay para *orificio* (para orificios de tolerancia cerrada, formas redondas y otras formas; fig. 24.23), *ranura de chaveta*, *engrane interno* y *estriado* (para cañones de armas). Por lo general, las formas irregulares internas se brochan iniciando con un orificio redondo, taladrado o mandrinado en la pieza de trabajo.

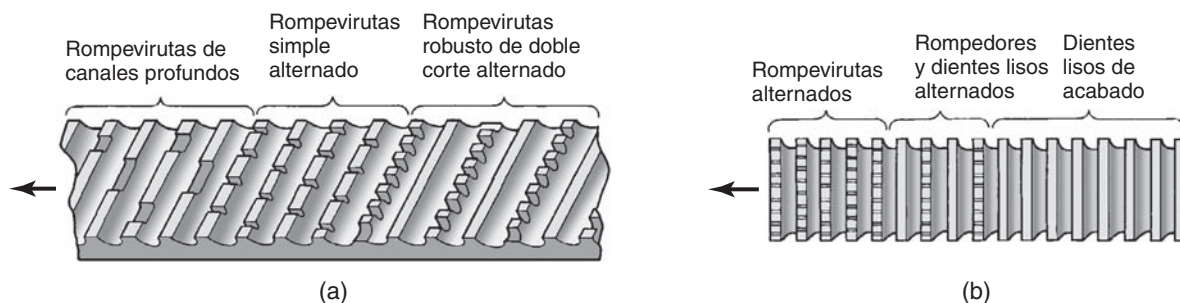


FIGURA 24.22 Características de rompevirutas en (a) brocha plana, y (b) brocha redonda.

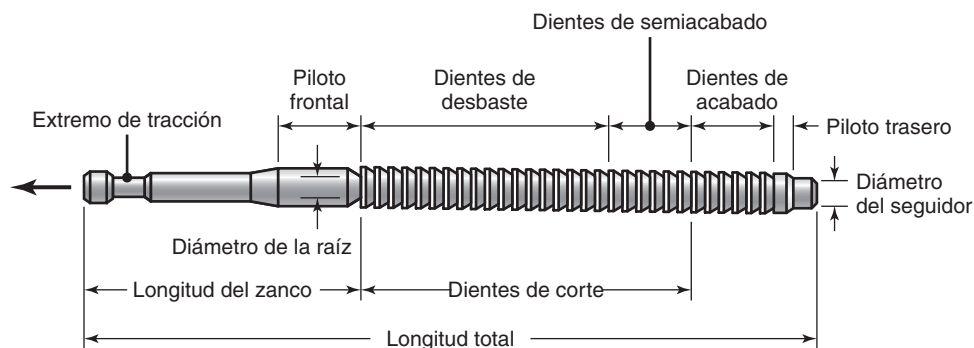


FIGURA 24.23 Terminología de una brocha interna tipo tracción utilizada para agrandar orificios largos.

Brochado rotativo. En general, este proceso se utiliza para brochar las superficies de apoyo de los cigüeñales y partes similares. El cigüeñal se rota entre centros y la brocha, que está equipada con múltiples insertos de carburo, pasa tangencialmente a través de las superficies de apoyo y remueve el material. El brochado rotativo es una combinación de *rasurado* y *pelado* (que retira una capa delgada de material con una herramienta de corte de forma especial); en él se emplean con éxito brochas rectas y circulares. Se han construido máquinas que brochan varios cigüeñales de manera simultánea.

Brochadoras. Las máquinas para brochar son relativamente simples en cuanto a construcción; sólo tienen movimientos lineales y, por lo general, son de accionamiento hidráulico, aunque algunas se mueven mediante manivela, tornillo o cremallera. Existen muchos estilos de máquinas de brochado y, en cuanto a tamaños, van desde máquinas para fabricar partes en forma de aguja hasta las utilizadas para brochar cañones de armas, incluyendo cañones estriados (canales internos en espiral). Las máquinas de brochado jalan o empujan las brochas y son horizontales o verticales. Por lo común, las *brochas de empuje* son más cortas, en la gama de 150 mm a 350 mm (6 a 14 pulgadas). Las *brochas de tracción* tienden a enderezar el orificio, en tanto que el empuje permite que la brocha siga cualquier irregularidad del orificio principal. Las máquinas horizontales tienen la capacidad de carreras más largas. La *fuerza* requerida para jalar o empujar la brocha depende de (a) la resistencia del material de la pieza de trabajo; (b) la profundidad y anchura total de corte; (c) la velocidad de corte; (d) el perfil de los dientes, y (e) el uso de fluidos de corte. Las capacidades de la fuerza de tracción de las brochas son tan altas como 0.9 MN (100 toneladas).

Parámetros del proceso. Las velocidades de corte del brochado van desde 1.5 m/min (5 pies/min) para aleaciones de alta resistencia, hasta 15 m/min (50 pies/min) para aleaciones de aluminio y magnesio. Los materiales más comunes de las brochas son los aceros de alta velocidad M2 y M7 e insertos de carburo. En la actualidad, la mayoría de las brochas se recubren con nitruro de titanio a fin de mejorar su vida útil y el acabado superficial. También se utilizan insertos de cerámica para operaciones de acabado en algunas aplicaciones. Se pueden hacer piezas en bruto de acero de alta velocidad más pequeñas para brochas con técnicas de metalurgia de polvos, a fin de mejorar el control de la calidad. Aunque se pueden indexar insertos de carburo o cerámica después de desgastarse, los dientes de las brochas de acero de alta velocidad deben reafilarse por rectificado, lo cual reduce el tamaño de la brocha. Son recomendables los fluidos de corte, en especial para brochado interno.

Consideraciones de diseño. En el brochado, como en otros procesos de maquinado, se necesita observar ciertos lineamientos para obtener una producción económica y de alta calidad. Los requisitos principales son los siguientes:

- Las partes deben diseñarse de manera que se puedan sujetar con seguridad en las brochadoras. Deben tener suficiente resistencia estructural y rigidez para soportar las fuerzas de corte durante el brochado.
- Deben evitarse los orificios ciegos, las esquinas puntiagudas, las estrías con cola de milano y las superficies planas grandes.
- Son preferibles los chaflanes a las esquinas redondas.

EJEMPLO 24.3 Brochado de estrías internas

La parte mostrada en la figura 24.24 está fabricada con hierro nodular (65-45-15; sección 12.3.2) y estrías internas, cada una de 50 mm (2 pulgadas) de largo. Las es-

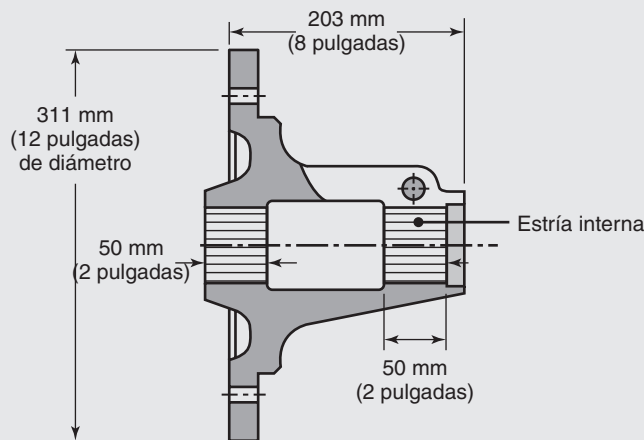


FIGURA 24.24 Ejemplo de parte con estrías internas producidas por brochado.

trías tienen 19 dientes de evolvente de círculo con un paso diametral de 63.52 mm (2.5009 pulgadas). Se utilizó una brocha de acero de alta velocidad M2 con 63 dientes, longitud de 1.448 m (57 pulgadas) y un diámetro igual al del paso para producir las estrías. El corte por diente fue de 0.116 mm (0.00458 pulgada); la velocidad de producción, de 63 piezas por hora; y el número de partes por rectificado, de 400, con una vida total de la brocha de unas 6000 partes.

Fuente: ASM International.

24.5 | Aserrado

El *aserrado* es una operación de corte común y antigua que se remonta al año 1000 a.C., en el que la herramienta de corte es una hoja de dientes pequeños (*sierra*). Cada diente remueve una pequeña cantidad de material con cada recorrido de la sierra. Este proceso se puede utilizar para todos los materiales metálicos y no metálicos y tiene la capacidad

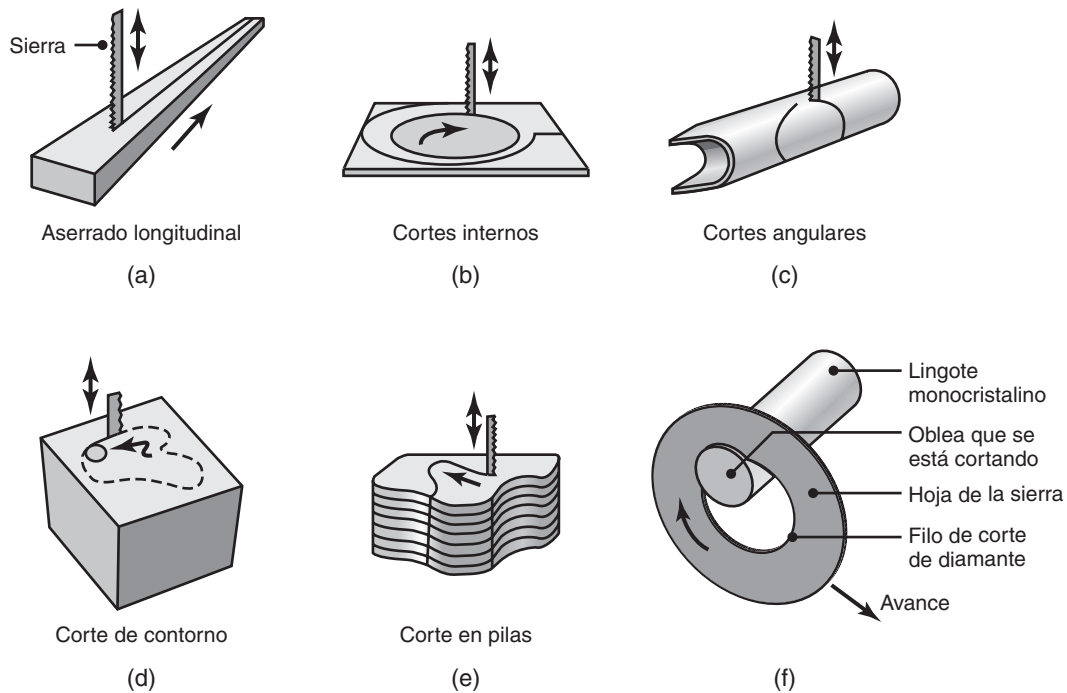


FIGURA 24.25 Ejemplos de diversas operaciones de aserrado.

de producir diversas formas (fig. 24.25). El aserrado es un proceso eficiente de remoción volumétrico y puede producir formas casi netas a partir de materias primas. La anchura de corte (**ranura**) en el aserrado suele ser angosta, por lo que el proceso desperdicia poco material.

En la figura 24.26 se muestran configuraciones comunes de dientes y cuchillas de sierras. Por lo común, el espaciado de los dientes es de 0.08 a 1.25 dientes por mm (2 a 32 por pulgada). Existe una gran variedad de tamaños, formas y espaciado de dientes, así como espesores y anchos de hojas. En general, las hojas de las sierras se fabrican con aceros de alto carbono y alta velocidad (M2 y M7). Para aserrar materiales más duros, se utilizan hojas de acero con dientes de acero de alta velocidad o de carburo (fig. 24.27).

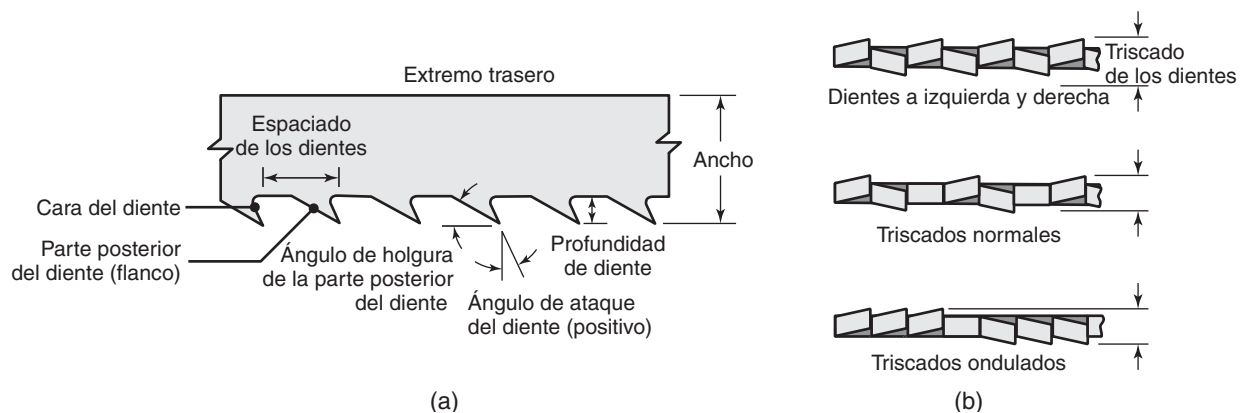


FIGURA 24.26 (a) Terminología de los dientes de una sierra. (b) Tipos de triscado de los dientes de una sierra, alternados para proporcionar una holgura a la hoja de la sierra con el fin de evitar que se atoren durante el aserrado.

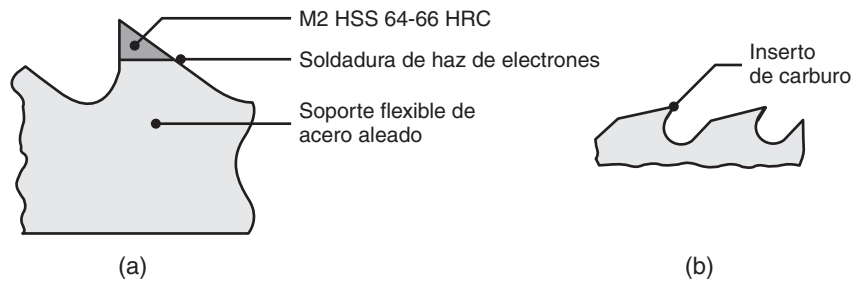


FIGURA 24.27 (a) Dientes de acero de alta velocidad soldados en una hoja de acero. (b) Insertos de carburo unidos por soldadura fuerte a los dientes de la hoja.

El **triscado de los dientes** en una sierra (fig. 24.26b) es importante, ya que proporciona una ranura suficientemente ancha para que la hoja se mueva en forma libre dentro la pieza de trabajo sin pegarse y sin excesiva resistencia a la fricción, reduciendo así el calor generado. Éste puede tener efectos adversos sobre el corte, en especial al cortar termoplásticos, que se ablandan con rapidez por el calor. El triscado de los dientes también permite que la hoja cuente con una trayectoria precisa, siguiendo el modelo a cortar sin desviarse. Por lo menos dos o tres dientes deben estar siempre en contacto con la pieza de trabajo para evitar que se *enganchen* (que el diente de la sierra se atore en la pieza). Ésta es la razón por la que puede ser difícil aserrar materiales delgados, en particular láminas metálicas. Cuanto más delgado sea el material, los dientes de la sierra deberán ser más finos y mayor su número por unidad de longitud de la sierra. Por lo general, se utilizan fluidos de corte para mejorar la calidad de corte y la vida útil de la sierra.

Tipos de sierras. Las *sierras de marco* o *arco* tienen hojas rectas (seguetas) y movimientos de vaivén o alternantes. Desarrolladas en la década de 1650, por lo general se utilizan para cortar barras, varillas y formas estructurales. Pueden operarse manual o mecánicamente. Debido a que el corte ocurre durante sólo una de las carreras, las sierras de marco no son tan eficientes como las sierras de banda (que se describen más adelante). Por lo general, las hojas de las *sierras de marco mecánicas* tienen de 1.2 mm a 2.5 mm (0.05 a 0.10 pulgada) de espesor y hasta 610 mm (24 pulgadas) de largo. La velocidad de los movimientos de vaivén va de 30 por minuto para aleaciones de alta resistencia a 180 por minuto para aceros al carbono. El bastidor de las sierras de marco mecánicas tiene un peso aumentado por diversos mecanismos, aplicando hasta 1.3 kN (300 libras) de fuerza a la pieza de trabajo para mejorar la capacidad de corte. Las hojas de las *sierras de marco manuales* son más delgadas y cortas que las de las sierras de arco mecánicas, que tienen hasta 1.2 dientes por mm (32 por pulgada) para aserrar láminas metálicas y tubería delgada.

Por lo general, las *sierras circulares* (también conocidas como *sierras en frío* cuando se corta metal) se utilizan para aserrado de alta capacidad de producción, proceso conocido como *seccionado* o *tronzado*. Las operaciones de seccionado también se pueden realizar con discos delgados abrasivos, como se describe en la sección 26.4. El aserrado en frío es muy común en la industria, sobre todo para cortar secciones transversales grandes. Existen sierras en frío con varios perfiles y tamaños de dientes y se pueden hacer avanzar en cualquier ángulo en la pieza de trabajo. En las máquinas modernas, el seccionado con sierras circulares produce superficies relativamente lisas con buen control del espesor y precisión dimensional, debido a la rigidez de las máquinas y de las sierras. La sierra de diámetro interno mostrada en la figura 24.25f se utiliza ampliamente para cortar obleas de silicio monocristalino en dispositivos microelectrónicos (ver también la sección 28.4).

Las *sierras de banda* tienen hojas continuas, largas y flexibles y, por lo tanto, su acción de corte es continua. Las sierras de banda verticales se utilizan para *corte recto* y *de contorno* de láminas planas y otras partes soportadas en una mesa horizontal (fig. 24.25d). También existen sierras de banda controladas por computadora con la habilidad de seguir la trayectoria de corte en forma automática. Hay asimismo sierras de

banda mecánicas que, en comparación con las sierras de marco, tienen mayor productividad debido a la acción de corte continua. Con hojas de acero de alta velocidad, se alcanzan velocidades de corte hasta de 60 m/min (200 pies/min) para aserrar aleaciones de alta resistencia y hasta de 120 m/min (400 pies/min) para aceros al carbono.

Las hojas y el hilo de alta resistencia pueden *recubrirse* con polvo de diamante (**hojas con dientes de diamante** y **sierras de banda de diamante**) de manera que las partículas de diamante actúan como dientes de corte (corte abrasivo); también se utilizan partículas de carburos para este propósito. Estas hojas e hilo son apropiados para aserrar materiales duros metálicos, no metálicos y compósitos. Los diámetros de los hilos van de 13 mm (0.5 pulgada) para uso en corte de roca hasta 0.08 mm (0.003 pulgada) para corte de precisión. También se pueden aserrar materiales duros con discos delgados, abrasivos y con procesos de maquinado avanzado (capítulo 27).

Aserrado por fricción. El *aserrado por fricción* es un proceso en el que la hoja o el disco de acero dulce roza contra la pieza de trabajo a velocidades hasta de 7,600 m/min (25,000 pies/min). La energía por fricción se transforma en calor, que ablanda con rapidez una zona angosta en la pieza de trabajo. La acción de la hoja, que puede tener dientes o muescas para mejorar la eficiencia del corte, extrae y expulsa el metal ablandado de la zona de corte. El calor generado en la pieza produce una *zona afectada por el calor* (sección 30.9) en las superficies de corte. Por lo tanto, mediante este proceso se pueden afectar de manera adversa las propiedades de la pieza a lo largo de los extremos de corte. Dado que sólo una pequeña parte de la hoja entra en contacto permanente con la pieza de trabajo, la hoja se enfría con rapidez al pasar a través del aire. Este proceso de aserrado por fricción es apropiado para metales duros, ferrosos y plásticos reforzados, aunque no para metales no ferrosos, por su tendencia a adherirse a la hoja. Para cortar secciones grandes de acero se utilizan discos de aserrado por fricción, con diámetros hasta de 1.8 m (6 pies). El aserrado por fricción también se emplea comúnmente para remover rebabas de las fundiciones.

24.6 | Limado

El *limado* comprende la remoción a pequeña escala de material de una superficie, esquina, borde u orificio, incluyendo la remoción de rebabas. Desarrolladas por primera vez hacia el año 1000 a.C., las limas suelen fabricarse con acero endurecido y existen varias secciones transversales planas, redondas, semicirculares, cuadradas y triangulares. Las limas pueden tener muchas formas de dientes y grados de rugosidad. Aunque por lo general el limado se realiza manualmente, existen máquinas de limado con características automáticas para altas capacidades de producción, en las que las limas realizan hasta 500 recorridos/min.

Las *limas de banda* constan de segmentos de lima, cada uno de casi 75 mm (3 pulgadas) de largo, que se remachan a una banda de acero flexible y se utilizan de manera similar a las sierras de banda. También existen limas tipo disco.

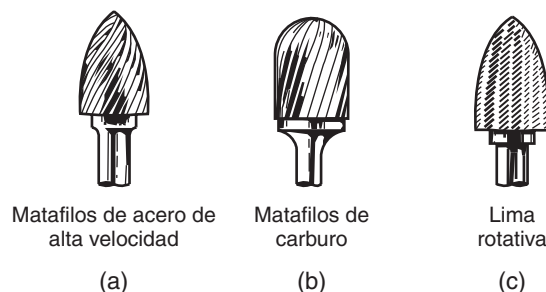


FIGURA 24.28 Tipos de matafilos utilizadas en operaciones de rebabeo.

Las **limas rotatorias** y los **matafilos** (fig. 24.28) se utilizan para aplicaciones como rebabeo, remoción de cascarilla de las superficies, producción de conos en partes y remoción de pequeñas cantidades de material en la fabricación de matrices. Por lo general, estos cortadores son cónicos, cilíndricos o esféricos y tienen diversos perfiles de dientes. Su acción de corte (similar a la de las rimas) remueve pequeñas cantidades de material a altas velocidades. La velocidad rotatoria de los matafilos va de 1500 rpm para cortar aceros, donde se usan matafilos grandes, hasta 45,000 rpm para magnesio, donde se emplean matafilos pequeños.

24.7 | Manufactura de engranes mediante maquinado

En las partes II y III se describieron diversos procesos para fabricar engranes o dientes de engranes en varios componentes, por ejemplo, fundición, forjado, extrusión, estirado, laminación de roscas y metalurgia de polvos. También se puede utilizar el troquelado de láminas metálicas para hacer engranes delgados, como los usados en relojes mecánicos de pulsera, relojes de pared y mecanismos similares. Los engranes de plástico se pueden fabricar por procesos como moldeo por inyección y fundición.

Los engranes pueden ser tan pequeños como los utilizados en relojes, o de diámetros tan grandes como 9 m (30 pies), para hacer girar las superestructuras de las grúas móviles. La precisión dimensional y el acabado superficial requerido para los dientes de los engranes dependen del uso al que se destinan. Una calidad deficiente de los dientes de los engranes contribuye a una transmisión deficiente de energía y al aumento de la vibración y el ruido, por lo que afecta de manera adversa las características de fricción y desgaste. Por ejemplo, los engranes de los submarinos deben ser de una calidad extremadamente alta, a fin de reducir los niveles de ruido y evitar así que sean detectados.

En la figura 24.29 se muestra la nomenclatura estándar para un engrane recto de evolvente. Iniciando con una pieza en bruto para engranes forjada o fundida, existen dos métodos básicos de fabricación de dichos dientes: *corte de forma* y *generación*.

24.7.1 Corte de forma

En el *corte de forma*, la herramienta de corte es similar a un cortador de fresado de forma producido con la forma del espacio entre los dientes del engrane (fig. 24.30a). La forma de

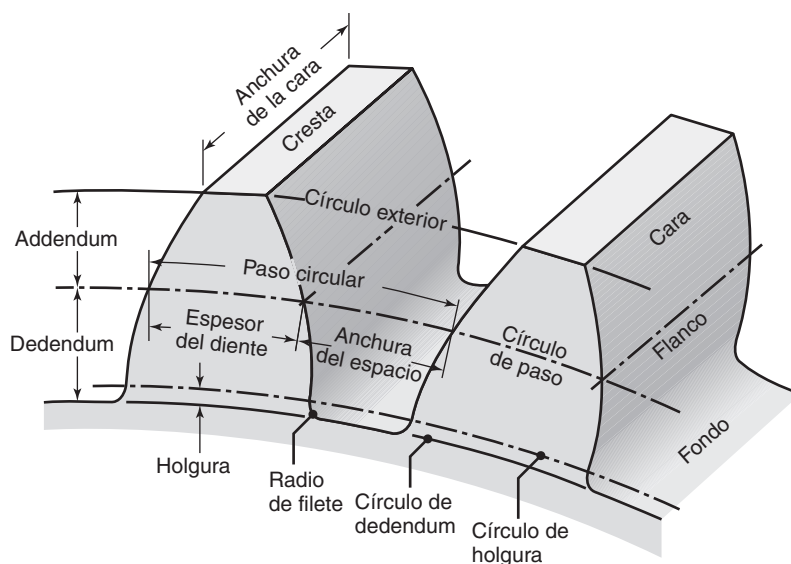


FIGURA 24.29 Nomenclatura de un engrane recto de evolvente.

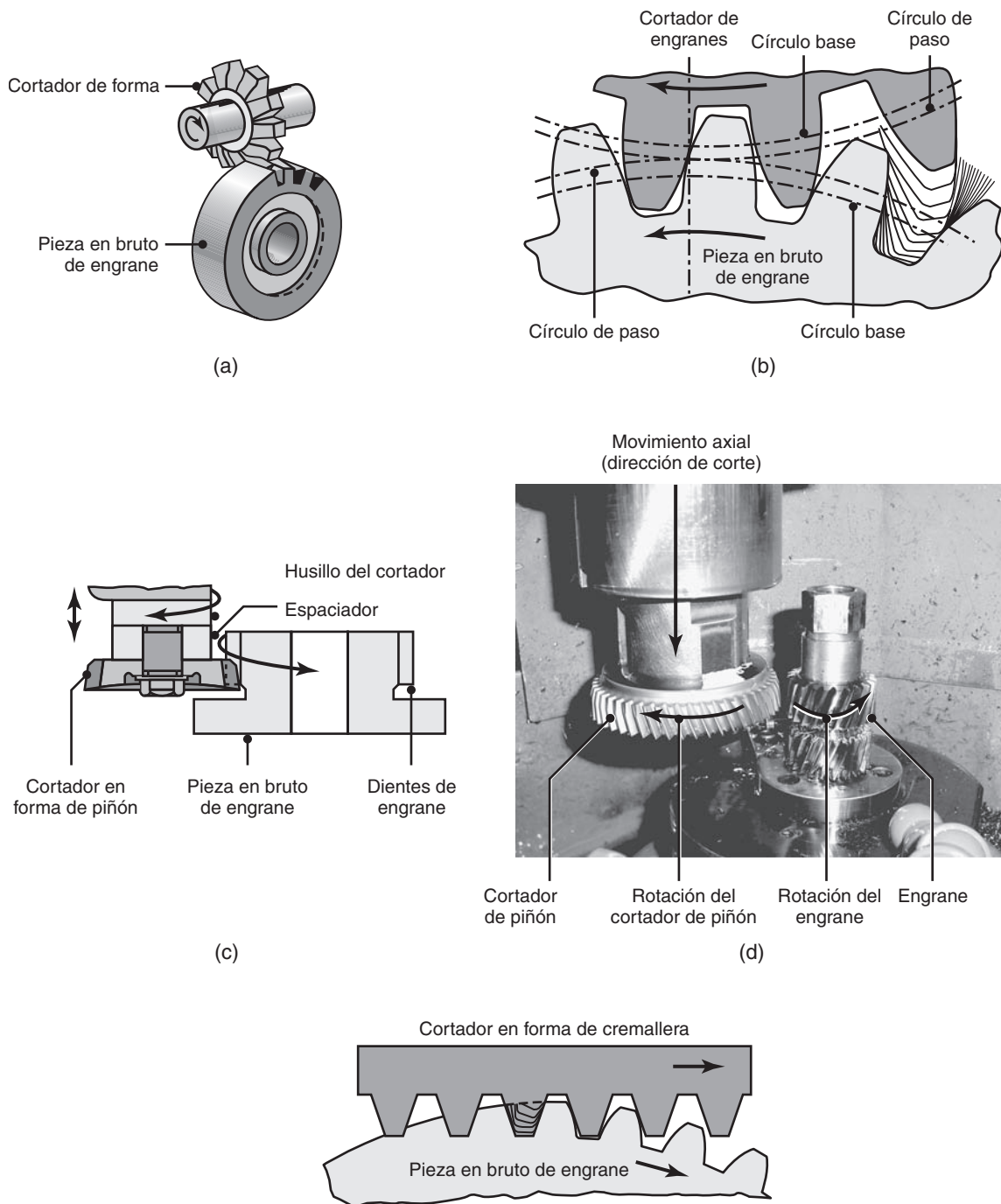


FIGURA 24.30 (a) Producción de dientes de engrane en una pieza en bruto por corte de forma. (b) Esquema de engrane que se genera con un cortador de engranes en forma de piñón. (c) y (d) Engrane que se genera en una cepilladora de engranes utilizando un cortador en forma de piñón. Obsérvese que el cortador se mueve alternativamente en la dirección vertical. (e) Engrane que se genera con cortador en forma de cremallera. *Fuente:* (d) Cortesía de Schafer Gear Works, Inc.

los dientes de los engranes se reproduce maquinando la pieza en bruto del engrane alrededor de su periferia. El cortador avanza axialmente a lo largo del diente del engrane y hasta la profundidad apropiada, a fin de producir el perfil de los dientes del engrane. Después de cortar cada uno, el cortador se retira, la pieza en bruto del engrane se gira (*indexa*) y el cortador procede a cortar otro diente. Este proceso continúa hasta que se maquilan todos los dientes.

Cada cortador está diseñado para cortar cierto número de dientes. La precisión del perfil de los dientes producidos por corte de forma depende de la precisión del cortador y de la máquina y su rigidez. Aunque ineficiente, el corte de forma se puede realizar en fresadoras con el cortador montado en un árbol y la pieza en bruto del engrane montada en un cabezal divisor. Dado que el cortador tiene una geometría fija, el corte de forma sólo se puede utilizar para producir dientes de engranes que tengan una anchura constante; es decir, en engranes rectos o helicoidales, pero no en engranes cónicos. Los engranes internos y los dientes de engranes en superficies rectas (como en una cremallera y piñón) se elaboran por corte de forma con un cortador de forma usando una máquina similar a un cepillado. El cortado de forma es un proceso relativamente simple y puede emplearse para cortar dientes de engranes con varios perfiles. Por otro lado, es una operación lenta; además, algunos tipos de máquinas requieren mano de obra experta. Es posible utilizar máquinas con características semiautomáticas de manera económica para el corte de forma, en producciones limitadas. Sin embargo, por lo general, el corte de forma es adecuado sólo para producción de bajas cantidades.

También puede utilizarse el *brochado* para maquinar dientes de engranes y es particularmente apropiado para fabricar dientes internos. El proceso de brochado es rápido y produce un terminado fino de la superficie con alta precisión dimensional. Sin embargo, dado que cada tamaño de engrane requiere una brocha diferente (y las brochas son costosas), este método es apropiado casi en exclusiva para la producción en grandes cantidades.

Los dientes de engranes también pueden cortarse en máquinas especiales con una herramienta de corte de una sola punta, guiada por una *plantilla* con la forma del perfil del diente. Como la plantilla puede ser mucho más grande que el diente del engrane, se mejora la precisión dimensional.

24.7.2 Generación de engranes

La herramienta de corte utilizada en la *generación de engranes* puede ser una de las siguientes: (a) cortador en forma de piñón; (b) cortador recto en forma de cremallera, y (c) fresa madre.

- Un **cortador en forma de piñón** puede considerarse uno de los dos engranes de un par conjugado, y el otro, la pieza en bruto del engrane (fig. 24.30b). Este tipo de cortador se utiliza en *cepilladoras de engranes* (fig. 24.30c y d). Tiene un eje paralelo al de la pieza en bruto del engrane y gira lentamente con dicha pieza, a la misma velocidad que el círculo de paso y en un movimiento alternativo axial. Un tren de engranes proporciona el movimiento relativo requerido entre el eje del cortador y el eje de la pieza en bruto del engrane. El corte puede ocurrir en la carrera hacia arriba o hacia abajo de la máquina. Debido a que la holgura necesaria para el recorrido del cortador es pequeña, el cepillado de mesa fija resulta adecuado para engranes que se localizan cerca de superficies de obstrucción, como un reborde en la pieza en bruto del engrane en la figura 24.30c y d. El proceso se puede usar para producir bajas y altas cantidades.
- En un **cortador de cremallera**, la herramienta generadora es un *segmento* de una cremallera (fig. 24.30e), que realiza movimientos alternativos paralelos al eje de la pieza en bruto del engrane. Dado que no es práctico tener más de seis a 12 dientes en un cortador de cremallera, el cortador debe separarse a intervalos adecuados y regresar al punto de inicio. La pieza en bruto del engrane permanece fija durante la operación.

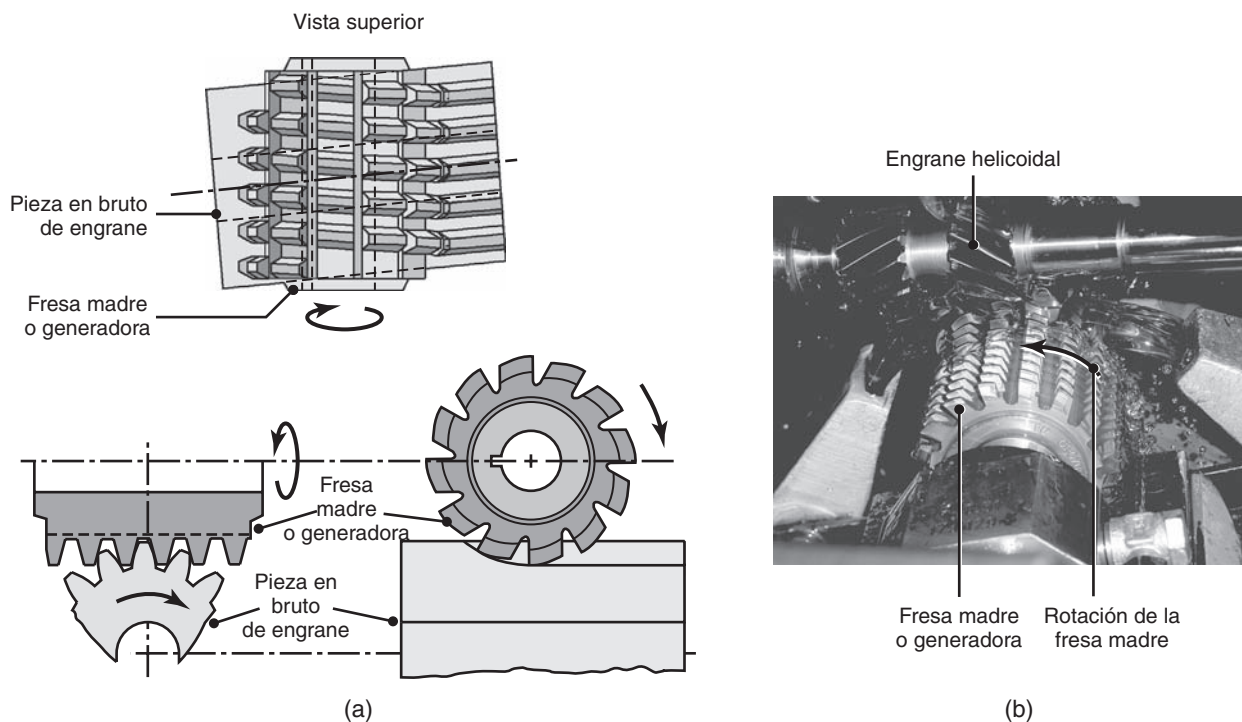


FIGURA 24.31 (a) Esquema de corte de engranes con una fresa madre o generadora. (b) Producción de engranes sinfín con una fresa madre o generadora. Fuente: Cortesía de Schafer Gear Works, Inc.

- Una **fresa madre** (fig. 24.31) es básicamente un sinfín o tornillo de corte de engranes convertido en herramienta de generación de engranes mediante una serie de ranuras o hendiduras longitudinales maquinadas en él para formar los dientes de corte. Al utilizar la fresa madre para un engrane recto, el ángulo entre la fresa madre y los ejes de la pieza en bruto del engrane es 90° menos el ángulo de avance en las roscas de la fresa madre. Todos los movimientos en la generación de engranes son rotatorios y la fresa madre y la pieza en bruto del engrane giran de manera continua, muy similar a dos engranes engranados, hasta que se cortan todos los dientes.

Las fresas madre tienen una, dos o tres roscas. Por ejemplo, si la fresa madre posee una sola rosca y el engrane va a tener 40 dientes, la fresa madre y el husillo del engrane deben engranarse uno con otro de manera que la fresa madre haga 40 revoluciones, en tanto que la pieza en bruto del engrane hace una revolución. De modo similar, si se utiliza una fresa madre de doble rosca, haría 20 revoluciones contra una revolución de la pieza en bruto del engrane. Además, la fresa madre debe hacerse avanzar de forma paralela al eje del engrane por una distancia mayor a la anchura de la del diente del engrane (fig. 24.29), a fin de producir dientes rectos en engranes rectos. Las mismas fresas madre y máquinas se pueden usar para cortar engranes helicoidales inclinando el eje del husillo de la fresa madre.

Debido a que produce varios engranes a altas velocidades y con buena precisión dimensional, la generación de engranes se utiliza ampliamente en la industria. Aunque el proceso también es adecuado para la producción de bajas cantidades, resulta más económico para fabricar medias y altas cantidades. Las máquinas de generación de engranes también pueden producir engranes cónicos en espiral e hipoideos. Como la mayoría de las demás máquinas herramienta, las modernas máquinas de generación de engranes se controlan mediante computadora. Las *máquinas multiejes de control computarizado* son capaces de generar muchos tipos y formas de engranes por medio de cortadores de fresado indexable.

24.7.3 Corte de engranes cónicos

Los engranes cónicos rectos se desbastan en un corte con un cortador de forma en máquinas que se indexan de manera automática. Después se termina el engrane dándole la

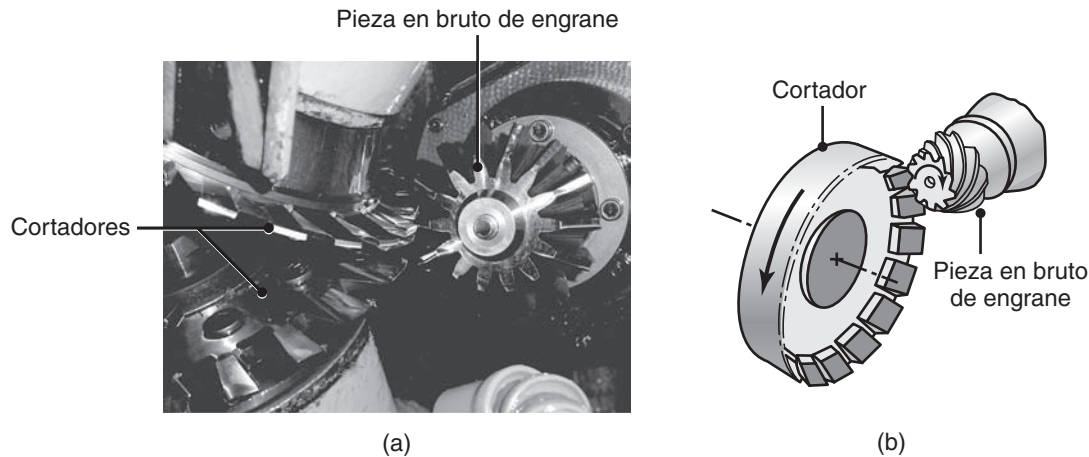


FIGURA 24.32 (a) Corte de una pieza en bruto de engrane cónico recto con dos cortadores. (b) Corte de engrane cónico helicoidal. *Fuente:* Cortesía de Schafer Gear Works, Inc.

forma adecuada en un generador de engranes. El método de generación es análogo al método de generación de cremalleras ya descrito. Los cortadores se mueven de manera alternativa a través de la cara del engrane cónico, como sucede con la herramienta en la cepilladora de mesa fija (fig. 24.32a). Las máquinas para engranes cónicos espirales operan con base en el mismo principio, en tanto que el cortador en espiral es básicamente un cortador de fresado de careado con varias hojas de corte de lados rectos que sobresalen de su periferia (fig. 24.32b).

24.7.4 Procesos de acabado de engranes

Tal como se produjeron mediante algunos de los procesos ya descritos, el acabado superficial y la precisión dimensional de los dientes del engrane pueden ser insuficientes para ciertas aplicaciones. Además, es posible que los engranes sean ruidosos o que sus propiedades mecánicas (en particular la resistencia a la fatiga y al desgaste) no sean suficientemente elevadas. Existen diversos *procesos de acabado* para mejorar la calidad de la superficie de los engranes. El método de manufactura del engrane y la posibilidad de que los engranes se hayan endurecido por tratamiento térmico determinan la elección del proceso. Como se describe en el capítulo 4, el tratamiento térmico puede provocar la distorsión de las partes. Por consiguiente, para obtener un perfil preciso de dientes de engranes, los engranes tratados térmicamente deben someterse a operaciones adecuadas de terminado.

Rasurado. El proceso de rasurado de engranes comprende un cortador fabricado con la forma exacta del perfil del diente terminado, el cual remueve cantidades pequeñas de metal de la superficie de los dientes del engrane. A los dientes del cortador se les realizan ranuras o hendiduras en varios puntos a lo ancho, haciendo el proceso similar al brochado fino. El cortador tiene un movimiento alternativo. El rasurado y el bruñido (se describe posteriormente) se pueden efectuar sólo en engranes con una dureza de 40 HRC o inferior.

Aunque las herramientas son costosas y se requieren máquinas especiales, el rasurado es rápido y es el proceso más utilizado para el acabado de engranes. Produce dientes de engranes con acabado superficial mejorado y una buena precisión dimensional del perfil del diente. Después, los engranes rasurados pueden tratarse térmicamente y rectificarse para obtener una mejor dureza, resistencia al desgaste y un perfil de dientes más preciso.

Bruñido. El acabado superficial de los dientes de los engranes también puede mejorarse mediante bruñido. Presentado en la década de 1960, el bruñido es básicamente un proceso de deformación plástica de la superficie (ver sección 34.2) por medio de una matriz especial de bruñido endurecida con forma de engrane, que somete las superficies del dien-

te a una acción de laminación de superficies (**laminación de engranes**). El trabajo en frío resultante en las superficies del diente no sólo mejora el acabado superficial, sino que también induce esfuerzos residuales de compresión en las superficies de los dientes del engrane, mejorando así su resistencia a la fatiga. Sin embargo, se ha demostrado que el bruñido no mejora de manera significativa la precisión dimensional del diente del engrane.

Rectificado, honeado y lapeado. Para obtener la máxima precisión dimensional, el espaciado y forma de los dientes, así como el acabado superficial, los dientes de los engranes se pueden rectificar, honear y lapear posteriormente, como se describe en el capítulo 26. Para formar o generar superficies de dientes de engranes, se utilizan ruedas de rectificado afiladas. Existen varios tipos de rectificadoras, siendo la rectificadora de formas de un solo índice la más utilizada. En el **rectificado de forma**, la forma de la piedra abrasiva es idéntica a la del espaciado de los dientes (fig. 24.33a). En la **generación**, la piedra abrasiva actúa de manera similar al cortador generador de engranes, ya descrito (fig. 24.32b).

La herramienta de **honeado** es un engrane de plástico con partículas abrasivas finas. El proceso de honeado es más rápido que el rectificado y se utiliza para mejorar el acabado superficial. Para mejorar aún más este acabado, los dientes de engranes rectificados se **lapean**, usando compuestos abrasivos con (a) una herramienta de lapeado en forma de engrane fabricada de hierro fundido o bronce, o (b) un par de engranes coinci-

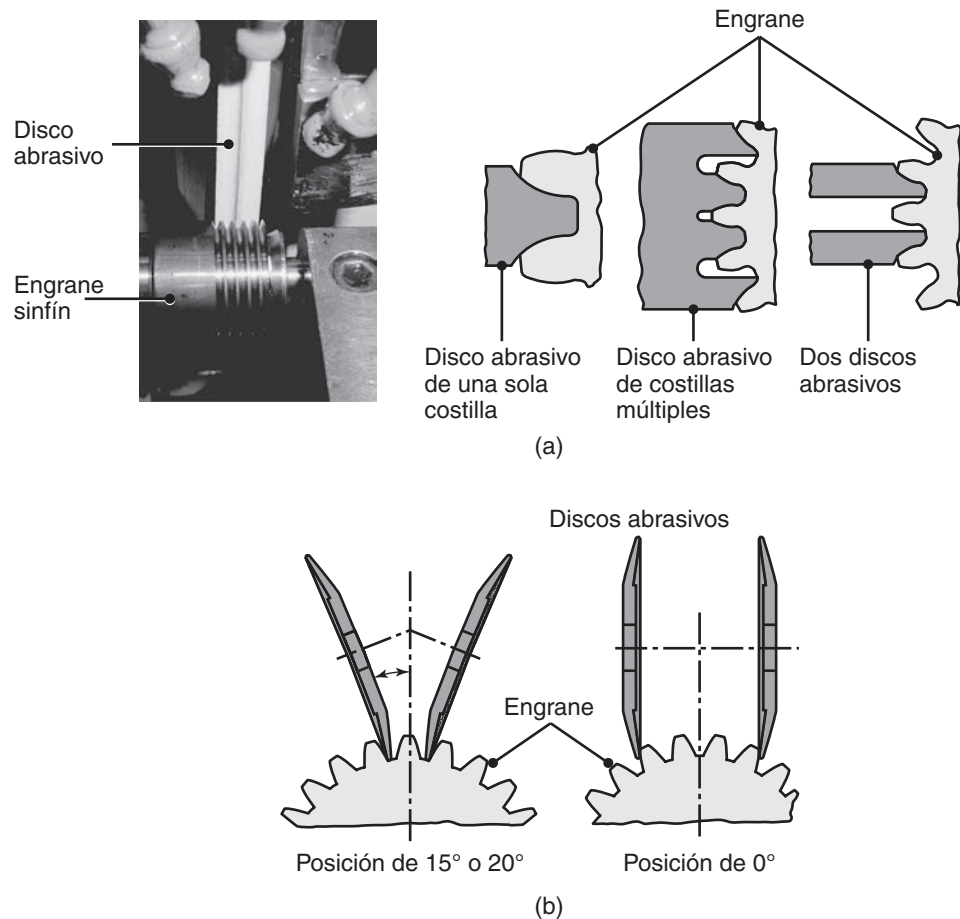


FIGURA 24.33 Acabado de engranes por rectificado: (a) rectificado de forma con discos abrasivos de forma; (b) rectificado por generación utilizando dos discos.

dentes que giran juntos. Aunque las capacidades de producción son inferiores y los costos superiores, estas operaciones de acabado resultan adecuadas, en particular para producir engranes endurecidos de calidad muy alta, larga vida útil y operación silenciosa.

24.7.5 Consideraciones de diseño y economía del maquinado de engranes

Las consideraciones de diseño para las operaciones de corte de engranes se pueden resumir de la siguiente manera:

- Es importante el diseño de las piezas en bruto de engranes, en particular para dientes complejos de engranes; es necesario hacer provisiones a fin de sujetar dichas piezas con seguridad en la máquina.
- La precisión dimensional y el acabado superficial especificados en los dientes de engranes deben ser tan amplios como sea posible para reducir los costos de producción.
- Es más difícil maquinar los engranes anchos que los angostos.
- Los engranes deben maquinarse antes de ensamblarlos en sus ejes.
- Debe proporcionarse suficiente holgura entre los dientes de un engrane y los rebordes, hombros y otras características, de manera que la herramienta de corte pueda maquinar sin interferencia.
- Deben hacerse provisiones para utilizar cortadores estándar siempre que sea posible.

Economía. Como en todas las operaciones de maquinado, el costo de los engranes aumenta rápidamente con la mejoría del acabado superficial y la calidad. En la figura 24.34 se muestra el costo relativo de manufactura de los engranes en función de la calidad, conforme a los números de especificaciones de la AGMA (American Gear Manufacturers Association) y el DIN (Deutsches Institut für Normung). Cuanto mayor es el número, mayor será la precisión dimensional de los dientes de los engranes. Como se observa en esta figura, el costo de manufactura puede variar en magnitud, dependiendo de las tolerancias dimensionales.

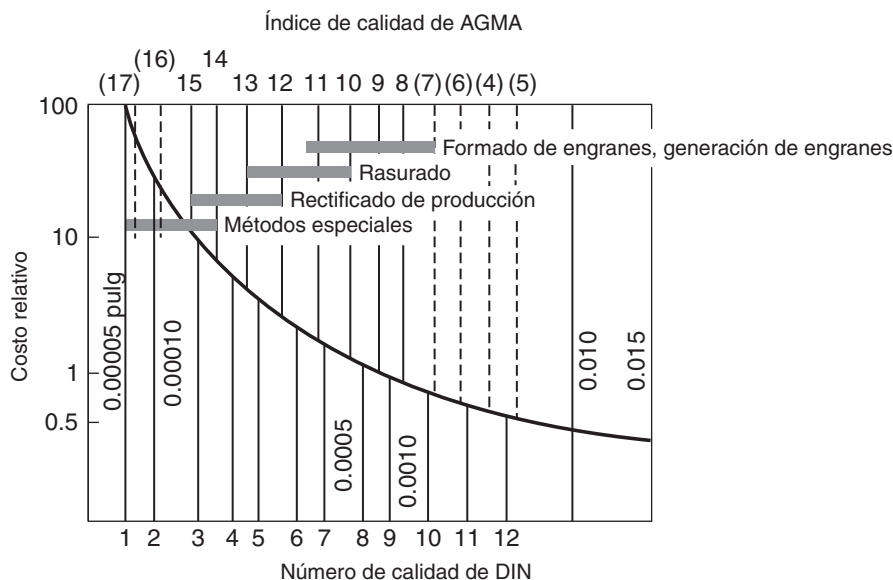


FIGURA 24.34 Costo de manufactura de engranes en función de la calidad de los mismos. Los números a lo largo de las líneas verticales indican tolerancias.

RESUMEN

- Mediante los procesos descritos en este capítulo se pueden maquinar diversas formas complejas. El fresado es uno de los procesos de maquinado más comunes, debido a que tiene la capacidad de producir varias formas en piezas de trabajo de manera económica.
- Aunque esos procesos son similares a los de torneado, taladrado y mandrinado, la mayoría de estos últimos utilizan herramientas y cortadores de dientes múltiples en varios ejes respecto de la pieza de trabajo.
- En la actualidad, la mayoría de las máquinas herramienta para estas operaciones se controlan por computadora, tienen diversas características y operan con mayor flexibilidad.
- Además de los diversos procesos de formado y moldeado descritos en otros capítulos, se producen engranes por maquinado, ya sea por corte de forma o por generación; este último fabrica engranes con mejor acabado superficial y mayor precisión dimensional. La calidad del perfil del diente de los engranes aumenta con los procesos de acabado, como rasurado, bruñido, rectificado, honeado y lapeado.

TÉRMINOS CLAVE

Aserrado	Corte de forma	Fresado plano
Aserrado por fricción	Eje	Generación de engranes
Brocha de empuje	Estampado de matrices	Honeado
Brocha de tracción	Fresa madre	Lapeado
Brochado	Fresado	Limado
Brochado rotativo	Fresado concurrente	Matafilos
Bruñido	Fresado de careado	Ranura
Cepillado de mesa fija	Fresado de un solo filo	Rasurado
Cepillado de mesa móvil	Fresado frontal	Sujeción de trabajo
Cortador de cremallera	Fresado frontal de alta velocidad	Triscado de los dientes

BIBLIOGRAFÍA

- Arnone, M., *High Performance Machining*, Hanser, 1998.
- ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
- Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2ª. ed., Marcel Dekker, 1989.
- Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
- Ewert, R. H., *Gears and Gear Manufacture: The Fundamentals*, Chapman and Hall, 1997.
- Hoffman, E. G., *Jigs and Fixture Design*, 4a. ed., Industrial Press, 1996.
- Krur, S. F. y Check, A. F., *Technology of Machine Tools*, 5a. ed., Glencoe Macmillan/McGraw-Hill, 1996.
- Machinery's Handbook*, Industrial Press, modificado periódicamente.
- Machining Data Handbook*, 3a. ed., 2 vols. Machinability Data Center, 1980.
- Metal Cutting Tool Handbook*, 7a. ed., Industrial Press, 1989.
- Stephenson, D. A. y Agapiou, J. S., *Metal Cutting: Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1996.
- Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., Vol. 1: *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 1983.
- Townsend, D. P., *Dudley's Gear Handbook: The Design, Manufacturing, and Application of Gears*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1991.
- Walsh, R. A., *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*. McGraw-Hill, 1994.
- Weck, M., *Handbook of Machine Tools*, 4 vols., Wiley, 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

- 24.1 ¿Por qué el fresado es un proceso de maquinado tan versátil?
- 24.2 Describa los diferentes tipos de cortadores utilizados en las operaciones de fresado y proporcione una aplicación para cada tipo.
- 24.3 ¿Cuáles son las ventajas de los dientes helicoidales sobre los dientes rectos en los cortadores para fresado plano?
- 24.4 Explique las características relativas del fresado concurrente y del fresado convencional.
- 24.5 Describa las características geométricas de una brocha y explique sus funciones.
- 24.6 ¿Por qué el aserrado es un proceso utilizado comúnmente? ¿Tiene limitaciones? Explique su respuesta.
- 24.7 ¿Por qué algunas hojas de sierras tienen dientes alternados?
- 24.8 Explique la diferencia entre rasurado y bruñido.
- 24.9 ¿Qué ventajas tienen las fresadoras tipo cama sobre las de tipo columna y codo para operaciones de producción?
- 24.10 ¿Por qué el eje de una fresa madre se inclina respecto del eje de la pieza en bruto del engrane?
- 24.11 Describa la diferencia entre acabado por rectificación de forma y por generación.
- 24.12 ¿Qué es una fresa hueca? ¿Por qué se utiliza?
- 24.13 ¿Por qué es difícil aserrar secciones muy delgadas o láminas metálicas?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 24.14 Explique por qué el brochado de los soportes de los cigüeñales es una alternativa atractiva para otros procesos de maquinado.
- 24.15 En este capítulo se presentan diversos lineamientos para varias operaciones de corte. Comente las razones que sirven de base para estos lineamientos.
- 24.16 Explique por qué las sierras de marco no son tan productivas como las sierras de banda.
- 24.17 En las operaciones de fresado con máquinas de husillo horizontal y vertical, ¿cuál es la que probablemente mantiene una mejor precisión dimensional? ¿Por qué?
- 24.18 ¿Qué similitudes y diferencias existen en el ranurado con un cortador de fresado y con una sierra?
- 24.19 ¿Por qué tienen que someterse a operaciones de acabado los engranes maquinados? ¿Qué proceso de acabado no es adecuado para los dientes de engranes endurecidos? ¿Por qué?
- 24.20 ¿Cómo reduciría la rugosidad de la superficie mostrada en la figura 24.6?
- 24.21 ¿Por qué son tan útiles máquinas como la mostrada en la figura 24.17?
- 24.22 Comente sus observaciones en relación con los diseños mostrados en la figura 24.20b y sobre la utilidad de las operaciones de brochado.
- 24.23 Explique cómo se puede iniciar el corte de contornos en una sierra de banda, como se muestra en la figura 24.25d.
- 24.24 En la figura 24.27a se sueldan dientes de corte de acero de alta velocidad a una hoja de acero. ¿Recomendaría que toda la hoja se fabricara con acero de alta velocidad? Explique sus razones.
- 24.25 Describa las partes y condiciones en que el brochado sería el método preferible de maquinado.
- 24.26 Con dibujos apropiados, explique las diferencias y similitudes entre las operaciones de rasurado, brochado y brochado rotativo.
- 24.27 ¿Consideraría que los procesos de maquinado descritos en este capítulo son procesos de forma casi neta o forma neta? Explique con ejemplos apropiados.
- 24.28 ¿Por qué el fresado frontal es un proceso tan versátil? Explique con ejemplos.
- 24.29 Liste y explique los factores que contribuyen a un acabado superficial deficiente en los procesos descritos en este capítulo.
- 24.30 Explique las posibles razones por las que un cuchillo corta bien cuando se mueve hacia delante y hacia atrás. Considere factores como el corte del material, la fricción y las dimensiones de corte.
- 24.31 ¿Existen limitaciones de tamaño para las partes a aserrar? Explique su respuesta.
- 24.32 ¿Por qué es difícil utilizar aserrado por fricción en metales no ferrosos?
- 24.33 ¿Recomendaría el brochado de una ranura de chaveta en una pieza en bruto de engrane antes o después del maquinado de los dientes? ¿Por qué?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

24.34 En las operaciones de fresado, el tiempo de corte total se puede ver significativamente afectado por (a) la magnitud de la distancia sin corte, l_c , mostrada en las figuras 24.3 y 24.4, y (b) la relación de la anchura de corte, w , al diámetro del cortador, D . Dibuje varias combinaciones de estos parámetros, proporcione dimensiones, seleccione avances y velocidades de corte, etc., y determine el tiempo total de corte. Comente sus observaciones.

24.35 Está realizando una operación de fresado plano a una velocidad de corte especificada (velocidad superficial del cortador) y un avance por diente. Explique el procedimiento para determinar la velocidad de mesa requerida.

24.36 Demuestre que la distancia l_c en el fresado plano es aproximadamente igual a $\sqrt{Dd}$ para situaciones en las que $D \gg d$. Ver figura 24.3c.

24.37 En el ejemplo 24.1, ¿cuál de las cantidades se afectará al aumentar el avance a $f = 0.02$ pulgada/diente?

24.38 Calcule la profundidad de corte de viruta, t_c , y el torque para el ejemplo 24.1.

24.39 Estime el tiempo requerido para fresar por careado un bloque de latón de 10 pulgadas de largo y 2 pulgadas de ancho, con un cortador de 6 pulgadas de diámetro con 10 insertos de acero de alta velocidad.

24.40 Se está cortando una placa de 10 pulgadas de largo, 1 pulgada de ancho en una sierra de banda a 150 pies/min. La sierra tiene 12 dientes por pulgada. Si el avance por diente es de 0.003 pulgada, ¿cuánto tiempo se requerirá para aserrar la placa a lo largo?

24.41 Se utiliza una fresa generadora de rosca simple para cortar 40 dientes en un engrane recto. La velocidad de corte es de 120 pies/min y la fresa generadora tiene 3 pulgadas de diámetro. Calcule la velocidad rotacional del engrane recto.

24.42 Suponga que en la operación de fresado de careado que se muestra en la figura 24.4, las dimensiones de la pieza de trabajo son de 5 pulgadas por 10 pulgadas. El cortador es de 6 pulgadas de diámetro, tiene 8 dientes y gira a 300 rpm. La profundidad de corte es de 0.125 pulgada y el avance de 0.005 pulgada/diente. Suponga que el requerimiento específico de energía para este material es de 2 hp min/pulg³ y que sólo 75% del diámetro del cortador participa en el corte. Calcule (a) la potencia requerida, y (b) la velocidad de remoción de material.

24.43 Una operación de fresado plano ocurre en una parte de 250 mm de largo y 50 mm de ancho. Se utiliza un cortador helicoidal de 75 mm de diámetro con 10 dientes. Si el avance por diente es de 0.2 mm/diente y la velocidad de corte de 0.75 m/s, obtenga el tiempo de maquinado y la velocidad de remoción de metal para remover 6 mm de la superficie de la parte.

24.44 Calcule los intervalos de tiempo de maquinado para fresado de careado de un cortador de 10 pulgadas de largo, 2 pulgadas de ancho, con una profundidad de corte de 0.1 pulgada para los siguientes materiales de la pieza de trabajo: (a) acero de bajo carbono; (b) aleaciones de titanio; (c) aleaciones de aluminio, y (d) termoplásticos.

24.45 Explique si las marcas de avance de la izquierda en la pieza de trabajo con un cortador de fresado de careado (como se muestra en la fig. 24.13a) son segmentos de círculos exactos. Describa los parámetros que considera al responder esta pregunta.

24.46 Al describir las operaciones de brochado y el diseño de las brochas, no hemos proporcionado ecuaciones en relación con los avances, velocidades y velocidades de remoción de material, como lo hicimos en las operaciones de torneado y fresado. Revise la figura 24.21 y desarrolle dichas ecuaciones.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

24.47 La parte mostrada en la figura 24.1f se va a maquinar a partir de una pieza en bruto rectangular. Sugiera las máquinas herramienta requeridas, los soportes necesarios y los tipos y secuencia de operaciones a realizar. Comente sus respuestas en términos del material de la pieza de trabajo, como aluminio contra acero inoxidable.

24.48 Respecto de la figura 24.1f, ¿preferiría maquinar esta parte a partir de una pieza en bruto preformada (forma casi neta) en vez de una pieza rectangular? Si es así, ¿cómo prepararía dicha pieza? ¿Cómo influiría el número de partes requeridas en su respuesta?

24.49 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y está aplicando un examen so-

bre varios aspectos para evaluar los conocimientos de los alumnos. Elabore dos problemas cuantitativos y dé las respuestas.

24.50 Sugiera algunos métodos mediante los cuales los cortadores de fresado de diversos diseños (incluyendo fresas frontales) puedan incorporar insertos de carburo.

24.51 Algunos manuales incluyen tablas de recomendaciones en relación con las operaciones de maquinado y el equipo utilizado. Estudie la bibliografía disponible y elabore una tabla para operaciones de fresado.

24.52 Elabore una tabla completa sobre las capacidades de proceso de los procesos de maquinado descritos en este capítulo. Utilizando varias columnas, describa las máqui-

nas comprendidas, los tipos de herramientas y los materiales para herramientas usados, las formas de las piezas en bruto y las partes producidas, los tamaños máximo y mínimo característicos, el acabado superficial, las tolerancias dimensionales y las capacidades de producción.

24.53 Con base en los datos desarrollados en el problema 24.52, diga lo que piensa en relación con el procedimiento a seguir para determinar qué tipo de máquina herramienta seleccionar al maquinar una parte específica.

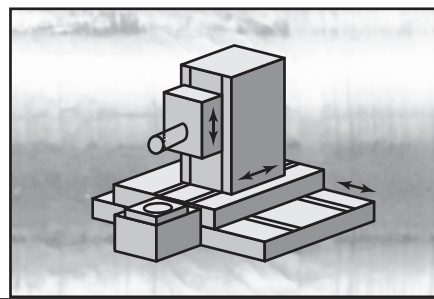
24.54 Utilizando la Internet, obtenga especificaciones sobre las fresadoras más pequeñas y más grandes disponibles y compare sus resultados con los obtenidos por sus compañeros.

24.55 Liste todos los procesos que se pueden utilizar en la manufactura de engranes, incluyendo los descritos en las partes II y III de este texto. Para cada proceso, describa las ventajas, limitaciones y la calidad de los engranes producidos.

24.56 Si se fueran a maquinar tableros de panal expandidos (ver sección 16.12) en una operación de fresado de forma, ¿qué precauciones tomaría para evitar que la lámina de metal se doblara debido a las fuerzas de la herramienta? Piense en tantas soluciones como pueda.

CAPÍTULO 25

Centros de maquinado, conceptos y estructuras de maquinado avanzado y economía del maquinado



25.1	Introducción	760
25.2	Centros de maquinado	761
25.3	Estructuras de las máquinas herramienta	770
25.4	Vibración y traqueteo en las operaciones de maquinado	775
25.5	Maquinado de alta velocidad	778
25.6	Maquinado duro	781
25.7	Maquinado de ultraprecisión	782
25.8	Economía del maquinado	783

EJEMPLO:

25.1	Maquinado de pistas exteriores de un rodamiento en un centro de torneado	768
------	--	-----

ESTUDIO DE CASO:

25.1	Maquinado en seco de alta velocidad de motores de hierro fundido	779
------	--	-----

En este capítulo se presentan los avances en el diseño y la construcción de máquinas herramienta para mejorar sus características, precisión y productividad, además de reducir los costos de manufactura. En particular, se describen:

- Los conceptos y las características de los centros de maquinado y torneado.
- La estructura de las máquinas herramienta. Su diseño, construcción y materiales.
- El diseño y la operación de centros de maquinado hexápodo y reconfigurables.
- La razón por la que se generan vibración y traqueteo en las operaciones de maquinado y cómo se pueden evitar.
- La importancia creciente del maquinado de alta velocidad, duro y de ultraprecisión.
- Los factores comprendidos en los costos de maquinado y cómo minimizarlos.

25.1 | Introducción

En los capítulos anteriores se describieron las características y peculiaridades de las máquinas herramienta que comúnmente se utilizan para conjuntos específicos de operaciones de maquinado. Además, se enfatizó la conveniencia de que estas máquinas fueran flexibles, de manera que pudieran efectuarse más operaciones sin tener que volver a fijar las piezas de trabajo en diferentes máquinas. En este capítulo se estudian el diseño y las capacidades de los **centros de maquinado** controlados por computadora, que cuentan con la flexibilidad y versatilidad que les falta a otras máquinas herramienta individuales. En consecuencia, a menudo se han convertido en la primera opción al seleccionar máquinas herramienta.

También se describe el desarrollo más reciente en la flexibilidad de los procesos de manufactura, es decir, el concepto de **máquinas reconfigurables**. Aquí, el diseño de estas máquinas consta de componentes modulares, que se pueden arreglar y rearreglar con ra-

pidez dándoles varias configuraciones, de ahí el término *reconfigurable*. El sistema utiliza avanzados *hardware* y *software* de computadora, sistemas de comunicación y controladores reconfigurables.

En este capítulo se presentan las tendencias en el diseño y los materiales para máquinas herramienta. Estos desarrollos requieren conocimientos sobre el desempeño de dichas máquinas, los módulos y sus componentes, en particular los relativos a su rigidez, vibración, traqueteo y características de amortiguamiento. Estas consideraciones son importantes no sólo por lo que se refiere a la precisión dimensional y calidad de las superficies fabricadas, sino también por su influencia en la vida útil de la herramienta, la productividad y la economía general del maquinado. En las últimas secciones de este capítulo se trata la economía de las operaciones de maquinado, identificando los factores que contribuyen a los costos del mismo. Se describe el maquinado de alta velocidad, duro y de ultraprecisión, en el entendido de que estos temas se relacionan fuertemente con las consideraciones económicas del maquinado. Se presenta un método simple de análisis de costos que puede ayudar a determinar las condiciones en las cuales se seleccionarían los parámetros de maquinado, de manera que sea posible lograr un costo mínimo de maquinado o un tiempo unitario mínimo de maquinado.

25.2 Centros de maquinado

Al describir los procesos individuales de maquinado y las máquinas herramienta en los capítulos anteriores, se destacó que cada máquina, sin importar su grado de automatización, está diseñada para realizar básicamente el mismo tipo de operaciones, como torneado, mandrinado, taladrado, fresado, brochado, cepillado de mesa móvil o cepillado de mesa fija. También se mostró que la mayoría de las partes manufacturadas mediante los métodos descritos en este libro requieren operaciones adicionales en sus superficies antes de ser terminadas. Por ejemplo, obsérvese que las partes mostradas en la figura 25.1 tienen varias características geométricas complejas y que todas sus superficies necesitan diferentes tipos de operaciones de maquinado (como fresado, careado, mandrinado, taladrado, rimado o roscado) para cumplir algunos requisitos específicos en relación

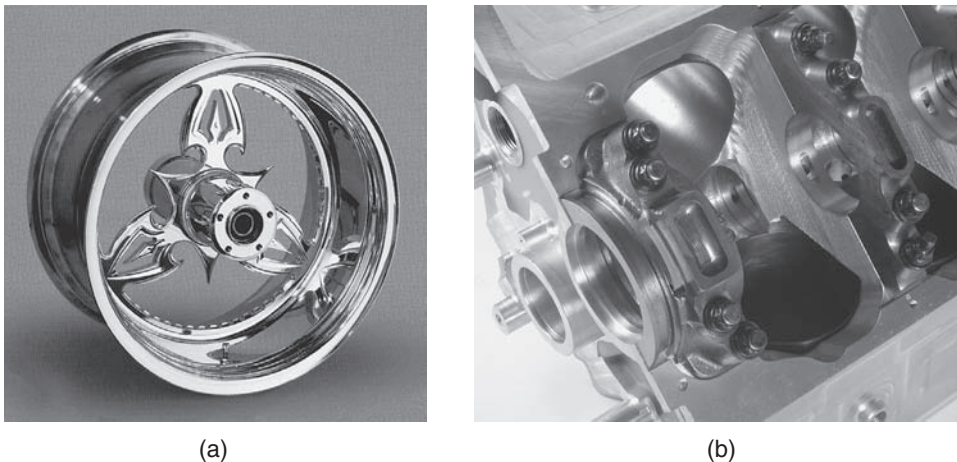


FIGURA 25.1 Ejemplos de partes que se pueden mecanizar en centros de maquinado mediante diversos procesos como torneado, careado, fresado, taladrado, mandrinado, rimado y roscado. Es común que dichas partes requieran el uso de varias máquinas herramienta para concluir las. (a) Rueda forjada de motocicleta, maquinada de acabado para obtener la tolerancia, y posteriormente pulida y recubierta. (b) Vista detallada de un monobloque de motor, que muestra cavidades complejas, orificios roscados y superficies planas. Fuente: (a) Cortesía de R. C. Components. (b) Cortesía de Donovan Engineering, programación por Norman Woodruff y fotografía de Ed Dellis, Powersports photography.

con las formas, características, tolerancias dimensionales y acabado superficial. Una breve revisión conduce a las siguientes observaciones:

- Existen algunas posibilidades en la producción de *forma neta* o *forma casi neta* de estas partes, dependiendo de los requisitos específicos para las formas, tolerancias dimensionales, peculiaridades de la superficie, acabado superficial, diversas propiedades mecánicas y otras que podrían satisfacer los requisitos de servicio. Los procesos de formado que son candidatos para estas partes son la fundición de precisión, la metalurgia de polvos, el moldeo por inyección de polvos y el forjado de precisión. Sin embargo, aun así es muy probable que las partes sigan requiriendo operaciones de acabado adicionales. Por ejemplo, necesitarán maquinado posterior los orificios profundos de diámetro pequeño, los orificios roscados, las superficies planas para ser selladas con empaques, las tolerancias dimensionales muy cerradas, las esquinas y los bordes agudos, así como las superficies planas o curvadas con diferentes requerimientos de acabado superficial.
- Si se requiere cierta forma de maquinado o se demuestra que es más económico dar acabado a estas partes mediante maquinado para proporcionarles su forma final, entonces es obvio que ninguna de las máquinas herramienta descritas *de manera individual* en los capítulos 23 y 24 pueden producir estas partes por completo. También observamos que, tradicionalmente, las operaciones de maquinado se efectúan pasando la pieza de trabajo de una máquina herramienta a otra hasta completar todas las operaciones de este proceso.

El concepto de centros de maquinado. El método tradicional de maquinado de partes por medio de diferentes tipos de máquinas herramienta sigue siendo un método viable y eficiente de manufactura. Se puede automatizar en gran medida para aumentar la productividad y, de hecho, es el principio básico de las **líneas de transferencia** (también conocidas como *líneas de manufactura dedicada*, DML, por sus siglas en inglés), como se describe en la sección 37.2. Empleadas comúnmente en la *producción de alto volumen* o *en masa*, las líneas de transferencia constan de diversas máquinas herramienta específicas, ordenadas en una secuencia lógica.

La pieza de trabajo (como un monobloque de motor automovilístico) se pasa de una estación a otra realizando una operación específica de maquinado en cada una de ellas; después se transfiere a la siguiente máquina para otra operación de maquinado, y así sucesivamente. Sin embargo, existen situaciones en las que las líneas de transferencia no son viables ni económicas, sobre todo cuando los tipos de productos a procesar cambian con rapidez debido a factores como demanda del producto o cambios en la forma o el estilo del mismo. Arreglar de nuevo estas máquinas herramienta para responder a las necesidades del siguiente ciclo de producción es un proceso muy costoso y laborioso. Un concepto importante desarrollado a finales de la década de 1950 es el de los **centros de maquinado**.

Un centro de maquinado (fig. 25.2) es una máquina herramienta avanzada, controlada por computadora, que tiene la capacidad de realizar varias operaciones de maquinado en diferentes superficies y orientaciones de una pieza de trabajo sin tener que retirarla de su dispositivo o aditamento de sujeción. Por lo general, dicha pieza se mantiene estacionaria y las herramientas de corte giran como lo hacen en el fresado, taladrado, honeado, machueleado y en operaciones similares. Mientras que en las líneas de transferencia, o en los talleres o fábricas comunes, la pieza de trabajo se lleva *a la máquina*, en los centros de maquinado es la operación de maquinado la que se lleva *a la pieza de trabajo*.

Respecto del término *pieza de trabajo*, cabe señalar que en un centro de maquinado también consta de todo tipo de **herramental**. Éste incluye herramientas de formado y corte, cortadores y portaherramientas, zancos de herramientas para sujetar insertos, moldes para fundición, matrices o dados hembra y macho para formado, punzones para el trabajo metalmecánico y metalurgia de polvos, arietes para extrusión, dispositivos de sujeción y fijación del trabajo, todos los cuales también se deben manufacturar. Debido a que las geometrías con frecuencia son bastante complicadas y se realizan varias operaciones de maquinado, es común producir estas herramientas en centros de maquinado.

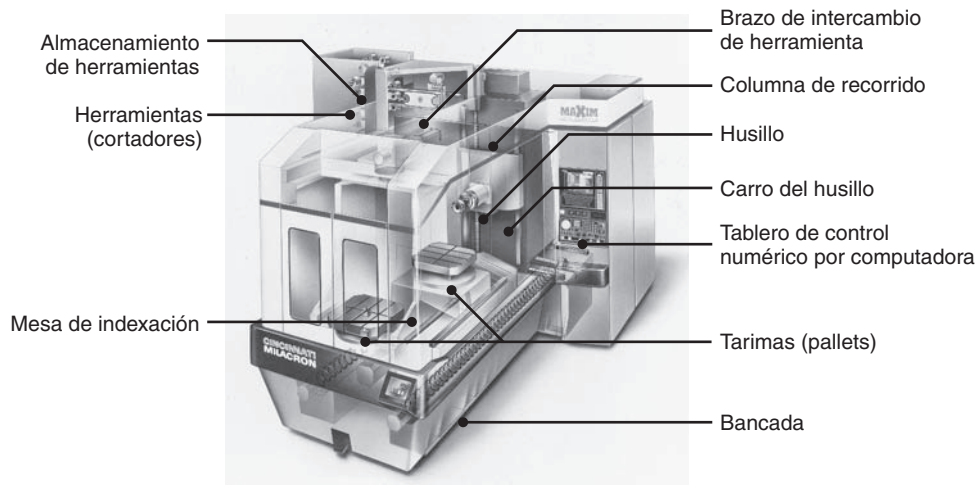


FIGURA 25.2 Centro de maquinado de husillo horizontal equipado con un cambiador automático de herramientas. Los cargadores de herramientas pueden almacenar hasta 200 herramientas de corte, con diversas funciones y tamaños. *Fuente:* Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

El desarrollo de los centros de maquinado se relaciona estrechamente con los avances en la automatización y el control computarizado de las máquinas herramienta, cuyos detalles se describen en el capítulo 37. Recuérdese que como ejemplo de los avances en los tornos modernos, en la figura 23.10 se ilustra un torno de control numérico (**centro de torneado**) con dos torretas que portan varias herramientas de corte.

Componentes de un centro de maquinado. La pieza de trabajo en un centro de maquinado se coloca en una tarima o *pallet* o *módulo* que se puede mover y girar (orientar) en varias direcciones (fig. 25.3). Después de completar una operación específica de maquinado, empieza otra operación, que puede requerir la reindexación de la

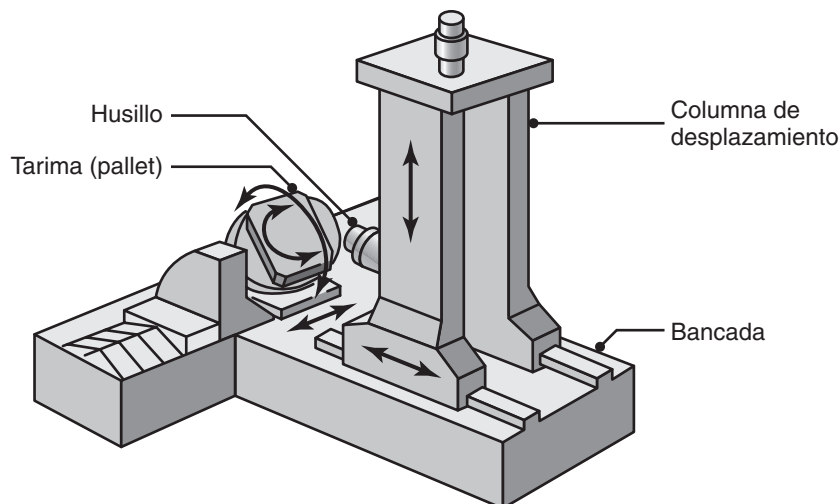


FIGURA 25.3 Esquema del principio de un centro de maquinado de cinco ejes. Obsérvese que además de tres movimientos lineales (tres ejes), la tarima (pallet), que soporta la pieza de trabajo, se puede girar alrededor de dos ejes (por lo tanto, un total de cinco ejes), permitiendo el maquinado de ejes complejos, como los mostrados en la figura 25.1. *Fuente:* Cortesía de Toyoda Machinery.

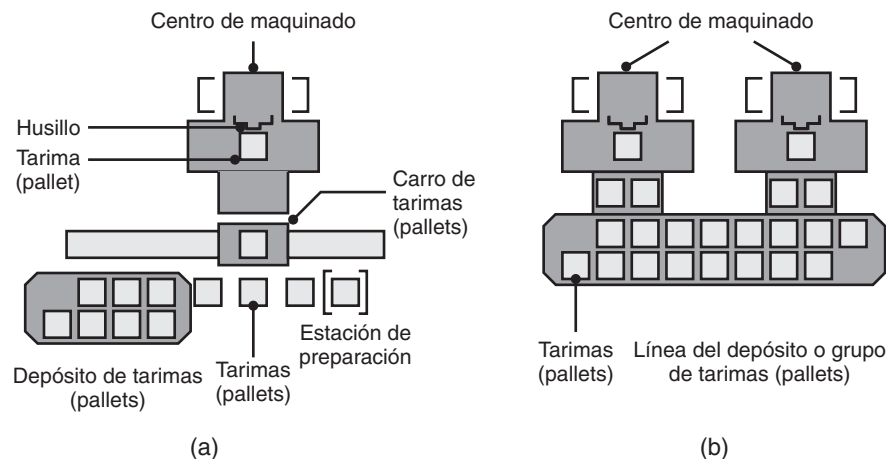


FIGURA 25.4 (a) Esquema de la vista superior de un centro de maquinado de husillo horizontal que muestra el depósito o grupo de tarimas, la estación de preparación para una tarima, el carro de tarimas y una tarima activa en operación (mostrada directamente debajo del husillo de la máquina). (b) Esquema de dos centros de maquinado con un depósito común de tarimas. También son posibles muchos otros arreglos de tarimas (pallets) en dichos sistemas. *Fuente:* Cortesía de Hitachi Seiki Co., Ltd.

pieza de trabajo sobre su *pallet*. Luego de terminar todas las operaciones de maquinado, se aleja la tarima (*pallet*) en forma automática con la parte terminada y se coloca otra (llevando una nueva pieza de trabajo a maquinar) en posición mediante un **cambiador automático de pallets** (fig. 25.4). Todos los movimientos se controlan por computadora y los tiempos del ciclo de cambio de tarima (*pallet*) son de sólo 10 a 30 segundos. Existen estaciones con diversas tarimas que sirven al centro de maquinado. Las máquinas también se pueden equipar con diversas características automáticas, como dispositivos de carga y descarga de partes.

Un centro de maquinado está equipado con un **cambiador automático de herramientas** (ATC, por sus siglas en inglés) programable. Dependiendo del diseño particular se pueden almacenar hasta 200 herramientas de corte en un carrusel, tambor o cadena (*almacenamiento de herramientas*). Algunos centros de maquinado especiales y grandes también cuentan con un almacenamiento auxiliar de herramientas. Las herramientas de corte se seleccionan en forma automática, con acceso aleatorio para la ruta más corta al husillo de la máquina. Las máximas dimensiones que las herramientas de corte pueden alcanzar alrededor de una pieza de trabajo en un centro de maquinado se conocen como **envolvente (volumen) de trabajo**, término que se utilizó por primera vez en relación con los robots industriales, como se describe en la sección 37.6.

El **brazo de intercambio de herramientas** que se muestra en la figura 25.5 es un diseño común; gira alrededor para recoger una herramienta en particular y la coloca en el husillo. Obsérvese que cada herramienta tiene su propio portaherramientas, por lo cual la transferencia de las herramientas de corte al husillo de la máquina es muy eficiente. Las herramientas se identifican con códigos de barras, etiquetas codificadas o chips de memoria incorporados directamente en sus portaherramientas. Por lo general, los *tiempos de cambio de herramienta* son de entre 5 y 10 segundos, pero pueden ser hasta de 30 segundos para herramientas que pesan 110 kg (250 libras). Debido a que el cambio de herramienta es una operación sin corte, la tendencia constante es reducir aún más los tiempos.

Los centros de maquinado se pueden equipar con una **estación de verificación de herramienta o de verificación de parte o pieza** que alimenta información al sistema de control de la máquina, de manera que pueda compensar cualquier variación en el ajuste o desgaste de las herramientas. Se pueden instalar **sondas o palpadores de contacto** (fig.

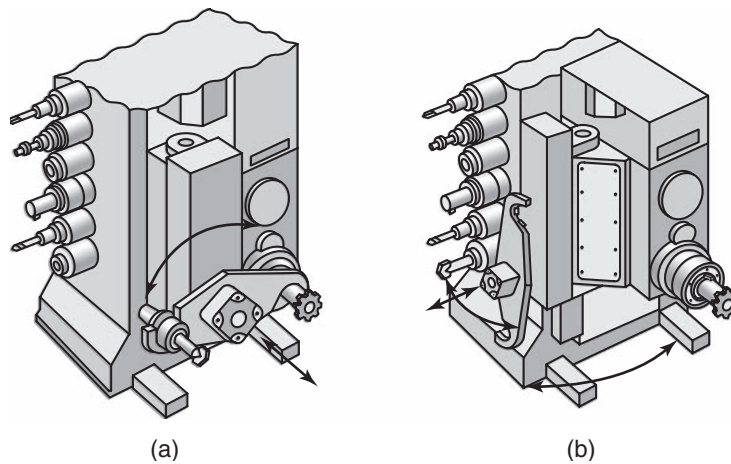


FIGURA 25.5 Cambiador oscilante de herramientas en un centro de maquinado de husillo horizontal. (a) El brazo de intercambio de herramientas está colocando un portaherramientas con una herramienta de corte en el husillo de la máquina. Nótese el movimiento axial y rotativo del brazo. (b) El brazo está regresando a su posición de inicio. Obsérvese su rotación a lo largo de un eje vertical después de colocar la herramienta y los dos grados de libertad en su posición inicial.

25.6) en un portaherramientas a fin de determinar las superficies de referencia de la pieza de trabajo para seleccionar los ajustes de las herramientas e inspeccionar en línea las partes que se están maquinando. En la figura 25.6 se observa que se pueden contactar diversas superficies (ver también *tecnología de los sensores*, sección 37.7) y que sus posiciones relativas se determinan y almacenan en la base de datos del *software* de la computadora. Después se utilizan los datos para programar las trayectorias de las herramientas y compensar su longitud, diámetro y desgaste en máquinas herramienta más avanzadas.

25.2.1 Tipos de centros de maquinado

Existen diversos diseños de centros de maquinado. Los dos tipos básicos son el de husillo vertical y el de husillo horizontal, pero muchas máquinas tienen la capacidad de operar en ambos ejes.

Centros de maquinado de husillo vertical. También conocidos como *centros de maquinado verticales* (VMC, por sus siglas en inglés), tienen la capacidad de efectuar diversas operaciones de maquinado en partes con cavidades profundas, por ejemplo, en la fabricación de moldes y matrices. En la figura 25.7 se muestra un centro de maquinado de husillo vertical (que es similar a una fresadora de husillo vertical). El carrusel o cargador de herramientas se encuentra a la izquierda de la figura y todas las operaciones y movimientos se dirigen y modifican por medio del tablero de control por computadora mostrado a la derecha. Debido a que las fuerzas de empuje en el maquinado vertical se dirigen hacia abajo, dichas máquinas tienen gran rigidez y producen partes con buena precisión dimensional. Por lo general, son menos costosas que las máquinas de husillo horizontal.

Centros de maquinado de husillo horizontal. También conocidos como *centros de maquinado horizontales* (HMC, por sus siglas en inglés), son adecuados para piezas de trabajo grandes y altas que requieren maquinado en muchas de sus superficies. El *pallet* se puede girar en diferentes ejes (por ejemplo, ver fig. 25.3) a diversas posiciones

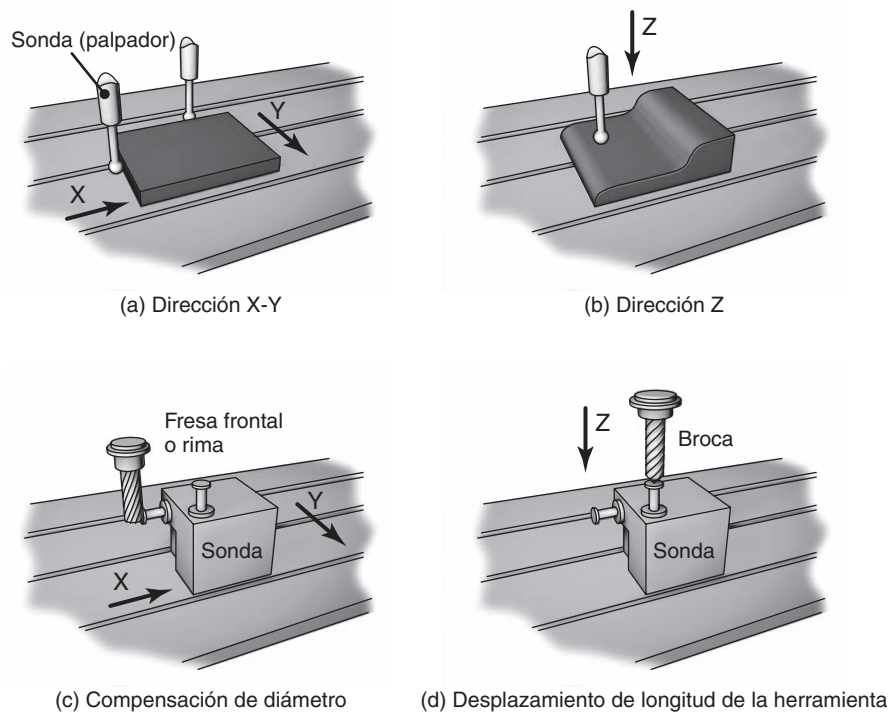


FIGURA 25.6 Sondas o palpadores de contacto utilizadas en los centros de maquinado para determinar las posiciones de la pieza de trabajo y la herramienta y superficies en relación con la mesa o columna de la máquina. Sondas o palpadores de contacto: (a) determinando la posición de X-Y (horizontal) de una pieza; (b) determinando la altura de una superficie horizontal; (c) determinando la posición del plano de la superficie de un cortador (por ejemplo, para compensación del diámetro del cortador), y (d) determinando la longitud de una herramienta para desplazamiento de la longitud de la herramienta.

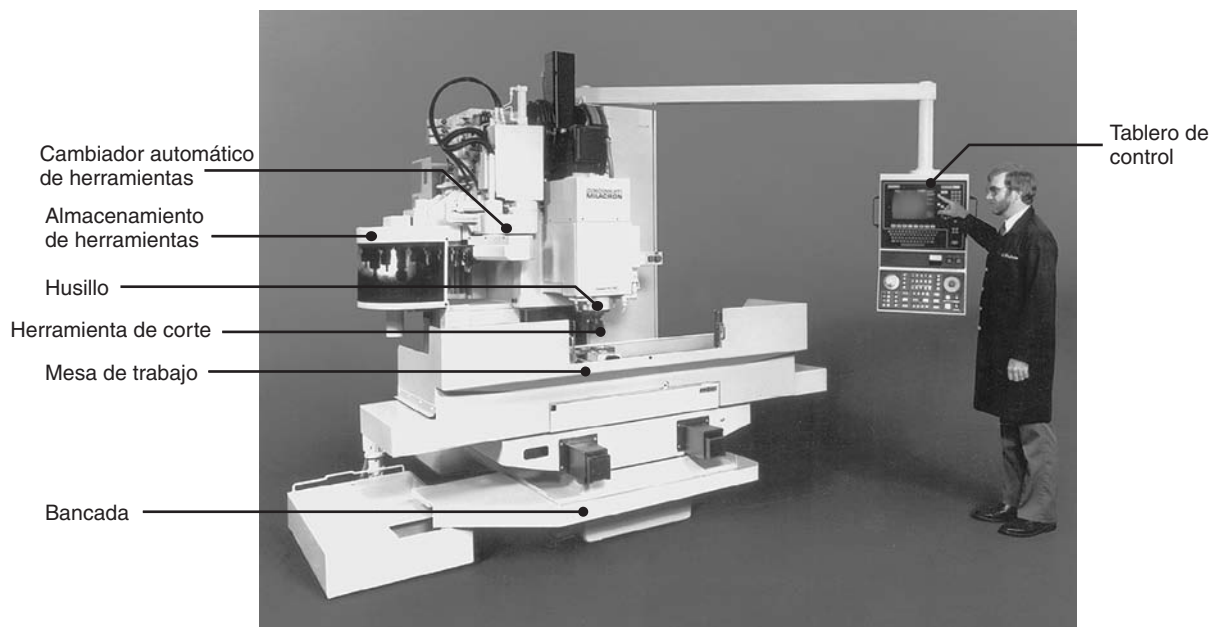


FIGURA 25.7 Centro de maquinado de husillo vertical. El cargador de herramientas está a la izquierda de la máquina. El operador puede hacer girar el tablero de control de la derecha. *Fuente:* Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

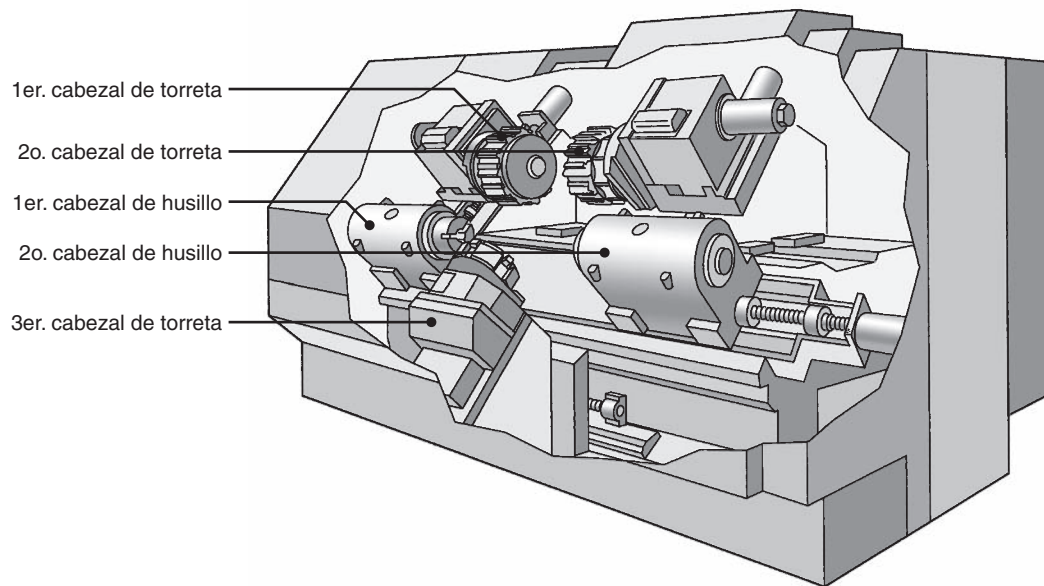


FIGURA 25.8 Esquema de un centro de torneado de control numérico por computadora. Obsérvese que la máquina tiene dos cabezales de husillo y tres cabezales de torreta, lo que hace que tenga capacidades de maquinado muy flexibles. *Fuente:* Cortesía de Hitachi Seiki, Co., Ltd.

angulares. Otra categoría de máquinas de husillo horizontal son los **centros de torneado**, que son *tornos* controlados por computadora con distintas características. En la figura 25.8 se muestra un centro de torneado de tres torretas; se construye con dos husillos horizontales y tres torretas equipadas con diversas herramientas de corte, usadas para realizar diferentes operaciones en una pieza de trabajo rotatoria o rotacional.

Los *centros universales de maquinado* están equipados con husillos verticales y horizontales. Tienen diversas características y la capacidad de maquinar todas las superficies de una pieza de trabajo (es decir, verticales, horizontales y a una amplia variedad de ángulos).

25.2.2 Características y capacidades de los centros de maquinado

A continuación se resumen las principales características de los centros de maquinado:

- Los centros de maquinado son capaces de manejar una amplia variedad de tamaños y formas de partes de manera eficiente, económica y repetitiva; tienen alta precisión dimensional y tolerancias del orden de ± 0.0025 mm (0.0001 pulgada).
- Estas máquinas son versátiles y tienen la capacidad de cambiar con rapidez de un tipo de producto a otro.
- Reducen el tiempo requerido para cargar y descargar las piezas de trabajo, cambiar las herramientas, calibrar la parte y resolver problemas. Por lo tanto, mejoran la productividad, reducen la necesidad de mano de obra (en particular mano de obra calificada) y minimizan los costos de producción.
- Estas máquinas están equipadas con dispositivos que monitorean las condiciones de la herramienta y detectan su rotura y desgaste, además de sondas o palpadores para compensar el desgaste y posicionamiento de las herramientas.

- En la actualidad, el calibrado e inspección de las piezas de trabajo maquinadas durante el proceso y después del mismo son características de los centros de maquinado.
- Estas máquinas son compactas y altamente automatizadas y tienen sistemas de control avanzados, de manera que un operador puede atender dos o más centros de maquinado al mismo tiempo, reduciendo así los costos de mano de obra.

Debido a la alta productividad de los centros de maquinado, se generan grandes cantidades de viruta que deben recolectarse y desecharse de manera adecuada (sección 23.3.7); a este proceso se le conoce como *manejo de virutas*. Existen diversos diseños para la **recolección de virutas** con una o más bandas transportadoras de espiral (tornillo) o de cadena, que las recolectan con charolas en la máquina y las entregan en un punto de recolección.

Existen centros de maquinado con una amplia variedad de tamaños y características; sus costos van desde unos \$50,000 hasta \$1 millón de dólares y más. Las capacidades comunes llegan hasta 75 kW (100 hp). Por lo general, las velocidades máximas del husillo van de 4000 a 8000 rpm y algunas llegan a 75,000 rpm para aplicaciones especiales, utilizando cortadores de diámetro pequeño. Los husillos modernos pueden acelerar a una velocidad de 20,000 rpm en sólo 1.5 segundos. Algunos pallets (tarimas) tienen la capacidad de soportar piezas de trabajo que pesan hasta 7000 kg (15,000 libras), aunque existen capacidades mayores para aplicaciones especiales.

25.2.3 Selección de los centros de maquinado

Por lo general, los centros de maquinado requieren gastos de capital importantes; para que su costo sea rentable, es posible que tengan que utilizarse durante más de un turno al día. Por consiguiente, debe existir demanda continua y suficiente de partes que justifiquen esta compra. Sin embargo, debido a su versatilidad inherente, los centros de maquinado pueden emplearse para producir una amplia variedad de productos, particularmente para la *manufactura justo a tiempo* (JIT, por sus siglas en inglés), como se describirá en la sección 39.5.

La selección del tipo y tamaño de los centros de maquinado depende de diversos factores, en particular:

- Del tipo de productos, su tamaño y la complejidad de su forma.
- Del tipo de operaciones de maquinado a realizar y del tipo y la cantidad de herramientas de corte requeridas.
- De la precisión dimensional requerida.
- De la capacidad de producción requerida.

EJEMPLO 25.1 Maquinado de pistas exteriores de un rodamiento en un centro de torneado

Las pistas exteriores para rodamientos (fig. 25.9) se maquinan en un centro de torneado. El material de inicio es un tubo de acero 52100 laminado en caliente con 91 mm (3.592 pulgadas) de DE y 75.5 mm (2.976 pulgadas) de DI. La velocidad de corte es de 95 m/min (313 pies/min) para todas las operaciones. Todas las herramientas son de carburo, incluyendo la herramienta para tronzar (la última operación), que es de 3.18 mm ($\frac{1}{8}$ de pulgada) en lugar de 4.76 mm ($\frac{3}{16}$ de pulgada) para el tronizador de acero de alta velocidad que se utilizaba inicialmente.

El material ahorrado por este cambio es significativo, porque la anchura de la pista es pequeña. El centro de torneado tuvo la capacidad de maquinar estas pistas a altas velocidades y con tolerancias repetibles de ± 0.025 mm (0.001 pulgada). (Ver también el ejemplo 23.2).

Fuente: Cortesía de McGill Manufacturing Company.

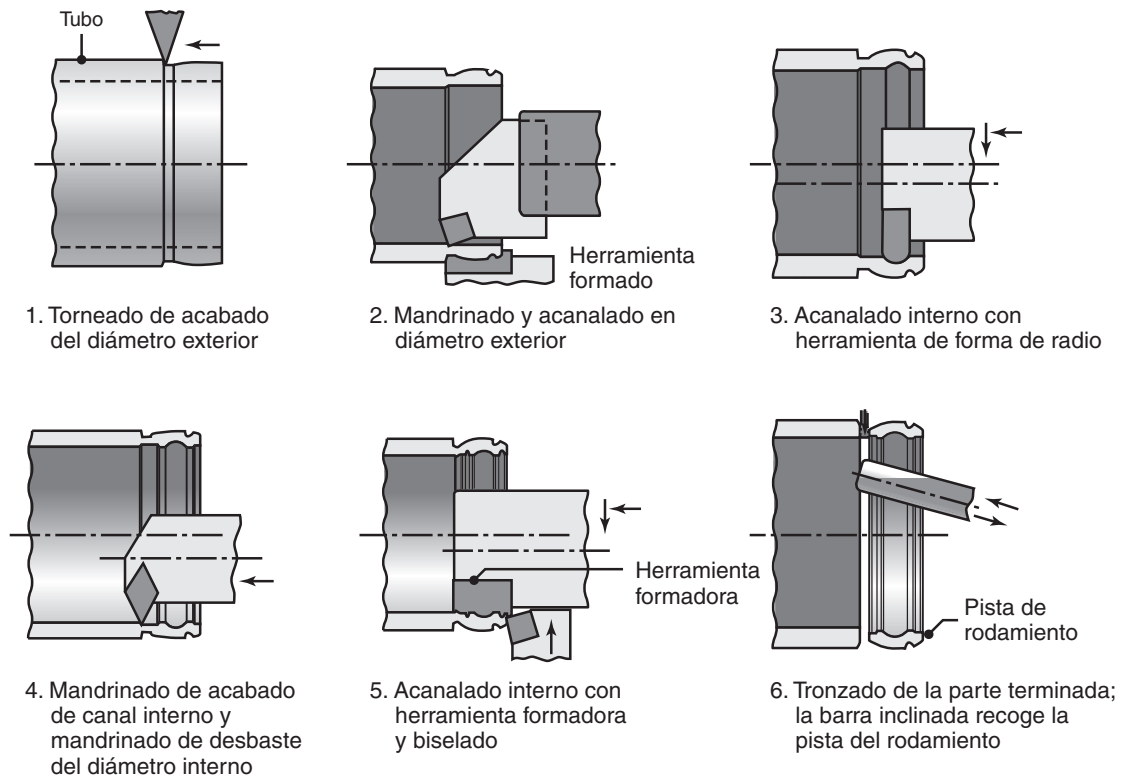


FIGURA 25.9 Maquinado de pistas exteriores de rodamiento.

25.2.4 Máquinas y sistemas reconfigurables

La necesidad de flexibilizar los procesos de manufactura ha llevado al concepto más reciente de *máquinas reconfigurables*, que constan de varios módulos. El término *reconfigurables* proviene del hecho de que (utilizando *hardware* de computadora, controladores reconfigurables avanzados y los avances en tecnologías de administración de la información) los componentes de la máquina se pueden ordenar y reordenar con rapidez en numerosas configuraciones para cumplir demandas específicas de producción. Con base en la estructura básica de la máquina herramienta de un centro de maquinado de tres ejes, la figura 25.10 muestra un ejemplo de cómo se puede reconfigurar para que se vuelva un

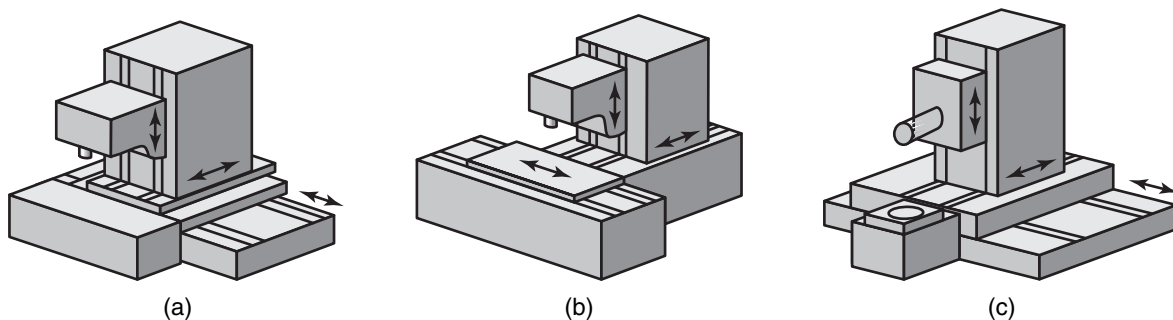


FIGURA 25.10 Esquema de un centro de maquinado modular reconfigurable, capaz de manejar piezas de trabajo de diferentes formas y tamaños que requieren distintas operaciones de maquinado en sus diversas superficies.
Fuente: Y. Koren.

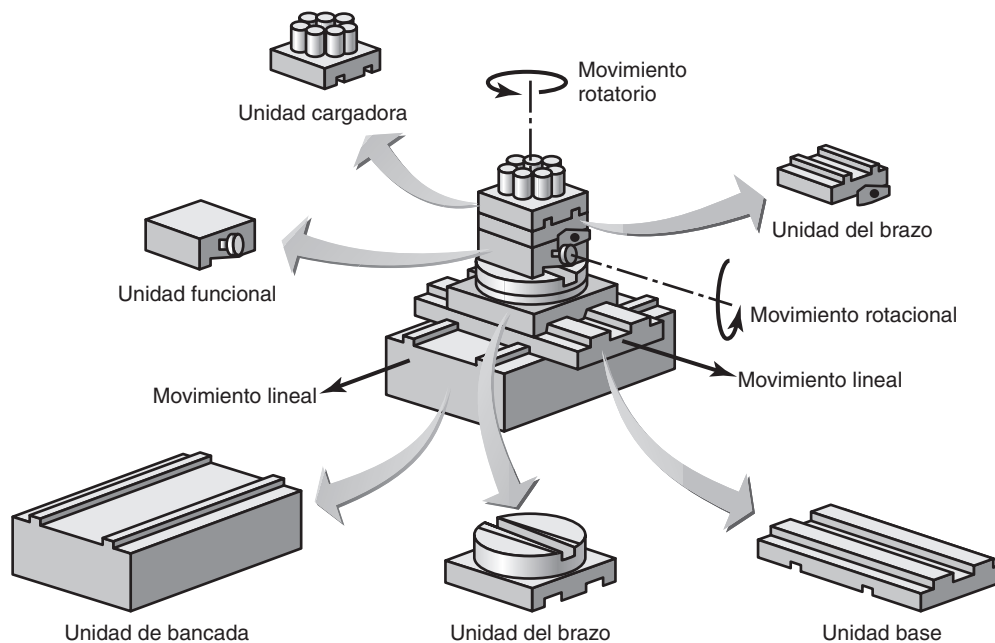


FIGURA 25.11 Esquema del ensamble de diferentes componentes de un centro de maquinado reconfigurable. *Fuente:* Y. Koren.

centro de maquinado modular. Con tal flexibilidad, la máquina puede realizar distintas operaciones de maquinado al tiempo que soporta diversos tamaños de piezas de trabajo y geometrías de partes. En la figura 25.11 se proporciona otro ejemplo en el que una máquina de cinco ejes (tres movimientos lineales y dos rotacionales) se puede reconfigurar ensamblando diferentes módulos.

Las máquinas reconfigurables prometen (a) mejorar la productividad y el rendimiento de las operaciones de manufactura; (b) reducir el tiempo de entrega para producción, y (c) proporcionar una respuesta rápida y de costo efectivo a las demandas del mercado (ver también capítulo 39). Estas capacidades son significativas, en particular dada la frecuente introducción de nuevos productos en un mercado global altamente competitivo, las fluctuaciones en la demanda de productos, la mezcla de los mismos y las modificaciones impredecibles en el diseño de productos.

25.3 Estructuras de las máquinas herramienta

En esta sección describimos los materiales y aspectos de diseño de las estructuras de las máquinas herramienta que son importantes en la producción de partes con características geométricas aceptables y características dimensionales y de acabado superficial.

25.3.1 Materiales

En esta sección se indican los materiales que se utilizan comúnmente o que son adecuados para las estructuras de las máquinas herramienta y se describen sus características.

- El **hierro fundido gris**, primer material utilizado en estructuras para máquinas herramienta, tiene las ventajas de poseer buena capacidad de amortiguamiento y bajo costo, pero la desventaja es que resulta pesado. La mayor parte de las estructuras de las máquinas herramienta están fabricadas con hierro fundido clase 40; algunas han sido elaboradas con clase 50 (ver tabla 12.4). Cada fundición requiere un modelo, cuyo costo aumenta de manera significativa con el tamaño de la parte.

- Las estructuras de **acero soldado** son más ligeras que las de hierro fundido. Los aceros forjados (*a*) cuentan con una amplia variedad de tamaños y formas de sección (como canales, ángulos y tubos); (*b*) tienen propiedades mecánicas deseables; (*c*) poseen buenas características de manufactura (como formabilidad, maquinabilidad y soldabilidad), y (*d*) son de bajo costo. Las estructuras fabricadas con aceros pueden tener altas relaciones de rigidez a peso, utilizando secciones transversales como tubos y canales. En cambio, su capacidad de amortiguamiento es muy baja.
- Los componentes a base de material **cerámico** se utilizan en las máquinas herramienta avanzadas para mejorar su resistencia, rigidez, resistencia a la corrosión y acabado superficial y para obtener buena estabilidad térmica. Los componentes a base de cerámicos de las máquinas herramienta se introdujeron por primera vez en la década de 1980. En la actualidad se pueden fabricar husillos y rodamientos de nitruro de silicio, que tienen mejores características de fricción y desgaste que los materiales metálicos tradicionales. Además, la baja densidad de los cerámicos los hace más adecuados que los componentes de maquinaria de alta velocidad que se someten a movimientos rápidos alternativos o rotatorios, en los que las bajas fuerzas de inercia son deseables para mantener la estabilidad del sistema, reducir las fuerzas de inercia y disminuir el tiempo sin corte en las operaciones de maquinado de alta velocidad.
- Los **compósitos** pueden ser de matriz de polímero, matriz metálica o matriz de cerámico con diversos materiales de refuerzo. Es posible adecuar las composiciones para proporcionar propiedades mecánicas idóneas en los ejes seleccionados de la máquina herramienta. Aunque son costosos y de uso limitado (en la actualidad), es probable que los compósitos se vuelvan materiales importantes para aplicaciones de alta precisión y maquinado de alta velocidad.
- Los **compósitos de granito epóxico** (con una composición característica de 93% de granito triturado y 7% de aglutinante epóxico) se utilizaron por primera vez en las rectificadoras de precisión sin centros y en las rectificadoras de interiores en la década de 1980. Estos materiales compósitos tienen diversas propiedades favorables: (*a*) buena capacidad para fundirse (que permite versatilidad de diseño en máquinas herramienta); (*b*) alta relación de rigidez a peso; (*c*) estabilidad térmica; (*d*) resistencia a la degradación ambiental, y (*e*) buena capacidad de amortiguamiento.
- El **concreto polimérico** es una mezcla de concreto y plástico triturado (por lo general, polimetilmetacrilato) y puede fundirse con facilidad, dándole las formas deseadas para maquinar bases y diversos componentes. Se introdujo por primera vez en la década de 1980 y se están desarrollando nuevas composiciones. Aunque cuenta con buena capacidad de amortiguamiento, el concreto polimérico tiene baja rigidez (alrededor de un tercio del hierro fundido clase 40) y conductividad térmica deficiente. También se puede utilizar en la construcción tipo sándwich con hierros fundidos, combinando así las ventajas de cada tipo de material. El concreto simple también puede ser vaciado en las estructuras de hierro fundido de las máquinas herramienta a fin de aumentar su masa y mejorar su capacidad de amortiguamiento. Llenar las cavidades de las bases de las máquinas herramienta con arena suelta también ha demostrado ser un medio efectivo para mejorar la capacidad de amortiguamiento.

25.3.2 Consideraciones de diseño de las máquinas herramienta

Por lo general, las consideraciones importantes en las máquinas herramienta comprenden los siguientes factores:

- Diseño, materiales y construcción.
- Materiales y construcción del husillo.
- Distorsión térmica de los componentes de la máquina.
- Compensación de errores y control del movimiento de los componentes móviles a lo largo de las guías.

Rigidez. La rigidez es un factor básico de la precisión dimensional de una máquina herramienta. Es una función de (a) el módulo elástico de los materiales utilizados, y (b) la geometría de los componentes estructurales, incluyendo el husillo, los rodamientos, el tren de accionamiento y las guías. La rigidez de la máquina se puede mejorar con el diseño, como el uso de costillas o nervaduras interiores colocadas en forma diagonal.

Amortiguamiento. El amortiguamiento es un factor muy crítico en la reducción o eliminación de la vibración y el traqueteo en las operaciones de maquinado. Principalmente, implica (a) los tipos de materiales utilizados, y (b) el tipo y la cantidad de uniones (por ejemplo, soldadas contra atornilladas) en la estructura de la máquina herramienta. Como ya se indicó, los hierros fundidos y los compósitos de matriz de polímero tienen una mejor capacidad de amortiguamiento que los metales o cerámicos. Además, cuanto mayor sea la cantidad de uniones en la estructura, mayor será el amortiguamiento.

Distorsión térmica. Un factor importante en las máquinas herramienta es la distorsión térmica de sus componentes, que contribuye de manera significativa a su falta de precisión. Se ha calculado que casi 50% de los errores de las máquinas herramienta se deben a la temperatura: sus componentes se dilatan o contraen en diversas medidas en diferentes direcciones.

Existen dos fuentes de calor en las máquinas herramienta:

1. *Fuentes internas:* como rodamientos, tornillos sinfín de bolas, guías de las máquinas, motores de los husillos, bombas y servomotores, así como la zona de corte durante el maquinado.
2. *Fuentes externas:* como fluidos de corte, hornos que se encuentren cerca, calentadores, otras máquinas cercanas, luz solar y fluctuaciones en la temperatura ambiente, aparatos de aire acondicionado, conductos de ventilación, o incluso alguien que abre o cierra una puerta o ventana.

Estas consideraciones son importantes sobre todo en el **maquinado de precisión y ultraprecisión**, cuyas tolerancias dimensionales y el acabado superficial se aproximan en la actualidad al nivel de los nanómetros. Las máquinas utilizadas para estas aplicaciones están equipadas con lo siguiente:

- Diversas características térmicas y geométricas de compensación de errores en tiempo real, incluyendo el modelado de calor y enfriamiento y la compensación electrónica para posiciones precisas de tornillos sinfín de bolas.
- Rodamientos de husillos hidrostáticos de gas o fluido.
- Nuevos diseños para transmisiones de tracción o fricción para movimiento lineal.
- Controles extremadamente finos de avance y posición utilizando microactuadores.
- Canales de circulación de fluidos en la base de la máquina herramienta para el mantenimiento de la estabilidad térmica.

Los componentes estructurales de la máquina herramienta se pueden fabricar con materiales de alta estabilidad dimensional y bajo coeficiente de dilatación térmica, como SuperInvar, granito, cerámicos y compósitos. La *retroalimentación* también es una alternativa viable para mejorar el desempeño de máquinas más obsoletas.

Técnicas de ensamble para componentes de máquinas herramienta. Tradicionalmente, los componentes de las máquinas herramienta se han ensamblado mediante sujetadores roscados y soldadura. En la actualidad, las técnicas de ensamble avanzado incluyen fundición integral y unión con resinas. Por medio de una tecnología de fundición híbrida se pueden fundir guías de acero (con su rigidez superior) en forma integral sobre una bancada de hierro fundido. La *unión con resinas* se utiliza para ensamblar máquinas herramienta, reemplazando la sujeción mecánica. Los adhesivos (descritos en la sección 32.4) tienen características favorables para construir máquinas herramienta, ya que no requieren preparación especial y son adecuados para ensamblar componentes metálicos y no metálicos.

Guías o correderas. Tradicionalmente, la preparación de guías en las máquinas herramienta ha requerido un esfuerzo significativo. Las guías simples de hierro fundido en las máquinas (que es lo más común) precisan de mucho tallado manual para lograr la precisión y vida de servicio necesarias. También se están investigando otros materiales, incluyendo epóxicas moldeadas y distintos recubrimientos de base polímero. Por lo general, los movimientos de diversos componentes en una máquina herramienta a lo largo de varios ejes han utilizado *tornillos sinfín de bolas* convencionales, *accionamientos de tornillos rotatorios* y *motores rotatorios*. Este sistema de componentes mecánicos y eléctricos tiene diversas desventajas, como limitaciones de velocidad, restricciones de longitud, efectos de inercia, juego en los engranes y otros errores, desgaste de los componentes y baja eficiencia.

Transmisiones de motor lineal. Un *motor lineal* es como un motor eléctrico rotatorio común que se ha desenrollado (abierto) y extendido. Éste es el mismo principio utilizado en algunos sistemas de transporte terrestre de alta velocidad, en el que los carros levitan mediante fuerzas magnéticas. En estas transmisiones las superficies de deslizamiento se separan mediante un espacio de aire, lo que produce una fricción muy baja.

Las transmisiones de motor lineal en las máquinas herramienta tienen ventajas importantes:

- Simplicidad y mantenimiento mínimo, ya que no existen partes móviles ni conexiones mecánicas.
- Operación suave, mejor precisión de posicionamiento y repetibilidad, en un intervalo tan bajo como una micra.
- Una amplia variedad de velocidades lineales, de $1 \mu\text{m/s}$ a 5 m/s .
- Velocidades de aceleración de aproximadamente 1 a 2 g (10 a 20 m/s^2) y tan altas como 4 a 10 g para unidades más pequeñas.
- Los componentes móviles no sufren desgaste, porque no existe contacto físico entre las superficies de deslizamiento de la máquina.

Cimentaciones de las máquinas. Los materiales de las cimentaciones, su masa y la manera en que se instalan en una planta son factores que deben considerarse, ya que ayudan a reducir la vibración y no afectan de manera adversa el desempeño de otra maquinaria cercana. Por ejemplo, al instalar una rectificadora especial para rectificado de alta precisión de engranes de propulsión marina de 2.75 m (9 pies) de diámetro, la cimentación de concreto fue de 6.7 m (22 pies) de profundidad. La gran masa de concreto, combinada con la base de la máquina, redujo la amplitud de las vibraciones. Se pueden obtener incluso mejores resultados si la máquina se instala en una placa de concreto *independiente*, que se aísla del resto del piso de la planta con dispositivos antivibratorios o amortiguadores.

25.3.3 Máquinas hexápodos

Continuamente se producen desarrollos en el diseño y los materiales utilizados en estructuras y componentes de máquinas herramienta. Las metas importantes son (a) impartir flexibilidad de maquinado a las máquinas herramienta; (b) aumentar su *envolvente de maquinado* (es decir, el espacio dentro del cual se puede realizar el maquinado), y (c) hacerlas más ligeras. Una estructura de máquina herramienta verdaderamente innovadora es un marco independiente octaédrico (de ocho lados). Conocidas como **hexápodos** (fig. 25.12) o *máquinas con uniones cinemáticas paralelas*, se basan en un mecanismo conocido como *plataforma Stewart* (llamado así en honor de D. Stewart), invento desarrollado en 1966 y usado al principio para posicionar simuladores de cabinas de aeronaves. Su principal ventaja es que las uniones en la máquina hexápoda reciben carga axial; los esfuerzos de flexión y las deflexiones son mínimos, lo que produce una estructura extremadamente rígida.

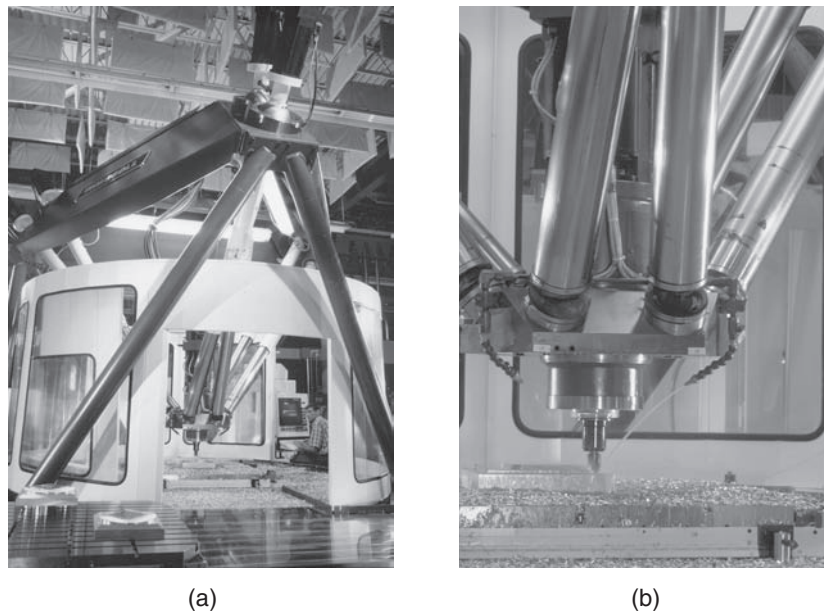


FIGURA 25.12 (a) Máquina herramienta hexápoda, que muestra sus componentes principales. (b) Vista detallada de la herramienta de corte en un centro de maquinado hexápodo. Fuente: Cortesía de National Institute of Standards and Technology.

La pieza de trabajo se monta sobre una mesa estacionaria; se utilizan tres pares de *tubos telescópicos* (puntales o piernas), cada uno con su propio motor y equipado con tornillos sinfín de bolas, para maniobrar un portaherramienta rotatorio de la herramienta de corte. Durante el maquinado de una parte con diversas características y curvaturas, el controlador de la máquina acorta en forma automática algunos tubos y extiende otros, de manera que el cortador pueda seguir una trayectoria especificada alrededor de la pieza de trabajo. En estas máquinas participan seis conjuntos de coordenadas (de ahí el término *hexápoda*, que significa “de seis patas”): tres conjuntos lineales y tres conjuntos rotatorios. Cada movimiento del cortador (incluso un movimiento lineal simple) se traduce en seis longitudes coordinadas de las patas moviéndose en tiempo real; estos movimientos son rápidos. En consecuencia, implican altas aceleraciones y desaceleraciones, con grandes fuerzas de inercia.

Estas máquinas (a) tienen alta rigidez; (b) no son tan masivas como los centros de maquinado; (c) poseen menos de una tercera parte de piezas que dichos centros; (d) cuentan con una gran envolvente de maquinado (y, por tanto, un mayor acceso a la zona de trabajo); (e) tienen la capacidad de mantener la herramienta de corte perpendicular a la superficie que se está maquinando (mejorando así la operación de maquinado), y (f) su flexibilidad es alta (con seis grados de libertad) en la producción de partes con diversas geometrías y tamaños sin necesidad de volver a fijar el trabajo en proceso. A diferencia de la mayoría de las máquinas herramienta, estas máquinas son básicamente portátiles. De hecho, hoy en día existen *accesorios hexápodos*, de manera que un centro de maquinado convencional se puede convertir con facilidad en una máquina hexápoda.

Se ha construido una cantidad limitada de estas máquinas. Debido a su potencial como máquinas herramienta eficientes, su desempeño se está evaluando de manera continua en relación con la rigidez, distorsión térmica, fricción dentro de los puntales, precisión dimensional, velocidad de operación, repetibilidad y confiabilidad. Actualmente, el costo de una máquina hexápoda es de unos \$500,000 dólares, pero es probable que disminuya de modo significativo cuando aumenten su aceptación y uso.

25.4 Vibración y traqueteo en las operaciones de maquinado

Al describir los procesos de maquinado y las máquinas herramienta, en muchas ocasiones se observó que la *rigidez de la máquina* es tan importante como cualquier otro parámetro en el maquinado. Una baja rigidez puede provocar *vibración y traqueteo* de las herramientas de corte y los componentes de la máquina y, por lo tanto, tener efectos adversos en la calidad de los productos. La vibración y el traqueteo sin control pueden provocar lo siguiente:

- Acabado superficial deficiente, como se muestra en la región central derecha de la figura 25.13.
- Pérdida de precisión dimensional de la pieza de trabajo.
- Desgaste prematuro, formación de virutas y falla de la herramienta de corte, una consideración crítica con materiales frágiles para herramientas, como cerámicos, algunos carburos y diamante.
- Posible daño a componentes de las máquinas herramienta por vibración excesiva.
- Ruido desagradable, en particular si es de alta frecuencia, como el chillido producido al torneear latón en un torno.

La vibración y el traqueteo en el maquinado son fenómenos complejos. Existen dos tipos básicos de vibración en el maquinado: la forzada y la autoexcitada.

Vibración forzada. Por lo general, la vibración forzada es provocada por alguna fuerza *periódica* presente en la máquina herramienta, como la de transmisiones de engranes, inestabilidad de los componentes de las máquinas herramienta, desalineación, y motores y bombas. En procesos como el fresado o torneado de una flecha estriada o de una flecha con una ranura de chaveta u orificio, las vibraciones forzadas se deben al contacto periódico de la herramienta de corte cuando entra y sale de la superficie de la pieza de trabajo. (Por ejemplo, ver figs. 24.9 y 24.14).

La solución básica para la vibración forzada consiste en aislar o eliminar el elemento que produce la fuerza. Por ejemplo, si la frecuencia de la fuerza es equivalente, o casi equivalente, a la frecuencia natural de un componente del sistema de la máquina herramienta, se puede aumentar o disminuir una de las frecuencias. Es posible reducir la amplitud de la vibración incrementando la rigidez o amortiguando el sistema. Aunque cambiar los parámetros de corte no parece afectar en gran medida la magnitud de las vibraciones forzadas, puede ser útil modificar la velocidad de corte y la geometría de la

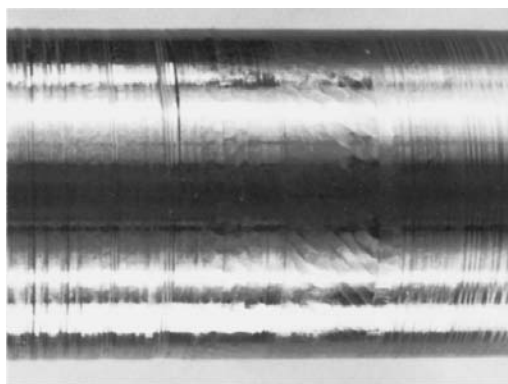


FIGURA 25.13 Marcas de traqueteo (a la derecha del centro de la fotografía) en la superficie de una parte torneada. *Fuente:* Cortesía de General Electric Company.

herramienta. También se reconoce que se puede minimizar la fuente de vibraciones cambiando la configuración de los componentes de la máquina herramienta, como si las fuerzas de accionamiento estuvieran cerca o actuaran a través del *centro de gravedad* de dicho componente. Esta estrategia reduce el momento de flexión en el componente, disminuye las deflexiones y, por lo tanto, mejora la precisión.

Vibración autoexcitada. Generalmente conocida como **traqueteo**, la vibración autoexcitada se debe a la interacción del proceso de remoción de virutas y la estructura de la máquina herramienta. Por lo común, estas vibraciones tienen una amplitud muy alta. El traqueteo suele iniciar con una perturbación en la zona de corte e incluye (a) el tipo de virutas producidas; (b) una carencia de homogeneidad en el material de la pieza de trabajo o las condiciones de su superficie, y (c) las variaciones en las condiciones de fricción en la interfaz de la herramienta y las virutas, según sean afectadas por los fluidos de corte y su efectividad.

El tipo más importante de vibración autoexcitada es el **traqueteo regenerativo**, que se origina cuando una herramienta corta una superficie que tiene rugosidad o alteraciones geométricas desarrolladas por el corte anterior (por ejemplo, ver figs. 21.2 y 21.21). En consecuencia, la profundidad de corte varía y las modificaciones producidas en la fuerza del mismo someten la herramienta a vibraciones. Este proceso continúa de manera repetida (de ahí el término *regenerativo*). Este tipo de vibración se puede observar con facilidad al conducir un auto sobre una carretera rugosa (el llamado *efecto lavadero*).

Por lo general, las vibraciones autoexcitadas se pueden controlar:

- Aumentando la **rigidez** y, en especial, la **rigidez dinámica** del sistema.
- Mediante **amortiguamiento**.

La rigidez dinámica se define como la relación de la amplitud de la fuerza aplicada respecto de la amplitud de la vibración. Por ejemplo, la figura 23.23b muestra el trepanado e indica que existen cuatro componentes implícitos en las deflexiones y que causan la vibración: el husillo, el brazo de soporte de la herramienta de corte, la broca y la herramienta de corte. La experiencia y el análisis indicarían que, a menos que todos los componentes tengan suficiente rigidez, es probable que una operación produzca traqueteo, empezando con una vibración torsional alrededor del eje del husillo y torsión del brazo. Algunos ejemplos son las brocas largas y delgadas que pueden sufrir vibraciones torsionales y las herramientas de corte que son largas o no están bien soportadas (como las que se presentan esquemáticamente en la fig. 23.3) que también producirían vibración y traqueteo.

Factores que influyen en el traqueteo. Se ha observado que la tendencia al traqueteo durante el maquinado es proporcional a las fuerzas de corte y a la profundidad y anchura de éste. Puesto que dichas fuerzas aumentan con la resistencia (de ahí la dureza del material de la pieza de trabajo), por lo general la tendencia al traqueteo aumenta al incrementarse la dureza. Por lo tanto, las aleaciones de aluminio y magnesio tienen menor tendencia al traqueteo que los aceros inoxidables martensíticos y de endurecimiento por precipitación, las aleaciones de níquel y las aleaciones de alta temperatura y refractarias.

Otro factor importante en el traqueteo es el tipo de viruta generado durante las operaciones de corte. Las virutas continuas implican fuerzas estables de corte; en consecuencia, dichas virutas generalmente no provocan traqueteo. En cambio, las virutas discontinuas y las aserradas (fig. 21.5) sí pueden hacerlo. Estas virutas son periódicas y las variaciones de fuerza resultantes durante el corte pueden ocasionar traqueteo. Otros factores que también contribuirían al traqueteo son el uso de cortadores desafilados, la falta de fluidos de corte y el desgaste de las guías y los componentes de las máquinas herramienta.

Amortiguamiento. El amortiguamiento se define como la velocidad a la que decaen las vibraciones. Este efecto puede demostrarse con los amortiguadores de un automóvil, al oprimir la parte delantera o posterior del vehículo y observando la rapidez con que se detiene el movimiento vertical. El amortiguamiento es un factor básico en el control de la

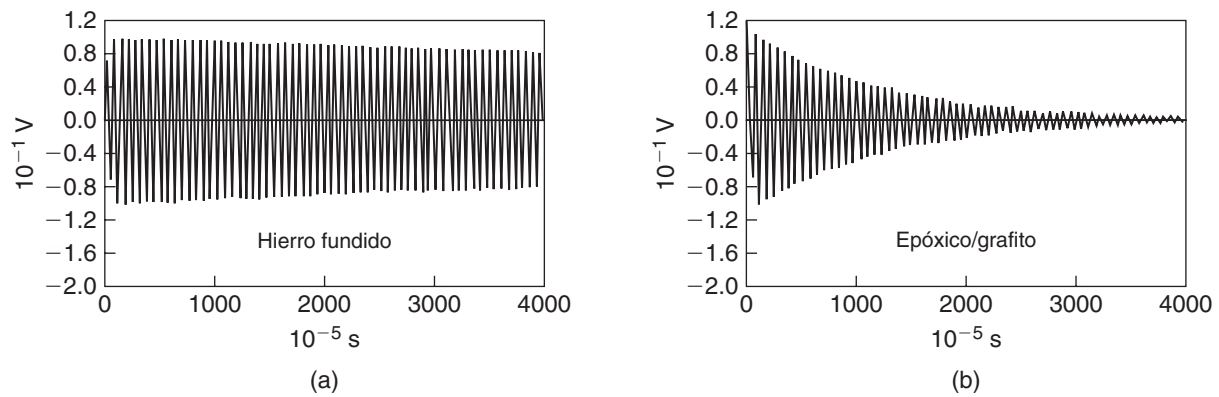


FIGURA 25.14 Capacidad relativa de amortiguamiento de (a) hierro fundido gris, y (b) un material compuesto de epóxico y granito. La escala vertical es la amplitud de vibración y la escala horizontal es el tiempo.

vibración y el traqueteo de las máquinas herramienta y consiste en amortiguamiento interno y externo.

El **amortiguamiento interno** es producido por la pérdida de energía en los materiales durante la vibración. Por ejemplo, los aceros tienen una capacidad de amortiguamiento inferior a la del hierro fundido gris, cuya capacidad es asimismo menor que la de los materiales compósitos (fig. 25.14). La diferencia en la capacidad de amortiguamiento de los materiales se puede observar al golpearlos con un mazo y escuchando el sonido. Por ejemplo, golpee un timbal de latón, una pieza de concreto y una pieza de madera y escuche las variaciones en el sonido.

Las **uniones atornilladas** en la estructura de una máquina herramienta también son una fuente de amortiguamiento; su efectividad depende del tamaño, la posición y el número de uniones. Debido a que la fricción disipa la energía, los movimientos relativos pequeños a lo largo de las uniones secas (sin lubricar) disipan energía y, por lo tanto, ayudan a mejorar el amortiguamiento. Como todas las máquinas herramienta constan de una cantidad de componentes grandes y pequeños ensamblados por varios medios, este tipo de amortiguamiento es acumulativo. En la figura 25.15 se observa cómo aumenta el amortiguamiento general conforme se eleva la cantidad de componentes en un torno y sus áreas de contacto. Sin embargo, como era de esperarse, al incrementarse la cantidad de uniones suele reducirse la rigidez general del sistema de la máquina.

En algunas barras de mandrinado y portaherramientas se ha implementado otro método de amortiguamiento para reducir o eliminar la vibración y el traqueteo. Como se describe e ilustra en la figura 23.17b, el amortiguamiento se logra por medios mecánicos, disipando la energía mediante la resistencia a la fricción de los componentes dentro de la estructura de la barra de mandrinado.

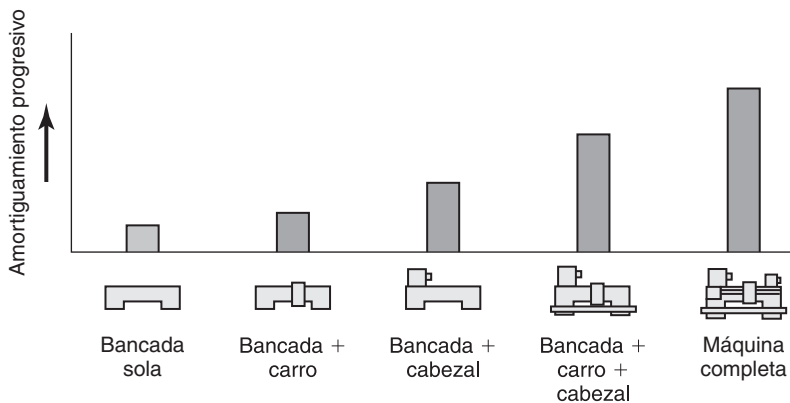


FIGURA 25.15 Amortiguamiento de vibraciones en función de la cantidad de componentes en un torno. Las uniones disipan energía; a mayor cantidad de uniones, mayor capacidad de amortiguamiento de la máquina. Fuente: J. Peters.

El **amortiguamiento externo** se logra con amortiguadores externos que son similares a los de automóviles o máquinas. Para este propósito se han desarrollado e instalado amortiguadores especiales para vibración. Además, las máquinas herramienta también pueden colocarse en pisos y cimentaciones especialmente preparados para aislar vibraciones forzadas, como las de máquinas cercanas colocadas en el mismo piso.

Lineamientos para reducir la vibración y el traqueteo. Con base en lo ya indicado, es evidente que se debe lograr un equilibrio entre el incremento de rigidez de una máquina herramienta y la conveniencia de aumentar el amortiguamiento, sobre todo en la construcción de máquinas herramienta de alta precisión. En diversas secciones de los capítulos 23 y 24 se han señalado los lineamientos generales para reducir la vibración y el traqueteo en las operaciones de maquinado, los cuales se pueden resumir de la siguiente manera:

- Minimizar la saliente de las herramientas.
- Mejorar la rigidez de los dispositivos de sujeción de trabajo y soportar con firmeza las piezas de trabajo.
- Modificar la geometría de las herramientas y cortadores para minimizar las fuerzas o hacerlas uniformes.
- Cambiar los parámetros de proceso, como velocidad y profundidad de corte, avance y fluidos de corte.
- Aumentar la rigidez de la máquina herramienta y sus componentes mejorando el diseño, utilizando secciones transversales y materiales más grandes con un módulo elástico mayor.
- Mejorar la capacidad de amortiguamiento de la máquina herramienta.

25.5 | Maquinado de alta velocidad

Con las continuas demandas de mayor productividad y menores costos de producción, desde finales de la década de 1950 se han efectuado investigaciones para aumentar la velocidad de corte y de remoción de material en el maquinado, sobre todo para aplicaciones en las industrias aeroespacial y automotriz.

El término “alta” en *maquinado de alta velocidad* (HSM, por sus siglas en inglés) es de algún modo relativo; como guía general, se puede definir un intervalo aproximado de velocidades de corte de la siguiente manera:

Velocidad alta: 600 a 1800 m/min (2000 a 6000 pies/min)

Velocidad muy alta: 1800 a 18,000 m/min (6000 a 60,000 pies/min)

Velocidad ultraalta: >18,000 m/min

En la actualidad, las *velocidades de giro del husillo* en las máquinas herramienta son hasta de 50,000 rpm, aunque por lo general la industria automotriz las ha limitado a 15,000 rpm para mejorar la confiabilidad y tener un tiempo muerto menor en caso de que ocurra alguna falla. La *potencia del husillo* requerida en el maquinado de alta velocidad suele ser de 0.004 W/rpm (0.005 hp/rpm), mucho menor que la del maquinado tradicional, que por lo general es de 0.2 a 0.4 W/rpm (0.25 a 0.5 hp/rpm). Hoy en día, las velocidades de avance en el maquinado de alta velocidad son hasta de 1 m/s (3 pies/s) y las velocidades de aceleración de los componentes de las máquinas herramienta son muy elevadas.

Los diseños de los husillos para grandes velocidades requieren *alta rigidez y precisión* y, por lo general, comprenden un motor eléctrico integral. La armadura se instala en la flecha y el estator se coloca en la pared de la carcasa del husillo. Los rodamientos pueden ser elementos giratorios o hidrostáticos; este último es más conveniente porque necesita menos espacio que el primero. Debido a los *efectos de la inercia* durante la aceleración y desaceleración de los componentes de las máquinas herramienta, el uso de materiales ligeros (como los cerámicos y materiales compósitos) es un factor que debe considerarse.

Por supuesto, la selección de los materiales adecuados para las herramientas de corte es una consideración importante. Con base en nuestros temas sobre herramientas y su selección en el capítulo 22 (en particular si se revisa la tabla 22.2), al parecer (dependiendo del material de la pieza de trabajo) los carburos con recubrimiento de fases múltiples, los cerámicos, el nitruro de boro cúbico y el diamante son los materiales para herramientas más apropiados para esta operación.

El maquinado de alta velocidad debe considerarse principalmente para operaciones en las que el **tiempo de corte** sea una parte básica del tiempo en la operación de maquinado en general. Como se describe en la sección 38.6 y el capítulo 40, el **tiempo sin corte** y otros factores diversos son esenciales en la evaluación global de los beneficios del maquinado de alta velocidad para una aplicación en particular.

El trabajo de investigación y desarrollo sobre maquinado de alta velocidad continúa, en particular para el torneado, fresado, mandrinado y taladrado de aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio, aceros y superaleaciones. Se ha recabado mucha información en relación con el efecto de la alta velocidad de corte en (a) el tipo de virutas producidas; (b) las fuerzas y la potencia de corte; (c) las temperaturas generadas; (d) el desgaste y la falla de las herramientas, (e) el acabado y la integridad de la superficie, y (f) la economía del proceso.

Estos estudios indican que el maquinado de alta velocidad es económico para ciertas aplicaciones específicas. Por ejemplo, se ha implementado en el maquinado de (a) componentes estructurales de aluminio para aeronaves; (b) propulsores de submarinos de 6 m (20 pies) de diámetro, fabricados de aleación de níquel, aluminio y bronce y con un peso de 55,000 kg (50 toneladas), y (c) motores automovilísticos, con cinco a diez veces la productividad del maquinado tradicional. El maquinado de alta velocidad de contornos complejos de tres y cinco ejes ha sido posible gracias a los avances en la tecnología de control de CNC, como se describe respecto de los *centros de maquinado* en este capítulo y en el capítulo 37.

Otro factor fundamental en la adopción del maquinado de alta velocidad ha sido el requisito para obtener una mejora adicional en las tolerancias dimensionales de las operaciones de corte. Como ya se vio en la figura 21.14, al aumentar la velocidad de corte, la viruta elimina cada vez más el calor generado, por lo que la herramienta y (más importante) la pieza de trabajo mantienen una temperatura cercana a la del medio ambiente. Esto resulta benéfico, porque no existe dilatación térmica ni alabeo de la pieza durante el maquinado.

Las características importantes de las máquinas herramienta en el maquinado de alta velocidad se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Diseño del husillo para obtener rigidez, precisión y equilibrio a velocidades rotacionales muy altas.
2. Características de los rodamientos.
3. Inercia de los componentes de la máquina herramienta.
4. Transmisiones de avance rápido.
5. Selección de las herramientas de corte apropiadas.
6. Parámetros de procesamiento y su control por computadora.
7. Dispositivos de sujeción de trabajo que puedan soportar altas fuerzas centrífugas.
8. Sistemas efectivos de remoción de viruta a muy altas velocidades de remoción de material.

ESTUDIO DE CASO 25.1

Maquinado en seco de alta velocidad de motores de hierro fundido

El maquinado de alta velocidad tiene claras ventajas económicas, siempre que se eviten daños y traqueteo al husillo. De manera similar, el maquinado en seco se reconoce como una estrategia prometedora para resolver problemas ambientales asociados

con los fluidos de corte. Por desgracia, con frecuencia se ha percibido que las dos estrategias no pueden aplicarse de manera simultánea, porque sus altas velocidades producirían una vida corta de la herramienta. Sin embargo, el maquinado en seco de alta velocidad es posible con hierro fundido y aluminio; a continuación se hace un análisis para operaciones de desbaste, acabado y producción de orificios en una cabeza de cilindro de hierro fundido para un motor de 4.3 litros.

El maquinado en seco de alta velocidad es una operación demandante. La disipación de calor sin refrigerante líquido necesita recubrimientos de alto rendimiento y materiales para herramientas resistentes al calor. Los materiales de las herramientas de corte son cerámicos o cBN debido al intenso calor generado en el proceso. Además, se requieren máquinas herramienta con gran potencia y husillos con altos niveles de rigidez y potencia. El traqueteo puede ser un problema en el maquinado de alta velocidad, por lo que deben desarrollarse programas de CNC que mantengan los parámetros del proceso dentro de una ventana de operación en la que se asegure que no existe traqueteo.

La clave para el maquinado en seco de la cabeza de hierro fundido es el uso de dos técnicas avanzadas. La primera es el *maquinado de media luna roja*, en el que se generan altas temperaturas en la pieza de trabajo frente a la herramienta, creando un arco rojo visible (de ahí el nombre del proceso). La segunda técnica es el maquinado de limpieza fina, que utiliza aire de alta presión en el interior del husillo a fin de retirar las virutas que normalmente se eliminarían con un fluido de corte. El maquinado de media luna roja se refiere a las operaciones de fresado que ocurren a altas velocidades tanto de avance como de husillo. Esta combinación reduce la fuerza de empuje contra la pieza de trabajo, en comparación con una operación estándar de fresado. El maquinado de media luna roja concentra calor en el material frente a la herramienta y puede alcanzar de 600 °C a 700 °C (1100 °F a 1300 °F) en algunos casos. Esto se debe a que (a altas velocidades) el calor generado se localiza en la zona de cizallamiento o de corte y no tiene tiempo de conducirse a la pieza de trabajo o a la herramienta. Esta zona de alta temperatura produce un destello rojo que es benéfico para los hierros fundidos, porque el calor aumenta la ductilidad y reduce la resistencia de los mismos, lo que permite un maquinado con mucha mayor eficiencia. La parte no se distorsiona, porque la mayoría del calor se retiene en la viruta y se retira antes de que se transfiera a la pieza de trabajo. En la tabla 25.1 se incluye una comparación entre el maquinado de media luna roja y el maquinado convencional para esta aplicación en particular.

El *fresado de acabado* se logra mediante estrategias de maquinado de bajo empuje, por lo general utilizando cortadores con menos insertos por cortador, a menor avance por revolución y mayores velocidades superficiales que el maquinado convencional. El maquinado de menor fuerza de empuje tiene la ventaja adicional de que el diseño del sujetador del trabajo se simplifica, permitiendo con frecuencia mejor acceso a partes complicadas. En el maquinado de acabado de monobloques de hierro fundido para motores se utilizan insertos de cBN. Aunque éste es más costoso que las alternativas de insertos de carburo o de cerámicos, la vida de la herramienta es más larga y se requieren menos preparaciones, por lo que el costo del inserto por parte

TABLA 25.1

Comparación de condiciones de maquinado convencional contra maquinado de media luna roja

Parámetro	Convencional	Media luna roja
Velocidad superficial (pies/min)	250	5000
Velocidad del husillo (rpm)	160	3200
Avance (pulgadas/rev)	0.020	0.005
Número de insertos	10	5
Fuerza de empuje radial (libras)	4300	262
Velocidad de remoción de metal (pulg ³ /min)	32	80

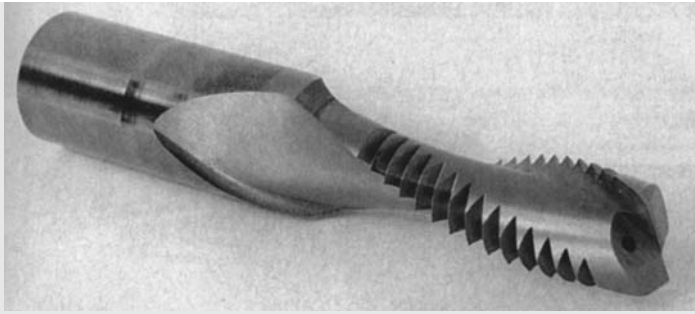


FIGURA 25.16 Herramienta de alta velocidad para fresado de un solo punto, biselado, contrataladrado y roscado de orificios. *Fuente:* Cortesía de Makino, Inc.

maquinada puede ser comparable o menor al de los materiales convencionales para herramientas.

El *maquinado de limpieza fina* es un proceso que emplea aire a alta presión a través del husillo para desechar las virutas y eliminar calor de la herramienta de corte. La presión del aire necesaria es de 1100 a 1380 kPa (160 a 200 psi) para reducir la temperatura de la pieza de trabajo en casi 50%. El maquinado de limpieza fina es adecuado para la mayoría de los orificios poco profundos (relaciones de profundidad a diámetro de cinco o menos), que se adapta a la mayoría de las aplicaciones automotrices. Los orificios más profundos se producen utilizando operaciones de taladrado más convencionales. La producción de orificios profundos, el fresado con una sola herramienta, biselado, contrataladrado y roscado de orificios, se pueden lograr usando herramientas como la que se muestra en la figura 25.16. Este proceso emplea control de CNC de alta velocidad y precisión a fin de mover una herramienta de diámetro pequeño en un patrón helicoidal para formar y roscar los orificios. Además, esto permite que una herramienta simple machine orificios de diferentes diámetros.

Fuente: Adaptado de “High Speed, Dry Machining Can Cut Cycle Times and Cost”, por G. Hyatt, *Manufacturing Engineering*, Vol. 119, No. 3, 1997.

25.6 | Maquinado duro

Ya se indicó que al aumentar la dureza de la pieza de trabajo su maquinabilidad disminuye, y el desgaste y la fractura de la herramienta, así como el acabado y la integridad superficial, pueden convertirse en problemas significativos. Como se describe en los capítulos 26 y 27, existen muchas otras técnicas mecánicas (incluyendo maquinado abrasivo), no mecánicas y avanzadas de remoción de material, para metales y aleaciones duros o endurecidos, que resultan económicas. Sin embargo, aún es posible aplicar procesos tradicionales de maquinado a metales y aleaciones duros seleccionando un material adecuado para herramientas duras y utilizando máquinas herramienta con alta rigidez, potencia y precisión.

Un ejemplo común es el maquinado de acabado de ejes, engranes, piñones y diversos componentes automovilísticos de acero tratado térmicamente (45 a 65 HRC) mediante herramientas de corte de nitruro de boro cúbico policristalino (PcBN), cermet o cerámicos. Conocido como *maquinado duro* o *torneado duro*, este proceso produce partes maquinadas con buena precisión dimensional, buen acabado superficial (tan bajo como $0.25\ \mu\text{m}$ o $10\ \mu\text{pulg}$) e integridad superficial. (a) La potencia disponible; (b) la rigidez estática y dinámica de la máquina herramienta y su husillo, y (c) los dispositivos de sujeción del trabajo y los soportes son factores importantes.

Como se describe en la sección 25.3, las tendencias en el diseño y la construcción de máquinas herramienta modernas incluyen el uso de rodamientos hidrostáticos para

los husillos y las guías. El cabezal y la bancada inclinada en las máquinas (ver fig. 23.10a) se pueden fabricar de *materiales compósitos graníticos* con propiedades únicas. La selección de la herramienta de corte y la preparación del filo también son importantes para evitar fallas prematuras en el maquinado duro.

A partir de consideraciones técnicas, económicas y ecológicas, el torneado duro puede competir de manera exitosa con el proceso de *rectificado* y con la calidad y las características que se aproximan a las producidas en máquinas de rectificado. Por ejemplo, en algunos casos específicos se ha demostrado que el torneado duro es tres veces más rápido que el rectificado, requiere pocas operaciones para acabar la parte y utiliza cinco veces menos energía. En el ejemplo 26.4 se presenta un modelo comparativo detallado del torneado duro contra el rectificado.

25.7 | Maquinado de ultraprecisión

A principios de la década de 1960, se incrementó la demanda de manufactura de precisión de componentes para aplicaciones en computadoras, electrónicas, nucleares y de defensa. Algunos ejemplos incluyen espejos ópticos, discos de memoria para computadoras y tambores para fotocopadoras. Los requisitos de acabado superficial se encuentran en el intervalo de las decenas de *nanómetros* (10^{-9} m, $0.001\ \mu\text{m}$, o $0.04\ \mu\text{pulg}$) y las tolerancias dimensionales y precisiones de forma están en el intervalo de los μm y sub- μm .

Esta tendencia a la manufactura de ultraprecisión continúa creciendo. Las modernas **máquinas herramienta de ultraprecisión**, con controles avanzados por computadora, pueden posicionar una herramienta de corte con una precisión aproximada a 1 nm, como se puede notar en la figura 25.17. En ésta se observa además que en hoy en día están obteniendo precisiones mayores mediante procesos como el maquinado abrasivo, maquinado por haz de iones y manipulación molecular. En los capítulos 26 y 27 se describen los *procesos de maquinado abrasivo y maquinado avanzado*, respectivamente. En los capítulos 28 y 29 se cubren los temas de *micromaquinado, fabricación de sistemas microelectrónicos y microelectromecánicos (MEMS) y nanomanufactura*.

La herramienta de corte para aplicaciones de *maquinado de ultraprecisión* es casi exclusivamente un diamante monocristalino; el proceso se conoce como **torneado con diamante**. La herramienta de diamante tiene un filo de corte pulido con un radio muy pequeño, de unos cuantos nm. El desgaste del diamante puede ser un problema significativo

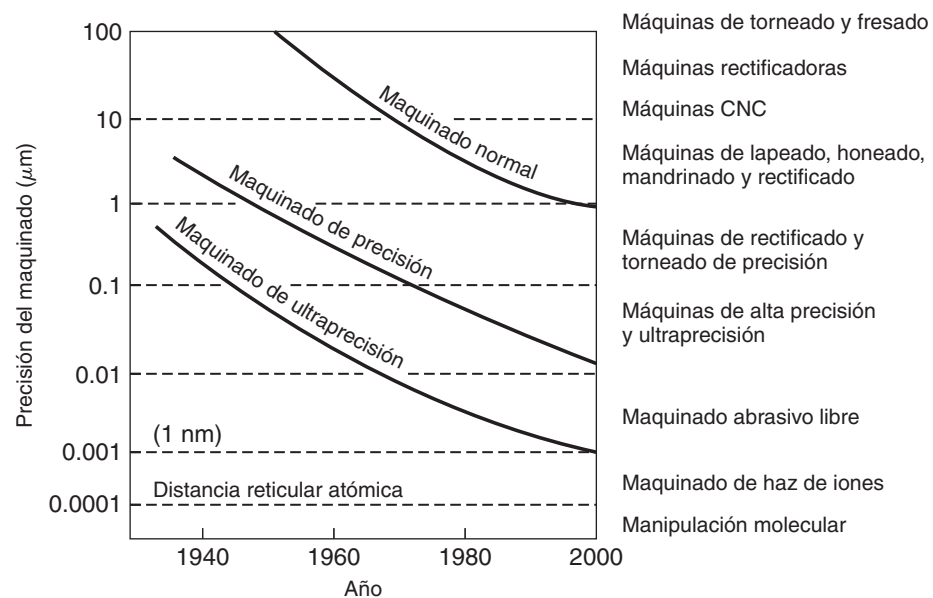


FIGURA 25.17 Mejoras en la precisión del maquinado a través de los años, utilizando tecnologías de maquinado de ultraprecisión. Fuente: C. J. McKeown, N. Taniguchi, G. Byrne, D. Dornfeld y B. Denkena.

y los avances recientes incluyen el *torneado criogénico con diamante*, en el que el sistema de herramientas se enfría con nitrógeno líquido a una temperatura aproximada de $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-184\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Los materiales de la pieza de trabajo para maquinado de ultraprecisión incluyen aleaciones de cobre y de aluminio, plata, oro, níquel no electrolítico, materiales infrarrojos y plásticos (acrílicos). Con profundidades de corte en el nivel de los nm, los materiales duros y frágiles generan virutas continuas en un proceso conocido como **corte a régimen dúctil**. (Ver también *rectificado a régimen dúctil* en la sección 26.3.4). Los cortes más profundos en materiales frágiles producen virutas discontinuas.

Las máquinas herramienta para estas aplicaciones se construyen con una precisión muy alta y rigidez elevada de la máquina, el husillo y los dispositivos de sujeción del trabajo. Estas máquinas de ultraprecisión (partes de las cuales se fabrican con materiales estructurales de baja dilatación térmica y buena estabilidad dimensional, ver sección 25.3) se encuentran en un ambiente libre de polvo (*cuartos limpios*), en el que se controla la temperatura dentro de una fracción de grado.

Hasta donde sea posible, deben evitarse las vibraciones de las fuentes internas de la máquina (y de las externas, como las máquinas cercanas en el mismo piso). Se utiliza metrología láser para controlar el avance y la posición, y las máquinas son equipadas con sistemas altamente avanzados de control computarizado y con características de compensación de errores térmicos y geométricos.

Consideraciones generales para maquinado de precisión. Existen diversos factores importantes en el maquinado y en las máquinas herramienta de precisión y ultraprecisión, hasta cierto punto similares a los del maquinado de alta velocidad:

1. Diseño, construcción y ensamble de las máquinas herramienta, que proporcionan rigidez, amortiguamiento y precisión geométrica.
2. Control del movimiento de diversos componentes, tanto lineales como rotacionales.
3. Tecnología del husillo.
4. Crecimiento térmico de la máquina herramienta, compensación de dicho crecimiento y control del ambiente de las máquinas herramienta.
5. Selección y aplicación de las herramientas de corte.
6. Parámetros de maquinado.
7. Desempeño y control en tiempo real de la máquina herramienta e implantación de un sistema de supervisión de las condiciones de la herramienta.

25.8 | Economía del maquinado

En la Introducción a la parte IV, se indicó que las limitaciones importantes de las operaciones de maquinado incluyen (a) tiempo relativamente más largo para maquinar una parte, en comparación con el formado y moldeado; (b) la necesidad de reducir el tiempo sin corte, y (c) el hecho de que el material se desperdicia de manera inevitable. A pesar de estas desventajas, el maquinado es indispensable, en particular para producir formas complejas en piezas de trabajo, con características externas e internas, y para obtener una alta precisión dimensional y acabado superficial.

Ya se indicaron los parámetros de los materiales y procesos que son importantes para lograr operaciones de maquinado eficientes. Sin embargo, al analizar la *economía* del maquinado, se deben considerar muchos otros factores. Como se describe con mayor detalle en el capítulo 40, estos factores incluyen los costos comprendidos en (a) máquinas herramienta, dispositivos y aditamentos de sujeción de las piezas y herramientas de corte; (b) mano de obra y gastos generales; (c) tiempo invertido en preparar la máquina para una operación en particular; (d) manejo y movimiento del material, como carga de la pieza en bruto y descarga de la pieza maquinada; (e) calibrado de la precisión dimensional y acabado superficial, y (f) tiempos de corte y tiempos sin corte.

Es importante considerar el tiempo real de maquinado. También recuérdese lo tratado en la sección 25.5 sobre la importancia del tiempo sin corte para evaluar la economía del maquinado de alta velocidad. A menos que el tiempo sin corte sea una parte significativa del tiempo de piso a piso, no debe considerarse el maquinado de alta velocidad, excepto cuando sus demás beneficios sean importantes.

Minimización del costo unitario de maquinado. Como en todos los procesos y operaciones de manufactura, los parámetros importantes del maquinado se pueden seleccionar y especificar de manera que se minimice el *costo unitario de maquinado* (así como el *tiempo unitario de maquinado*). Para lograr este objetivo, se han desarrollado diversos métodos y estrategias. Con el uso creciente de *software* y computadoras de fácil manejo, hoy en día esta tarea se ha vuelto más sencilla. Sin embargo, para que los resultados sean confiables, es fundamental que los datos ingresados sean precisos y actualizados. A continuación se describe uno de los métodos más simples y comunes para analizar los costos de maquinado en una operación de torneado.

En el maquinado de una parte mediante torneado, el costo unitario total del maquinado (C_p) consiste en:

$$C_p = C_m + C_s + C_l + C_t \quad (25.1)$$

donde

C_m = Costo de maquinado.

C_s = Costo de la preparación para el maquinado; montaje del cortador, preparación de los soportes y de la máquina herramienta para la operación.

C_l = Costo de carga, descarga y manejo de la máquina.

C_t = Costo del herramental, con frecuencia sólo alrededor de 5% de la operación total de corte. Por consiguiente, usar la herramienta menos costosa no siempre es una manera eficaz de reducir los costos de maquinado.

El **costo del maquinado** se obtiene mediante la fórmula:

$$C_m = T_m(L_m + B_m) \quad (25.2)$$

donde T_m es el tiempo unitario de maquinado, L_m el costo por mano de obra del operador de producción por hora y B_m la carga fiscal o cargo por gastos generales de la máquina, incluyendo depreciación, mantenimiento, mano de obra indirecta y similares. El **costo de preparación por pieza** es una cifra determinada en dólares. El **costo de carga, descarga y manejo de la máquina** es:

$$C_l = T_l(L_m + B_m) \quad (25.3)$$

donde T_l es el tiempo comprendido en la carga y descarga de la parte, el cambio de velocidades, las velocidades de avance y así sucesivamente. El **costo de las herramientas** es:

$$C_t = \frac{1}{N_p} \left[T_c(L_m + B_m) + T_g(L_g + B_g) + D_c \right] \quad (25.4)$$

donde N_p es el número de partes maquinadas por rectificado de herramienta, T_c el tiempo requerido para cambiar la herramienta, T_g el tiempo requerido para rectificar herramientas, L_g el costo por hora de mano de obra del operador del rectificador de herramientas, B_g el cargo fiscal por hora del rectificador de herramientas y D_c la depreciación en dólares de la herramienta por rectificado.

El **tiempo necesario** para producir una parte es

$$T_p = T_l + T_m + \frac{T_c}{N_p} \quad (25.5)$$

donde T_m debe calcularse para una operación específica. Por ejemplo, considérese una operación de torneado; el tiempo de maquinado es:

$$T_m = \frac{l}{fN} = \frac{\pi l d}{fV} \quad (25.6)$$

donde l es la longitud de corte, f el avance, N son las rpm de la pieza de trabajo, d es el diámetro de la pieza y V la velocidad de corte. Obsérvese que se deben utilizar las unidades apropiadas en todas estas ecuaciones. Con base en la ecuación de Taylor de vida útil de la herramienta (ecuación 21.20a), tenemos que:

$$VT^n = C$$

Por lo que,

$$T = \left(\frac{C}{V} \right)^{1/n} \quad (25.7)$$

donde T es el tiempo (en minutos) requerido para sufrir un desgaste del flanco de cierta dimensión, después del cual la herramienta tiene que rectificarse de nuevo o cambiarse. Por lo tanto, la cantidad de piezas por rectificado de herramienta es simplemente:

$$N_p = \frac{T}{T_m} \quad (25.8)$$

La combinación de las ecuaciones 25.6, 25.7 y 25.8 da

$$N_p = \frac{fC^{1/n}}{\pi l d V^{(1/n)-1}} \quad (25.9)$$

Ahora el **costo unitario** (C_p) en la ecuación 25.1 puede definirse en términos de diversas variables. Con el fin de obtener la velocidad óptima de corte y también la vida óptima de la herramienta para **costo mínimo**, se tiene que diferenciar C_p respecto de V e igualar a cero. Por lo que,

$$\frac{\partial C_p}{\partial V} = 0 \quad (25.10)$$

Así encontramos que la velocidad óptima de corte (V_o) es:

$$V_o = \frac{C(L_m + B_m)^n}{\{[(\frac{1}{n}) - 1][T_c(L_m + B_m) + T_g(L_g + B_g) + D_c]\}^n} \quad (25.11)$$

y la vida óptima de la herramienta (T_o) es:

$$T_o = [(\frac{1}{n}) - 1] \frac{T_c(L_m + B_m) + T_g(L_g + B_g) + D_c}{L_m + B_m} \quad (25.12)$$

Para encontrar la velocidad óptima de corte y la vida óptima de la herramienta para **máxima producción**, se tiene que diferenciar T_p respecto de V e igualar a cero. Por lo que

$$\frac{\partial T_p}{\partial V} = 0 \quad (25.13)$$

Ahora, la **velocidad óptima de corte** es:

$$V_o = \frac{C}{\{[(\frac{1}{n}) - 1]T_c\}^n} \quad (25.14)$$

y la **vida óptima de la herramienta** es:

$$T_o = [(\frac{1}{n}) - 1]T_c \quad (25.15)$$

En la figura 25.18 se proporciona un diagrama cualitativo del costo unitario y tiempo unitario mínimo (es decir, la máxima velocidad de producción). El costo de una superficie maquinada también depende del acabado requerido; el costo de maquinado aumenta rápidamente con un acabado superficial más fino.

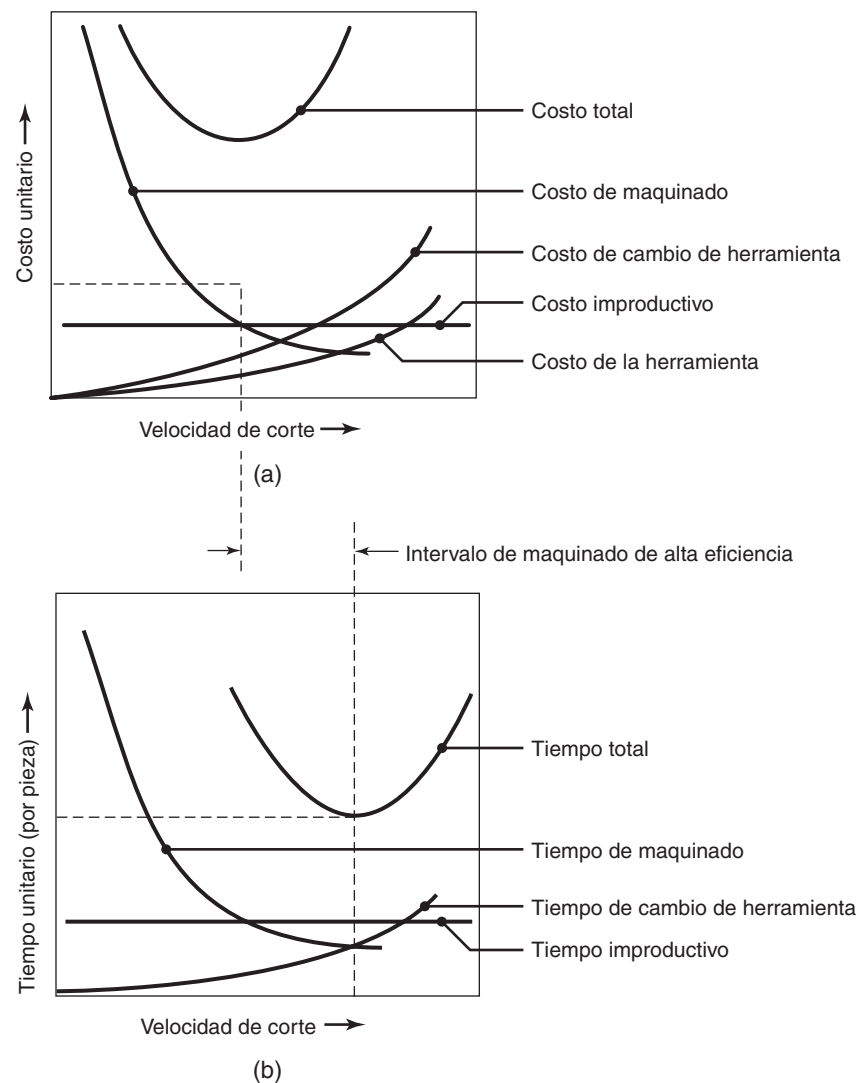


FIGURA 25.18 Gráficos que muestran: (a) costo unitario, y (b) tiempo unitario (por pieza) en maquinado. Obsérvese las velocidades óptimas para costo y tiempo. El intervalo entre las dos se conoce como intervalo de maquinado de alta eficiencia.

Este análisis indica la importancia de identificar todos los parámetros relevantes en una operación de maquinado, determinar diversos factores de costo, obtener curvas relevantes de la vida de la herramienta para la operación específica y medir en forma adecuada los diversos intervalos de tiempo comprendidos en toda la operación. La importancia de obtener datos precisos se muestra con claridad en la figura 25.18, ya que los cambios pequeños en la velocidad de corte pueden tener un efecto significativo en el costo o tiempo unitarios mínimos.

RESUMEN

- Por su versatilidad y capacidad de efectuar varias operaciones de maquinado en piezas de trabajo pequeñas y grandes de diversas formas, los centros de maquinado se encuentran hoy en día entre las máquinas herramienta más importantes. Su selección depende de factores como la complejidad de la parte, la cantidad y el tipo de operaciones de maquinado por realizar, la cantidad de herramientas de corte requeridas y la precisión dimensional y velocidad de producción necesarias.

- La vibración y el traqueteo en el maquinado son elementos que deben considerarse por lo que respecta a la precisión dimensional y el acabado superficial de la pieza de trabajo, así como en la vida útil de la herramienta. La rigidez y capacidad de amortiguamiento de las máquinas herramienta son factores importantes en el control de la vibración y el traqueteo. Continuamente se desarrollan nuevos materiales para utilizarse en la construcción de estructuras de máquinas herramienta.
- La economía de los procesos de maquinado depende de costos como los siguientes: improductivos, de maquinado, por cambio de herramienta y de las herramientas. Las velocidades óptimas de corte pueden determinarse para tiempos y costos unitarios mínimos de maquinado.

TÉRMINOS CLAVE

Amortiguamiento	Construcción modular	Rigidez
Brazo de intercambio de herramientas	Envolvente de trabajo	Rigidez dinámica
Cambiador automático de herramientas	Estación de verificación de herramientas y partes	Sondas o palpadores de contacto
Cambiador automático de tarimas (pallets)	Hexápodos	Tarimas (pallets)
Centro de maquinado	Intervalo de maquinado de alta eficiencia	Transmisión de motor lineal
Centro de torneado	Máquinas reconfigurables	Traqueteo
Centro universal de maquinado	Recolección de virutas	Traqueteo regenerativo
		Vibración autoexcitada
		Vibración forzada

BIBLIOGRAFÍA

- ASM Handbook, Vol. 16, *Machining*, ASM International, 1989.
- Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1989.
- Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
- Erdel, B., *High-Speed Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- Krar, S. F. y Check, A. F., *Technology of Machine Tools*, 5a. ed., Glencoe/Macmillan McGraw-Hill, 1996.
- Nakazawa, H., *Principles of Precision Engineering*, Oxford, 1994.
- Reshetov, D. N. y Portman, V. T., *Accuracy of Machine Tools*, American Society of Mechanical Engineers, 1989.
- Rivin, E. I., *Stiffness and Damping in Mechanical Design*, Marcel Dekker, 1999.
- Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., Vol. 1, *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 1983.
- Weck, M., *Handbook of Machine Tools*, 4 vols., Wiley, 1984..

PREGUNTAS DE REPASO

- 25.1 Describa las características distintivas de los centros de maquinado y explique por qué son tan versátiles estas máquinas.
- 25.2 ¿Por qué los cambiadores de tarimas (pallets) y de herramientas son partes integrales de los centros de maquinado?
- 25.3 Explique cómo opera el sistema de herramientas en un centro de maquinado.
- 25.4 Explique las tendencias en los materiales utilizados para las estructuras de las máquinas herramienta.
- 25.5 ¿Existe alguna diferencia entre traqueteo y vibración? Explique su respuesta.
- 25.6 Explique la importancia de las cimentaciones para instalar las máquinas herramienta.
- 25.7 ¿Cuáles son los tiempos comunes de cambio de herramienta en un centro de maquinado?
- 25.8 ¿Con qué tipos de materiales se fabrican las bases de las máquinas herramienta? ¿Por qué?
- 25.9 ¿Qué factores contribuyen a los costos en las operaciones de maquinado?
- 25.10 ¿Qué significa construcción “modular” de las máquinas herramienta?
- 25.11 ¿Cuál es el intervalo de maquinado de alta eficiencia? ¿Por qué se le llama así?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

25.12 Explique los factores técnicos y económicos que llevaron al desarrollo de los centros de maquinado.

25.13 Ya se indicó que las velocidades de husillo en los centros de maquinado varían en una amplia variedad. Explique las razones, proporcionando aplicaciones específicas.

25.14 Explique la importancia de la rigidez y el amortiguamiento de las máquinas herramienta. ¿Cómo se obtienen?

25.15 ¿Existen operaciones de maquinado descritas en los capítulos 23 y 24 que no puedan efectuarse en centros de maquinado y torneado? Explique con ejemplos específicos.

25.16 Describa cómo funcionan las sondas o palpadores de contacto mostradas en la figura 25.6.

25.17 ¿Cuál es la importancia del control de temperatura del fluido de corte en las operaciones realizadas en los centros de maquinado? Explique su respuesta.

25.18 Revise la figura 25.10 sobre centros de maquinado modulares y explique las piezas de trabajo y operaciones que serían adecuadas en dichas máquinas.

25.19 Describa los efectos adversos de la vibración y el traqueteo en el maquinado en relación con la pieza de trabajo y la herramienta de corte.

25.20 Se sabe que es posible disminuir los costos de maquinado cambiando la velocidad de corte. Explique qué costos tienen la probabilidad de cambiar y cómo, conforme se modifica la velocidad de corte.

25.21 Explique las diferencias entre las funciones de una torreta y un husillo en los centros de torneado.

25.22 Explique cómo se harían funcionar los arreglos de tarimas (pallets) mostrados en la figura 25.4a y b en el uso de estas máquinas.

25.23 Revise el cambiador de herramientas mostrado en la figura 25.5 y explique cualquier restricción para realizar sus operaciones más rápidamente, reduciendo así el tiempo de cambio de herramienta.

25.24 Además de la cantidad de uniones en una máquina herramienta (ver fig. 25.15), ¿qué otros factores

influyen en la proporción en que aumenta el amortiguamiento?

25.25 Describa las piezas de trabajo que no serían apropiadas para maquinado en un centro de maquinado. Proporcione ejemplos específicos.

25.26 Además de que cada una de ellas tiene un mínimo, ¿son importantes las formas y pendientes generales de las curvas de costo total y tiempo total en la figura 25.18? Explique su respuesta.

25.27 En la sección 21.3 se indicó que la fuerza de empuje en el corte puede ser negativa, con altos ángulos de ataque o baja fricción en la interfaz de la viruta y la herramienta. Puede tener un efecto adverso en la estabilidad del proceso de corte. Explique por qué.

25.28 Explique las ventajas y desventajas de las estructuras de las máquinas herramienta fabricadas con hierros fundidos grises.

25.29 ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de las estructuras de acero soldado? ¿Y de las estructuras de acero atornillado? ¿Y utilizando uniones adhesivas para ensamblar los componentes de máquinas herramienta?

25.30 ¿Por qué se han utilizado concreto o concretos de polímero en algunas máquinas herramienta?

25.31 Describa las consideraciones económicas implícitas en la selección de los centros de maquinado y de torneado.

25.32 Proporcione ejemplos de vibración forzada y vibración autoexcitada en la práctica general de ingeniería.

25.33 Explique situaciones específicas en las que sería importante la distorsión térmica de los componentes de las máquinas herramienta.

25.34 ¿Cuáles son los requisitos de las piezas de trabajo que harían que un centro de maquinado fuera preferible a las fresadoras, tornos y taladros de columna?

25.35 Explique cómo haría para reducir cada uno de los factores de costo en las operaciones de maquinado. ¿Qué dificultades encontraría para hacerlo?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

25.36 El husillo y la herramienta de un centro de maquinado se extienden 12 pulgadas desde la estructura de su máquina herramienta. ¿Qué cambio de temperatura se puede tolerar para mantener una tolerancia de 0.0001 pulgada en el maquinado? ¿Y una tolerancia de 0.001 pulgada? Suponga que el husillo está hecho de acero.

25.37 Calcule el tiempo para manufacturar las partes en el ejemplo 25.1 mediante maquinado convencional y maquinado de alta velocidad, empleando los datos del estudio de caso 25.1.

25.38 En la producción de una válvula maquinada, la tarifa de la mano de obra es de \$19.00 dólares por hora, la de mano de obra del rectificado de herramientas es de \$25.00 dólares por hora y la tarifa de gastos generales es de \$15.00 dólares por hora. La herramienta está fabricada con acero de alta velocidad y cuesta \$25.00 dólares; se requieren cinco minutos para cambiarla, 10 minutos para rectificarla y puede hacerse cuatro veces más antes de necesitar su reemplazo. La pieza de trabajo es un aluminio de libre maquinado. Calcule la velocidad óptima de corte desde la perspectiva de los costos. Utilice $C = 100$ para V_0 en m/min.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

25.39 Si fuera el jefe de ingenieros a cargo del diseño de centros de maquinado y torneado, ¿qué cambios y mejoras recomendaría a los modelos existentes?

25.40 Estudie la bibliografía técnica e indique las tendencias en el diseño de máquinas herramienta modernas. Explique por qué existen esas tendencias.

25.41 Liste los componentes de máquinas herramienta que se puedan fabricar con material cerámico y explique por qué serían adecuados los cerámicos.

25.42 Estudie la bibliografía de varios fabricantes de máquinas herramienta y elabore una tabla completa, indicando las capacidades, tamaños, potencia y costos de los centros de maquinado y torneado. Comente sus observaciones.

25.43 Como se puede ver, el costo de los centros de maquinado y torneado es considerablemente más alto que el de las máquinas herramienta tradicionales. Puesto que muchas operaciones realizadas en dichos centros también pueden hacerse en máquinas convencionales, ¿cómo justificaría el alto costo de los centros? Explique con ejemplos apropiados.

25.44 Investigue en la bibliografía o comuníquese con fabricantes para describir los detalles de la manera en que funcionan las máquinas hexápodos.

25.45 En la parte III de este texto se describieron los procesos de formado y moldeo para materiales metálicos y no metálicos. Con base en este conocimiento, explique si sería probable diseñar una máquina que se llamara “centro de formado”, capaz de efectuar dos o más procesos diferentes de moldeo (para dar forma). Proporcione

ejemplos específicos de partes que se puedan producir y diga lo que piensa sobre el diseño de dicha máquina o máquinas.

25.46 Explique si sería posible diseñar y construir centros de maquinado sin controles computarizados.

25.47 En su experiencia al usar herramientas u otros dispositivos, ¿ha llegado a situaciones en las que haya experimentado vibración y traqueteo? Si es así, proporcione detalles y explique cómo los minimizaría.

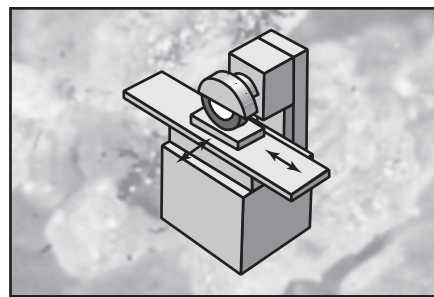
25.48 Diga si es probable o no incluir operaciones de rectificado (ver capítulo 26) en centros de maquinado. Explique la naturaleza de cualquier dificultad que pudiera presentarse.

25.49 El siguiente experimento está diseñado para demostrar de mejor manera el efecto del material saliente de la herramienta en la vibración y el traqueteo. Con una herramienta puntiaguda, raspe la superficie de una pieza de metal blando sosteniendo la herramienta con su brazo totalmente extendido. Repita el experimento sosteniendo la herramienta con la mano lo más cerca posible del metal. Describa sus observaciones sobre la tendencia a vibrar de la herramienta. Repita el experimento con diferentes tipos de materiales metálicos y no metálicos.

25.50 Se va a producir un perno grande a partir de material hexagonal extruido, colocándolo sobre un mandril o plato de sujeción y maquinando el zanco cilíndrico del perno mediante torneado. Liste las dificultades que se pueden presentar en esta operación.

CAPÍTULO 26

Operaciones de maquinado abrasivo y de acabado



26.1	Introducción	790
26.2	Abrasivos y abrasivos aglutinados	792
26.3	Proceso de rectificado	798
26.4	Operaciones de rectificado y rectificadoras	808
26.5	Consideraciones de diseño para el rectificado	818
26.6	Maquinado ultrasónico	818
26.7	Operaciones de acabado	820
26.8	Operaciones de rebabeo	825
26.9	Economía de las operaciones de maquinado abrasivo y de acabado	828

EJEMPLOS:

26.1	Fuerzas en el rectificado de superficies planas	802
26.2	Acción de un disco de rectificado	805
26.3	Patrones de ciclos en rectificado cilíndrico	812
26.4	Rectificado contra torneado duro	816
26.5	Rectificado por banda de álabes para tobera de turbinas	821

El maquinado abrasivo es uno de los pasos finales en la producción de partes. Consiste de una serie importante de procesos debido a su capacidad para proporcionar alta precisión dimensional y acabado superficial. En este capítulo se describen:

- Fundamentos y capacidades del proceso de rectificado.
- Características de los abrasivos comunes.
- Estructura de los discos o piedras de rectificado y diversas herramientas abrasivas.
- Operaciones de rectificado y sus capacidades.
- Procesos de acabado que se basan en una acción abrasiva.
- La manera en que el maquinado abrasivo puede competir con otros procesos.

Partes comunes fabricadas: cualquier parte que requiera alta precisión dimensional y acabado superficial, como rodamientos de bolas y rodillos, anillos de pistones, válvulas, levas, engranes y matrices.

Procesos alternativos: maquinado de precisión, maquinado por descarga eléctrica o electroerosión, maquinado y rectificado electroquímico y maquinado por chorro de abrasivo.

26.1 | Introducción

Existen muchas situaciones de manufactura en las que los procesos descritos hasta ahora no pueden proporcionar la precisión dimensional y el acabado superficial requeridos por una parte, o el material de la pieza de trabajo es demasiado duro o quebradizo para procesarlo. Por ejemplo, considérese la precisión y el fino acabado superficial de los rodamientos de bolas o rodillos, pistones, válvulas, cilindros, levas, engranes, matrices y diversos componentes utilizados en instrumentación. Uno de los mejores métodos para producir estas demandantes características en las partes es el maquinado abrasivo.

Un **abrasivo** es una pequeña partícula dura que posee aristas afiladas y forma irregular, a diferencia de las herramientas de corte ya descritas. Los abrasivos tienen la capacidad de remover pequeñas cantidades de material de una superficie mediante un proceso de corte que genera virutas diminutas. Muchos de nosotros estamos familiarizados con el uso de *discos o piedras abrasivas* (abrasivos aglutinados), como se muestra en la figura 26.1, para afilar cuchillos y herramientas, y con el uso de *lijas de papel* y *tela de esmeril* para alisar superficies y eliminar esquinas puntiagudas. Como se describe en este capítulo, los abrasivos también sirven para honear, lapear, abrillantar y pulir piezas de trabajo. Con el empleo de máquinas controladas por computadora, en la actualidad los procesos abrasivos tienen la capacidad de producir (a) una amplia variedad de geometrías



FIGURA 26.1 Variedad de abrasivos aglutinados que se utilizan en los procesos de maquinado abrasivo. Fuente: Cortesía de Norton Company.

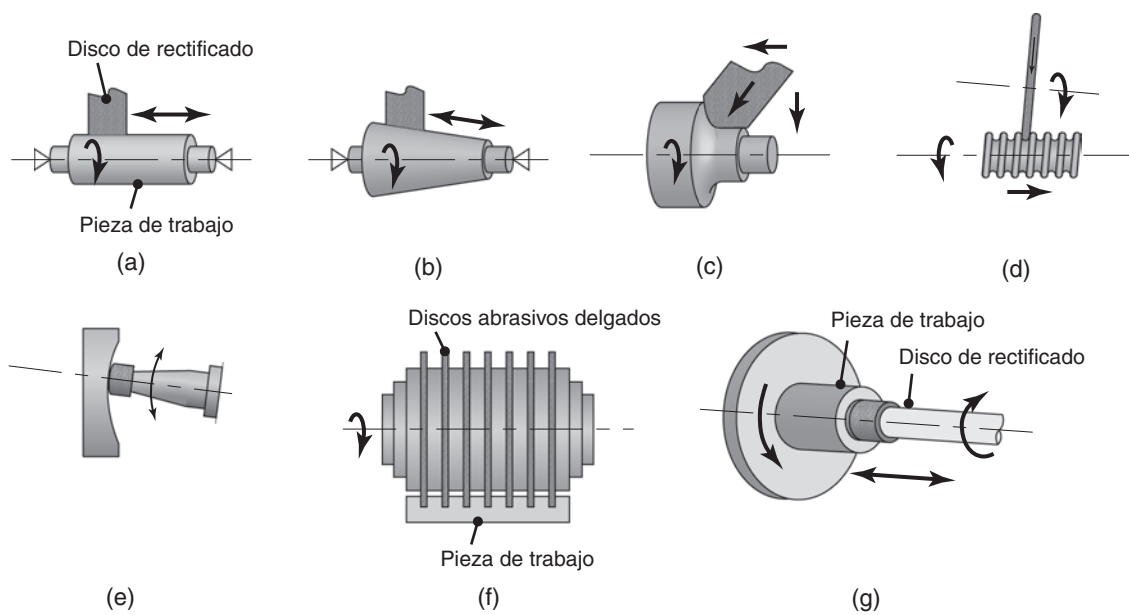


FIGURA 26.2 Tipos de piezas de trabajo y operaciones comunes de rectificado: (a) superficies cilíndricas; (b) superficies cónicas; (c) filetes en una flecha; (d) perfiles helicoidales; (e) forma cóncava; (f) corte o ranurado con discos delgados, y (g) rectificado interno.

en las piezas, como se puede ver en la figura 26.2, y *(b)* precisión dimensional y acabados superficiales muy finos, como se muestra en las figuras 23.13, 23.14 y 27.4. Por ejemplo, las tolerancias dimensionales pueden ser menores a $1\ \mu\text{m}$ ($40\ \mu\text{pulg}$) y las rugosidades superficiales pueden ser tan finas como $0.025\ \mu\text{m}$ ($1\ \mu\text{pulg}$).

Debido a su dureza, los abrasivos también se usan en *procesos de acabado* para metales y aleaciones tratadas térmicamente y para partes muy duras en aplicaciones como *(a)* acabado de cerámicos y vidrios; *(b)* corte de tramos de barras, formas estructurales, albañilería y concreto; *(c)* remoción de puntos de soldadura y salpicaduras no deseadas, y *(d)* limpieza de superficies con chorros de aire o agua que contienen partículas abrasivas.

En este capítulo se presentan las características de los abrasivos y su uso en diversos procesos de remoción de material. Como en las operaciones de corte, primero se describe la mecánica de las operaciones de maquinado abrasivo. Este conocimiento ayuda a establecer las relaciones entre las variables de los materiales y procesos de la pieza de trabajo y la precisión dimensional, el acabado superficial y la integridad de las superficies de las partes producidas.

26.2 | Abrasivos y abrasivos aglutinados

Los abrasivos que más se utilizan en las operaciones de maquinado abrasivo son:

Abrasivos convencionales

- Óxido de aluminio (Al_2O_3)
- Carburo de silicio (SiC)

Superabrasivos

- Nitruro de boro cúbico (cBN)
- Diamante

Como se indica en el capítulo 8, estos abrasivos son mucho más duros que los materiales convencionales de las herramientas de corte, como se observa al comparar las tablas 22.1 y 26.1. Debido a que los dos últimos abrasivos arriba mencionados son los materiales más duros que se conocen, se les denomina *superabrasivos*.

Además de la dureza, una característica básica de los abrasivos es su **friabilidad**, que se define como la capacidad de los granos abrasivos para fracturarse (romperse) en piezas más pequeñas. Ésta es una propiedad importante y proporciona a los abrasivos sus cualidades de *autoafilado*, que son esenciales para mantener su filo durante el uso. La alta friabilidad indica baja resistencia o baja resistencia a la fractura del abrasivo. Por lo tanto, un grano abrasivo altamente friable se fragmenta con mayor rapidez bajo el efecto de las fuerzas de rectificado que uno con baja friabilidad. Por ejemplo, el óxido de aluminio tiene menos friabilidad que el carburo de silicio y, en consecuencia, menos tendencia a fragmentarse.

TABLA 26.1

Intervalos de dureza Knoop para diversos materiales y abrasivos			
Vidrio común	350–500	Nitruro de titanio	2000
Pedernal, cuarzo	800–1100	Carburo de titanio	1800–3200
Óxido de zirconio	1000	Carburo de silicio	2100–3000
Aceros endurecidos	700–1300	Carburo de boro	2800
Carburo de tungsteno	1800–2400	Nitruro de boro cúbico	4000–5000
Óxido de aluminio	2000–3000	Diamante	7000–8000

La *forma* y el *tamaño* del grano abrasivo también afectan su friabilidad. Por ejemplo, los granos con forma de bloque (similares a un ángulo de ataque negativo en las herramientas de corte de una sola punta, como se muestra en la fig. 21.3) son menos friables que los granos con forma de placa. Además, ya que la probabilidad de defectos es menor conforme los granos se vuelven más pequeños (debido al *efecto del tamaño*), estos granos son entonces más resistentes y menos friables que los más grandes.

Tipos de abrasivos. Los abrasivos comunes en la naturaleza son el *esmeril*, *corindón* (alúmina), *cuarzo*, *granate* y *diamante*. Debido a que estos abrasivos naturales suelen contener cantidades desconocidas de impurezas y poseen propiedades irregulares, su rendimiento es inconsistente y poco confiable. Por lo tanto, durante muchos años se han fabricado abrasivos sintéticos, como se describe a continuación:

- El **óxido de aluminio** se preparó por primera vez en 1893 y se produce fundiendo bauxita, limaduras de hierro y coque. Los óxidos de aluminio fundido se clasifican en *crystal oscuro* (menos friable), *blanco* (muy friable) y *simple*.
- El **gel sembrado** se introdujo por primera vez en 1987 y es la forma más pura de *óxido de aluminio sin fundir*. También se conoce como *óxido de aluminio cerámico*. Tiene un tamaño de grano de $0.2\ \mu\text{m}$, que es mucho más pequeño que otros tipos de granos abrasivos de uso común. Estos granos se sinterizan a fin de obtener tamaños más grandes. Debido a que son más duros que la alúmina fundida y su friabilidad es relativamente alta, el gel sembrado mantiene su filo y se usa en particular para materiales difíciles de rectificar.
- El **carburo de silicio** se descubrió en 1891 y se fabrica con arena de sílice y coque de petróleo. Los carburos de silicio se dividen en *negros* (menos friables) y *verdes* (más friables). Tienen mayor friabilidad que los óxidos de aluminio y, por lo tanto, mayor tendencia a fracturarse y permanecer afilados.
- El **nitruro de boro cúbico** se desarrolló por primera vez en la década de 1970. Sus propiedades y características se describen en las secciones 8.2.3 y 22.7.
- El **diamante** (también conocido como diamante sintético o industrial) se utilizó por primera vez como abrasivo en 1955. Sus propiedades y características se describen en las secciones 8.7 y 22.9.

Tamaño de los granos abrasivos. En las operaciones de manufactura, los abrasivos son por lo general más pequeños que las herramientas de corte e insertos que describimos en los capítulos 21 y 22. Además, tienen aristas afiladas, que permiten remover cantidades mínimas de material de la superficie de la pieza de trabajo. Por lo tanto, se pueden obtener acabado superficial y precisión dimensional muy finos utilizando abrasivos como herramientas.

El tamaño de un *grano* abrasivo se identifica por el **número de grano**, que es una función de tamaño de tamiz: cuanto más pequeño es el tamaño del grano, más grande será su número. Por ejemplo, el grano número 10 se considera muy grueso; el 100, fino, y el 500, muy fino. La lija y la tela de esmeril también se identifican de esta manera, como se puede descubrir de inmediato al observar el número de grano impreso en la parte posterior del papel o tela abrasiva.

Compatibilidad entre la pieza de trabajo y el material abrasivo. Como sucede en la selección de los materiales para herramientas de corte para maquinar materiales específicos de piezas de trabajo, la afinidad de un grano abrasivo con el material de la pieza es un factor que debe considerarse. Cuanto menor sea la reactividad de los dos materiales, menor será el desgaste y desafilado de los granos durante el rectificado, que en ambos casos volvería menos eficaz la operación y dañaría la superficie de la pieza (ver sección 26.3.1 para detalles). Recuérdese que, debido a su afinidad química, el diamante no puede utilizarse para rectificar aceros porque se disuelve en el hierro a las altas temperaturas encontradas en el rectificado.

Por lo general, se hacen las siguientes recomendaciones para la selección de abrasivos:

- *Óxido de aluminio*: aceros al carbono, aleaciones ferrosas y aceros de aleación.
- *Carburo de silicio*: metales no ferrosos, hierros fundidos, carburos, cerámicos, vidrio y mármol.
- *Nitruro de boro cúbico*: aceros e hierros fundidos con dureza superior a 50 HRC y aleaciones de alta temperatura.
- *Diamante*: cerámicos, carburos cementados y algunos aceros endurecidos.

26.2.1 Discos o piedras de rectificado

Debido a que, en general, cada grano abrasivo sólo retira una cantidad muy pequeña de material a la vez, se pueden lograr altas velocidades de remoción de material sólo si una gran cantidad de estos granos actúan juntos. Esto se realiza utilizando **abrasivos aglutinados**, por lo común en forma de *disco de rectificado*, en la que los granos abrasivos se distribuyen y orientan de manera aleatoria.

Como se muestra de manera esquemática en la figura 26.3, los granos abrasivos en un disco de rectificado se mantienen juntos mediante un **material aglutinante** (sección 26.2.2) que actúa como poste o tirante de soporte entre los granos. En los abrasivos aglutinados, la *porosidad* es fundamental para proporcionar holgura a las virutas que se generan y ayudar al enfriamiento; de otra manera, las virutas interferirían severamente en la operación de rectificado. La porosidad se puede observar mirando de cerca la superficie de cualquier disco de rectificado. Como se aprecia, es imposible utilizar un disco de rectificado sin porosidad, que sea denso y sólido por completo; simplemente no hay espacio para la formación de virutas.

Hoy en día se fabrica una amplia variedad de tipos y tamaños de piedras abrasivas. En la figura 26.4 se muestran algunos ejemplos de discos de rectificado, utilizados más comúnmente para abrasivos convencionales. En la figura 26.5 se presentan los discos superabrasivos. Debido a su alto costo, sólo un pequeño volumen de estos discos contiene superabrasivos.

Los abrasivos aglutinados están marcados con un sistema estandarizado de letras y números que indican tipo de abrasivo, tamaño de grano, grado, estructura y tipo de aglutinante. En la figura 26.6 se muestra el sistema de marca para abrasivos aglutinados con óxido de aluminio y carburo de silicio, y en la figura 26.7 el sistema de marca para abrasivos aglutinados con diamante y nitruro de boro cúbico.

El *costo* de las piedras de rectificado depende del tipo y tamaño del disco. Los discos pequeños (hasta de 25 mm [1 pulgada] de diámetro) cuestan entre \$2 y \$10 dólares para abrasivos convencionales, de \$30 a \$100 dólares para diamante y de \$50 a \$200 dólares para piedras de rectificado de nitruro de boro cúbico. En el caso de una piedra grande, de unos 500 mm de diámetro y 250 mm de anchura (20 pulgadas $\times$ 10 pulgadas), los

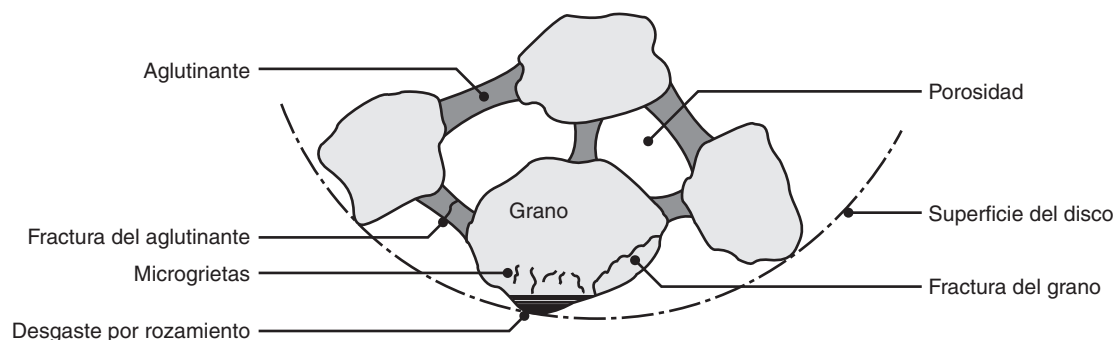


FIGURA 26.3 Esquema del modelo físico de una piedra o disco abrasivo rectificado que muestra su estructura y patrones de desgaste y fractura.

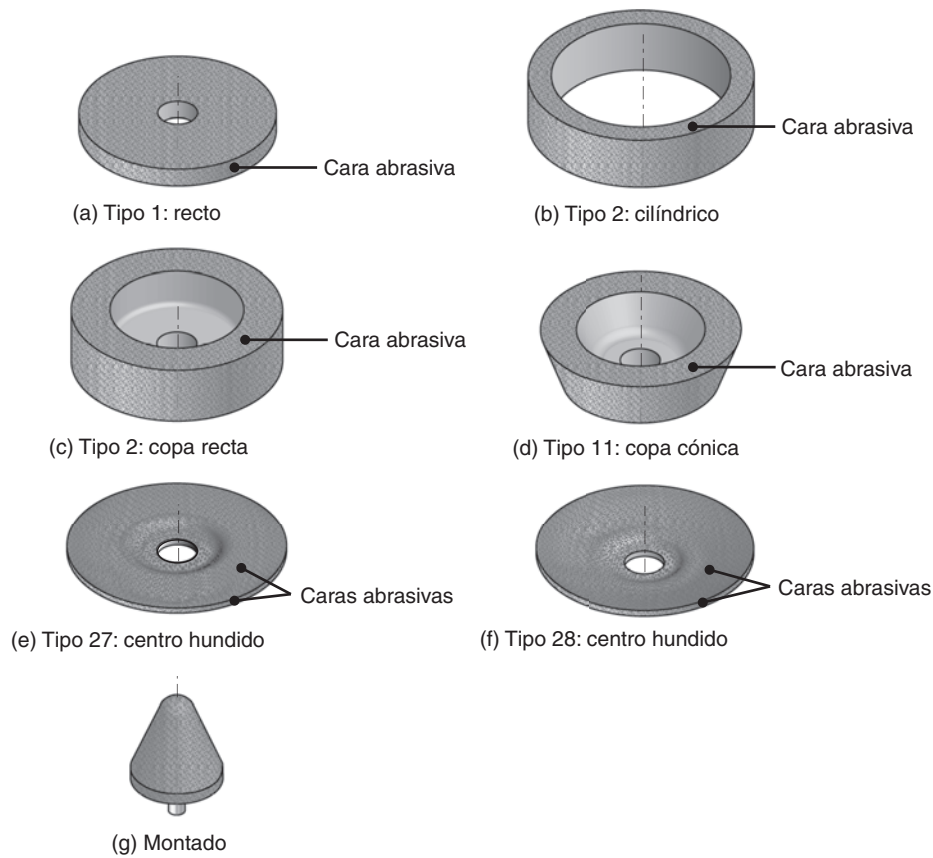


FIGURA 26.4 Tipos comunes de discos de rectificado fabricados con abrasivos convencionales. Obsérvese que cada disco tiene una superficie abrasiva específica; el rectificado en otras superficies es inadecuado e inseguro.

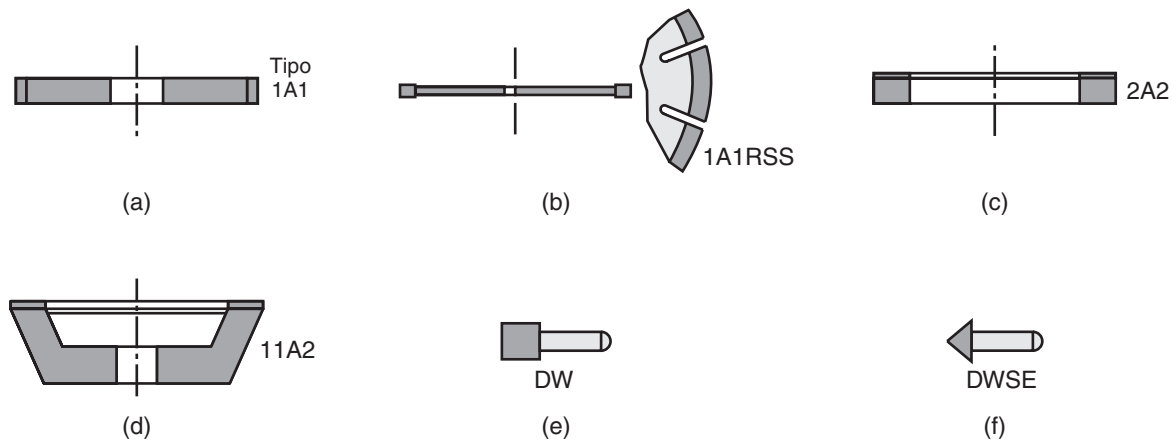


FIGURA 26.5 Ejemplos de configuraciones de discos superabrasivos. Las regiones anulares (rueda) son superficies de rectificado superabrasivas y, por lo general, el disco en sí (núcleo) se fabrica con metal o compósitos. Los materiales aglutinantes para los superabrasivos son: (a); (d), y (e) resinoide, metálico o vitrificado; (b) metálico; (c) vitrificado, y (f) resinoide.

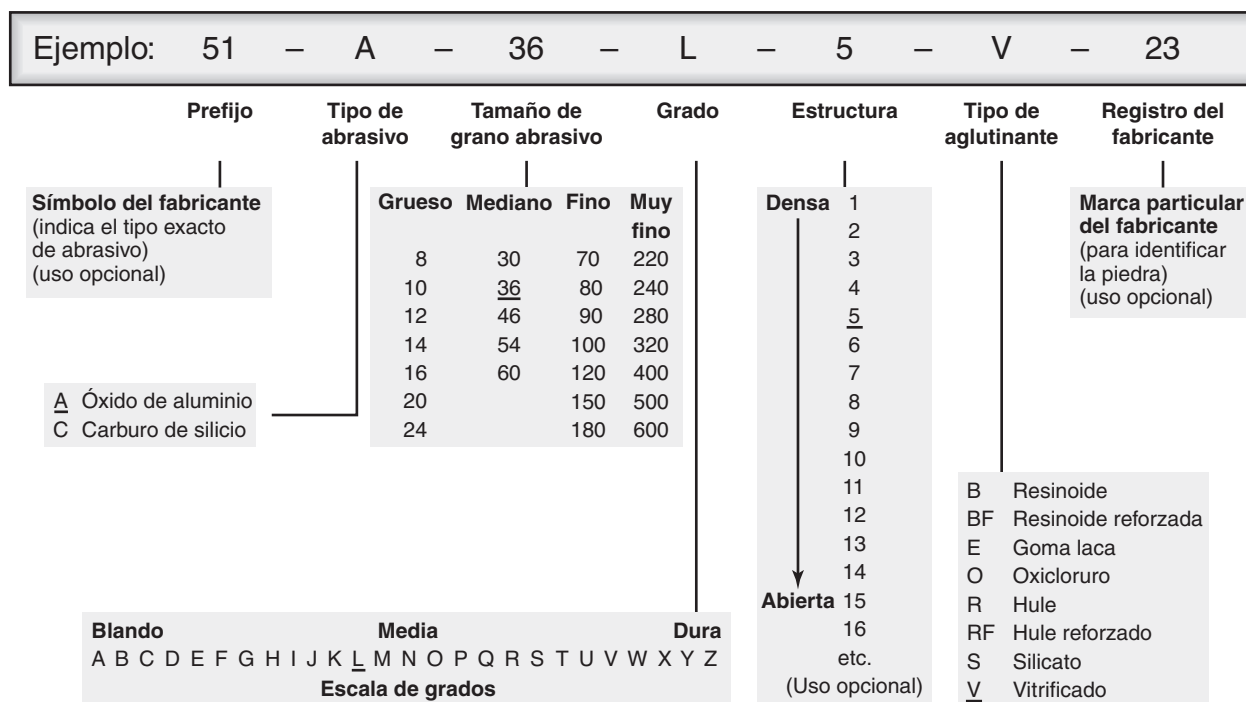


FIGURA 26.6 Sistema de marcado estándar para abrasivos aglutinados de óxido de aluminio y carburo de silicio.

costos de las piedras son de \$500 dólares para abrasivos convencionales, de \$5000 a \$8000 dólares para diamante y de casi \$20,000 dólares para nitruro de boro cúbico.

26.2.2 Tipos de aglutinantes

A continuación se describen los tipos comunes de aglutinantes utilizados en los abrasivos aglutinados.

Vitrificados. Es en esencia un vidrio, un *aglutinante vitrificado* (también conocido como *aglutinante cerámico*, sobre todo fuera de Estados Unidos); es el material de unión más común y utilizado. Sus materias primas son feldespato (un mineral cristalino) y arcillas. Se mezclan con los abrasivos, se humedecen y moldean a presión en forma de discos de rectificado. Estos discos “crudos”, similares a las partes fabricadas con metalurgia de polvos (capítulo 17), se someten a cocción lentamente hasta una temperatura de casi 1250 °C (2300 °F) a fin de fundir el vidrio y desarrollar resistencia estructural. Después, las piedras se enfrían poco a poco (para evitar agrietamiento térmico), se terminan al tamaño adecuado, se inspeccionan para efectos de calidad y precisión dimensional y se someten a pruebas de defectos.

Los discos con aglutinantes vitrificados son resistentes, rígidos, porosos y resistentes a aceites, ácidos y agua. Sin embargo, son quebradizos y carecen de resistencia a choques mecánicos y térmicos. Para mejorar su resistencia durante el uso, las piedras vitrificadas también se fabrican con placas o copas de refuerzo de acero para mejorar el soporte estructural del abrasivo aglutinado. El color del disco de rectificado puede modificarse agregando diversos elementos durante su manufactura; de esta manera, las piedras se pueden codificar por colores para usarlas con materiales específicos de piezas de trabajo, como ferrosos, no ferrosos, cerámicos y así sucesivamente.

Resinoides. Los materiales aglutinantes resinoides son las *resinas termofijas* y existe una amplia variedad de composiciones y propiedades (secciones 7.4 y 7.7). Debido a que

Ejemplo: M D 100 – P 100 – B 1/8								
	Prefijo	Tipo de abrasivo	Tamaño de grano	Grado	Concentración de diamante	Aglutinante	Modificación de aglutinante	Profundidad del diamante (pulgadas)
Símbolo del fabricante (para indicar tipo de diamante)		B Nitruro de boro cúbico <u>D</u> Diamante	20	A (blando) a Z (duro)	25 (baja) 50 75 <u>100</u> (alta)	<u>B</u> Resinoide M Metálico V Vitrificado		1/16
			24					<u>1/8</u>
			30					1/4
			36					La ausencia del símbolo de profundidad indica diamante sólido
			46					
			54					
			60					
			80					
			90					
			<u>100</u>					
			120					
			150					
			180					
			220					
			240					
			280					
			320					
			400					
			500					
			600					
			800					
			1000					
Letra, o número, o una combinación (utilizados aquí indican una variación del aglutinante estándar)								

FIGURA 26.7 Sistema de marcado estándar para abrasivos aglutinados de nitruro de boro cúbico y diamante.

el aglutinante es un compuesto orgánico, los discos con *aglutinantes resinoides* también se conocen como **discos orgánicos**. La técnica de manufactura para producirlos consiste básicamente en (a) mezclar el abrasivo con resinas y aditivos fenólicos líquidos o en polvo; (b) prensar la mezcla en forma de piedra de rectificado, y (c) curarla a temperaturas de unos 175 °C (350 °F).

Debido a que el módulo elástico de las resinas termofijas es inferior al de los vidrios, las piedras resinoides son más flexibles que las vitrificadas. Un desarrollo más reciente es el uso de *poliamida* (sección 7.7) como sustituto del fenólico en las piedras resinoides, ya que es más tenaz y resistente a altas temperaturas. Además de prensarlas, estas piedras de rectificado se manufacturan mediante el *moldeo por inyección* (ver secciones 17.3 y 19.3).

Discos o piedras reforzadas. Estos discos o piedras constan generalmente de una o más capas de *mallla de fibra de vidrio* de diversos tamaños. La fibra de vidrio en esta estructura laminada refuerza los discos resinoides retardando su desintegración en caso de que se rompan por alguna razón durante el uso, en lugar de mejorar su resistencia. A los discos resinoides de diámetro grande se les puede dar soporte adicional con uno o más anillos internos fabricados de barras redondas de acero que se insertan durante el moldeo del disco.

Termoplástico. Además de las resinas termofijas, los aglutinantes termoplásticos se utilizan en los discos de rectificado. Existen discos con abrasivos de sol-gel aglutinados con termoplásticos.

Hule. La matriz más flexible utilizada en los discos de rectificado es el hule. El proceso de manufactura consiste en (a) mezclar hule crudo, azufre y los granos abrasivos; (b) laminar la mezcla en hojas; (c) cortar círculos, y (d) calentarlos bajo presión para vulcanizar el hule. Los discos delgados se pueden fabricar de esta manera y se usan como sierras para operaciones de corte (*hojas de corte*).

Aglutinantes metálicos. Por medio de técnicas de metalurgia de polvos, los granos abrasivos (por lo general, diamante o nitruro de boro cúbico) se aglutinan en la periferia de un disco metálico a profundidades de 6 mm (0.25 pulgada) o menos, como se muestra en la figura 26.5. La unión al metal se efectúa bajo alta presión y temperatura. El disco en sí (el núcleo) se puede fabricar de aluminio, bronce, acero, cerámicos o materiales compósitos, dependiendo de si requiere resistencia, rigidez o estabilidad dimensional. Los discos superabrasivos se pueden *recubrir con capas*, de manera que una sola capa abrasiva se deposita o suelda con soldadura fuerte a un disco metálico con una forma particular deseada. Estos discos son de menor costo y se emplean para pequeñas cantidades de producción.

26.2.3 Grado y estructura de los discos

El *grado* de un abrasivo aglutinado es una medida de su resistencia de unión, por lo que incluye tanto el *tipo* como la *cantidad* de aglutinante en el disco. Puesto que la resistencia y dureza están directamente relacionadas (ver sección 2.6.2), el grado también se conoce como la *dureza* de un abrasivo aglutinado. Por lo tanto, un disco duro tiene una unión más resistente o una cantidad más grande de material aglutinante entre los granos que un disco blando. La *estructura* de un abrasivo aglutinado es una medida de su *porosidad* (es decir, el espaciado entre los granos; ver fig. 26.3). La estructura de los abrasivos aglutinados va de *densa* a *abierta*, como se muestra en la figura 26.6. Ya se indicó que cierta porosidad es fundamental para proporcionar holgura a las virutas de rectificado; de lo contrario, interferirían en la operación de rectificado.

26.3 | Proceso de rectificado

El *rectificado* es un proceso de remoción de virutas que utiliza un grano abrasivo individual como herramienta de corte (fig. 26.8a). Las diferencias principales entre la acción de un grano abrasivo y la de una herramienta de corte de un solo punto se pueden resumir de la siguiente manera:

- Los granos abrasivos individuales tienen *formas irregulares* y están espaciados de manera *aleatoria* en la periferia del disco (fig. 26.9).
- El ángulo de ataque promedio de los granos es altamente negativo, por lo común de -60° o incluso menos. En consecuencia, las virutas de rectificado se someten a una deformación plástica mucho mayor que la de otros procesos de maquinado. (Ver sección 21.2).
- Las posiciones radiales de los granos sobre la superficie periférica de un disco varían, por lo que no todos los granos están activos durante el rectificado.
- Las velocidades superficiales (es decir, velocidades de corte) en el rectificado son muy altas, por lo general de 20 a 30 m/s (4000 a 6000 pies/min) y pueden ser hasta de 150 m/s (30,000 pies/min) en el rectificado de alta velocidad, usando discos diseñados y manufacturados especialmente.

El proceso de rectificado y sus parámetros se pueden observar mejor en la operación de *rectificado de superficies planas*, que se muestra de manera esquemática en la figura 26.10. Un disco de rectificado recto (fig. 26.4a) con un diámetro D retira una capa de metal a una profundidad d (**profundidad de corte del disco**). Un grano individual en la periferia del disco se mueve a una velocidad tangencial (V), en tanto que la pieza de trabajo se mueve a una velocidad (v). Cada grano abrasivo remueve una pequeña viruta

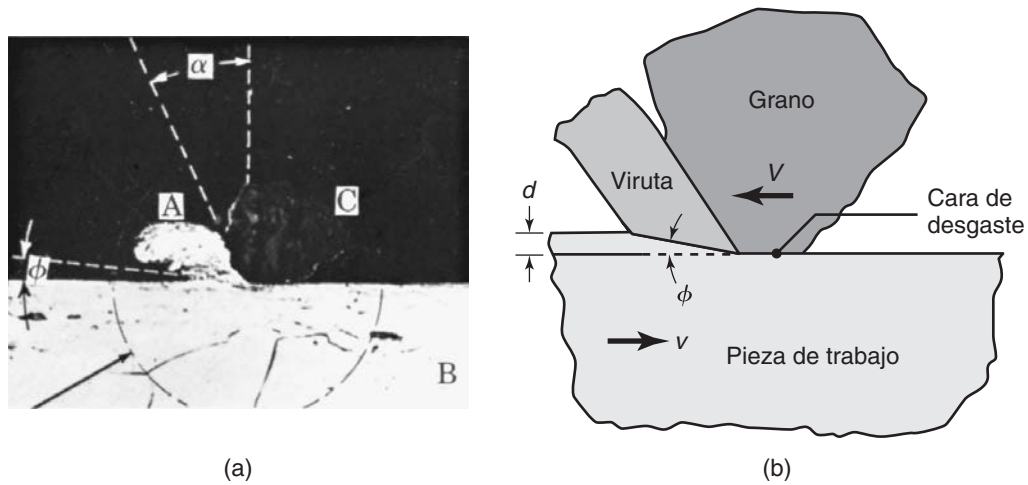


FIGURA 26.8 (a) Viruta de rectificado que se produce mediante un solo grano abrasivo: (A) viruta, (B) pieza de trabajo, (C) grano abrasivo. Obsérvese el ángulo de ataque negativo del grano. El círculo inscrito tiene 0.065 mm (0.0025 pulgada) de diámetro. (b) Esquema de la formación de virutas mediante un grano abrasivo con cara de desgaste. Nótese el ángulo de ataque negativo del grano y el pequeño ángulo de cizallamiento. Fuente: (a) M. E. Merchant.

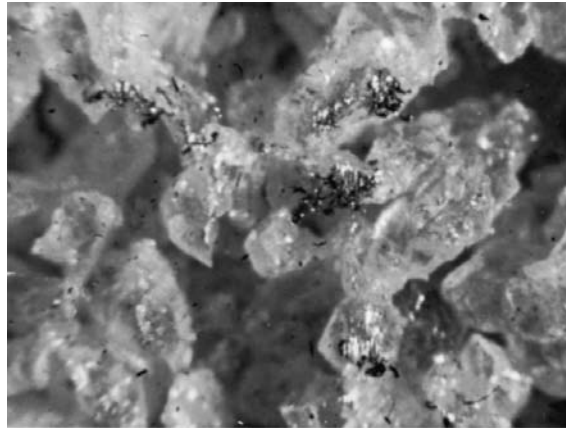


FIGURA 26.9 Superficie de un disco de rectificado (A46-J8V) que muestra los granos abrasivos, la porosidad del disco, caras de desgaste en los granos y virutas metálicas de la pieza de trabajo que se adhiere a los granos. Obsérvese la distribución aleatoria y forma de los granos abrasivos. Ampliación: 50 $\times$. Fuente: S. Kalpakjian.

que tiene un *espesor sin deformación* (profundidad de corte del grano), t , y una *longitud sin deformación*, l .

A partir de las relaciones geométricas, se puede demostrar que la longitud de la viruta sin deformación (l) en el rectificado de superficies planas (fig. 26.10) se obtiene mediante la expresión

$$l = \sqrt{Dd} \quad (26.1)$$

y el espesor de la viruta sin deformación (t) mediante la expresión

$$t = \sqrt{\left(\frac{4v}{VCr}\right)} \sqrt{\left(\frac{d}{D}\right)} \quad (26.2)$$

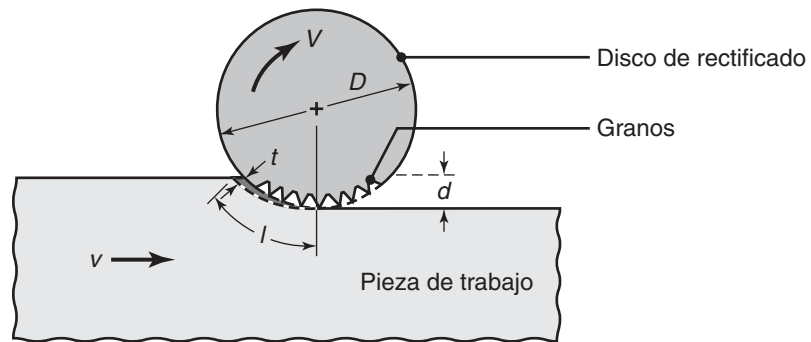


FIGURA 26.10 Esquema del proceso de rectificado de superficie plana, que muestra diversas variables del proceso. La figura ilustra el rectificado convencional.

donde C es la cantidad de puntos de corte por unidad de área de la periferia del disco; en general, se estima que es de 0.1 a 10 por mm^2 (10^2 a 10^3 por pulg^2). La cantidad r es la relación de la anchura de la viruta al espesor promedio de la viruta sin deformación y tiene un valor estimado que por lo común se encuentra entre 10 y 20.

Como ejemplo, l y t se pueden calcular para los siguientes parámetros del proceso. Digamos que $D = 200$ mm, $d = 0.05$ mm, $v = 30$ m/min y $V = 1800$ m/min. Utilizando las fórmulas anteriores,

$$l = \sqrt{(200)(0.05)} = 3.2 \text{ mm} = 0.13 \text{ pulgadas}$$

Suponiendo que $C = 2$ por mm^2 y que $r = 15$,

$$t = \sqrt{\frac{(4)(30)}{(1800)(2)(15)}} \sqrt{\frac{0.05}{200}} = 0.006 \text{ mm} = 0.00023 \text{ pulgadas}$$

Debido a la deformación plástica, la viruta real es más corta y gruesa que los valores calculados. (Ver fig. 26.8). Se puede ver que las virutas de rectificado son mucho más pequeñas que las comúnmente obtenidas en las operaciones de corte de metal, como se describe en el capítulo 21.

Fuerzas de rectificado. Es fundamental conocer las fuerzas de rectificado para:

- Calcular los requerimientos de potencia.
- Diseñar las máquinas rectificadoras y los soportes y dispositivos de sujeción de la pieza de trabajo.
- Determinar las deflexiones que pueden sufrir la pieza de trabajo y la máquina rectificadora. Obsérvese que las deflexiones, a su vez, afectan de manera adversa la precisión dimensional y son particularmente críticas en el rectificado de precisión y ultraprecisión.

Si se supone que la fuerza de corte en el grano es proporcional al área transversal de la viruta sin deformación, se puede demostrar que la **fuerza del grano** (tangencial al disco) es proporcional a las variables del proceso.

$$\text{Fuerza del grano} \propto \left(\frac{v}{V} \sqrt{\frac{d}{D}} \right) (\text{resistencia del material}) \quad (26.3)$$

Por lo general, las fuerzas en el rectificado son menores que las de las operaciones de maquinado que se describen en los capítulos 23 y 24, debido a las pequeñas dimensiones comprendidas. Las fuerzas de rectificado deben mantenerse bajas para evitar distorsión y mantener una alta precisión dimensional de la pieza de trabajo.

Energía específica. La *energía* disipada al generar una viruta de rectificado consiste en la energía requerida para las siguientes acciones:

- Formación de la viruta.
- Surcado, como se muestra por los pliegues formados en la figura 26.11.
- Fricción, causada por el rozamiento del grano a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo.

Obsérvese que después de cierto uso, los granos en la periferia del disco se desgastan y desarrollan una **cara de desgaste** (fig. 26.8b), fenómeno similar al *desgaste de flanco* en las herramientas de corte (fig. 21.15). La cara de desgaste roza continuamente a lo largo de la superficie rectificada, disipa energía (debido a la fricción) y hace que la operación de rectificado sea menos eficaz.

Los requisitos de **energía específica** para el rectificado se definen como la energía por unidad de volumen del material rectificado de la superficie de la pieza de trabajo y se muestran en la tabla 26.2. Nótese que estos niveles de energía específica son mucho mayores que los de las operaciones de maquinado proporcionadas en la tabla 21.2. Esta diferencia se ha atribuido a factores como la presencia de una cara de desgaste, altos ángulos de ataque negativos de los granos (que requieren más energía) y posible contribución del efecto del tamaño (cuanto más pequeña es la viruta, más alta será la energía requerida para producirla). También se ha observado que con lubricación efectiva, se pueden reducir las energías específicas en el rectificado por un factor de cuatro o más.

Como se muestra en el ejemplo 26.1, la *fuerza de rectificado* y la *fuerza de empuje* en el rectificado pueden calcularse con base en los datos de la energía específica.

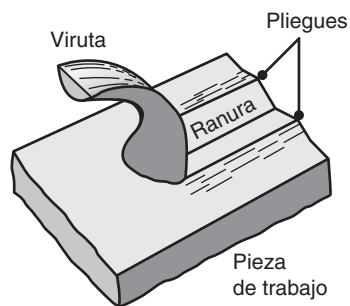


FIGURA 26.11 Formación de virutas y surcado de la superficie de la pieza de trabajo mediante un grano abrasivo.

TABLA 26.2

Requerimientos aproximados de energía específica para rectificado de superficies

Material de la pieza de trabajo	Dureza	Energía específica	
		$W \cdot s/mm^3$	hp $\cdot$ min/pulg ³
Aluminio	150 HB	7–27	2.5–10
Hierro fundido (clase 40)	215 HB	12–60	4.5–22
Acero al bajo carbono (1020)	110 HB	14–68	5–25
Aleación de titanio	300 HB	16–55	6–20
Acero para herramientas (T15)	67 HRC	18–82	6.5–30

EJEMPLO 26.1 Fuerzas en el rectificado de superficies planas

Se realiza una operación de rectificado de superficies planas en acero al bajo carbono con un disco de diámetro $D = 10$ pulgadas que está girando a $N = 4000$ rpm y una anchura de corte de $w = 1$ pulgada. La profundidad de corte es $d = 0.002$ pulgada y la velocidad de avance de la pieza de trabajo (v) es 60 pulgadas/min. Calcule la fuerza de corte (fuerza tangencial al disco), F_c , y la fuerza de empuje (normal a la superficie de la pieza de trabajo), F_n .

Solución Primero se determina la velocidad de remoción de material (MRR) de la siguiente manera:

$$\text{MRR} = d w v = (0.002)(1)(60) = 0.12 \text{ pulg}^3/\text{min}$$

La potencia consumida se obtiene mediante:

$$\text{Potencia} = (u)(\text{MRR})$$

donde u es la energía específica, obtenida de la tabla 26.2. (Ver también la sección 21.3). Para acero al bajo carbono, se calcula que es $1.5 \text{ hp} \cdot \text{min}/\text{pulg}^3$. Por lo que:

$$\text{Potencia} = (15)(0.12) = 1.8 \text{ hp}$$

Considerando que $1 \text{ hp} = 33,000 \text{ pies} \cdot \text{libras}/\text{min} = 396,000 \text{ pulgadas} \cdot \text{libras}/\text{min}$,

$$\text{Potencia} = (1.8)(396,000) = 712,800 \text{ pulgadas} \cdot \text{libras}/\text{min}$$

Puesto que la potencia se define como

$$\text{Potencia} = T \omega$$

donde T es el torque y es igual a $T = F_c D/2$ y ω es la velocidad rotacional del disco en radianes por minuto ($\omega = 2\pi N$). Se deduce que

$$712,800 = (F_c) \left(\frac{10}{2} \right) (2\pi) (4000)$$

y, por lo tanto, $F_c = 5.7$ libras.

La fuerza de empuje (F_n) puede calcularse directamente; sin embargo, también es posible hacerlo observando, con base en datos experimentales de la bibliografía técnica, que es aproximadamente 30% más alta que la fuerza de corte (F_c). Por consiguiente,

$$F_n = (1.3)(5.7) = 7.4 \text{ libras}$$

Temperatura. El aumento de temperatura en el rectificado es un factor que debe considerarse, por lo siguiente:

- Puede afectar de manera adversa las propiedades superficiales, incluyendo cambios metalúrgicos.
- El aumento de temperatura puede provocar esfuerzos residuales en la pieza de trabajo.
- Los gradientes de temperatura en la pieza de trabajo provocan distorsiones debido a la dilatación y contracción térmica de su superficie, lo que dificulta el control de la precisión dimensional.

Se ha descubierto que el *aumento de temperatura superficial* en el rectificado se relaciona con las variables del proceso mediante la siguiente expresión:

$$\text{Aumento de temperatura} \propto D^{1/4} d^{3/4} \left(\frac{V}{v} \right)^{1/2} \quad (26.4)$$

Por lo tanto, la temperatura se eleva al aumentar la profundidad de corte (d), el diámetro del disco (D) y la velocidad del disco (V), y disminuye al incrementarse la velocidad de la pieza de trabajo (v). En esta ecuación se observa que la profundidad de corte tiene el exponente más grande, por lo que posee la mayor influencia sobre la temperatura.

Las *temperaturas pico* durante el rectificado pueden alcanzar 1600 °C (3000 °F). Sin embargo, el tiempo que tarda en generar una viruta es extremadamente corto (microsegundos), así que la viruta puede fundirse o no. Debido a que las virutas transfieren gran parte del calor producido (como lo hacen las formadas en los procesos de maquinado de alta velocidad, sección 25.5), sólo se transfiere a la pieza de trabajo una fracción del calor producido en el rectificado. Si éste no fuera el caso, sería muy difícil rectificar piezas con suficiente precisión dimensional.

Chispas. Las chispas generadas al rectificar metales son en realidad virutas que se encienden, debido a la reacción *exotérmica* (producción de calor) de las virutas calientes con el oxígeno de la atmósfera. Las chispas no aparecen si el rectificado se realiza en un ambiente sin oxígeno. El color, la intensidad y la forma de las chispas dependen de la composición del metal que se rectifica. Existen gráficos que ayudan a identificar el tipo de metal que se rectifica por la apariencia de sus chispas. Si el calor generado por la reacción exotérmica es suficientemente alto, las virutas pueden fundirse, adquirir una forma esférica (debido a la tensión superficial) y solidificarse como partículas metálicas.

Revenido. El aumento excesivo de temperatura en el rectificado puede provocar el *revenido* y *ablandamiento* de la superficie de la pieza de trabajo. Deben seleccionarse con cuidado las variables del proceso a fin de evitar una elevación excesiva de la temperatura. El uso de fluidos para rectificación es un medio efectivo para controlar la temperatura.

Quemado. La temperatura excesiva durante el rectificado puede quemar la superficie que se rectifica. Si ésta es de acero, la *quemadura* se caracteriza por un color azulado, señal de que la alta temperatura produjo oxidación. Se puede detectar mediante técnicas de ataque y metalúrgicas. Quizá una quemadura no sea objetable en sí, a menos que las capas de la superficie sufran *transformaciones de fase* (capítulo 4). Por ejemplo, al formado de martensita en los aceros con mayor contenido de carbono, debido al enfriamiento rápido, se le conoce como *quemadura metalúrgica*. Esta condición afecta de manera adversa las propiedades superficiales de las partes rectificadas, reduciendo la ductilidad y tenacidad de la superficie.

Agrietamiento por calor. Las altas temperaturas del rectificado pueden provocar grietas en la superficie de trabajo; esta condición se conoce como *agrietamiento por calor*. En general, las grietas son perpendiculares a la dirección de rectificado. Sin embargo, en condiciones severas también pueden aparecer grietas paralelas. Como se esperaba, dicha superficie carece de tenacidad y tiene baja resistencia a la fatiga y corrosión. (Obsérvese que el agrietamiento por calor también ocurre en las matrices para fundición a presión, como se indica en la sección 11.3.5).

Esfuerzos residuales. Los gradientes de temperatura en el interior de la pieza de trabajo durante el rectificado son los principales responsables de los *esfuerzos residuales*. Los fluidos de rectificado, su método de aplicación, además de los parámetros del proceso, como la profundidad de corte y las velocidades, afectan de manera significativa la magnitud y el tipo de esfuerzos residuales desarrollados (a tensión o compresión). Debido al efecto adverso que los esfuerzos residuales de tensión tienen sobre la resistencia a la

fatiga, deben seleccionarse con cuidado las variables del proceso. Por lo general, los esfuerzos residuales se pueden reducir disminuyendo la velocidad del disco o piedra y aumentando la velocidad de la pieza de trabajo (**rectificado de bajo esfuerzo** o *rectificado sutil*). También pueden utilizarse discos de grado más blando (conocidos como **discos de corte libre**).

26.3.1 Desgaste de los discos de rectificado

El desgaste de los discos de rectificado es un factor que debe considerarse, porque afecta de manera adversa la forma y precisión dimensional de las superficies rectificadas, similar al desgaste en las herramientas de corte. El desgaste de dichos discos es provocado por tres mecanismos: desgaste por rozamiento del grano (atrición), fractura del grano y fractura del aglutinante.

Desgaste por rozamiento del grano (atrición). En el *desgaste por rozamiento del grano*, las aristas de corte de un grano originalmente puntiagudo se desafilan y desarrollan una *cara de desgaste* (fig. 26.8b), que es similar al desgaste del flanco en las herramientas de corte. El desgaste es provocado por la interacción del grano con el material de la pieza de trabajo, que incluye reacciones físicas y químicas. Estas reacciones son complejas y comprenden difusión, degradación química o descomposición del grano, fractura a escala microscópica, deformación plástica y fusión.

El desgaste por atrición es bajo cuando los dos materiales (grano y pieza de trabajo) son *químicamente inertes* de manera recíproca, muy similar a lo que se observa en las herramientas de corte. Cuanto más inertes sean los materiales, más baja será la tendencia a que ocurran reacción y adhesión entre el grano y la pieza de trabajo. Por ejemplo, dado que el óxido de aluminio es inerte respecto del hierro, su valor de desgaste por atrición cuando se utiliza para rectificar aceros es mucho menor que el del carburo de silicio y el del diamante. Por otro lado, el carburo de silicio puede disolverse en hierro, así que no resulta conveniente para rectificar aceros. El nitruro de boro cúbico es más inerte respecto de los aceros, de ahí que sea adecuado para su uso como abrasivo.

Por lo tanto, la selección del tipo de abrasivo para el desgaste por atrición se basa en la *reactividad* del grano con la pieza de trabajo y en sus propiedades mecánicas relativas, como dureza y tenacidad. El ambiente y tipo de fluido de rectificado que se utiliza también afectan las interacciones del grano y la pieza de trabajo.

Fractura del grano. Los granos abrasivos son quebradizos, y estas características de fractura son importantes en el rectificado. Si es excesiva la cara de desgaste por rozamiento de grano (atrición), éste se desafila, en tanto que el rectificado se vuelve ineficaz y produce temperaturas inconvenientemente altas.

Lo ideal es que el grano se fracture o fragmente a una velocidad moderada, de manera que las nuevas aristas afiladas de corte se produzcan continuamente durante el rectificado. Esto equivale a romper un pedazo desafilado de gis o una piedra en dos o más piezas para exponer nuevos bordes filosos. En la sección 26.2 se describió la *friabilidad* de los abrasivos (la medida en que se afilan por sí mismos) como un factor importante en el rectificado efectivo.

La selección del tipo y tamaño de grano para una aplicación en particular también depende de la velocidad de desgaste por rozamiento del grano (atrición). Una combinación de materiales del grano y de la pieza de trabajo con alto desgaste por atrición y baja friabilidad del grano desafila los granos y desarrolla caras de desgaste grandes. Así, el rectificado se vuelve ineficaz y es probable que se dañe la superficie (como si se hubiera quemado).

Fractura del aglutinante. La resistencia del aglutinante (grado) es un parámetro significativo en el rectificado. Si el aglutinante es demasiado fuerte, los granos desafilados no se pueden desalojar. Esto evita que otros granos afilados a lo largo de la circunfe-

rencia del disco de rectificado establezcan contacto con la pieza de trabajo para retirar virutas, por lo que el proceso de rectificado se vuelve ineficaz. Por otro lado, si el aglutinante es demasiado débil, los granos se sueltan fácilmente y aumenta la velocidad de desgaste del disco. En este caso, se vuelve difícil mantener la precisión dimensional.

En general, se recomiendan los aglutinantes más blandos para los materiales más duros y para reducir los esfuerzos residuales y el daño térmico a la pieza de trabajo. Los discos de grado duro se utilizan en materiales más blandos y para retirar grandes cantidades de material a altas velocidades.

26.3.2 Relación del rectificado

Por lo general, el desgaste de los discos de rectificado se relaciona con la cantidad de material retirado de la pieza de trabajo mediante un parámetro conocido como *relación de rectificado* (G), que se define como:

$$G = \frac{\text{Volumen del material retirado}}{\text{Volumen de desgaste del disco}} \quad (26.5)$$

En la práctica, las relaciones de rectificado varían ampliamente: van desde 2 hasta 200, e incluso más altas, dependiendo del tipo de disco, el material de la pieza de trabajo, el fluido de rectificado y los parámetros del proceso (como la profundidad de corte y las velocidades del disco y de la pieza). Se ha demostrado que los fluidos efectivos de rectificado pueden aumentar la velocidad de rectificado en un factor de diez o más, mejorando en gran medida la vida del disco.

Durante el rectificado, un disco en particular puede **actuar blando** (el desgaste del disco es alto) o **actuar duro** (el desgaste es bajo), sin considerar el grado del disco. Por ejemplo, obsérvese cómo un lápiz ordinario *actúa* blando al escribir sobre papel rugoso y actúa duro al hacerlo sobre papel liso, aunque sea el mismo lápiz. La actuación dura o blanda es una función de la fuerza sobre el grano individual en la periferia del disco. A mayor fuerza, mayor tendencia de los granos a fracturarse o soltarse de la superficie del disco y menor relación de rectificado. En la ecuación 26.3, nótese que la fuerza del grano aumenta con la resistencia del material de la pieza de trabajo, la velocidad de trabajo y la profundidad del corte, y disminuye con el incremento de la velocidad y el diámetro del disco. Por lo tanto, un disco de rectificado actúa blando cuando v y d aumentan, o cuando V y D disminuyen.

En la práctica, no siempre es deseable tratar de obtener una alta relación de rectificado (como para ampliar la vida del disco), ya que las relaciones elevadas pueden indicar granos desafilados y, por lo tanto, posible daño a la superficie de la pieza de trabajo. Una relación inferior puede ser aceptable cuando un análisis técnico y económico general lo justifican.

EJEMPLO 26.2 Acción de un disco de rectificado

Se realiza una operación de rectificado de una superficie, con el disco funcionando a una velocidad constante del husillo. ¿El disco actúa blando o duro conforme se desgasta durante cierto periodo? Supóngase que la profundidad de corte (d) permanece constante y el disco se afila periódicamente (ver sección 26.3.3).

Solución De acuerdo con la ecuación 26.3, los parámetros que cambian con el tiempo en esta operación son el diámetro del disco (D) y la velocidad de su superficie (V). Conforme D se vuelve más pequeña, la fuerza relativa del grano aumenta y el disco actúa más blando. Para dar cabida a los cambios producidos por la reducción del diámetro del disco a lo largo del tiempo, o para considerar el uso de discos de diferentes diámetros, algunas máquinas de rectificado están equipadas con motores de husillos de velocidad variable.

26.3.3 Afilado, ajuste y formado de piedra abrasivas

El *afilado* es el proceso de:

- *Acondicionar* los granos desgastados en la superficie de un disco de rectificado produciendo *nuevos bordes afilados* en ellos, de manera que corten con mayor eficacia.
- *Ajuste*, que es producir un círculo real en un disco que dejó de ser redondo.

El afilado es necesario cuando el desgaste por rozamiento del grano (atrición) desafilado el disco (conocido como **satinado** por la apariencia brillante de la superficie del disco) o cuando éste se tapa. Para discos más blandos, el afilado y ajuste se efectúan por separado; en cambio, para discos más duros (como el cBN), ambos se efectúan en una sola operación.

El **tapado** de un disco de rectificado ocurre cuando las porosidades en las superficies del disco (fig. 26.9) se llenan o atascan con virutas de la pieza de trabajo. Puede suceder en materiales blandos de rectificado o por la selección inapropiada de los discos o de los parámetros del proceso. Un disco tapado corta de manera deficiente y genera mucho calor por fricción, lo que daña la superficie y ocasiona pérdida de precisión dimensional en la pieza.

Las técnicas empleadas para afilar los discos de rectificado son:

- Se hace pasar una *herramienta con punta de diamante o conjunto de diamante* con una forma especial a lo ancho de la cara de rectificado de un disco rotatorio, que con cada pase retira una pequeña capa de la superficie del disco. Este método se puede aplicar en seco o en húmedo, dependiendo de si el disco va a utilizarse en seco o en húmedo, respectivamente. Sin embargo, en la práctica, el desgaste del diamante puede ser significativo con discos más duros, en cuyo caso se puede emplear un disco o copa de diamante.
- Se prensa manualmente un conjunto de *discos de acero con forma de estrella* contra el disco. El material se retira de la superficie del disco triturando los granos. Como resultado, se produce una superficie áspera en el disco y se utiliza sólo para operaciones de rectificado de desbaste en rectificadoras de banco o pedestal.
- Se pueden utilizar *barras abrasivas* para afilar los discos de rectificado, en particular los más blandos. Sin embargo, esta técnica no es apropiada para operaciones de rectificado de precisión.
- Las técnicas de afilado de discos de diamante con aglutinante metálico comprenden el uso de técnicas de *maquinado por descarga eléctrica y electroquímico*, como se indica en el capítulo 27. Estos procesos erosionan capas muy delgadas de aglutinante metálico y, por lo tanto, exponen nuevas aristas de corte de diamante.
- El afilado de rectificado de formas comprende *afilado y formado por compresión*. El proceso consiste en oprimir un rodillo metálico sobre la superficie del disco de rectificado, que por lo general es un disco vitrificado. El rodillo (que suele fabricarse con acero de alta velocidad, carburo de tungsteno o carburo de boro) tiene un perfil (forma) maquinado o rectificado en su periferia. Por lo tanto, reproduce una réplica de este perfil en la superficie del disco de rectificado que se está afilando. (Ver sección 26.4).

Las técnicas de afilado y su frecuencia son importantes en materia de calidad, porque afectan las fuerzas de rectificado y el acabado superficial de la pieza de trabajo. Las rectificadoras modernas controladas por computadora están equipadas con características de afilado automático, que afilan el disco de manera continua conforme avanza el rectificado. El primer contacto de la herramienta de afilado en el disco de rectificado es muy importante, ya que determina la naturaleza de la nueva superficie producida. Por lo general, esta acción se supervisa de manera precisa mediante detectores piezoeléctricos o de emisiones acústicas (sección 38.8). También se utilizan mecanismos como detectores de vibración, indicadores de potencia y medidores de deformación en la configuración de afilado de las máquinas rectificadoras de alta precisión.

Para un disco común de óxido de aluminio, la profundidad retirada durante el afilado es de 5 a 15 μm (200 a 600 μpulg), pero para un disco de cBN, sería de 2 a 10 μm (80 a 400 μpulg). Por consiguiente, los sistemas modernos de afilado tienen una resolución tan baja como 0.25 a 1 μm (10 a 40 μpulg).

A los discos de rectificado se les puede dar la **forma** que van a rectificar en la pieza de trabajo (sección 26.4). La cara abrasiva en el disco recto tipo 1 mostrado en la figura 26.4a es cilíndrica; por lo tanto, produce una superficie plana. Sin embargo, a esta superficie se le pueden dar diversas formas afilándola (fig. 26.12a). Aunque se han utilizado plantillas para este propósito, las rectificadoras grandes están equipadas comúnmente con características de moldeado controlado por computadora. A menos que ya tenga la forma deseada, la herramienta de afilado de diamante recorre la superficie del disco de modo automático a lo largo de cierta trayectoria prescrita (fig. 26.12b) y produce superficies muy precisas. En la figura 26.12b se observa que el eje de la herramienta de afilado de diamante permanece normal a la superficie del disco de rectificado en el punto de contacto.

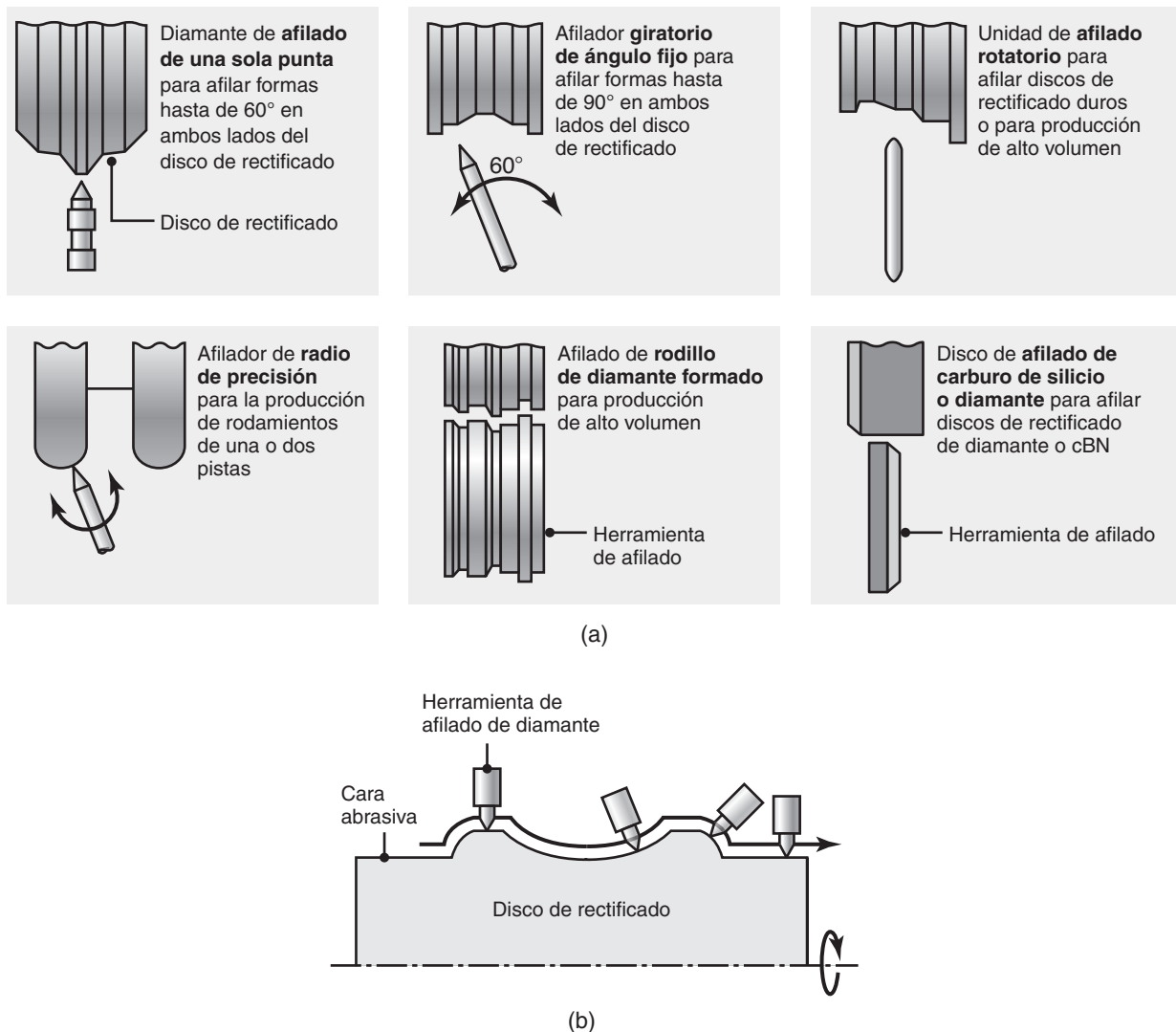


FIGURA 26.12 (a) Formas de afilado de discos de rectificado. (b) Producción de forma de la superficie de rectificado de un disco afilándolo mediante control por computadora. Obsérvese que la herramienta de afilado de diamante es normal a la superficie en el punto de contacto con el disco. *Fuente:* Cortesía de Okuma Machinery Works Ltd.

TABLA 26.3

Intervalos característicos de velocidades y avances para procesos abrasivos				
Variable del proceso	Rectificado, convencional	Rectificado, avance lento	Pulido	Abrillantado
Velocidad de disco (m/min)	1500–3000	1500–3000	1500–2400	1800–3500
Velocidad de trabajo (m/min)	10–60	0.1–1	—	—
Avance (mm/pase)	0.01–0.05	1–6	—	—

26.3.4 Rectificabilidad de los materiales y selección de discos

La *rectificabilidad* de los materiales es (como la *maquinabilidad* descrita en la sección 21.7) difícil de definir con precisión. La rectificabilidad es un indicador general de lo fácil que es rectificar un material e incluye consideraciones como calidad de la superficie producida, acabado e integridad de la superficie, desgaste del disco, tiempo del ciclo y economía general de la operación. Como en la maquinabilidad, la rectificabilidad de un material puede mejorarse en gran medida mediante la selección adecuada de los parámetros del proceso (tabla 26.3), los discos de rectificado y los fluidos de rectificado, así como por medio de las características de la máquina, los métodos de fijación y los dispositivos de sujeción de la pieza de trabajo.

En la actualidad, las prácticas de rectificado están bien establecidas para una amplia variedad de materiales metálicos y no metálicos, incluyendo materiales aeroespaciales recién desarrollados, como los compósitos. Se pueden encontrar recomendaciones específicas para seleccionar discos y parámetros de proceso apropiados en diversos manuales, instructivos de fabricantes y referencias en la bibliografía de este capítulo.

La selección de discos comprende no sólo las formas del disco y de la parte a producir, sino también las características del material de la pieza de trabajo. Con base en lo tratado hasta ahora, se puede ver que las propiedades físicas y mecánicas de dicho material son importantes en la selección de un tipo de abrasivo y un aglutinante.

Rectificado en régimen dúctil. Los cerámicos pueden rectificarse con relativa facilidad por medio de discos de diamante y utilizando con cuidado los parámetros seleccionados del proceso. Por ejemplo, se ha demostrado que con pases leves y máquinas con alta rigidez y capacidad de amortiguamiento es posible producir virutas continuas y buena integridad superficial al rectificar materiales frágiles (fig. 26.11) en un proceso conocido como *rectificado en régimen dúctil*. Sin embargo, dado que las virutas de cerámico son comúnmente de 1 a 10 μm (40 a 400 μpulg) de tamaño, son más difíciles de retirar de los fluidos de rectificado que las virutas metálicas y requieren filtros finos y técnicas especiales.

26.4 Operaciones de rectificado y rectificadoras

La selección del proceso de rectificado y de la rectificadora para una aplicación en particular depende de la forma y las peculiaridades de la pieza de trabajo, tamaño, facilidad de sujeción y capacidad de producción requeridos (tabla 26.4). Las rectificadoras modernas se controlan por computadora y tienen características como carga y descarga automática de la pieza, sujeción de la parte, afilado y formado del disco. Las rectificadoras también se pueden equipar con sondas y calibradores, a fin de determinar la posición relativa del disco y las superficies de la pieza de trabajo (ver también fig. 25.6), así como con características de detección al tacto, mediante las cuales se puede detectar de inmediato (por ejemplo) la ruptura de una herramienta de afilado de diamante durante el ciclo de afilado. En esta sección se describen los tipos básicos de operaciones de rectificado.

El movimiento relativo del disco puede ser a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo (rectificado *transversal*, rectificado *de paso completo*, *avance transversal*) o se puede mover radialmente hacia la pieza (rectificado *por penetración*). Las rectificadoras de superfi-

TABLA 26.4

Características generales de los procesos y máquinas para el maquinado abrasivo		
Proceso	Características	Dimensiones máximas características, longitud y diámetro (m)*
De superficies planas	Superficies planas en la mayoría de los materiales; la capacidad de producción depende del tamaño de la mesa y el nivel de automatización; la calificación de la mano de obra depende de la complejidad de la parte; la capacidad de producción es alta en máquinas de mesa rotatoria de husillo vertical.	Mesa alternativa $L:6$ Mesa rotatoria $D: 3$
Cilíndrico	Piezas de trabajo redondas con diámetros escalonados; baja capacidad de producción, a menos que se automatice; calificación media a baja de la mano de obra.	Pieza de trabajo $D: 0.8$, rectificadoras de rodillos $D: 1.8$, rectificadoras universales $D: 2.5$
Sin centros	Piezas de trabajo redondas y esbeltas; alta capacidad de producción; calificación media a baja de la mano de obra.	Pieza de trabajo $D: 0.8$
Interiores	Orificios en la pieza de trabajo; baja capacidad de producción; calificación media a baja de la mano de obra.	Orificio $D: 2$
Honeado	Orificios en la pieza de trabajo; baja capacidad de producción; calificación baja de la mano de obra.	Husillo $D: 1.2$
Lapeado	Plano, cilíndrico o curvado; alta capacidad de producción, calificación baja de la mano de obra.	Mesa $D: 3.7$
Maquinado ultrasónico	Orificios y cavidades con diversas formas; adecuado para materiales duros y frágiles; calificación media de la mano de obra.	—

*Existen capacidades grandes para aplicaciones especiales.

cies comprenden el porcentaje más grande de rectificadoras utilizadas en la industria, seguidas de las de banco (generalmente con dos discos en cada extremo del husillo), las cilíndricas y las de herramientas y cortadores; las menos comunes son las rectificadoras de interiores.

Rectificado de superficies planas. El *rectificado plano* es una de las operaciones más comunes (fig. 26.13), y por lo regular comprende el rectificado de superficies planas. Es común asegurar la pieza de trabajo en un *plato magnético* sujeto a la mesa de trabajo de la *rectificadora* (fig. 26.14); los materiales no magnéticos se sujetan con prensas de banco, platos de vacío o algún otro soporte. Se monta un disco recto en el husillo horizontal de la rectificadora de superficies. El rectificado transversal ocurre conforme la mesa se mueve alternativamente en la dirección longitudinal y se hace avanzar en forma lateral (en la dirección del eje del husillo) después de cada carrera. En el *rectificado de penetración*, el disco se mueve de modo radial *hacia* la pieza de trabajo, como sucede cuando se rectifica una ranura (fig. 26.13b).

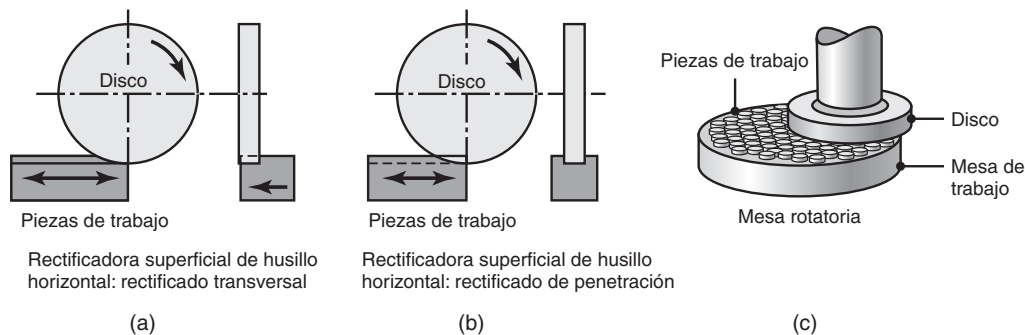


FIGURA 26.13 Esquemas de diversas operaciones de rectificado superficial. (a) Rectificado transversal con una rectificadora superficial de husillo horizontal. (b) Rectificado de penetración con una rectificadora superficial de husillo horizontal, produciendo una ranura en la pieza de trabajo. (c) Rectificadora de mesa giratoria de husillo vertical (también conocida como tipo *Blanchard*).

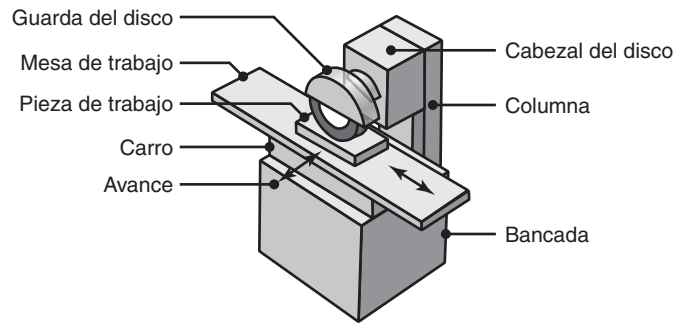


FIGURA 26.14 Esquema de una rectificadora de superficies planas de husillo horizontal.

Además de la rectificadora de superficies planas mostrada en la figura 26.14, otros tipos incluyen *husillos verticales* y *mesas rotatorias* (conocidas como tipo *Blanchard*, fig. 26.13c). Estas configuraciones permiten rectificar numerosas piezas en una sola operación. Por ejemplo, las bolas de acero para rodamientos de bolas se rectifican en configuraciones especiales y a grandes capacidades de producción (fig. 26.15).

Rectificado cilíndrico. En el *rectificado cilíndrico* (conocido asimismo como *rectificado con centros*, fig. 26.16; ver también fig. 26.2), se rectifican las superficies y los hombros cilíndricos externos de la pieza de trabajo, además de los apoyos de los cigüeñales, husillos, pernos y pistas de rodamientos. La pieza de trabajo cilíndrica rotatoria se mueve alternativamente de manera lateral a lo largo de su eje para cubrir la anchura a rectificar. En las *rectificadoras de rodillo* utilizadas para piezas de trabajo grandes y largas, como los molinos de laminación (ver fig. 13.1), el disco de rectificado se mueve en forma alternativa. Estas máquinas tienen la capacidad de rectificar rodillos hasta de 1.8 m (72 pulgadas) de diámetro.

En el rectificado cilíndrico, la pieza de trabajo se sujeta entre centros o en un plato, o se monta en un plato frontal en el cabezal de la rectificadora. Para superficies cilíndricas,

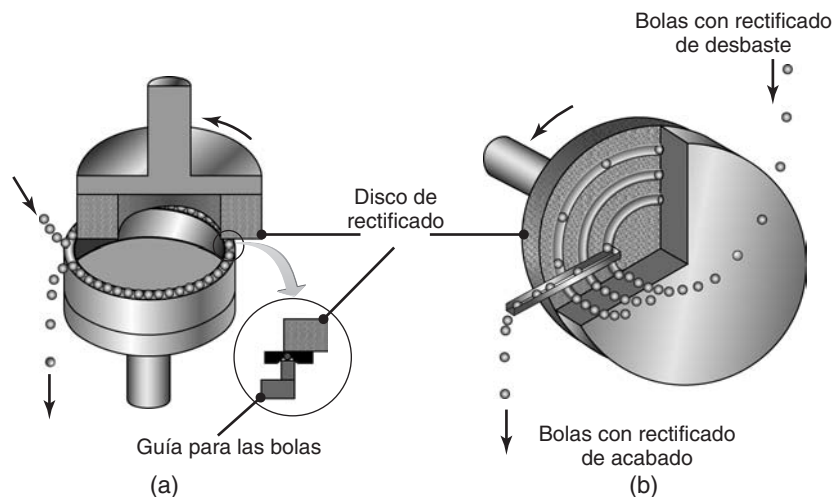


FIGURA 26.15 (a) Rectificado de desbaste de bolas de acero en una rectificadora de husillo vertical. Las bolas se guían mediante un soporte rotatorio especial. (b) Rectificado de acabado de bolas en un soporte de canales múltiples. Las bolas se rectifican hasta 0.013 mm (0.0005 pulgada) de su tamaño final.

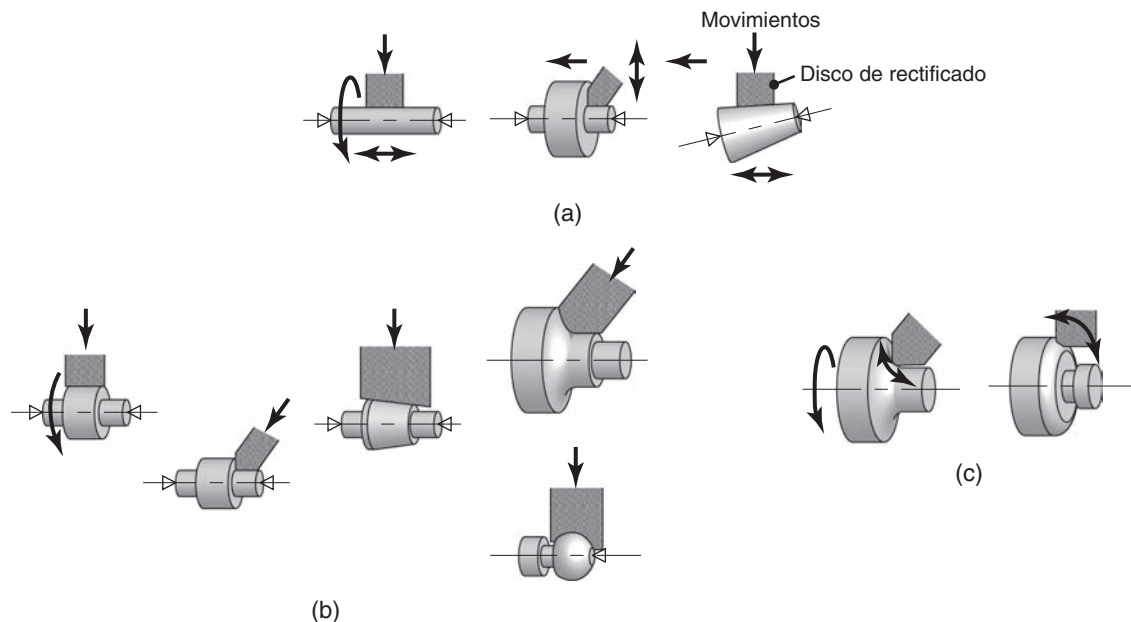


FIGURA 26.16 Ejemplos de diversas operaciones de rectificado cilíndrico: (a) rectificado transversal; (b) rectificado por penetración, y (c) rectificado de perfiles. Fuente: Cortesía de Okuma Machinery Works Ltd.

dricas rectas, los ejes de rotación del disco y la pieza de trabajo son paralelos. El disco y la pieza se accionan cada uno mediante motores separados y a diferentes velocidades. Las piezas de trabajo largas, con dos o más diámetros, también se pueden rectificar en rectificadoras cilíndricas. El rectificado cilíndrico puede producir asimismo formas (*rectificado de formas* y *rectificado por penetración*) en donde el disco se afila dándole la forma de la pieza a rectificar (fig. 26.17).

Las rectificadoras cilíndricas se identifican por el diámetro y la longitud máximos de la pieza de trabajo que pueden rectificar, en forma similar a los tornos mecánicos. En las *rectificadoras universales*, tanto el eje de la pieza como el eje del disco pueden moverse y girar alrededor de un plano horizontal, permitiendo así el rectificado de conicidades y otras formas.

Con las características de control por computadora, las partes *no cilíndricas*, como las levas, se pueden rectificar en piezas de trabajo giratorias. Como se ilustra en la figura 26.18, la velocidad del husillo de la pieza se sincroniza de tal manera que la distancia radial entre la pieza y los ejes del disco varía de modo continuo para producir una forma particular, como la que se muestra.

El **rectificado de roscas** se realiza en rectificadoras cilíndricas mediante discos especialmente afilados que coinciden con la forma de las roscas, como se muestra en la figu-

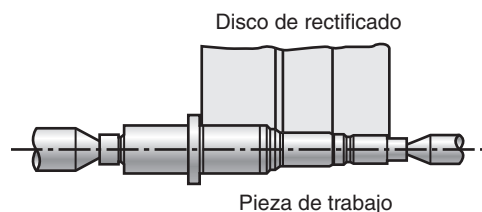


FIGURA 26.17 Rectificado por penetración de una pieza de trabajo en una rectificadora cilíndrica con el disco afilado en forma escalonada.

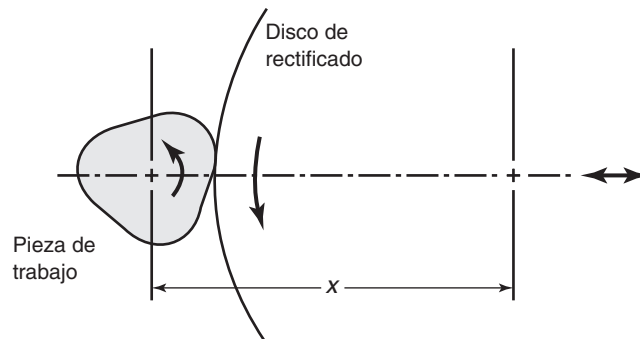


FIGURA 26.18 Esquema de rectificado de una parte no cilíndrica en una rectificadora cilíndrica con controles computarizados para producir la forma. La rotación de la parte y la distancia x entre los centros se varía y sincroniza para rectificar la forma particular de la pieza de trabajo.

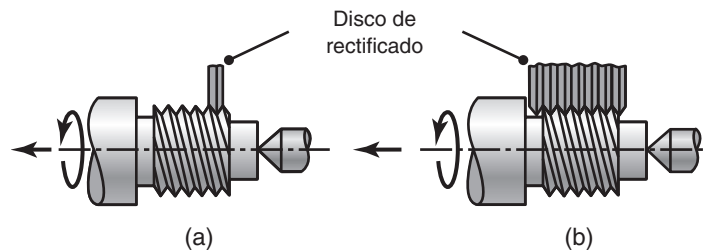


FIGURA 26.19 Rectificado de roscas mediante rectificado: (a) transversal, y (b) de penetración.

ra 26.19. (Ver también *rectificado sin centros*). Aunque costosas, las roscas producidas por rectificado son las más precisas de los procesos de manufactura y tienen un acabado superficial fino, con aplicaciones como los mecanismos de tornillo esférico utilizados para el movimiento preciso de los componentes de máquinas. Los movimientos de la pieza de trabajo y del disco se sincronizan a fin de producir el paso de la rosca, por lo general, en alrededor de seis pases.

EJEMPLO 26.3 Patrones de ciclos en rectificado cilíndrico

Como en la mayoría de las operaciones de rectificado, el disco de rectificado en el rectificado cilíndrico suele hacer varios pases a lo largo de una trayectoria para producir la geometría final en la pieza de trabajo. En la figura 26.20 se ilustran los patrones de los ciclos a fin de elaborar diversas formas en una rectificadora de precisión, multifuncional, controlada por computadora. Las flechas hacia abajo con números indican el inicio del ciclo de rectificado.

La determinación del patrón óptimo y más económico para el tiempo mínimo del ciclo depende de la cantidad de material a remover, la forma de la parte y los parámetros elegidos del proceso. Estos patrones se generan automáticamente con el *software* en los controles por computadora de la rectificadora.

Fuente: Cortesía de Toyoda Machinery.

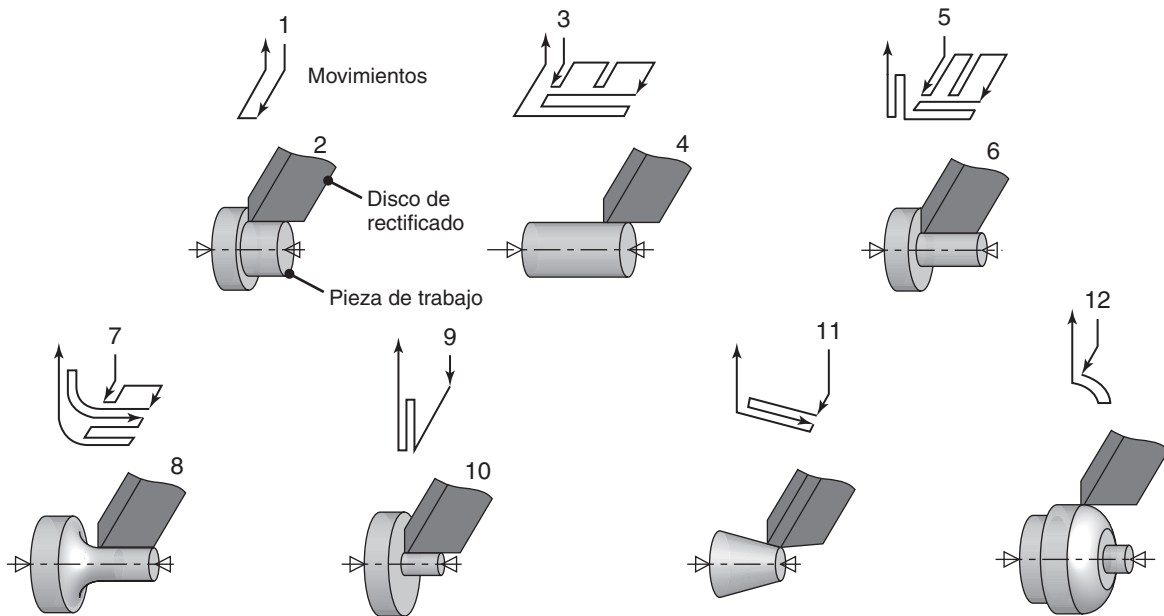


FIGURA 26.20

Rectificado interno. En el *rectificado interno* (fig. 26.21) se utiliza un pequeño disco para rectificar el diámetro interno de la parte, como en los bujes y las pistas para rodamientos. La pieza de trabajo se sujeta en un plato rotatorio y el disco rota a 30,000 rpm o más. Los perfiles internos también pueden rectificarse con discos de afilado de perfiles que se mueven radialmente en la pieza. El cabezal de las rectificadoras internas puede inclinarse en un plano horizontal para rectificar orificios cónicos.

Rectificado sin centros. El *rectificado sin centros* es un proceso de alta producción para rectificar de manera continua superficies cilíndricas donde la pieza de trabajo no se sostiene entre centros (de ahí el concepto “sin centros”) ni platos, sino por una *cuchilla* (fig. 26.22a y b). Las partes comunes fabricadas por rectificado sin centros son los rodamientos de rodillos, pernos de pistones, válvulas para motores, cigüeñales y componentes similares. Se pueden rectificar partes con diámetros hasta de 0.1 mm (0.004 pulgada). Las rectificadoras sin centros (fig. 26.22d) tienen capacidad para velocidades superficiales del disco de 10,000 m/min (35,000 pies/min), utilizando comúnmente discos abrasivos de nitruro de boro cúbico.

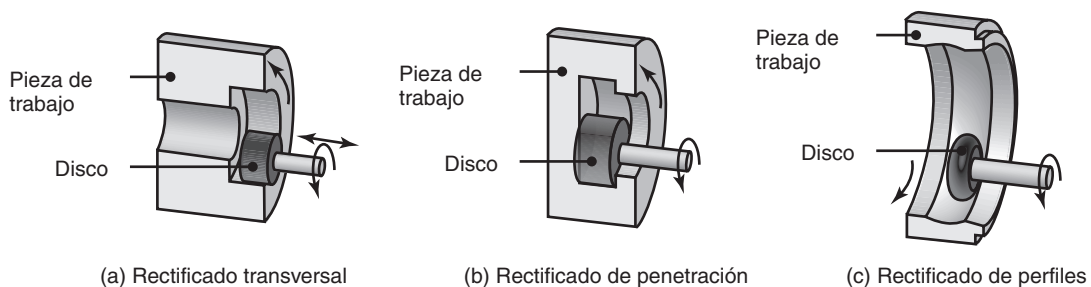


FIGURA 26.21 Esquemas de operaciones de rectificado interno: (a) rectificado transversal; (b) rectificado por penetración, y (c) rectificado de perfiles.

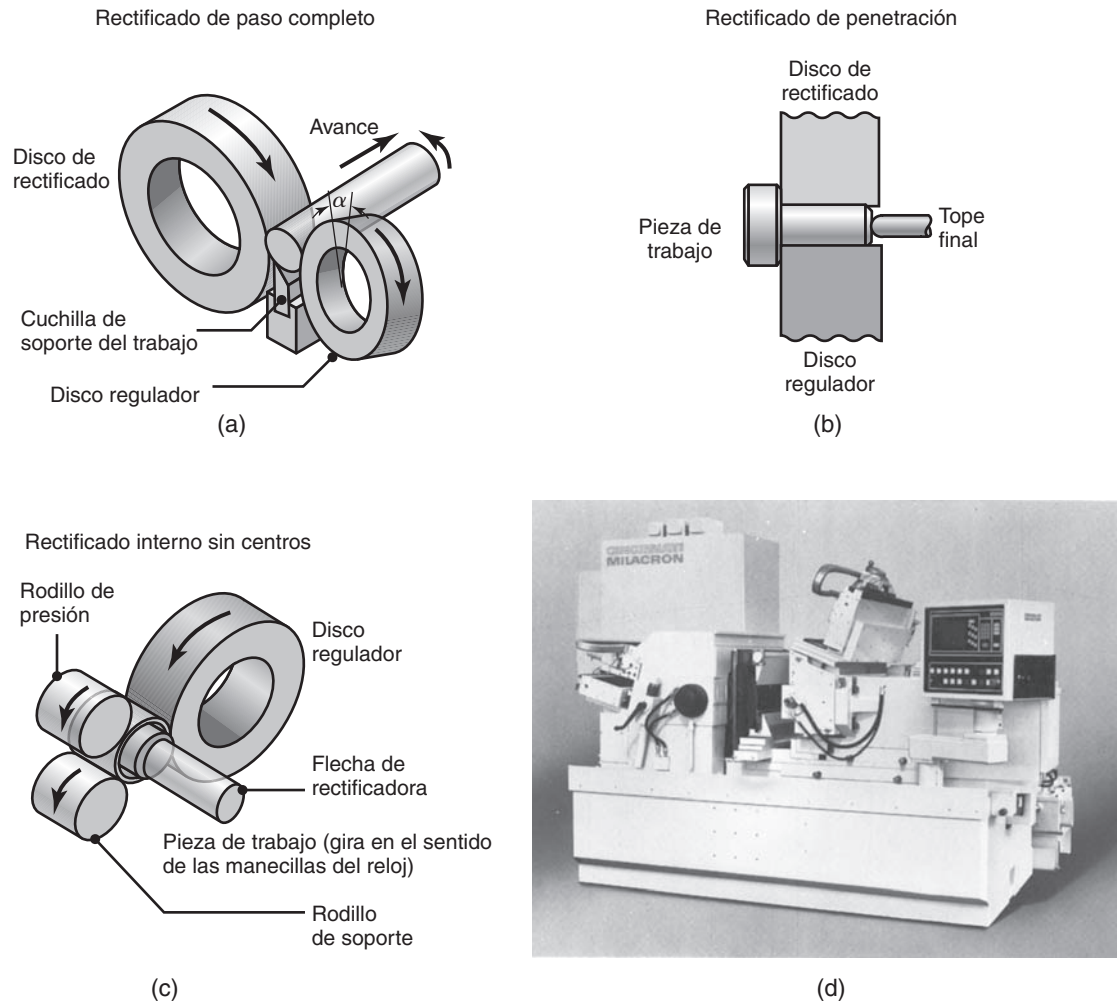


FIGURA 26.22 Esquemas de operaciones de rectificado sin centros: (a) rectificado de paso completo; (b) rectificado de penetración; (c) rectificado interno y (d) rectificadora cilíndrica de control numérico computarizado. Fuente: Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

En el *rectificado de paso completo*, la pieza de trabajo se soporta en una cuchilla de soporte y se rectifica entre dos discos. El rectificado se efectúa con el disco más grande, en tanto que el más pequeño regula el movimiento axial de la pieza. El *disco regulador* (aglomerado con hule) se inclina y opera a sólo una vigésima parte de la velocidad del disco de rectificado.

Las partes con diámetros variables (como tornillos, buzos de válvulas y flechas de diámetros múltiples) se pueden rectificar con rectificado sin centros en un proceso llamado *rectificado de avance* o *de penetración* (fig. 26.22b). Esta operación es similar al rectificado de penetración o de forma en las rectificadoras cilíndricas. Las piezas cónicas se rectifican sin centros mediante el *rectificado de avance al extremo*. El rectificado de rosas de alta velocidad de producción también se puede realizar con rectificadoras sin centros mediante discos especialmente afilados. En el *rectificado interno sin centros*, la pieza de trabajo se soporta entre tres rodillos y se rectifica de modo interno; las aplicaciones comunes son partes y anillos en forma de camisa (fig. 26.22c).

Rectificado de avance lento. Tradicionalmente, el rectificado se ha asociado con pequeñas velocidades de remoción de material (tabla 26.4) y operaciones de acabado fino. Sin embargo, también se puede utilizar en operaciones de remoción de metal a gran escala, similares y en competencia con el fresado, brochado y cepillado de mesa móvil. En el *rectificado de avance lento*, la profundidad de corte (d) del disco es hasta de 6 mm (0.25 pulgada) y la velocidad de la pieza de trabajo es baja (fig. 26.23). Para mantener bajas las temperaturas de la pieza y mejorar el acabado superficial, los discos se aglutinan con una resina de grado más blando y tienen una estructura abierta.

Las máquinas utilizadas en el rectificado de avance lento tienen características especiales, como potencia hasta de 225 kW (300 hp), alta rigidez (debido a las elevadas fuerzas por la gran profundidad del material retirado), alta capacidad de amortiguamiento, velocidades variables del husillo y la mesa de trabajo y amplia capacidad para fluidos de rectificado. Las rectificadoras están equipadas con características para afilar continuamente el disco por medio de un rodillo de diamante como herramienta de afilado.

El rectificado de avance lento puede ser competitivo con otros procesos de maquinado, y económico en aplicaciones específicas, como el rectificado de punzones con forma, asientos para chavetas, ranuras para brocas helicoidales, raíces de los álabes de las turbinas (fig. 26.23c) y diversas partes complejas de superaleación. Puesto que el disco se afila dándole la forma de la pieza de trabajo a producir, ésta no tiene que formarse antes por fresado, moldeo o brochado. Por lo tanto, las fundiciones y forjas de forma casi neta son apropiadas para el rectificado de avance lento. Aunque por lo general basta un solo pase de rectificado, un segundo pase puede ser necesario para mejorar el acabado superficial.

Remoción de grandes cantidades de material mediante rectificado. El rectificado también puede utilizarse para retirar mucho material aumentando los parámetros del proceso. Esta operación puede ser económica en aplicaciones específicas y competir favorablemente con los procesos de maquinado, en particular el fresado, torneado y brochado. En esta operación, el acabado superficial es de importancia secundaria y el disco de rectificado (o banda) se usa en su totalidad, minimizando así el costo unitario. Las tolerancias dimensionales en este proceso son del mismo orden que las obtenidas por la mayoría de los procesos de maquinado. La remoción de grandes cantidades de material mediante rectificado también se efectúa en soldaduras, fundiciones y forjas para alisar los puntos de soldadura y eliminar rebabas.

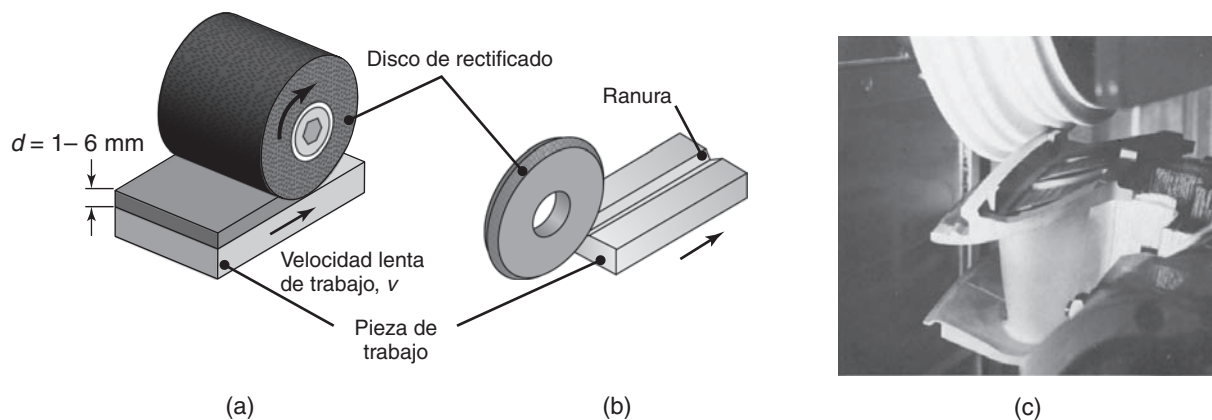


FIGURA 26.23 (a) Esquema del proceso de rectificado de avance lento. Obsérvese la profundidad de corte grande del disco, d . (b) Ranura producida en una superficie plana por rectificado de avance lento en un pase. Comúnmente, la profundidad de la ranura es de unos cuantos milímetros. (c) Ejemplo de rectificado de avance lento con disco moldeado. Esta operación también puede realizarse mediante alguno de los procesos descritos en el capítulo 27. Fuente: Cortesía de Blohm, Inc.

EJEMPLO 26.4 Rectificado contra torneado duro

En la sección 25.6 se describió el *torneado duro*. Un ejemplo de esto es el maquinado de aceros tratados térmicamente (por lo general, arriba de 45 HRC) mediante una herramienta de corte de nitruro de boro cúbico policristalino. En vista de lo tratado hasta ahora, es evidente que el rectificado y el torneado duro pueden ser competitivos en aplicaciones específicas. Por ello, ha habido un debate considerable en cuanto a los méritos respectivos de los dos procesos.

El torneado duro es cada vez más competitivo contra el rectificado y tanto las tolerancias dimensionales como el acabado superficial están empezando a aproximarse a los obtenidos mediante el rectificado. Como se ve en las tablas 21.2 y 26.2, el torneado requiere mucho menos energía que el rectificado. Además, es menos probable que ocurra daño térmico y de otros tipos en la superficie de la pieza de trabajo; tal vez no se requieran fluidos de corte y las máquinas herramienta son menos costosas. Asimismo, la posibilidad de darle acabado a la parte mientras sigue sujeta en el plato del torno elimina la necesidad del manejo de materiales y de colocar la parte en la rectificadora.

Sin embargo, los dispositivos de sujeción para piezas de trabajo grandes y delgadas durante el torneado duro pueden presentar problemas significativos, debido a que las fuerzas de corte utilizadas son superiores a las fuerzas de rectificado. Además, el desgaste de las herramientas y su control representaría un problema importante al compararlos con el afilado automático de los discos de rectificado. Es evidente que la posición competitiva del torneado duro contra el rectificado debe evaluarse por separado para cada aplicación en términos de acabado superficial, integridad, calidad y economía general del producto.

Otras operaciones de rectificado. A continuación se resumen diversas operaciones que se efectúan en rectificadoras de propósitos especiales.

- Las *rectificadoras universales de herramientas y cortadores* se utilizan para rectificar herramientas y cortadores de una sola punta o de puntas múltiples, incluyendo brocas. Están equipadas con dispositivos de sujeción del trabajo especiales para el posicionamiento preciso de las herramientas a rectificar. En la actualidad existe una gran variedad de rectificadoras de herramientas de CNC, lo que hace que la operación sea más sencilla, rápida y con resultados consistentes. Sin embargo, el costo de estas rectificadoras es de entre \$150,000 y \$400,000 dólares.
- Las *rectificadoras de torno, o de aditamentos de rectificar*, son unidades independientes y, por lo general, se sujetan al portaherramientas del torno (como en la fig. 23.2). La pieza de trabajo se monta en el cabezal y se rectifica moviendo el portaherramientas. Estas rectificadoras son versátiles, pero los componentes del torno deben protegerse contra residuos abrasivos.
- Las *rectificadoras de bastidor pendular* se utilizan en talleres de fundición para rectificar fundiciones grandes. El proceso de rectificado burdo de las fundiciones se conoce como *esmerilado de desbaste* y, por lo general, se realiza en *rectificadoras de piso* mediante discos hasta de 0.9 m (36 pulgadas) de diámetro.
- Las *rectificadoras portátiles* se accionan neumática o eléctricamente, con una flecha flexible conectada a un motor eléctrico o de gasolina. Se utilizan para operaciones como rectificado de puntos de soldadura y operaciones de *corte* mediante discos abrasivos delgados.
- Las *rectificadoras de banco y pedestal* se utilizan para el rectificado manual de rutina en herramientas y partes pequeñas. Por lo general, están equipadas con dos discos montados en los dos extremos de la flecha de un motor eléctrico. Un disco suele ser grueso, para el rectificado de desbaste, y el otro fino, para el rectificado de acabado.

Fluidos de rectificado. Las funciones de los fluidos de rectificado son similares a las de los fluidos de corte, como se indica en la sección 22.12. Aunque el rectificado y otros procesos de remoción mediante abrasivos se pueden realizar en seco, es importante el uso de un fluido debido a que:

- Evita el aumento de temperatura en la pieza de trabajo.
- Mejora el acabado superficial y la precisión dimensional de la parte.
- Mejora la eficiencia de la operación reduciendo el desgaste y tapado del disco y disminuyendo el consumo de energía.

Por lo general, los fluidos de rectificado son emulsiones acuosas para rectificado general y aceites para rectificado de roscas (tabla 26.5). Pueden aplicarse como un chorro (inundación) o como niebla (mezcla de fluido y aire). Debido a las altas velocidades superficiales implicadas, una corriente de aire (*cortina de aire*) en la periferia del disco suele evitar que el fluido alcance la interfaz del disco y la pieza de trabajo. Se han diseñado boquillas especiales que se adaptan a la forma de la superficie de corte del disco de rectificado, en las que el fluido de rectificado se aplica a alta presión.

Puede haber un aumento significativo de la temperatura de los fluidos de rectificado acuosos conforme se extrae el calor de la zona de rectificado. Esto puede dilatar la pieza de trabajo, dificultando el control de las tolerancias dimensionales. Un método común para mantener uniforme la temperatura en la pieza consiste en utilizar sistemas de refrigeración (enfriadores), por medio de los cuales se hace circular fluido de rectificado de manera continua y se mantiene a la misma temperatura. Como se indica en la sección 22.12, los aspectos biológicos y ecológicos de los fluidos para trabajo de los metales, relacionados con su disposición, tratamiento y reciclaje, son factores que deben considerarse en su selección y uso. Las prácticas empleadas deben cumplir las leyes y reglamentos federales, estatales y locales.

Traqueteo en el rectificado. El *traqueteo* es muy importante en las operaciones de rectificado, debido a que afecta de manera adversa el acabado superficial y el comportamiento del disco. Con frecuencia, el estudio de las **marcas de traqueteo** en las superficies rectificadas permite identificar su fuente, que incluiría (a) los rodamientos y husillos de la rectificadora; (b) irregularidades en el disco de rectificado (originadas en su manufactura); (c) desgaste disparejo del disco; (d) técnicas deficientes de afilado; (e) uso de discos de rectificado que no están adecuadamente balanceados, y (f) fuentes externas (como maquinaria cercana). La operación de rectificado puede causar *traqueteo regenerativo*, como sucede en el maquinado.

Los factores importantes en el control del traqueteo son la rigidez de la rectificadora, la rigidez de los dispositivos de sujeción del trabajo y el amortiguamiento. Se han establecido lineamientos generales para reducir la tendencia al traqueteo en el rectificado, en particular (a) utilizando discos de grado blando; (b) afilando los discos con frecuencia; (c) cambiando las técnicas de afilado; (d) reduciendo la velocidad de remoción de material, y (e) soportando la pieza de trabajo con rigidez.

TABLA 26.5

Recomendaciones generales para fluidos para rectificado	
Material	Fluido para rectificado
Aluminio	E, EP
Cobre	CSN, E, MO + FO
Magnesio	D, MO
Níquel	CSN, EP
Metales Refractarios	EP
Aceros	CSN, E
Titanio	CSN, E

D = Seco; E = Emulsión; EP = Presión extrema; CSN = Químicos y sintéticos; MO = Aceite mineral; FO = Aceite graso.

Seguridad en las operaciones de rectificado. Puesto que los discos de rectificado son frágiles y giran a altas velocidades, deben seguirse ciertos procedimientos cuidadosos durante su manejo, almacenamiento y uso. El incumplimiento de estos procedimientos y de las instrucciones y advertencias impresas en las etiquetas de los discos individuales puede provocar lesiones graves o decesos. Los discos de rectificado deben almacenarse de manera adecuada y protegerse contra ambientes extremos, como alta temperatura o humedad. Tienen que inspeccionarse en forma visual en cuanto a grietas y daños antes de instalarlos en las rectificadoras. Los discos vitrificados deben probarse *haciéndolos sonar* antes de utilizarlos (es decir, sujetándolos del orificio, golpeándolos levemente y escuchando cómo sueñan). Un disco dañado tiene un sonido llano, similar a un plato de cocina agrietado.

El daño a un disco de rectificado puede reducir su **velocidad de explosión** en forma severa. Definida como la velocidad superficial a la que explota (estalla) un disco que gira libremente, la velocidad de explosión se calcula en términos de las rpm de explosión para un disco en particular y depende del tipo de disco, su aglutinante, grado y estructura. En los discos de diamante y cBN (fig. 26.5), que operan a altas velocidades superficiales, el tipo de material del núcleo del disco afecta la velocidad de explosión. Por ejemplo, los núcleos metálicos tienen la velocidad de explosión más alta: 250 m/s (800 pies/s).

26.5 | Consideraciones de diseño para el rectificado

Las consideraciones de diseño para las operaciones de rectificado son similares a las del maquinado que se describieron en diversas secciones de los capítulos 23 y 24. Además, es necesario poner atención específicamente en lo siguiente:

- Las partes a rectificar deben diseñarse de manera que puedan montarse con firmeza en platos, mesas magnéticas o aditamentos y dispositivos adecuados de sujeción del trabajo. Las piezas de trabajo delgadas, rectas o tubulares pueden distorsionarse durante el rectificado, lo que requiere atención especial.
- Si se requiere alta precisión dimensional, deben evitarse las superficies interrumpidas (como orificios y ranuras de chavetas), ya que pueden provocar vibraciones y traqueteo.
- Las partes para rectificado cilíndrico deben balancearse y evitar los diseños largos y delgados, a fin de minimizar deflexiones. Los filetes y radios de esquinas deben ser tan grandes como sea posible, o se les tiene que proporcionar alivio mediante maquinado previo.
- En el rectificado sin centros puede ser difícil rectificar con precisión las piezas cortas, debido a la falta de soporte en la cuchilla. En el rectificado de paso completo, sólo puede rectificarse el diámetro más grande de las partes.
- Los diseños que requieren rectificado preciso de forma deben ser sencillos para evitar el frecuente afilado de la forma del disco.
- Deben evitarse orificios profundos y pequeños, así como orificios ciegos que requieran rectificado interno, o tienen que incluir un alivio.

En general, los diseños deben requerir una cantidad mínima de remoción de material, excepto en el rectificado de avance lento. Además, para mantener una buena precisión dimensional, los diseños deben permitir de preferencia que todo el rectificado se realice sin tener que volver a colocar la pieza de trabajo. (Este lineamiento también es aplicable a todos los procesos y operaciones de manufactura).

26.6 | Maquinado ultrasónico

En el *maquinado ultrasónico* (UM, por sus siglas en inglés), se retira material de una superficie mediante microastillado y erosión con granos abrasivos, finos, sueltos en lodo de

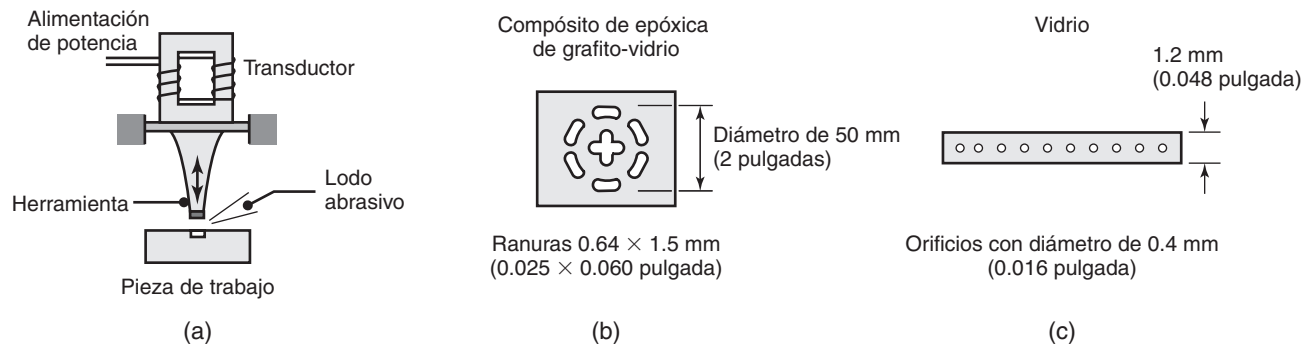


FIGURA 26.24 (a) Esquema del proceso de maquinado ultrasónico. (b) y (c) Tipos de partes fabricadas por este proceso. Obsérvese el pequeño tamaño de los orificios producidos.

agua (fig. 26.24a). La punta de la herramienta (*sonotrodo*) vibra a una frecuencia de 20 kHz y a una baja amplitud de 0.0125 mm a 0.075 mm (0.0005 a 0.003 pulgada). A su vez, esta vibración proporciona una alta velocidad a los granos abrasivos entre la herramienta y la pieza de trabajo. El esfuerzo producido por el impacto de las partículas abrasivas sobre la superficie de la pieza es alto porque (a) el tiempo de contacto entre la partícula y la superficie es muy corto (10 a 100 μ s), y (b) el área de contacto es muy pequeña. En materiales frágiles, estos esfuerzos de impacto son suficientemente altos para causar microastillado y erosión de la superficie de la pieza de trabajo.

El maquinado ultrasónico es más adecuado para materiales que son duros y frágiles, como cerámicos, carburos, piedras preciosas y aceros endurecidos. En la figura 26.24b y c se muestran dos aplicaciones del maquinado ultrasónico. Se requiere una herramienta especial para cada forma a producir, de ahí que se conozca como *herramienta de forma*. Por lo general, la punta de la herramienta (que se sujeta a un transductor a través del portaherramientas) se fabrica con acero dulce.

Por lo común, los granos abrasivos son de carburo de boro, aunque también se utilizan óxido de aluminio y carburo de silicio, con tamaños de granos que van del número de grano 100 para desbaste hasta el número 1000 para operaciones de acabado. Los granos se transportan en un lodo de agua con concentraciones de 20% a 60% en volumen; el lodo también desaloja los desechos de la zona de corte.

Maquinado ultrasónico rotatorio (RUM, por sus siglas en inglés). En este proceso, el lodo abrasivo se reemplaza con una herramienta que tiene abrasivos de diamante aglutinados con metal impregnado o electrodepuesto sobre la superficie de la herramienta. La herramienta se hace vibrar mediante ultrasonido y se gira al mismo tiempo que se oprime contra la superficie de la pieza de trabajo a una presión constante. El proceso es similar a una operación de fresado frontal (fig. 24.5), reemplazando los insertos con abrasivos. Las virutas generadas se desechan mediante un refrigerante bombeado a través del núcleo de la herramienta rotatoria. El proceso de maquinado ultrasónico rotatorio es muy efectivo en la producción de orificios profundos y altas velocidades de remoción de material en partes de cerámicos.

Consideraciones de diseño para el maquinado ultrasónico. Los lineamientos básicos de diseño para el UM incluyen los siguientes:

- Evitar perfiles, esquinas y radios agudos, porque se erosionan con el lodo abrasivo.
- Los orificios producidos tienen cierta conicidad.

- Dada la tendencia de los materiales frágiles a astillarse en el extremo de salida de los orificios maquinados, la parte inferior de las partes debe tener una placa de respaldo.

26.7 Operaciones de acabado

Además de los ya descritos, también se utilizan diversos procesos que emplean granos abrasivos finos en piezas de trabajo como operación final de acabado. Sin embargo, dichas operaciones pueden contribuir de manera significativa al tiempo de producción y costo del producto, por lo que deben especificarse con la debida consideración a sus costos y beneficios.

Abrasivos recubiertos. Ejemplos comunes de *abrasivos recubiertos* son las lijas de papel y la tela de esmeril. La mayoría de los abrasivos recubiertos se fabrican con óxido de aluminio. El resto ha sido elaborado con carburo de silicio y alúmina de zirconio. Por lo general, tienen una estructura mucho más abierta que los abrasivos en los discos de rectificado y poseen granos que son más afilados. Los granos se depositan electrostáticamente sobre materiales de refuerzo, como papel, algodón, poliéster de rayón, polinailon y diversas mezclas de estos materiales. Como se muestra en la figura 26.25, por lo común el material aglutinante (matriz) es resina, que primero se aplica al refuerzo (*recubrimiento de cierre*); después los granos se aglutinan con una segunda capa (*recubrimiento de tamaño*). Los granos tienen sus ejes largos perpendiculares al plano del refuerzo, mejorando así su acción de corte.

Existen abrasivos recubiertos en forma de hojas, bandas y discos. Se utilizan en gran medida para dar acabado a superficies planas o curvadas de partes metálicas y no metálicas, especímenes metalográficos y en trabajos de madera. La precisión del acabado superficial obtenido depende del tamaño del grano.

Rectificado por banda. Los abrasivos recubiertos también se utilizan como *bandas* para remoción de material a alta velocidad con buen acabado superficial. El *rectificado por banda* se ha convertido en un proceso de producción importante, que en algunos casos reemplaza las operaciones de rectificado convencional. Existen bandas con números de grano que van de 16 a 1500. Las velocidades de las bandas van de 700 a 1800 m/min (2500 a 6000 pies/min). Las máquinas para operaciones por banda abrasiva requieren un soporte de banda apropiado y tienen una construcción rígida a fin de minimizar vibraciones.

Los abrasivos convencionales recubiertos tienen abrasivos colocados de manera aleatoria sobre su superficie y pueden constar de capas simples o múltiples de abrasivos. Otra técnica es la *microrréplica*, en la que los abrasivos se colocan en un orden predeterminado sobre la superficie de la banda en forma de diminutas pirámides de óxido de aluminio. Utilizadas en aceros inoxidables y superaleaciones, su desempeño es más consistente y las temperaturas correspondientes son inferiores. Sus aplicaciones comunes incluyen rectificado por banda de implantes quirúrgicos, palos de golf, armas de fuego e instrumentos médicos y dentales.

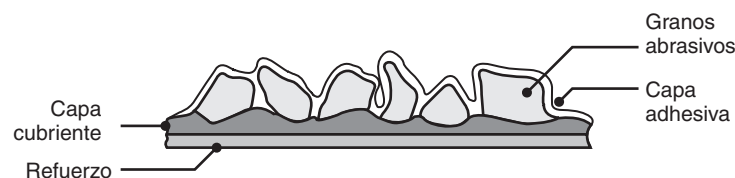
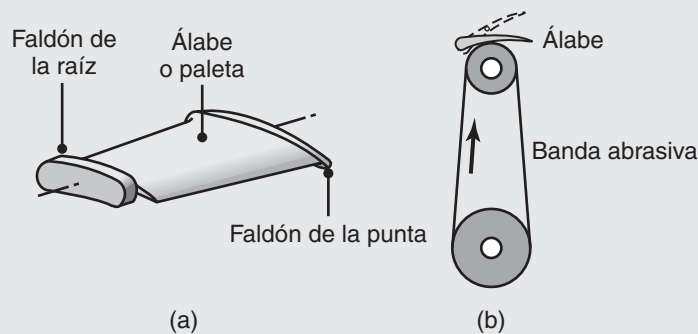


FIGURA 26.25 Esquema de la estructura de un abrasivo recubierto. La lija de papel (desarrollada en el siglo XVI) y la tela de esmeril son ejemplos comunes de abrasivos recubiertos.

EJEMPLO 26.5 Rectificado por banda de álabes para tobera de turbinas

El álabes para tobera de turbina mostrado en la figura 26.26 se fabricó mediante fundición por revestimiento (sección 11.8) de una superaleación de base cobalto. Para re-

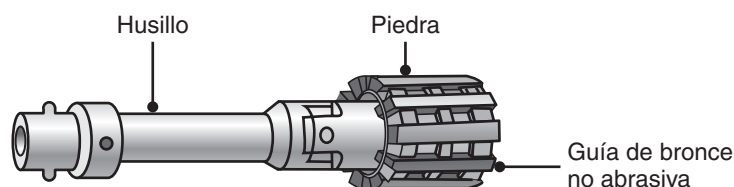
**FIGURA 26.26**

mover una delgada capa de difusión de las secciones del faldón de la raíz y el faldón de la punta del álabes, se rectificó en una banda abrasiva con refuerzo de tela (óxido de aluminio de grano 60). Los álabes se montaron en un soporte y se rectificaron en seco a una velocidad de banda de 1800 m/min (6000 pies/min). La velocidad de producción fue de 93 segundos por pieza. Cada álabes pesaba 21.65 g antes y 20.25 g después del rectificado por banda, una reducción en peso de casi 6.5%.

Fuente: Cortesía de ASM International.

Cepillado con alambre. En este proceso, también conocido como *cepillado de potencia*, la pieza de trabajo se sujeta contra un cepillo de alambre circular que gira a velocidades que van de 1750 rpm para discos grandes hasta 3500 rpm para discos pequeños. Al frotar, las puntas del alambre producen raspados longitudinales sobre la superficie de la pieza. El cepillado con alambre se utiliza para producir una textura superficial fina o controlada; si se realiza en las condiciones adecuadas, también se puede considerar un proceso ligero de remoción de material. Además de los alambres metálicos, pueden usarse de manera efectiva alambres poliméricos (nailon) embebidos con abrasivos. (Ver también *sierras de alambre de diamante*, sección 24.5).

Honeado. El *honeado* o *asentado* es una operación que se utiliza principalmente para mejorar el acabado superficial producido por procesos como el mandrinado, el taladrado y el rectificado interno. La herramienta de honeado consta de un juego de barras, por lo general conocidas como *piedras* (fig. 26.27). Se montan en un mandril que gira dentro del orificio a velocidades superficiales de 45 a 90 m/min (150 a 300 pies/min), aplicando una fuerza radial. La herramienta tiene un movimiento axial alternativo que produce un patrón cruzado en la superficie del orificio. Las piedras pueden ajustarse en forma radial

**FIGURA 26.27** Esquema de una herramienta de honeado utilizada para mejorar el acabado superficial de orificios mandrinados o esmerilados.

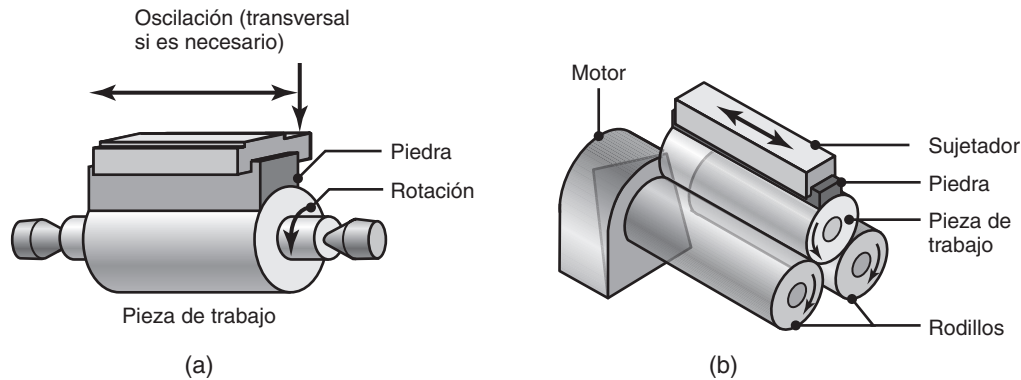


FIGURA 26.28 Esquemas del proceso de superacabado de una parte cilíndrica. (a) Microhoneado cilíndrico. (b) Microhoneado sin centros.

para diferentes tamaños de orificios. Por lo regular, se utilizan fluidos de honeado, que son base agua o aceite y ayudan a limpiar los residuos. El honeado se efectúa en superficies externas cilíndricas o planas y para eliminar aristas afiladas en herramientas de corte e insertos. (Ver fig. 22.5).

Se puede controlar la calidad del acabado superficial producido por honeado mediante el tipo y tamaño de abrasivo utilizado, la presión aplicada y la velocidad. Se emplea un fluido para retirar las virutas y mantener bajas las temperaturas. Si no se realiza de manera apropiada, el honeado puede producir orificios que no sean rectos ni cilíndricos, sino con forma abocinada, ondulada, abarrilada o cónica.

Superacabado. En este proceso, la presión aplicada es muy leve y el movimiento de la piedra de honeado tiene un recorrido corto. Su movimiento se controla de manera que los granos no se desplacen a lo largo de la misma trayectoria sobre la superficie de la pieza de trabajo. En la figura 26.28 se muestran ejemplos de superacabado externo de una parte redonda.

Lapeado. Esta operación sirve para dar acabado a las superficies planas, cilíndricas o curvadas. La *piedra de lapeado* (fig. 26.29a) es relativamente blanda y porosa, y por lo

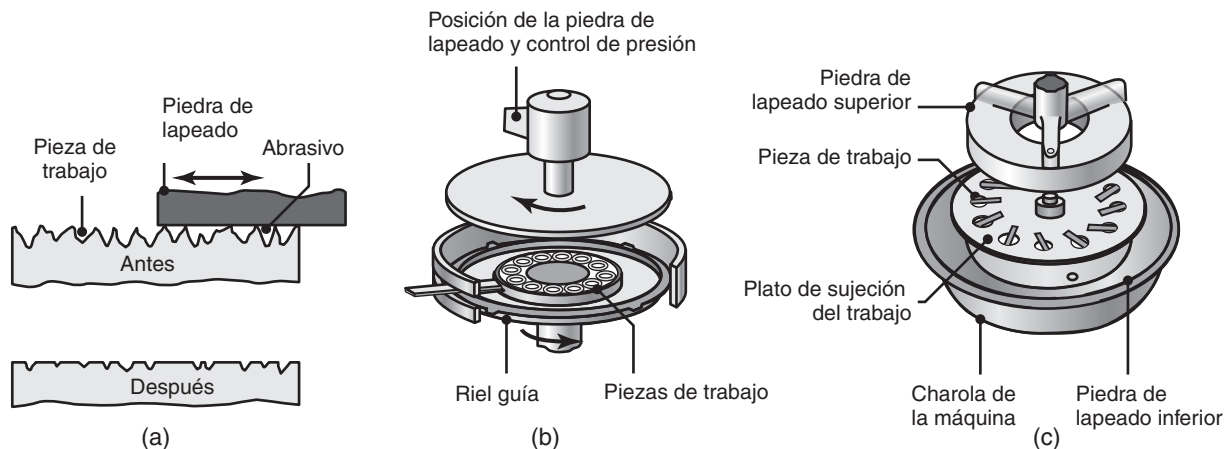


FIGURA 26.29 (a) Esquema del proceso de lapeado. (b) Lapeado de producción sobre superficies planas. (c) Lapeado de producción sobre superficies cilíndricas.

general se fabrica con hierro fundido, cobre, piel o tela. Las partículas abrasivas se embuten en la piedra de lapear o pueden transportarse mediante un lodo. El lapeado de objetos esféricos y lentes de vidrio se realiza mediante piedras moldeadas especialmente. El *asentado* de los engranes coincidentes se puede efectuar por lapeado, como en los engranes hipoides para ejes traseros. Dependiendo del tipo y la dureza del material de la pieza de trabajo, las presiones de lapeado van de 7 a 140 kPa (1 a 20 psi).

En el lapeado se pueden obtener tolerancias dimensionales de ± 0.0004 mm (0.000015 pulgada) utilizando abrasivos finos hasta de tamaño de grano 900 y el acabado superficial puede ser hasta de 0.025 a $0.1 \mu\text{m}$ (1 a 4 μpulg). El lapeado de producción en piezas planas o cilíndricas se efectúa en máquinas similares a las mostradas en la figura 26.29b y c.

Pulido. El *pulido* es un proceso que produce un acabado superficial liso y lustroso. Su mecanismo básico es el ablandamiento y extendido de las capas superficiales debido a calentamiento por fricción, que se desarrolló durante el pulido y la remoción a escala muy fina mediante abrasivos de la superficie de la pieza de trabajo. La apariencia brillante de las superficies pulidas se produce por la acción de extendido.

El pulido se realiza por medio de discos o bandas fabricadas con textiles, cuero o fieltro, que comúnmente se recubren con polvos finos de óxido de aluminio o diamante. En el *pulido de dos caras* se fijan pares de almohadillas en las caras de los platos que giran en forma horizontal y en direcciones opuestas. Las partes con formas irregulares, esquinas afiladas, recesos profundos y proyecciones puntiagudas pueden ser difíciles de pulir.

Pulido químico-mecánico. El *pulido químico-mecánico* (CMP, por sus siglas en inglés) es de gran importancia en la industria de los semiconductores. El proceso se muestra en la figura 26.30 y utiliza una suspensión de partículas abrasivas en una solución acuosa con una química seleccionada para generar una corrosión controlada. Por lo tanto, este proceso retira material de la pieza de trabajo mediante los efectos de abrasión y corrosión combinados. Los resultados son una superficie de acabado superficial excepcionalmente fino y una pieza de trabajo muy plana. Por esta razón, es frecuente hacer referencia a dicho proceso como **planarización química-mecánica**.

Una aplicación importante de este proceso es el pulido de obleas de silicio (sección 28.4). En este caso, la función principal del CMP consiste en pulir una oblea a nivel micro. Por lo tanto, para retirar material de manera uniforme de toda la oblea, ésta se sujeta sobre un soporte giratorio con la cara hacia abajo y se presiona contra un paño de pulido montado en un disco rotatorio, como se muestra en la figura 26.30. Se puede demostrar que la velocidad relativa del paño es constante a través del disco, ya que si la

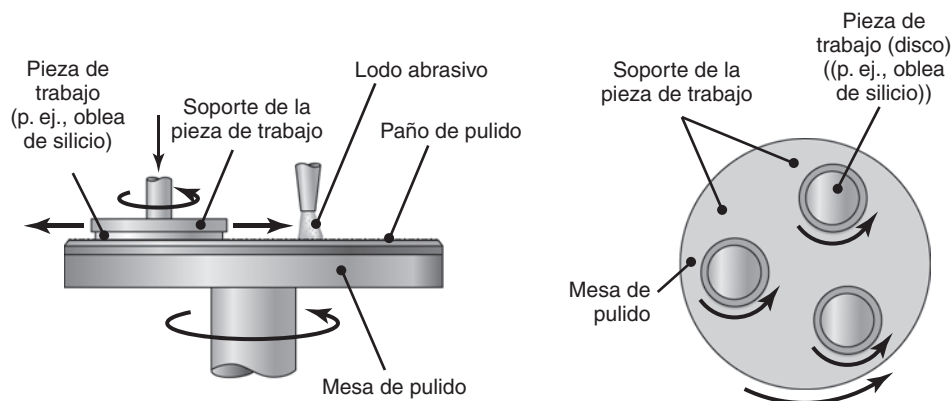


FIGURA 26.30 Esquema del proceso de pulido químico-mecánico (CMP). Este proceso se utiliza ampliamente en la manufactura de obleas de silicio y circuitos integrados y también se conoce como *planarización química-mecánica*. Para otros materiales y aplicaciones, es posible utilizar más soportes y más discos por soporte.

oblea no estuviera girando, la velocidad cambiaría con el radio. El paño contiene ranuras cuyo objetivo es suministrar lodo de manera uniforme a todas las obleas. Además, la rotación del paño asegura que no se desarrolle una capa lineal (ver sección 33.3).

Se han desarrollado combinaciones específicas de abrasivos y soluciones químicas para el pulido de cobre, silicio, dióxido de silicio, aluminio, tungsteno y otros materiales. Por ejemplo, para pulir dióxido de silicio o silicio, se alimenta continuamente un lodo alcalino de sílice coloidal (partículas de SiO_2 en una solución de KOH o NH_4OH) a la interfaz del paño-oblea.

Electropulido. Mediante el *electropulido* se pueden obtener acabados a espejo sobre superficies metálicas; este proceso es el inverso de la electrodeposición (que se describe en la sección 34.9). Debido a que no hay contacto mecánico con la pieza de trabajo, el proceso es apropiado en particular para pulir formas irregulares. El electrolito ataca proyecciones y picos sobre la superficie de la pieza a una velocidad más alta que el resto de la superficie, produciendo una superficie lisa. El electropulido también se utiliza en operaciones de rebabeo.

Pulido con campos magnéticos. En esta técnica, los lodos abrasivos se sostienen con campos magnéticos. Existen dos métodos básicos.

En el *pulido de flotación magnética* de las bolas de cerámica, esquematizado en la figura 26.31a, se llena la cámara con un fluido magnético (que contiene granos abrasivos y partículas ferromagnéticas muy finas en un fluido transportador, como agua o queroseno) por medio de un anillo guía. Las bolas cerámicas se localizan entre una flecha impulsora y un flotador. Los granos abrasivos, las bolas cerámicas y el flotador (que se fabrica con un material no magnético) se suspenden mediante fuerzas magnéticas. Las bolas se presionan contra la flecha de accionamiento rotatorio y se pulen mediante la acción abrasiva. Las fuerzas aplicadas por las partículas abrasivas sobre las bolas son extremadamente pequeñas y controlables, de ahí que la acción de pulido sea muy fina. Debido a que los tiempos de pulido son muy inferiores a los comprendidos en otros métodos de pulido, este proceso es muy económico y las superficies producidas tienen pocos defectos significativos, en caso de que existan.

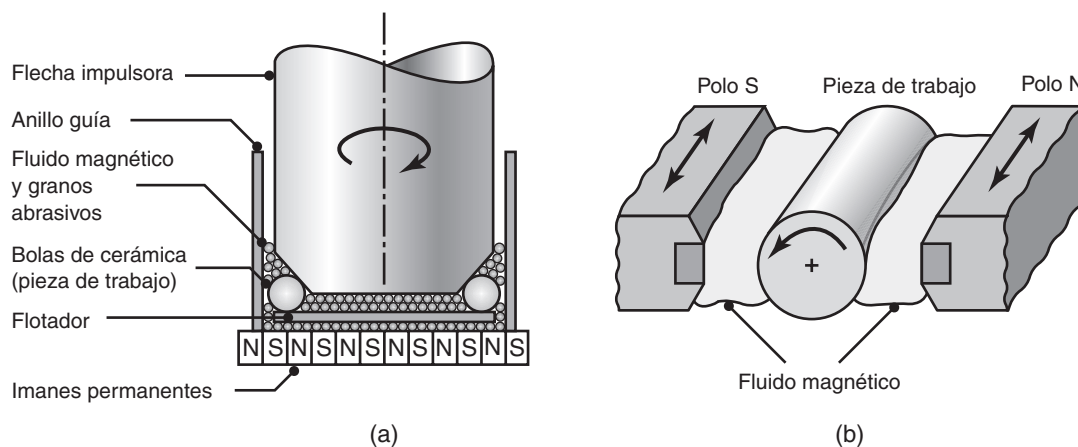


FIGURA 26.31 Esquema del pulido de bolas y rodillos utilizando campos magnéticos. (a) Pulido de flotación magnética de bolas cerámicas. (b) Pulido asistido por campo magnético de rodillos. Fuente: R. Komanduri, M. Doc y M. Fox.

En la figura 26.31b se ilustra el *pulido asistido por campo magnético* de rodillos de cerámicos. Un rodillo de cerámicos o metálico (como la pieza de trabajo) se sujeta y gira en un husillo. Se oscilan los polos magnéticos introduciendo un movimiento vibratorio al conglomerado abrasivo-magnético. Esta acción pule la superficie cilíndrica del rodillo. Mediante este proceso se les ha dado acabado de espejo a los aceros para rodamientos de 63 HRC en 30 segundos.

Abrillantado. El *abrillantado* es similar al pulido (excepto porque se obtiene un acabado superficial uniforme aún más fino) utilizando abrasivos muy finos en discos blandos, que por lo común se fabrican con tela o cuero. El abrasivo se suministra externamente de una varilla de compuesto abrasivo.

26.8 | Operaciones de rebabeo

Las **rebabas** son rebordes delgados, por lo general de forma triangular, que se desarrollan a lo largo de los bordes de una pieza de trabajo debido a operaciones como maquinado, cizallamiento de láminas metálicas (como en las figs. 16.2 y 16.3) y recorte de forjas y fundiciones. Las rebabas se pueden detectar por medios simples, como el dedo, un palillo o un hisopo. La inspección visual de las rebabas incluye el uso de lupas y microscopios. Aunque se están realizando esfuerzos, no existen estándares ampliamente aceptados para definir las rebabas, en parte porque puede existir una variedad de rebabas que se desarrollan en las partes.

Las rebabas tienen diversas desventajas: (a) pueden interferir en el ensamble mecánico de las partes y provocar su atascamiento, desalineación y cortos circuitos en componentes eléctricos. (b) Debido a que generalmente son puntiagudas, pueden representar un riesgo de seguridad para el personal. (c) Las rebabas reducen la vida a la fatiga de los componentes. Por otro lado, las rebabas en componentes taladrados o roscados (como las partes diminutas en relojes y mecanismos mecánicos) pueden aportar un espesor adicional y mejorar, por lo tanto, el torque de sujeción de los tornillos.

Existen diversos **procesos de rebabeo**. Su costo-efectividad depende de factores como el grado de rebabeo requerido, la complejidad de la parte y la ubicación de la rebaba, el número de partes a rebabeo, el espacio de piso disponible, los costos de mano de obra y las consideraciones de seguridad y ambientales. Las operaciones de rebabeo incluyen:

1. Rebabeo manual con limas y rasquetas. Se calcula que el rebabeo manual puede sumar hasta 10% del costo de manufactura de la parte.
2. Rebabeo mecánico mediante el maquinado de partes cilíndricas en un husillo rotatorio.
3. Cepillado con alambre o utilizando cepillos rotatorios de nailon, que constan de filamentos embebidos con arenillas abrasivas.
4. Bandas abrasivas.
5. Maquinado ultrasónico.
6. Electropulido.
7. Maquinado electroquímico.
8. Acabado magnético-abrasivo.
9. Acabado vibratorio.
10. Limpieza con chorro de granalla o de abrasivo.

11. Maquinado de flujo abrasivo (como la extrusión de un lodo abrasivo semisólido sobre los bordes de la parte).
12. Maquinado por energía térmica utilizando láser o plasma.

A continuación, se describen los últimos cuatro procesos; otros se tratan más adelante en este libro.

Acabado vibratorio y en tambor. Estos procesos se utilizan para retirar rebabas de grandes cantidades de piezas relativamente pequeñas. En esta operación tipo lote, se colocan *partículas abrasivas* moldeadas de manera particular, fabricadas con medios metálicos y no metálicos (bolas o piedras) en un contenedor junto con las partes a rebabeear. Se hace *vibrar* o se *sacude* el contenedor mediante diversos medios mecánicos. El impacto de los abrasivos individuales y de las partículas metálicas retira las rebabas y las aristas agudas de las partes. Dependiendo de la aplicación, este puede ser un proceso *seco* o *húmedo*. Se pueden agregar compuestos líquidos con objeto de disminuir o aumentar la resistencia a la corrosión de la parte que se rebabea. Cuando se usan fluidos y abrasivos químicamente activos, se convierte en una forma de pulido químico-mecánico.

Limpieza con chorro de abrasivo. También conocido como **chorro de granos**, éste comprende partículas abrasivas (por lo general, arena) que se impulsan mediante un chorro de aire a alta velocidad, o mediante un disco rotatorio, sobre la superficie de la pieza de trabajo. La limpieza con chorro de abrasivos es particularmente útil en el rebabeo de materiales metálicos y no metálicos y en el descostrado, limpieza y remoción de óxidos de la superficie. Las superficies producidas tienen un acabado mate, pero se puede producir un daño superficial si los parámetros del proceso no se controlan en forma apropiada. La limpieza con **chorro microabrasivo** consiste en un pulido a pequeña escala y ataque, utilizando abrasivos muy finos, en unidades tipo banco.

Maquinado de flujo abrasivo. Éste comprende el uso de granos abrasivos, como carburo de silicio o diamante, que se mezclan en una matriz tipo masilla y después se fuerzan hacia delante y hacia atrás a través de aperturas y pasajes en la pieza de trabajo. El movimiento de la matriz abrasiva bajo presión erosiona rebabas y esquinas puntiagudas y pule la parte. Este proceso es muy apropiado para piezas con cavidades internas, como las producidas por fundición, que son inaccesibles por otros medios. Las presiones aplicadas van de 0.7 a 22 MPa (100 a 3200 psi). Las superficies externas también pueden rebabearse con este método, conteniendo la pieza de trabajo dentro de un aditamento que dirige los medios abrasivos a los bordes y las áreas a rebabeear. En la figura 26.32 se ilustra el rebabeado del propulsor de una turbina por maquinado de flujo abrasivo.

Rebabeo por energía térmica. Este proceso consiste en colocar la parte en una cámara, donde después se inyecta una mezcla de gas natural y oxígeno. Al incendiarse la mezcla, se produce una explosión de calor a una temperatura de unos 3300 °C (6000 °F). Las rebabas se calientan y funden de modo instantáneo, en tanto que la temperatura de la parte alcanza tan sólo alrededor de 150 °C (300 °F). Sin embargo, existen desventajas para este proceso: (a) las rebabas más grandes tienden a formar perlas después de fundirse, (b) las partes delgadas y esbeltas se pueden distorsionar, y (c) no pule ni abrillanta las superficies de la pieza de trabajo, como lo hacen muchos otros procesos de rebabeo.

Rebabeo robótico. El rebabeo y la remoción de rebabas de productos terminados se efectúan cada vez más mediante *robots programables* (sección 37.6), utilizando un sistema de retroalimentación de fuerzas para controlar la trayectoria y velocidad de la remoción de las rebabas. Este método elimina la mano de obra manual tediosa y costosa y

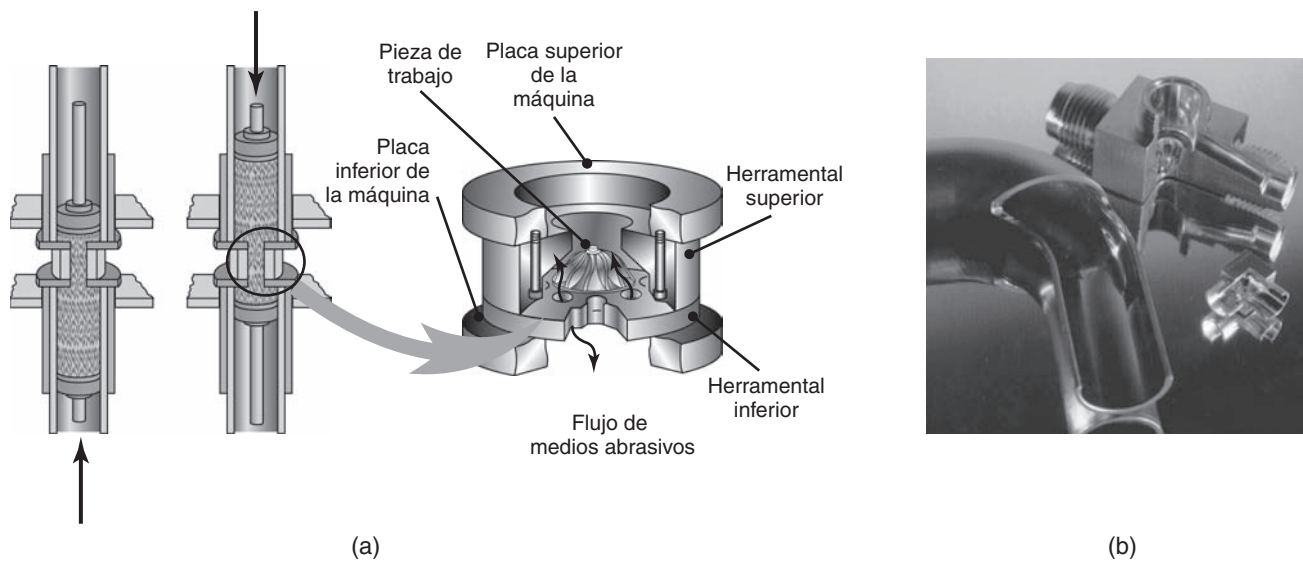


FIGURA 26.32 (a) Esquema del maquinado de flujo abrasivo para rebabeo de un propulsor de turbina. Las flechas indican el movimiento de los medios abrasivos. Obsérvese el soporte especial, que generalmente es diferente para el diseño de cada parte. (b) Accesorios de válvula tratados por maquinado de flujo abrasivo para eliminar rebabas y mejorar la calidad de la superficie. Fuente: Cortesía de Extrude Hone Corp.

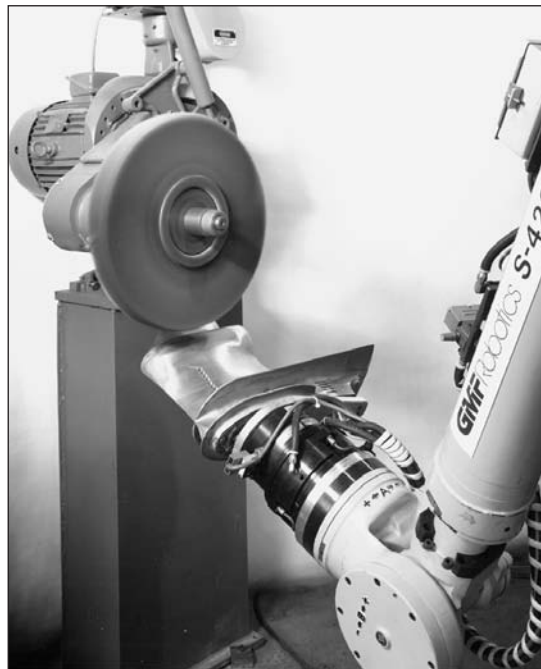


FIGURA 26.33 Operación de rebabeo en una parte fundida a presión para una carcasa de motor fuera de borda, sujeta por un robot y utilizando un disco de rectificado. También se pueden usar bandas abrasivas (fig. 26.26) o cepillos flexibles abrasivos de disco radial para dichas operaciones. Fuente: Cortesía de Acme Manufacturing Company

produce un rebabeo más consistente y repetible. Un ejemplo es el rebabeo robótico de una envolvente externa para motor fundido a presión que se muestra en la figura 26.33. En otra aplicación, el rebabeo manual de un engrane doble helicoidal para una caja de engranes de un helicóptero requirió 150 minutos, en tanto que el rebabeo robótico requirió 15 minutos.

26.9 Economía de las operaciones de maquinado abrasivo y de acabado

Con frecuencia son necesarias operaciones de maquinado abrasivo y acabado porque los procesos de formado, moldeado y maquinado, por sí solos, no logran una precisión dimensional suficientemente alta o una buena calidad de los acabados superficiales. Los procesos abrasivos pueden utilizarse como un proceso de acabado y como una operación de remoción de material a gran escala. Por ejemplo, el rectificado de avance lento es una alternativa económica para operaciones de maquinado (como el fresado), aunque el desgaste del disco es alto. También el rectificado y torneado duro se ha vuelto competitivo en ciertas aplicaciones específicas.

Se han realizado muchos avances en la automatización del equipo implicado en estas operaciones, incluyendo el uso de controles por computadora, optimización del proceso y manejo robótico de las partes. Por consiguiente, se han reducido los costos de la mano de obra y los tiempos de producción, aunque en general dicha maquinaria requiere una inversión significativa de capital.

Puesto que son operaciones adicionales, los procesos descritos en este capítulo pueden contribuir de manera significativa al costo de producción. Además, al aumentar el requisito de acabado superficial, son necesarias más operaciones, por lo que el costo

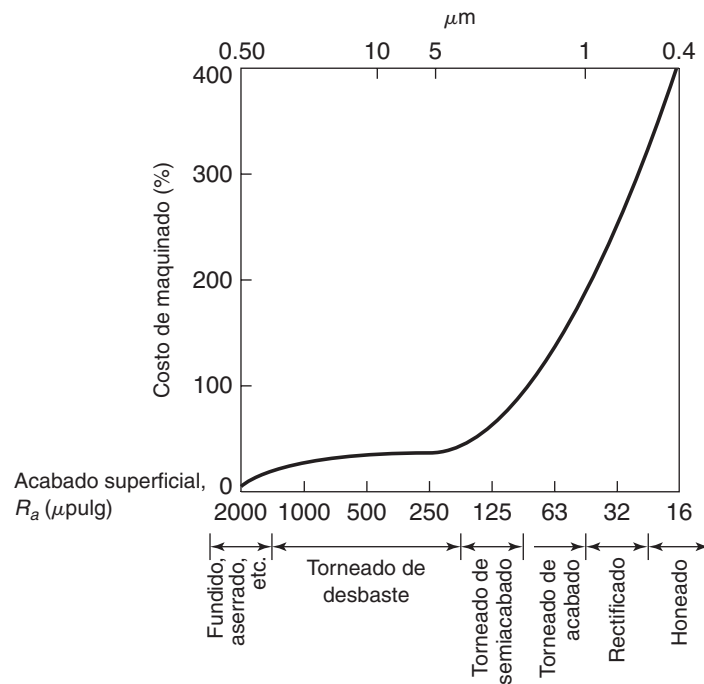


FIGURA 26.34 Aumento en el costo de maquinado y acabado de una parte en función del acabado superficial requerido. Esta es la razón principal por la que el acabado superficial especificado en partes no debe ser más fino de lo necesario para que la parte funcione apropiadamente.

aumenta más, como se muestra en la figura 26.34. Obsérvese la rapidez con que se incrementa el costo al mejorar el acabado superficial mediante procesos adicionales, como el rectificado y el honeado.

El costo de los componentes (como equipo, herramientas, mano de obra y experiencia del operador) en procesos abrasivos varía ampliamente. En tanto que para el rectificado los costos de la maquinaria pueden ser altos, para otros procesos de acabado son bastante bajos. Por lo general, los costos de los discos de rectificado son bajos en comparación con otros aspectos de la operación general de rectificado. Sin embargo, como ya se mencionó, el costo de los discos puede ser hasta de cientos o incluso miles de dólares, dependiendo de su composición y tamaño. Los costos de las herramientas de acabado, como las del honeado y lepeado, varían ampliamente. Los costos de mano de obra y experiencia del operador dependen en gran medida de cuán automatizado esté el equipo.

Si es posible que el acabado sea un factor importante en la manufactura de un producto en particular, las etapas conceptuales y de diseño deben comprender un análisis del nivel de acabado superficial y precisión dimensional requeridos y de si se pueden relajar. Además, debe examinarse la capacidad de todos los procesos que preceden a las operaciones de acabado para producir características de una superficie más aceptable. Como ya se describió en este libro, esto puede lograrse mediante la selección apropiada de herramientas, los parámetros de proceso, los fluidos para trabajo de los metales, las características de las máquinas herramienta y los dispositivos de sujeción de las piezas de trabajo implicadas.

RESUMEN

- El maquinado abrasivo suele ser necesario y económico cuando la dureza de la pieza de trabajo es alta, los materiales son frágiles y los requisitos de acabado superficial y tolerancia dimensional resultan elevados.
- Los abrasivos convencionales son el óxido de aluminio y el carburo de silicio. Los superabrasivos son el nitruro de boro cúbico y el diamante. La friabilidad de los granos abrasivos es un factor importante en su comportamiento, como lo son la forma y el tamaño de los granos.
- Los discos de rectificado consisten en una combinación de granos abrasivos y agentes aglutinantes. Las características importantes de los discos son el tipo de aglutinante y el grado y la dureza del grano abrasivo. Los discos también pueden reforzarse para mantener su integridad si se desarrolla una grieta durante su uso.
- El desgaste de los discos de rectificado es una consideración importante en la calidad de la superficie y la integridad del producto rectificado. El afilado y ajuste de los discos son operaciones básicas y se realizan mediante diversas técnicas.
- Existen varios procesos de maquinado abrasivo y maquinaria de rectificado superficial, externo e interno. El maquinado abrasivo también se utiliza para procesos de remoción de material a gran escala (como rectificado de avance lento), haciéndolo competitivo con procesos de maquinado como el fresado y torneado.
- La selección de abrasivos y variables del proceso, incluyendo fluidos para rectificado, es importante para obtener el acabado superficial y la precisión dimensional deseados. En caso contrario, pueden desarrollarse daños a las superficies (como quemado, agrietamiento por calor, esfuerzos residuales perjudiciales y traqueteo).
- Existen diversas operaciones de acabado para mejorar el acabado superficial. Sin embargo, dado que pueden contribuir en forma significativa al costo del producto, son importantes la selección e implantación adecuadas de estas operaciones.
- El rebabeo puede ser necesario para ciertos componentes acabados. Los métodos que se utilizan comúnmente son acabado vibratorio, acabado en tambor y chorro abrasivo, aunque también existen la energía térmica y otros métodos.

TÉRMINOS CLAVE

Abrasivos	Energía específica	Pulido químico-mecánico
Abrasivos aglutinados	Esmerilado de desbaste	Quemado
Abrasivos recubiertos	Estructura del disco	Quemadura metalúrgica
Abrillantado	Friabilidad	Rebaba
Acabado	Gel sembrado	Rebabeo
Afilado	Grado	Rebabeo robótico
Aglutinante resinoide	Honeado	Rectificabilidad
Aglutinante vitrificado	Lapeado	Rectificado
Agrietamiento por calor	Maquinado por flujo abrasivo	Rectificado de avance lento
Ajuste	Maquinado ultrasónico	Rectificado de bajo esfuerzo
Caras de desgaste	Maquinado ultrasónico rotatorio	Rectificado por banda
Carburo de silicio	Maquinado vibratorio	Relación de rectificado
Cepillado con alambre	Marcas de traqueteo	Revenido
Chispas	Microrréplica	Sonotrodo
Desgaste por rozamiento del grano (atrición)	Nitruro de boro cúbico	Superabrasivos
Diamante	Número de grano	Superacabado
Discos de corte libre	Óxido de aluminio	Tamaño de grano
Discos rectificado	Profundidad de corte del disco	Tapado
Dureza del disco	Pulido	Vidriado
Electropulido	Pulido asistido por campo magnético	
	Pulido de flotación magnética	

BIBLIOGRAFÍA

- Andrew, C., Howes, T. D. y Pearce, T. R. A., *Creep Feed Grinding*, Industrial Press, 1985.
- ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
- Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
- Farago, F. T., *Abrasive Methods Engineering*, Vol. 1 y Vol. 2, Industrial Press, 1976 y 1980.
- Gillespie, L. K., *Deburring and Edge Finishing Handbook*, Society of Manufacturing Engineers/American Society of Mechanical Engineers, 2000.
- , *Hand Deburring—Increasing Shop Productivity*, Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- Hwa, L. S., *Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing*, Academic Press, 1999.
- King, R. I. y Hahn, R. S., *Handbook of Modern Grinding Technology*, Chapman & Hall/Methuen, 1987.
- Krar, S., *Grinding Technology*, 2a. ed., Delmar Publishers, 1995.
- Krar, S. y Ratterman, E., *Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond*, McGraw-Hill, 1990.
- Machinery's Handbook*, Industrial Press, actualizado periódicamente.
- Machining Data Handbook*, 3a. ed., 2 vols., Machinability Data Center, 1980.
- Malkin, S., *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*, Wiley, 1989.
- Marinescu, I. D. (ed.), *Handbook of Ceramics Grinding & Polishing*, Noyes, 1998.
- Maroney, M. L., *A Guide to Metal and Plastic Finishing*, Industrial Press, 1991.
- Metzger, J. L., *Superabrasive Grinding*, Butterworth, 1986.
- Nachtman, E. S. y Kalpakjian, S., *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations*, Marcel Dekker, 1985.
- Salmon, S. C., *Modern Grinding Process Technology*, McGraw-Hill, 1992.
- Schneider, A. F., *Mechanical Deburring and Surface Finishing Technology*, Marcel Dekker, 1990.

Shaw, M. C., *Principles of Abrasive Processing*, Oxford, 1996.
 Sluhan, C. (ed.), *Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application*, Society of Manufacturing Engineers, 1992.
 Szymanski, A. y Borkowski, J., *Technology of Abrasives and Abrasive Tools*, Ellis Horwood, 1992.

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 1: *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 1983.

Webster, J. A., Marinescu, I. D. y Trevor, T. D., *Abrasive Processes*, Marcel Dekker, 1999.

PREGUNTAS DE REPASO

- 26.1 ¿Qué es un abrasivo? ¿Qué son los superabrasivos?
- 26.2 ¿Cómo es el tamaño de un grano abrasivo en relación con su número?
- 26.3 ¿Por qué la mayoría de los abrasivos se fabrican de forma sintética?
- 26.4 Describa la estructura de un disco de rectificado y sus características.
- 26.5 Explique las características de cada tipo de aglutinante utilizado en los abrasivos aglutinados.
- 26.6 Describa (a) el grado, y (b) la estructura, de los abrasivos aglutinados.
- 26.7 ¿Qué causa las chispas del rectificado? ¿Es útil observarlas? Explique su respuesta.
- 26.8 Defina quemadura metalúrgica.
- 26.9 Explique los mecanismos mediante los cuales se desgastan los discos de rectificado.
- 26.10 Defina (a) friabilidad; (b) cara de desgaste; (c) relación de rectificado, (d) ajuste, y (e) afilado.

- 26.11 Explique qué significa un disco de rectificado que actúa “blando” o que actúa “duro”.
- 26.12 ¿Qué es el rectificado de avance lento y cuáles son sus ventajas?
- 26.13 ¿Cuál es el principio del maquinado ultrasónico?
- 26.14 Liste las operaciones de acabado que se utilizan comúnmente en las operaciones de manufactura. ¿Por qué son necesarias? Explique por qué deben minimizarse.
- 26.15 ¿En qué se diferencia el rectificado sin centros del rectificado cilíndrico?
- 26.16 ¿Cuáles son las diferencias entre los abrasivos recubiertos y los aglutinados?
- 26.17 ¿Qué es el agrietamiento por calor en el rectificado? ¿Cuál es su importancia?
- 26.18 ¿Cuál es el propósito del “lodo abrasivo” en el pulido químico-mecánico? ¿Qué pasa con el líquido?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 26.19 ¿Por qué las operaciones de rectificado son necesarias para los componentes que ya se han maquinado mediante los procesos descritos en los capítulos 23 y 24?
- 26.20 Explique por qué existen tantos tipos, formas y tamaños diferentes de discos de rectificado.
- 26.21 Explique las razones de la gran diferencia entre las energías específicas comprendidas en el maquinado (tabla 21.2) y en el rectificado (tabla 26.2).
- 26.22 Ya se indicó que el maquinado ultrasónico se adapta mejor para materiales duros y frágiles. Explique por qué.
- 26.23 Explique por qué las partes con formas irregulares, esquinas afiladas, recesos profundos y proyecciones puntiagudas pueden ser difíciles de pulir.
- 26.24 Explique las razones por las que se han desarrollado tantas operaciones de rebabeo con los años.
- 26.25 ¿Qué precauciones deben tomarse al rectificar con alta precisión? Comente sobre la máquina, los pará-

metros del proceso, el disco de rectificado y los fluidos de rectificado.

- 26.26 ¿Por qué disminuye la temperatura de rectificado con el aumento de la velocidad de trabajo (ecuación 26.4)? ¿Esto significa que para una velocidad de trabajo de cero, la temperatura es infinita? Explique su respuesta.
- 26.27 Describa las similitudes y diferencias en la acción de los fluidos para el trabajo de los metales entre el maquinado y el rectificado.
- 26.28 ¿Qué factores podrían contribuir al traqueteo en el rectificado? Explique por qué.
- 26.29 La relación de rectificado (G) depende de lo siguiente: el tipo de disco de rectificado, dureza de la pieza de trabajo, profundidad de corte del disco, velocidades de disco y pieza de trabajo y el tipo de fluido para rectificado. Explique por qué.

26.30 Por lo general se recomienda que, al rectificar aceros endurecidos, el disco de rectificado sea de un grado relativamente blando. Explique la razón.

26.31 En la figura 26.4, las caras abrasivas apropiadas se muestran con una flecha para cada tipo de disco. Explique por qué las demás caras de los discos no deben utilizarse para rectificado y qué consecuencias puede haber al hacerlo..

26.32 Explique los factores implicados en la selección del tipo apropiado de abrasivo para una operación particular de rectificado.

26.33 Describa los efectos de la cara de desgaste en la operación general de rectificado.

26.34 ¿Qué dificultades, en su caso, podrían encontrarse en el rectificado de termoplásticos? ¿Termofijos? ¿Cerámicos?

26.35 ¿Existen similitudes entre el rectificado, el honeado, el pulido y el abrillantado? Explique su respuesta.

26.36 ¿La relación de rectificado es importante en la evaluación de la economía de una operación de rectificado? Explique su respuesta.

26.37 Se sabe que el rectificado puede producir un acabado superficial muy fino en una pieza de trabajo. ¿Esto es necesariamente una indicación de la calidad de una parte? Explique su respuesta.

26.38 ¿Cuáles son las consecuencias de permitir que aumente la temperatura durante el rectificado?

26.39 Si no se hace apropiadamente, el honeado puede producir orificios abocinados, ondulados, abarrilados o cónicos. Explique por qué es posible que suceda esto.

26.40 Las aplicaciones de joyería requieren el rectificado de los diamantes a las formas deseadas. ¿Cómo se realiza, dado que el diamante es el material más duro que se conoce?

26.41 ¿Por qué las velocidades son mucho más altas en el rectificado que en el corte?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

26.42 Calcule las dimensiones de las virutas en el rectificado superficial para las siguientes variables del proceso: $D = 8$ pulgadas, $d = 0.001$ pulgada, $v = 100$ pies/min, $V = 6000$ pies/min, $C = 500$ por pulg² y $r = 20$.

26.43 Si se duplica la resistencia del material de la pieza de trabajo, ¿cuál sería el porcentaje de disminución de la profundidad de corte del disco (d) para mantener la misma fuerza de grano, manteniendo constantes todas las demás variables?

26.44 Supóngase que se está realizando una operación de rectificado superficial en las siguientes condiciones: $D = 200$ mm, $d = 0.1$ mm, $v = 40$ m/min y $V = 3000$ m/min. Después, estas condiciones se cambian como sigue: $D = 150$ mm, $d = 0.1$ mm, $v = 30$ m/min, y $V = 2500$ m/min. ¿Cuán diferente es el aumento de temperatura respecto del incremento que ocurre con las condiciones iniciales?

26.45 Calcule el aumento de porcentaje del costo de la operación de rectificado si la especificación para el acabado superficial de una parte se cambia de 63 a 16 μ in.

26.46 Supóngase que el costo de energía para rectificar una parte de aluminio con un requisito específico de energía de 8 W·s/mm³ es \$0.90 de dólar por pieza. ¿Cuál sería el costo de la energía por realizar la misma operación si el material de la pieza de trabajo fuera acero para herramientas T15?

26.47 Con base en la información proporcionada en el capítulo 23 y en éste, comente la posibilidad de producir un orificio de 10 mm que tiene 100 mm de profundidad en una aleación de cobre: (a) por taladrado convencional, y (b) por rectificado interno.

26.48 Al describir los procesos de rectificado, no se proporcionó el tipo de ecuaciones en relación con avances, velocidades, velocidades de remoción de material, tiempo total de rectificado, etc., como lo hemos hecho en las operaciones de torneado y fresado en los capítulos 23 y 24. Estudie las relaciones cuantitativas correspondientes y desarrolle dichas ecuaciones para operaciones de rectificado.

26.49 ¿Cuáles serían las respuestas al ejemplo 26.1 si la pieza de trabajo fuera titanio de alta resistencia y la anchura de corte $w = 0.75$ pulgadas? Proporcione sus respuestas en newtons.

26.50 Se sabe que, en el rectificado, ocurre agrietamiento por calor al rectificar a una velocidad de husillo de 4000 rpm, un diámetro de disco de 10 pulgadas y una profundidad de corte de 0.0015 pulgada para una velocidad de avance de 50 pies/min. Por esta razón, el procedimiento operativo estándar consiste en mantener la velocidad del husillo a 3500 rpm. Si se utiliza un disco nuevo de 8 pulgadas de diámetro, ¿qué velocidad de husillo puede usarse antes de que ocurra agrietamiento por calor? ¿Qué velocidad de husillo debe emplearse para mantener las mismas temperaturas de rectificado que las encontradas con las condiciones operativas existentes?

26.51 Se desea rectificar una aleación dura de aluminio aeroespacial. Se va a retirar una profundidad de 0.003 pulgada de una sección cilíndrica de 10 pulgadas de largo y 4 pulgadas de diámetro. Si cada parte se va a rectificar

en no más de un minuto, ¿cuál es el requisito de potencia aproximada para la rectificadora? ¿Qué sucede si el material se cambia a aleación dura de titanio?

26.52 Una operación de rectificado ocurre con un disco de rectificado de 10 pulgadas con una velocidad de husillo de 3000 rpm. La velocidad de avance de la pieza de trabajo es 60 pies/min y la profundidad de corte es 0.002 pulgada. Los termómetros de contacto registran una tempera-

tura máxima de 1800 °F. Si la pieza es de acero, ¿cuál será la temperatura si la velocidad aumenta a 4000 rpm? ¿Qué sucede si la velocidad es de 10,000 rpm?

26.53 Derive una expresión para la velocidad angular de la oblea, como se muestra en la figura 26.30b, en función de la velocidad angular y del radio del paño en el pulido químico-mecánico.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

26.54 Liste y explique los factores que contribuyen al acabado superficial deficiente en los procesos descritos en este capítulo.

26.55 Con los dibujos apropiados, describa los principios de diversos métodos y dispositivos de fijación que se pueden utilizar para los procesos presentados en este capítulo.

26.56 Explique los lineamientos principales de diseño para rectificado.

26.57 ¿Cuál de los procesos descritos en este capítulo es apropiado en particular para piezas de trabajo fabricadas con (a) cerámicos; (b) termoplásticos, y (c) termofijos? ¿Por qué?

26.58 Elabore una tabla completa de las capacidades de los procesos de maquinado abrasivo. Utilizando varias columnas, describa las máquinas comprendidas, el tipo de herramientas abrasivas empleadas, las formas de las piezas en bruto y las partes producidas, los tamaños comunes máximo y mínimo, el acabado superficial, y las tolerancias y capacidades de producción.

26.59 Con base en los datos desarrollados en el problema 26.58, diga lo que piensa en relación con el procedimiento a seguir para determinar qué tipo de máquina herramienta debe seleccionarse para maquinar por medios abrasivos una pieza particular.

26.60 Los discos vitrificados de rectificado (también conocidos como discos cerámicos) utilizan un aglutinante de vidrio para mantener unidos los granos abrasivos. Dado su conocimiento sobre la manufactura de partes de cerámicos (como se indica en el capítulo 18), liste los métodos de producción de discos vitrificados.

26.61 Un tema hasta cierto punto polémico en el rectificado es el efecto del tamaño; es decir, existe un aumento aparente de la resistencia de una pieza de trabajo al reducirse la profundidad de penetración mediante abrasivos para rectificado. Diseñe un montaje experimental mediante el cual se pueda examinar este efecto de tamaño.

26.62 Describa tantos parámetros como sea posible que puedan afectar el acabado superficial final en el rectificado. Incluya parámetros del proceso, así como efectos de instalaciones y equipo.

26.63 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y aplica un examen sobre los as-

pectos numéricos para evaluar los conocimientos de los alumnos. Elabore tres problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

26.64 Investigue en la bibliografía y explique por qué puede ser una guía útil observar el color, el brillo y la forma de las chispas producidas en el rectificado, para identificar el tipo de material que se está rectificando y sus condiciones.

26.65 Revise la figura 26.4 y proporcione posibles aplicaciones de rectificado para cada tipo de disco mostrado en ella.

26.66 Visite una ferretería grande y revise los discos de rectificado en exhibición. Elabore una nota en relación con el marcado de los discos y, con base en el sistema de marcado mostrado en la figura 26.6, comente sus observaciones, incluyendo los tipos más comunes de discos existentes en la ferretería.

26.67 Consiga un disco pequeño de rectificado o una parte de un disco grande. (a) Observe sus superficies utilizando una lupa o un microscopio y compárelas con la figura 26.9. (b) Frote el disco abrasivo oprimiéndolo con fuerza contra varios materiales planos metálicos y no metálicos. Describa lo que observa en relación con las superficies producidas.

26.68 Explique cómo produciría las bolas de acero que se rectifican posteriormente en el tipo de instalaciones mostradas en la figura 26.15.

26.69 Al revisar los procesos de maquinado abrasivo en este capítulo, observará que algunos usan abrasivos aglutinados, mientras que otros utilizan abrasivos sueltos. Haga dos listas por separado de estos procesos y comente sus observaciones.

26.70 ¿Cree que la operación de rectificado por penetración mostrada en la figura 26.17 puede competir con una operación de torneado para producir el mismo tipo de parte? Explique su respuesta.

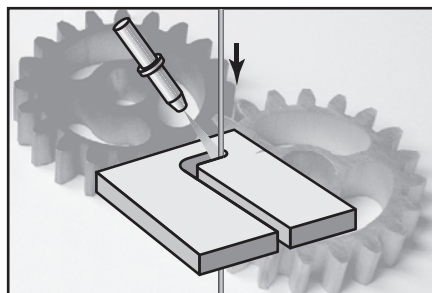
26.71 Observe los patrones de ciclo mostrados en la figura 26.20 y comente por qué se siguen esos patrones particulares.

26.72 Consiga pedazos de lija de papel y tela de esmeril de diferentes espesores. Utilizando una lupa o un microscopio, observe sus características superficiales y compárelas con la figura 26.25.

26.73 En este capítulo describimos los principios de los centros de maquinado y torneado. En el capítulo 27 presentaremos centros similares sobre operaciones de maquinado avanzado. Con base en el contenido de este capítulo, diga si es posible o no diseñar y construir un “centro de

rectificado”. Explique si dicho centro puede realizar todo tipo de operaciones de rectificado o si se limitaría a tipos específicos. También comente las dificultades que se tienen que superar con dichas máquinas y operaciones.

Procesos de maquinado avanzado



CAPÍTULO

27

En este capítulo se presentan procesos de maquinado avanzado que se basan en medios no mecánicos para la remoción de material. Específicamente, se describe lo siguiente:

- Fundamentos de procesos que utilizan la química, la electricidad y los haces de alta energía.
- Características de cada proceso y sus aplicaciones.
- Aspectos competitivos en comparación con otros procesos.

Partes comunes fabricadas: paneles de cubiertas para misiles y aeronaves, álabes para turbinas, boquillas, partes con cavidades complejas y orificios profundos de diámetro pequeño, matrices, corte por láser para láminas metálicas, corte de partes gruesas, metálicas y no metálicas.

Métodos alternativos: maquinado abrasivo, maquinado por ultrasonido y maquinado de precisión.

27.1 | Introducción

Los procesos de maquinado descritos en los capítulos precedentes comprenden la remoción de material por medios mecánicos, ya sea mediante la formación de viruta, abrasión o microvirutas. Sin embargo, existen situaciones en las que los medios mecánicos no son satisfactorios, económicos o incluso posibles, por las siguientes razones:

- La **resistencia** y **dureza** del material de la pieza de trabajo son muy elevadas, por lo común, superiores a 400 HB.
- El material de la pieza de trabajo es muy **frágil** para maquinarlo sin dañar la pieza. Por lo común, éste es el caso de aleaciones con severos tratamientos térmicos, vidrios, cerámicos y partes de metalurgia de polvos.
- La pieza de trabajo es muy **flexible** o muy esbelta para soportar las fuerzas del maquinado o rectificado, o resulta difícil sujetar las partes en dispositivos de soporte y sujeción.
- La **forma** de la parte es *compleja* (fig. 27.1), incluyendo características como perfiles internos y externos u orificios con relaciones elevadas de longitud a diámetro en materiales muy duros.
- Existen requerimientos especiales de **acabado superficial** y **tolerancias dimensionales** que no pueden obtenerse por medio de otros procesos de manufactura o que no son económicos mediante procesos alternos.

27.1 Introducción 835

27.2 Maquinado químico 836

27.3 Maquinado electroquímico 841

27.4 Rectificación electroquímica 845

27.5 Maquinado por descarga eléctrica (electroerosinado) 846

27.6 Maquinado por rayo láser 851

27.7 Maquinado por haz de electrones 854

27.8 Maquinado por chorro de agua 855

27.9 Maquinado por chorro abrasivo 858

27.10 Economía de los procesos de maquinado avanzado 858

EJEMPLO:

27.1 Combinación de corte de rayo láser y punzonado de láminas metálicas 854

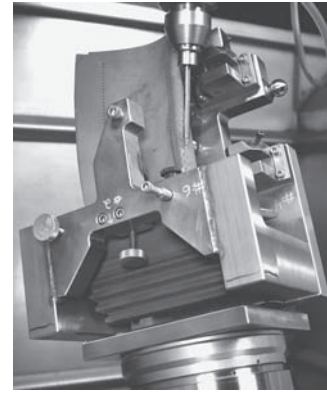
ESTUDIO DE CASO:

27.1 Maquinado electroquímico de un implante biomédico 843

27.2 Manufactura de "stents" 858



(a)



(b)

FIGURA 27.1 Ejemplos de partes fabricadas mediante procesos de maquinado avanzado. (a) Muestras de partes producidas por medio de corte por chorro de agua. (b) Álabes para turbina producido mediante maquinado por descarga eléctrica de émbolo, en un soporte para producir orificios mediante EDM. Fuente: (a) Cortesía de OMAX Corporation. (b) Cortesía de HI-TEK Mfg., Inc.

- No es deseable o aceptable la **elevación de la temperatura**, o los **esfuerzos residuales** desarrollados en la pieza de trabajo durante el procesamiento.

Estos requerimientos han llevado a desarrollar la química, la electricidad, los rayos láser y los haces de alta energía como fuentes de energía para retirar material de las piezas de trabajo metálicas y no metálicas, como se indica en la tabla 27.1. Estos métodos avanzados, a los que en el pasado se llamaba *maquinado no tradicional* o *no convencional*, comenzaron a introducirse en la década de 1940. Como se verá, estos procesos no retiran material mediante la generación de virutas, como en el maquinado y el rectificado, sino por medios como la disolución química, el ataque químico, la fusión, la evaporación y la acción hidrodinámica, algunas veces con la ayuda de partículas finas abrasivas. Una ventaja de estos procesos es que la dureza de la pieza de trabajo no es importante.

Cuando se seleccionan y aplican apropiadamente, los procesos de maquinado avanzado ofrecen ventajas técnicas y económicas sobre los métodos de maquinado más tradicionales. En este capítulo se describen estos procesos, incluyendo sus características, aplicaciones comunes, limitaciones, calidad de los productos, precisión dimensional, acabado superficial y economía.

27.2 | Maquinado químico

El *maquinado químico* (CM, por sus siglas en inglés) se desarrolló a partir de la observación de que los productos químicos atacan y afectan a la mayoría de los metales, piedras y algunos cerámicos, retirando así pequeñas cantidades de material de la superficie. El proceso CM se efectúa mediante la disolución química y el uso de **reactivos** o **atacantes**, como las soluciones ácidas y alcalinas. El maquinado químico es el más antiguo de los procesos de maquinado avanzado y se utiliza en el grabado de piedras y metales, en rebabeo y en la producción de tableros para circuitos impresos y dispositivos microelectrónicos (ver capítulos 28 y 29).

Fresado químico. En el *fresado químico* se producen cavidades poco profundas en placas, láminas, forjas y extrusiones, por lo general para la reducción global de peso (fig. 27.2). Este proceso se ha utilizado en una amplia variedad de metales, con profundidades de remoción de metal hasta de 12 mm (0.5 pulgada). El ataque selectivo del reactivo químico sobre diferentes áreas de la superficie de la pieza de trabajo se controla por me-

TABLA 27.1

Características generales de los procesos de maquinado avanzado		
Proceso	Características	Parámetros de proceso y velocidad característica de remoción de material, o velocidad de corte
Maquinado químico (CM)	Remoción poco profunda en superficies grandes planas o curvas; troquelado de láminas delgadas; bajo costo de herramienta y equipo; adecuado para corridas cortas de producción.	0.0025–0.1 mm/min.
Maquinado electroquímico (ECM)	Formas complejas con cavidades profundas; la velocidad más alta de remoción de material entre otros procesos no tradicionales; herramienta y equipo costoso; alto consumo de potencia; cantidades de producción medias a altas.	V: 5-25 CD; A: 1.5-8 A/mm ² ; 2.5-12 mm/min, dependiendo de la densidad de corriente.
Rectificación electroquímica (ECG)	Corte y afilado de materiales duros, como herramientas de carburo de tungsteno; también se utiliza como proceso de honeado; velocidad de remoción más alta que la rectificación.	A: 1-3 A/mm ² ; comúnmente 25 mm ³ /s por 1000 A.
Maquinado por descarga eléctrica (EDM)	Formado y corte de partes complejas fabricadas con materiales duros; puede producir algún daño superficial; también se usa como proceso de rectificación y corte; herramienta y equipo costoso.	V: 50-380; A: 0.1-500; comúnmente 300 mm ³ /min.
EDM con alambre	Corte de contornos de superficies planas o curvas; equipo costoso.	Varía con el material y el espesor.
Maquinado por rayo láser (LBM)	Corte y producción de orificios en materiales delgados; zona afectada por el calor; no requiere vacío; equipo costoso; consume mucha energía.	0.50-7.5 m/min.
Maquinado por haz de electrones (EBM)	Corte y producción de orificios en materiales delgados; orificios y ranuras muy pequeñas; zona afectada por el calor; requiere vacío; equipo costoso.	1-2 mm ³ /min.
Maquinado por chorro de agua (WJM)	Corte de todo tipo de materiales no metálicos; adecuado para el corte de contornos en materiales flexibles; no causa daño térmico; ruidoso.	Varía de manera considerable con el material.
Maquinado por chorro de agua abrasivo (AWJM)	Corte de una o varias capas de materiales metálicos y no metálicos.	Hasta 7.5 m/min.
Maquinado por chorro abrasivo (AJM)	Corte, ranurado, rebabeo, ataque y limpieza de materiales metálicos y no metálicos; tiende a redondear las aristas afiladas, puede ser peligroso.	Varía de manera considerable con el material.

dio de capas removibles de material (llamado **enmascaramiento**, fig. 27.3a), o mediante la inmersión parcial en el reactivo.

El procedimiento para el fresado químico es el siguiente:

1. Si la parte a maquinar tiene esfuerzos residuales procedentes del procesamiento anterior, primero deben relevarse dichos esfuerzos para evitar el alabeo después del fresado químico.
2. Las superficies se desengrasan y limpian totalmente para asegurar una buena adhesión del material enmascarador y una remoción uniforme del material. También deben eliminarse las cascarillas u otros depósitos producto del tratamiento térmico.
3. Se aplica el material enmascarador. Una práctica común es enmascarar con cintas o pinturas (**enmascarantes**), aunque también se utilizan elastómeros (hule y neopreno) y plásticos (cloruro de polivinilo, polietileno y poliestireno). El material enmascarante no debe reaccionar con el reactivo químico.

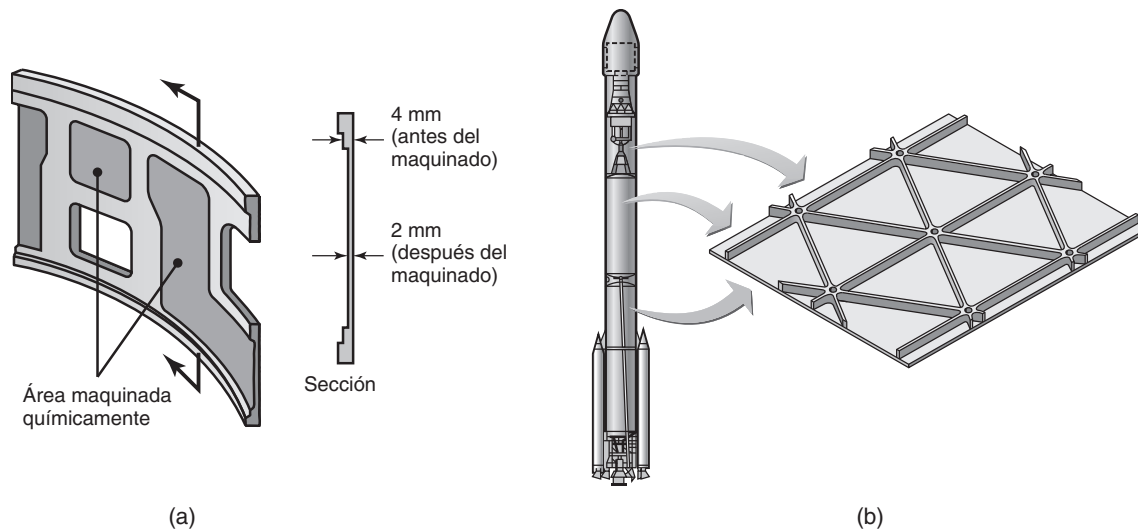


FIGURA 27.2 (a) Sección de panel de cubierta de misil contorneado mediante fresado químico para mejorar la relación rigidez a peso de la parte. (b) Reducción de peso en vehículos para lanzamiento al espacio mediante fresado químico de las placas de aleación de aluminio. Estos paneles se fresan químicamente después de que se les ha dado forma mediante un proceso como formado por rodillos o por ensanchado. El diseño de los patrones de las nervaduras maquinadas químicamente se puede modificar con facilidad a un costo mínimo.

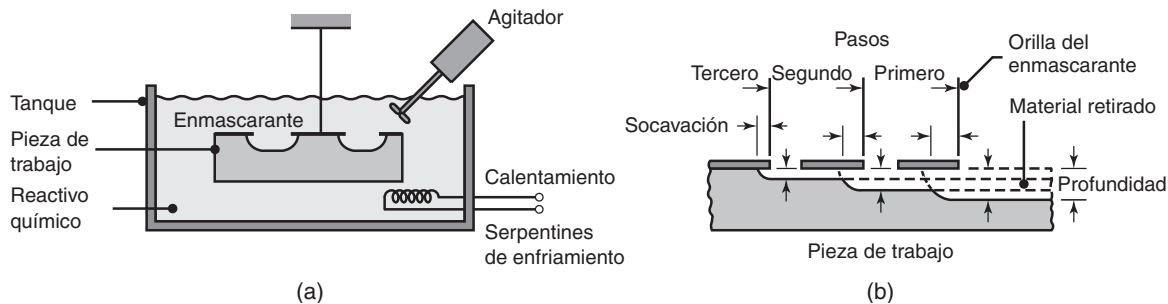


FIGURA 27.3 (a) Esquema del proceso de maquinado químico. Obsérvese que este proceso no implica fuerzas o máquinas herramienta. (b) Etapas en la producción de una cavidad perfilada mediante maquinado químico; nótese la socavación.

4. De ser necesario, el enmascarante que cubre diversas regiones que requieren ataque se retira (pela) mediante la técnica del rayado y pelado.
5. Las superficies expuestas se maquinan químicamente con reactivos atacantes, como hidróxido de sodio (para el aluminio), soluciones de ácidos clorhídrico y nítrico (para los aceros) o cloruro férrico (para los aceros inoxidable). Durante el fresado químico, es importante controlar la temperatura y la agitación (mezclado) a fin de obtener una profundidad uniforme de material retirado.
6. Después del maquinado, las partes deben lavarse totalmente para evitar reacciones posteriores con cualquier residuo atacante, o mediante la exposición al mismo.
7. Se retira el resto del material enmascarador y se limpia y revisa la parte. Obsérvese que dicho material no resulta afectado por el reactivo, pero por lo general se disuelve mediante un diferente tipo de solvente.
8. Se pueden realizar operaciones adicionales de acabado sobre las partes fresadas químicamente.
9. Esta secuencia de operaciones puede repetirse para producir cavidades escalonadas y diversos contornos (fig. 27.3b).

El fresado químico se utiliza en la industria aeroespacial para retirar capas poco profundas de material de grandes componentes de naves aéreas, paneles de la cubierta de misiles y partes extruidas de estructuras aéreas. Las capacidades de los tanques para reactivos son hasta de 3.7 m × 15 m (12 pies × 50 pies). Este proceso también se emplea en la fabricación de dispositivos microelectrónicos y con frecuencia se conoce como **ataque húmedo** para estos productos. En la figura 27.4 se muestran los intervalos de acabado superficial y tolerancias obtenidas mediante el maquinado químico y otros procesos de maquinado.

Es posible que el fresado químico cause algún daño superficial debido al *ataque preferencial* y el *ataque intergranular*, que afectan de manera adversa las propiedades de la superficie. El fresado químico de estructuras soldadas, incluso con soldadura fuerte, puede producir una remoción desequilibrada de material. El fresado químico de las fundiciones puede ocasionar superficies desniveladas, por la porosidad y falta de uniformidad del material.

Troquelado químico. El *troquelado químico* es similar al troquelado de láminas u hojas metálicas en que se utiliza para producir rasgos que traspasan el espesor del material (como se muestra en la fig. 16.4), con la excepción de que el material se retira me-

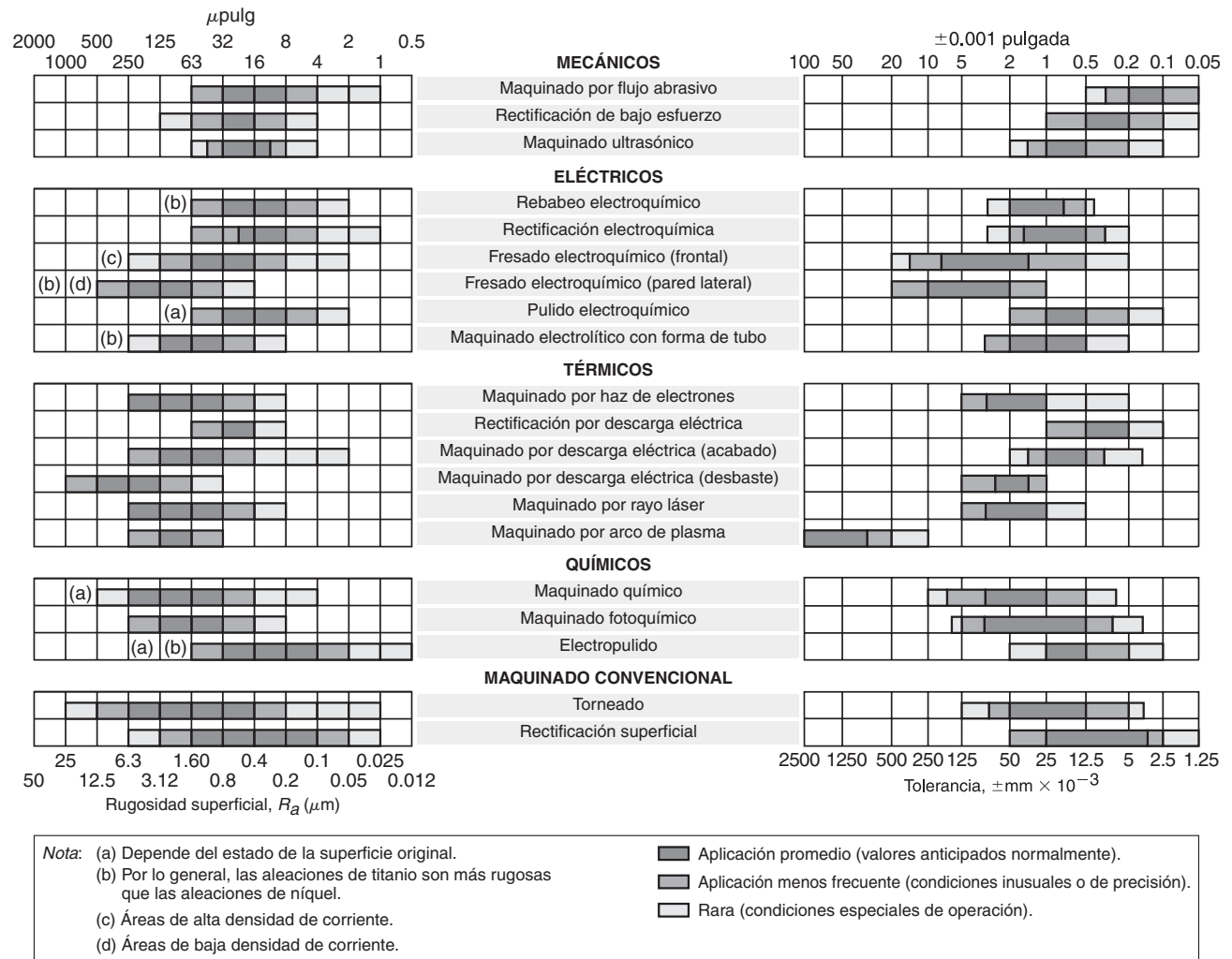


FIGURA 27.4 Rugosidad superficial y tolerancias obtenidas en diversos procesos de maquinado. Obsérvese el amplio intervalo dentro de cada proceso (ver también fig. 23.13). Fuente: *Machining Data Handbook*, 3ª. ed. Copyright © 1980. Utilizado con permiso de Metcut Research Associates, Inc.

diente disolución química, más que por cizallamiento. Las aplicaciones comunes del troquelado químico son el ataque sin dejar rebabas en las tarjetas para circuitos impresos, tableros decorativos y estampados de láminas metálicas delgadas, así como la producción de formas complejas o pequeñas.

Troquelado fotoquímico. El *troquelado fotoquímico* (también llamado fotoataque) es una modificación del fresado químico. El material se retira (por lo general de una delgada lámina) mediante técnicas fotográficas. Se pueden troquelar formas complejas y sin rebabas (fig. 27.5) sobre metales hasta de 0.0025 mm (0.0001 pulgada) de espesor. Este proceso, al que algunas veces se le denomina **maquinado fotoquímico**, también se utiliza para ataque de superficies.

El procedimiento para el troquelado fotoquímico consiste en los siguientes pasos:

1. Se prepara el diseño de la parte a troquelar con una ampliación hasta de 100×. Después se produce un negativo fotográfico y se reduce al tamaño de la parte terminada. Al negativo reducido del diseño se le llama **boceto**. El dibujo original (agrandado) permite que los errores inherentes al diseño se reduzcan en la medida de la reducción (hasta de 100×) para obtener la imagen definitiva del boceto.
2. La lámina en bruto se recubre con un material fotosensible (**fotorresistente**) mediante inmersión, rociado, vaciado centrífugo o recubrimiento con rodillos y se seca en un horno. Con frecuencia, a este recubrimiento se le llama la *emulsión*.
3. El negativo se coloca sobre la pieza recubierta y se expone a la luz ultravioleta, que endurece las áreas expuestas.
4. Se desarrolla la pieza, lo que disuelve las áreas no expuestas.
5. Después la pieza se sumerge en un baño del reactivo (como en el fresado químico), o se rocía con el reactivo, lo que ataca y retira las áreas expuestas.
6. Se retira el material enmascarador y se lava totalmente la parte para retirar todos los residuos químicos.

Las aplicaciones características del troquelado fotoquímico son pantallas finas, tarjetas de circuitos impresos, laminados para motores eléctricos, resortes planos y pantallas para televisores a color. Aunque se requiere mano de obra calificada, los costos del herramental son bajos, el proceso se puede automatizar y es económico para volúmenes de producción medios a altos. El troquelado fotoquímico es capaz de producir partes muy pequeñas en donde resulta muy difícil producir las matrices tradicionales para troquelado (sección 16.2). El proceso también es eficaz para troquelar piezas de trabajo y materiales frágiles.

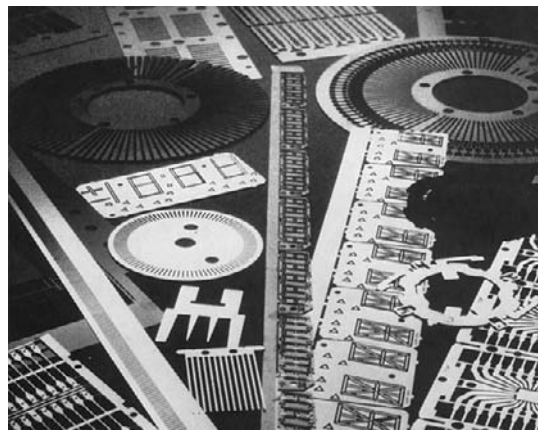


FIGURA 27.5 Diversas partes producidas mediante troquelado químico. Obsérvese el fino detalle. *Fuente:* Cortesía de Buckbee-Mears, St. Paul.

El manejo de los reactivos químicos requiere precauciones y consideraciones especiales de seguridad para proteger a los trabajadores contra la exposición a los productos químicos líquidos y volátiles. Además, la disposición de los subproductos químicos de este proceso es una desventaja importante, aunque algunos de ellos pueden reciclarse.

Consideraciones de diseño para el maquinado químico. Los lineamientos de diseño para el maquinado químico son:

- Ya que el reactivo ataca todas las superficies expuestas de manera continua, deben evitarse los diseños que comprendan esquinas agudas, cavidades profundas y estrechas, conos severos, costuras plegadas o materiales porosos en las piezas de trabajo.
- Debido a que el reactivo ataca el material tanto en la dirección vertical como en la horizontal, se pueden desarrollar *socavaciones* (como se muestra en las áreas bajo las orillas del enmascarante en la fig. 27.3). Por lo común, en el troquelado químico se pueden mantener tolerancias de $\pm 10\%$ del espesor del material.
- Para mejorar la capacidad de producción, la pieza de trabajo debe ser formada mediante otros procesos (como maquinado) antes del maquinado químico.
- Pueden presentarse variaciones dimensionales por los cambios de tamaño en el boceto debido a la humedad y la temperatura. Esta variación se puede minimizar seleccionando de manera apropiada el medio del boceto y controlando el medio ambiente en la generación del mismo y en el área de producción de la planta.
- En la actualidad, el diseño de muchos productos se realiza con sistemas de diseño asistidos por computadora (capítulo 38). Sin embargo, los planos del producto deben traducirse a un protocolo que sea compatible con el equipo para la generación de los bocetos fotoquímicos.

27.3 | Maquinado electroquímico

El *maquinado electroquímico* (ECM, por sus siglas en inglés) es básicamente el inverso de la electrodeposición (sección 34.9). Un **electrolito** actúa como portador de corriente (fig. 27.6) y la alta velocidad de movimiento del electrolito en el espacio entre la pieza de trabajo y la herramienta (por lo común de 0.1 mm a 0.6 mm) arranca y arrastra los iones metálicos de la pieza (**ánodo**) antes de que tengan oportunidad de depositarse en la herramienta (**cátodo**). Obsérvese que la cavidad producida es la imagen hembra coincidente de la forma de la herramienta.

La herramienta con forma, ya sea sólida o tubular, por lo general se produce con latón, cobre, bronce o acero inoxidable. El electrolito es un fluido inorgánico altamente

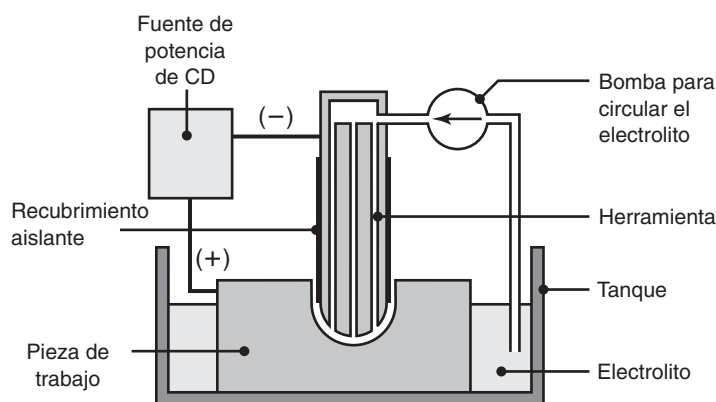


FIGURA 27.6 Esquema del proceso de maquinado electroquímico.

conductor, como solución acuosa de nitrato de sodio. Se bombea a través de los canales de la herramienta a velocidades de 10 a 16 m/s (30 a 50 pies/s). Una fuente de potencia de CD en el intervalo de 10 a 25 V mantiene las densidades de corriente, que para la mayoría de las aplicaciones es de 20 a 200 A/cm² (130 a 1300 A/pulg²) de la superficie activa maquinada.

La *velocidad de remoción de material* (MRR) en el maquinado electroquímico para una eficacia de corriente de 100%, puede estimarse mediante la ecuación:

$$MRR = CI \quad (27.1)$$

donde MRR está en mm³/min, I es la corriente en amperios y C una constante del material en mm³/A-min. Para metales puros, C depende de la valencia; cuanto mayor sea la valencia, menor será su valor.

Existen máquinas que tienen capacidades de corriente tan elevadas como 40,000 A y tan bajas como 5 A. La rapidez de penetración de la herramienta es proporcional a la densidad de corriente. La velocidad de remoción de material se encuentra comúnmente en el intervalo de 1.5 a 4 mm³ por A-min. Como la velocidad de remoción de material es sólo una función de la velocidad de intercambio iónico, no la afecta la resistencia, dureza o tenacidad de la pieza de trabajo.

Capacidades del proceso. El concepto básico del maquinado electroquímico se patentó en 1929 y se desarrolló con rapidez durante las décadas de 1950 y 1960, convirtiéndose en un proceso importante de manufactura, aunque no tan ampliamente utilizado como otros procesos descritos en este capítulo. En general se usa con el propósito de maquinar cavidades y formas complejas en materiales de alta resistencia, sobre todo en la industria aeroespacial para la producción en masa de álabes para turbinas, partes para motores de propulsión y boquillas (fig. 27.7), así como en la industria automotriz (fundiciones para motores y engranes) y en la médica.

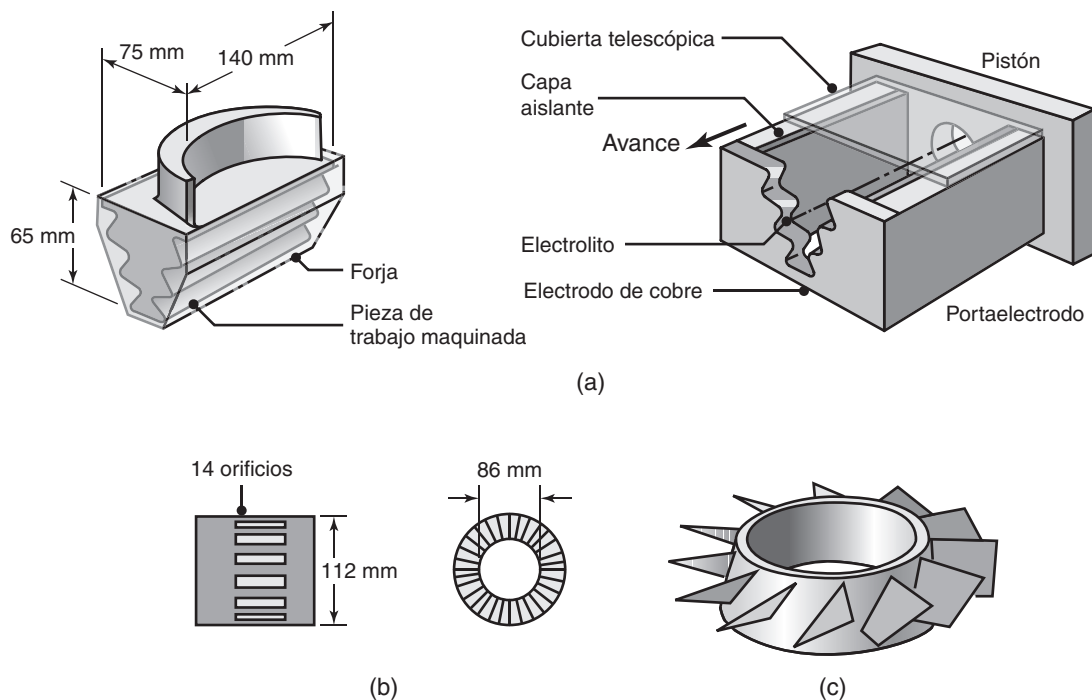


FIGURA 27.7 Partes comunes fabricadas mediante maquinado electroquímico. (a) Álabes de turbina fabricada con aleación de níquel de 360 HB. Obsérvese la forma del electrodo a la derecha. (b) Ranuras delgadas en una jaula de rodamiento de rodillos de acero 4340. (c) Aletas aerodinámicas integrales en el disco de un compresor.

El maquinado electroquímico también se utiliza para maquinar y dar acabado a cavidades de matrices de forja (*estampado de matrices*) y para producir orificios pequeños. Algunas versiones de este proceso se emplean para torneado, refrentado, fresado, ranurado, taladrado, trepanado y perfilado, así como en la producción de tiras y redes metálicas continuas. Las aplicaciones más recientes del ECM incluyen el *micromaquinado* (capítulo 29) para la industria electrónica.

Una modificación del ECM es el *maquinado electrolítico con forma de tubo* (STEM, por sus siglas en inglés), utilizado para taladrar orificios profundos de diámetro pequeño, como en los álabes para turbinas. La herramienta es un tubo de titanio, recubierto con una resina aislante eléctrica. Se pueden taladrar orificios tan pequeños como 0.5 mm, con relaciones de profundidad a diámetro hasta de 300:1.

El proceso ECM deja una superficie brillante, sin rebabas; de hecho, puede utilizarse como proceso de rebabeo. No provoca ningún daño térmico a la parte y la falta de fuerzas de la herramienta evita la distorsión de la parte. Tampoco existe desgaste de la herramienta (ya que sólo se genera hidrógeno en el cátodo) y el proceso es capaz de producir formas complejas. Sin embargo, las propiedades mecánicas de los componentes hacen que el proceso ECM deba compararse con cuidado con los otros métodos de remoción de material.

En la actualidad existen sistemas de maquinado electroquímico como *centros de maquinado controlados numéricamente* con capacidad de altos volúmenes de producción, gran flexibilidad y el mantenimiento de tolerancias cerradas. El proceso ECM también se puede combinar con el maquinado por descarga eléctrica (EDM, por sus siglas en inglés) en la misma máquina. Desarrollos adicionales incluyen sistemas híbridos de maquinado, en los que el ECM y otros procesos de maquinado avanzado (como los que se describen a lo largo de este capítulo) se combinan para aprovechar las capacidades de cada proceso.

Consideraciones de diseño para el maquinado electroquímico. Los lineamientos generales de diseño para el maquinado electroquímico son los siguientes:

- Debido a la tendencia del electrolito a erosionar los perfiles agudos, el maquinado electroquímico no es adecuado para producir esquinas agudas o fondos planos.
- Tal vez sea difícil controlar el flujo del electrolito, por lo que no se pueden producir cavidades irregulares para que adquieran la forma deseada con una precisión dimensional aceptable.
- Los diseños deben considerar pequeños ángulos de salida para maquinar los orificios y cavidades.

ESTUDIO DE CASO 27.1

Maquinado electroquímico de un implante biomédico

Un sistema de reemplazo total de rodilla consta de un implante femoral y tibial, combinado con un inserto de polietileno de peso molecular ultraelevado (UHMWPE, por sus siglas en inglés), como se muestra en la figura 27.8a. El polietileno tiene una resistencia superior al desgaste y una baja fricción contra el implante femoral de una aleación de cobalto-cromo. El inserto de UHMWPE se moldea por compresión (sección 19.7) y el implante metálico se funde y rectifica en sus superficies externas coincidentes.

Los diseñadores de implantes, los ingenieros de manufactura y los médicos se han preocupado en particular por la superficie de contacto en la cavidad del implante metálico, que coincide con una proyección en el inserto de polietileno. Debido a que la rodilla se articula durante el movimiento normal, el polietileno se desliza contra la parte metálica, convirtiéndose en un sitio de desgaste potencialmente serio. Esta geometría es necesaria para asegurar la estabilidad lateral de la rodilla (es decir, para evitar que ésta se pandee en forma lateral).

Para producir una superficie lisa, durante muchos años se había seguido el procedimiento de rectificar las superficies de apoyo del implante metálico utilizando tanto rectificadoras de mano como montadas en levas. Sin embargo, el rectificado producía

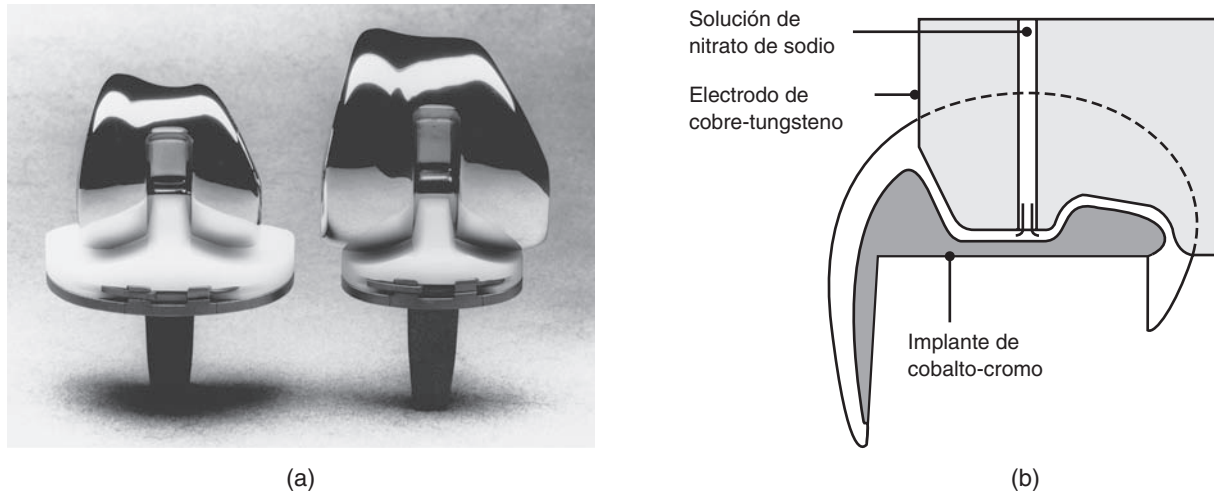


FIGURA 27.8 (a) Dos sistemas de reemplazo total de rodilla que muestran los implantes metálicos (partes superiores) con un inserto de polietileno de peso molecular ultraelevado (partes inferiores). (b) Sección transversal del proceso ECM aplicado al implante metálico. *Fuente:* Cortesía de Biomet, Inc.

una repetitividad y una calidad marginales. Es extremadamente difícil tener acceso a las superficies interiores de esta parte para rectificarlas y es difícil rectificar la aleación de cobalto-cromo. En consecuencia, los procesos de maquinado avanzado (en particular el maquinado electroquímico) eran candidatos ideales para esta operación.

Como se muestra en la figura 27.8b, el procedimiento actual consiste en colocar el implante metálico en un soporte y poner un electrodo de tungsteno con el contorno final deseado muy cerca del implante. El electrolito es una mezcla de nitrato de sodio y agua y se bombea a través de la herramienta, llenando el espacio entre ésta y el implante. Se aplica una fuente de potencia (comúnmente de 10 V y 225 A), produciendo un maquinado electroquímico local de los puntos elevados de la superficie del implante y generando una superficie pulida.

El volumen del flujo de electrolito se puede controlar a fin de maximizar la calidad de la superficie. Si el gasto o caudal es muy bajo, aparecen defectos en la superficie maquinada, como hoyuelos localizados; si el gasto es muy elevado, los tiempos de maquinado se alargan. Los tiempos comunes de maquinado para esta parte son de cuatro a seis minutos.

Fuente: Cortesía de T. Hershberger y R. Redman, Biomet, Inc., Warsaw, Indiana.

27.3.1 Maquinado por pulso electroquímico (PECM)

Este proceso es un refinamiento del ECM; utiliza densidades muy elevadas de corriente (del orden de 1 A/mm^2), pero la corriente es de *pulsos* y no directa. El propósito de los pulsos es eliminar la necesidad de los gastos elevados de electrolito, que limitan la utilidad del ECM en la fabricación de moldes y matrices (estampado de matrices). Las investigaciones han demostrado que el PECM mejora la vida a la fatiga y el proceso se ha propuesto como un método viable para eliminar la capa refundida que deja el maquinado por descarga eléctrica en las superficies de los moldes y las matrices. Las tolerancias obtenidas por lo común van de 20 a $100 \mu\text{m}$.

Algunas máquinas pueden combinar EDM y PECM, por lo que eliminan la necesidad de mover la herramienta y la pieza de trabajo entre los dos procesos. Sin embargo, es difícil mantener una alineación precisa al mover la pieza de trabajo del EDM al PECM. Si se desalinea de manera significativa, todo el pulido ocurrirá en donde la sepa-

ración es menor y se presentará la pasivación, en donde la separación es mayor. De igual manera, el proceso deja residuos metálicos suspendidos en la solución acuosa, lo que es dañino para el ambiente si se desecha sin darle algún tratamiento.

El proceso ECM también puede ser eficaz para micromaquinado. La ausencia total de desgaste de la herramienta implica que el proceso se puede utilizar en componentes electrónicos de precisión, aunque es necesario superar el problema de la erosión debida a las corrientes parásitas. En la actualidad, las máquinas ECM han adquirido una flexibilidad creciente mediante la implantación de controles numéricos.

27.4 Rectificación electroquímica

La *rectificación electroquímica* (ECG, por sus siglas en inglés) combina el maquinado electroquímico con el rectificado convencional. El equipo utilizado es similar a una rectificadora convencional, excepto que el disco es un cátodo rotatorio con partículas abrasivas insertas (fig. 27.9a). El disco es metálico con abrasivos de diamante o de óxido de aluminio aglutinados y gira a una velocidad superficial de 1200 a 2000 m/min (4000 a 7000 pies/min).

Los abrasivos tienen dos funciones: (1) servir como aislantes entre el disco y la pieza de trabajo, y (2) retirar mecánicamente productos electrolíticos del área de trabajo. Para la fase de maquinado electroquímico de la operación se suministra una corriente de solución de electrolito (por lo común, nitrato de sodio). Las densidades de corriente van de 1 a 3 A/mm² (500 a 2000 A/pulg²). En el ECG, la mayor parte de la remoción de material se efectúa mediante la acción electrolítica y, por lo regular, menos de 5% del metal se retira mediante la acción abrasiva del disco. En consecuencia, el desgaste del disco es muy bajo y la pieza de trabajo se mantiene fría. Los cortes de acabado suelen realizarse mediante la acción de rectificado, pero sólo para producir una superficie con buen acabado y precisión dimensional.

El proceso ECG es adecuado para aplicaciones similares al fresado, rectificado y aserrado (fig. 27.9b), pero no se adapta a las operaciones de estampado de matrices. Este proceso puede aplicarse con éxito en carburos y aleaciones de alta resistencia. Ofrece una ventaja distintiva sobre el rectificado tradicional mediante discos de diamante cuando se procesan materiales muy duros, donde el desgaste del disco puede ser alto. Existen máquinas ECG con controles numéricos que mejoran la precisión dimensional y la repetitividad y que aumentan la productividad.

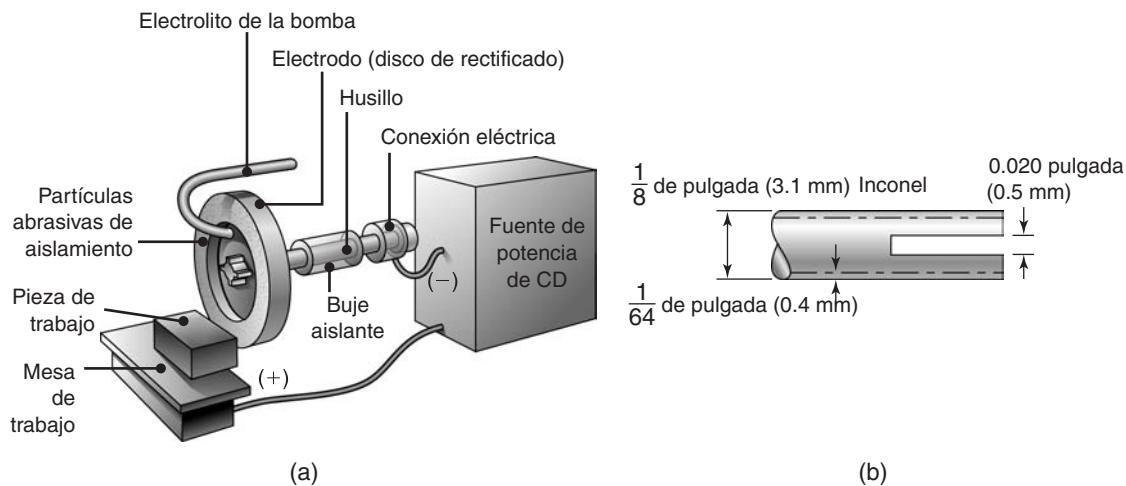


FIGURA 27.9 (a) Esquema del proceso de rectificación electroquímica. (b) Ranura delgada producida en un tubo redondo de aleación de níquel mediante este proceso.

El **honeado electroquímico** combina la fina acción abrasiva del honeado con la acción electroquímica. Aunque el equipo es costoso, este proceso es hasta cinco veces más rápido que el honeado convencional y la herramienta puede durar diez veces más. Se utiliza fundamentalmente para dar acabado a superficies cilíndricas interiores.

Consideraciones de diseño para el rectificado electroquímico. Además de las que ya se indicaron para el maquinado electroquímico, el ECG requiere dos consideraciones adicionales de diseño:

- Los diseños deben evitar los radios internos agudos.
- Si se van a producir superficies planas, la superficie rectificada electroquímicamente debe ser más angosta que el disco de rectificado.

27.5 Maquinado por descarga eléctrica (electroerosinado)

El principio del *maquinado por descarga eléctrica* o *electroerosinado* (EDM, por sus siglas en inglés) (también llamado *maquinado por electrode descarga* o *por erosión por chispa*) se basa en la erosión de los metales mediante descargas por chispa. Sabemos que cuando se tocan dos alambres conductores de corriente se produce un arco. Si observamos de cerca el punto de contacto entre ambos alambres, notamos que se ha erosionado una pequeña porción del metal, dejando un pequeño cráter.

Aunque se sabe de este fenómeno desde el descubrimiento de la electricidad, no fue sino hasta la década de 1940 cuando se desarrolló un proceso de maquinado basado en este principio. El proceso EDM se ha vuelto una de las tecnologías de producción más utilizadas en la manufactura.

Principio de operación. El sistema EDM básico consiste en una herramienta con forma (*electrodo de penetración*) y la pieza de trabajo conectada a una fuente de potencia de CD, colocada en un fluido **dieléctrico** (que no conduce electricidad) (fig. 27.10a). Cuando la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza de trabajo es lo suficientemente elevada, el dieléctrico es vencido y se descarga una chispa transitoria a través del fluido, retirando una cantidad muy pequeña de metal de la superficie de la pieza. La descarga del capacitor se repite a velocidades de entre 200 y 500 kHz, con voltajes que por lo común se encuentran entre 50 y 380 V y corrientes de 0.1 a 500 A. En general, el volumen de material retirado por chispa de descarga está en el intervalo de 10^{-6} a 10^{-4} mm^3 (10^{-10} a 10^{-8} pulg³).

El proceso EDM sólo se puede utilizar en cualquier material que sea conductor eléctrico. El punto de fusión y el calor latente de fusión son propiedades físicas importantes que determinan el volumen de metal retirado por descarga. Al aumentar estas cantidades disminuye la velocidad de remoción de material, la cual se puede estimar a partir de la siguiente fórmula empírica aproximada:

$$\text{MRR} = 4 \times 10^4 I T_w^{-1.23} \quad (27.2)$$

donde MRR está en mm³/min, I es la corriente en amperios y T_w el punto de fusión de la pieza de trabajo en °C.

La pieza de trabajo se sujeta dentro del tanque que contiene el fluido dieléctrico y sus movimientos se controlan mediante sistemas controlados numéricamente. La separación entre la herramienta y la pieza (*sobrecorte*) es crítica. Por ello, el avance descendente de la herramienta se controla por medio de un servomecanismo, que mantiene una separación constante de manera automática.

Debido a que el proceso no comprende energía mecánica, la dureza, resistencia y tenacidad del material de la pieza de trabajo no afecta necesariamente la rapidez de re-

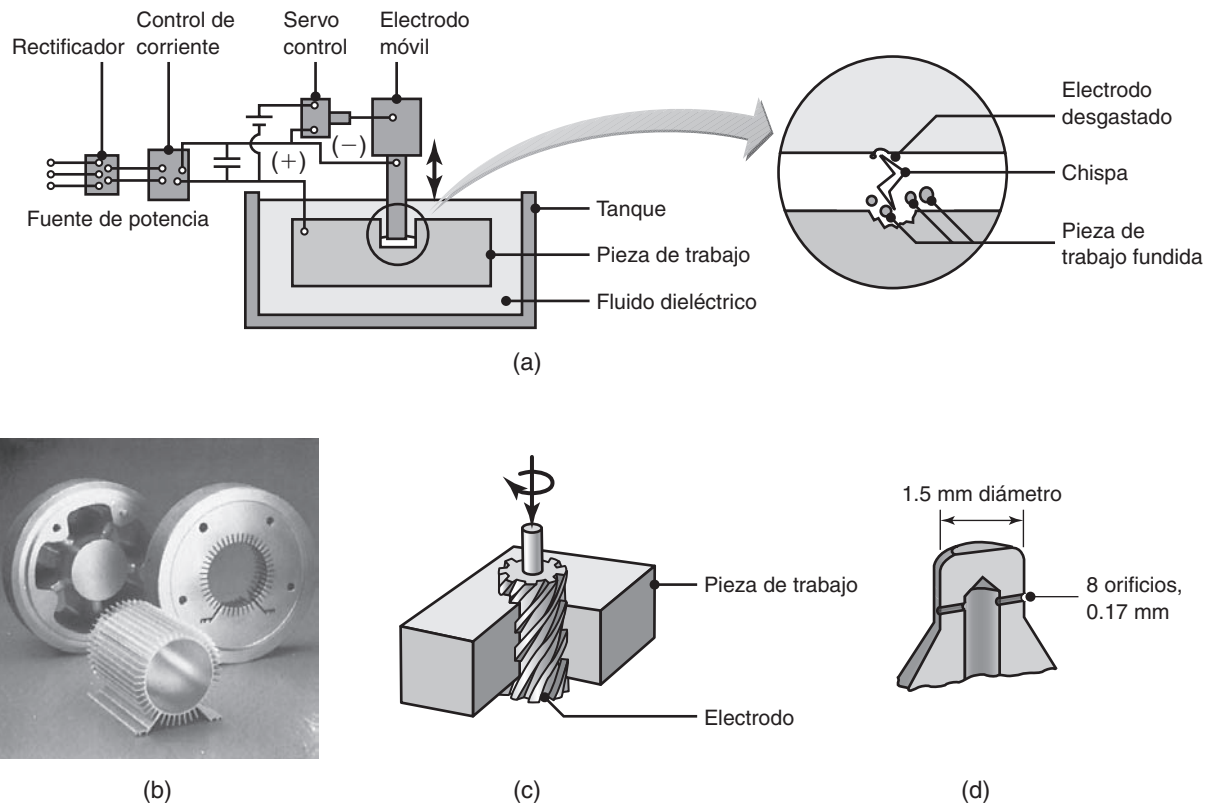


FIGURA 27.10 (a) Esquema del proceso de maquinado por descarga eléctrica. Éste es uno de los procesos de maquinado más utilizados, en particular para aplicaciones de estampado de matrices. (b) Ejemplos de cavidades producidas por el proceso de maquinado por descarga eléctrica, usando electrodos con forma. Dos partes redondas (traseras) son el juego de matrices para extruir la pieza de aluminio mostrada al frente (ver también fig. 15.9b). (c) Cavidad espiral producida mediante EDM mediante un electrodo de rotación lenta, similar a la rosca de un tornillo. (d) Orificios en una boquilla de inyección de combustible producida mediante EDM; el material es acero tratado térmicamente. Fuente: Cortesía de AGIE USA Ltd.

moción. Por lo común, para controlar la rapidez de remoción se varía la frecuencia de descarga, o la energía por descarga, el voltaje y la corriente. La rapidez de remoción y la rugosidad aumentan con (a) el incremento de la densidad de corriente, y (b) la disminución de la frecuencia de las chispas.

Fluidos dieléctricos. Las funciones del fluido dieléctrico son:

1. Actuar como aislante hasta que el potencial sea lo suficientemente alto.
2. Proporcionar un medio de enfriamiento.
3. Actuar como medio de limpieza y retiro de los desechos en el espacio entre electrodo y pieza.

Los fluidos dieléctricos más comunes son los aceites minerales, aunque también se utilizan el queroseno y el agua destilada y desionizada en aplicaciones especiales. Existen asimismo fluidos claros de baja viscosidad; aunque son más costosos, facilitan la limpieza. Las máquinas se equipan con una bomba y un sistema de filtrado para el fluido dieléctrico.

Electrodos. En general, los electrodos para el EDM se fabrican con grafito, aunque también se utiliza latón, cobre o aleaciones de cobre-tungsteno. A las herramientas se les puede formar además mediante moldeado, fundición, metalurgia de polvos o técnicas de

maquinado CNC. Se han usado electrodos de alambre de tungsteno tan pequeños como 0.1 mm (0.005 pulgada) de diámetro para producir orificios con relaciones de profundidad a diámetro hasta de 400:1.

Las chispas en este proceso también erosionan el electrodo, cambiando así su geometría y afectando de manera adversa la forma producida y su precisión dimensional. Por lo tanto, el *desgaste de la herramienta (electrodo)* es un factor importante. La *relación de desgaste* se define como la relación del volumen del material retirado de la pieza de trabajo y el volumen de desgaste de la herramienta. Esta relación va de aproximadamente 3:1 para electrodos metálicos hasta 100:1 para electrodos de grafito.

Se ha demostrado que el desgaste de la herramienta está relacionado con los puntos de fusión de los materiales involucrados: cuanto menor es el punto de fusión del electrodo, mayor será la relación de desgaste. Igualmente, cuanto mayor es la corriente, mayor será el desgaste. En consecuencia, los electrodos de grafito tienen la mayor resistencia al desgaste. El desgaste de la herramienta se puede minimizar invirtiendo la polaridad y utilizando herramientas de cobre, proceso al que se denomina EDM sin desgaste.

Capacidades del proceso. El maquinado por descarga eléctrica tiene numerosas aplicaciones, como la producción de matrices para forja, extrusión, fundición a presión, moldeo por inyección y grandes componentes de láminas metálicas para carrocerías automotrices (**centros de maquinado de estampado de matrices** con control numérico computarizado). Otras aplicaciones incluyen orificios profundos de diámetros pequeños que utilizan alambre de tungsteno como electrodo, ranuras estrechas en partes, orificios de enfriamiento en álabes para turbinas de superaleaciones y diversas formas intrincadas (ver fig. 27.10b y c). Se pueden producir cavidades escalonadas controlando los movimientos relativos de la pieza de trabajo en relación con el electrodo (fig. 27.11).

Debido a la estructura superficial fundida y resolidificada (refundición), las altas velocidades de remoción de material producen un acabado superficial rugoso con una deficiente integridad superficial y con bajas propiedades a la fatiga. Por lo tanto, los cortes de acabado se efectúan a bajas rapidezces de remoción, o la capa refundida se retira posteriormente mediante operaciones de acabado. Se ha demostrado que el acabado superficial puede mejorarse haciendo oscilar el electrodo en un movimiento planetario en amplitudes de 10 a 100 μm .

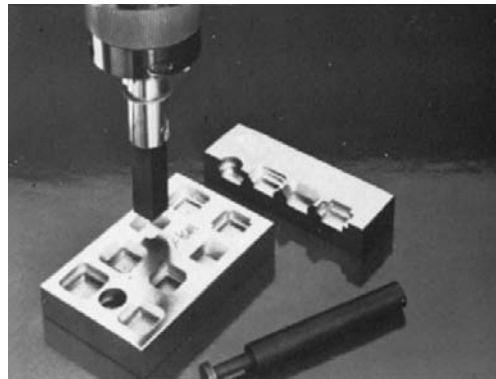


FIGURA 27.11 Cavidades escalonadas producidas con un electrodo cuadrado mediante el proceso EDM. La pieza de trabajo es mueve en las dos direcciones horizontales principales y su movimiento se sincroniza con el movimiento descendente del electrodo para elaborar estas cavidades. También se muestra un electrodo redondo capaz de producir cavidades redondas o elípticas. *Fuente:* Cortesía de AGIE USA Ltd.

Consideraciones de diseño para el EDM. Los lineamientos generales de diseño para el maquinado por descarga eléctrica son los siguientes:

- Las partes deben diseñarse de manera que a los electrodos se les pueda dar forma apropiada y económica.
- Deben evitarse las ranuras profundas y las aberturas estrechas.
- Para obtener una producción económica, el acabado superficial especificado no debe ser demasiado fino.
- Para lograr una alta capacidad de producción, la remoción de grandes volúmenes de material debe realizarse por procesos convencionales (operaciones de desbaste).

27.5.1 EDM con alambre

Una variación del EDM es el *EDM con alambre* (fig. 27.12), o *corte con alambre por descarga eléctrica*. En este proceso, similar al corte de contornos con una sierra de banda (ver fig. 24.25), un alambre de movimiento lento se desplaza a lo largo de una trayectoria prescrita, cortando la pieza de trabajo. Este proceso se utiliza para cortar placas hasta de 300 mm (12 pulgadas) de espesor y para fabricar punzones, herramientas y matrices a partir de metales duros. También puede cortar componentes intrincados para la industria electrónica. En la figura 27.13a se muestra una placa gruesa que se está cortando mediante este proceso, y en la figura 27.13b se presenta una máquina de EDM con alambre.

En general, el alambre se fabrica con latón, cobre, tungsteno o molibdeno; también se utilizan alambres recubiertos con zinc o latón y con recubrimientos múltiples. Comúnmente, el diámetro del alambre es de alrededor de 0.30 mm (0.012 pulgada) para cortes de desbaste y 0.20 mm (0.008 pulgada) para cortes de acabado. El alambre debe tener una alta conductividad eléctrica y resistencia a la tensión, ya que el esfuerzo que actúa sobre él es por lo regular de 60% de su resistencia a la tensión.

Por lo general, el alambre sólo se utiliza una vez, ya que es relativamente económico en comparación con el tipo de operación que realiza. Se desplaza a una velocidad constante que va de 0.15 a 9 m/min (6 a 360 pulgadas/min) y se mantiene un espacio constante (saque) durante el corte. La tendencia en el uso de fluidos dieléctricos es hacia los fluidos transparentes, de baja viscosidad.

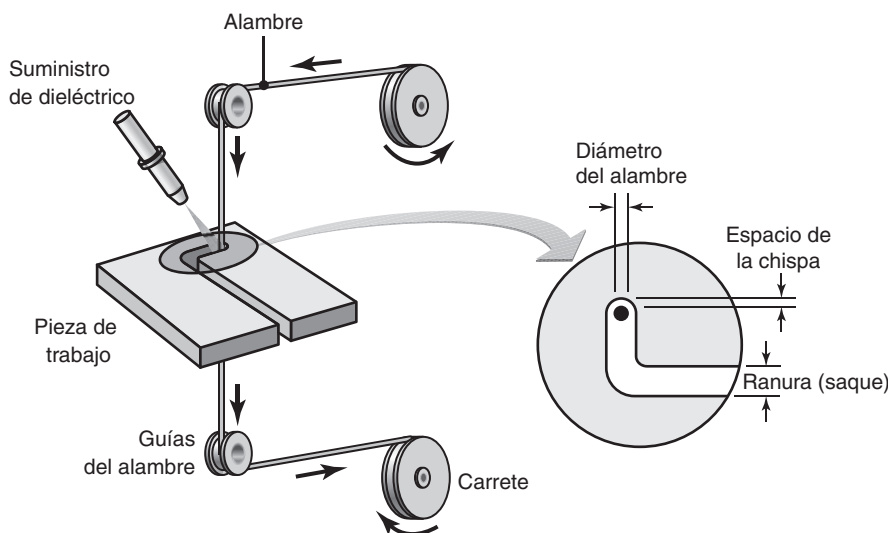


FIGURA 27.12 Esquema del proceso EDM con alambre. Se pueden efectuar hasta 50 horas de maquinado con un carrete de alambre, que después se desecha.

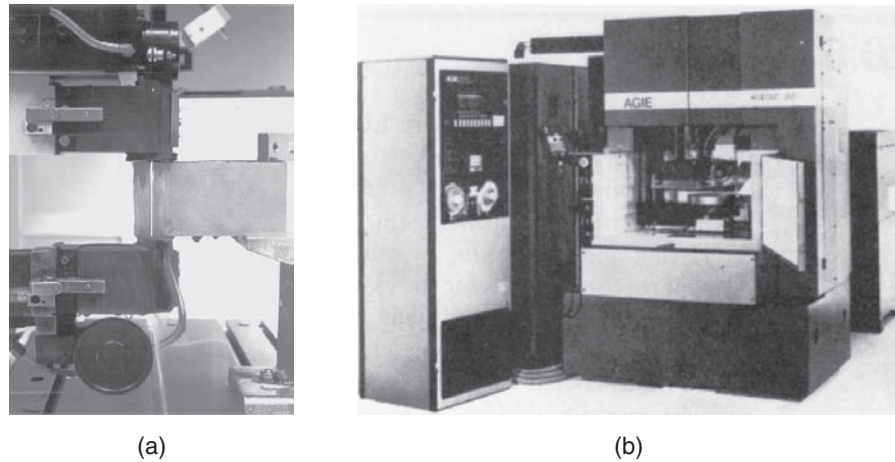


FIGURA 27.13 (a) Corte de una placa gruesa con EDM con alambre. (b) Máquina de EDM con alambre controlada por computadora. *Fuente:* Cortesía de AGIE USA Ltd.

En general, la velocidad de corte se da en términos del área de la sección transversal cortada por unidad de tiempo. Los ejemplos comunes son: $18,000 \text{ mm}^2/\text{h}$ ($28 \text{ pulg}^2/\text{h}$) para una herramienta de acero de 50 mm (2 pulgadas) de espesor, y $45,000 \text{ mm}^2/\text{h}$ ($70 \text{ pulg}^2/\text{h}$) para aluminio de 150 mm (6 pulgadas) de espesor. Estas rapidezces de remoción indican una velocidad de corte lineal de $18,000/50 = 360 \text{ mm/h} = 6 \text{ mm/min}$ y $45,000/150 = 300 \text{ mm/h} = 5 \text{ mm/min}$, respectivamente.

Las máquinas modernas de alambre EDM (**centros de maquinado EDM con alambre de corte de ejes múltiples**) son capaces de producir formas tridimensionales y están equipadas con características como:

- Controles computarizados para controlar la trayectoria de corte del alambre (fig. 27.13b) y su ángulo respecto del plano de la pieza de trabajo.
- Cabezales múltiples para cortar dos partes al mismo tiempo.
- Características como controles para evitar el rompimiento del alambre.
- Características de autoenhebrado automático en caso de ruptura del alambre.
- Estrategias de maquinado programado para optimizar la operación.

Dos máquinas de dos ejes, controladas por computadora, pueden producir formas cilíndricas de manera similar a las operaciones de torneado o rectificado cilíndrico. Muchas máquinas modernas de EDM con alambre permiten controlar el avance y los extremos de recuperación del alambre para que se desplacen en forma independiente en dos direcciones principales, por lo que se pueden producir partes cilíndricas.

27.5.2 Rectificación por descarga eléctrica

En la *rectificación por descarga eléctrica* (EDG, por sus siglas en inglés), el disco de rectificación está fabricado con grafito o latón y no contiene abrasivos. El material se retira de la superficie de la pieza de trabajo mediante descargas por chispa entre el disco rotatorio y la pieza. Fundamentalmente, este proceso se utiliza para herramientas y matrices de carburo, aunque también puede usarse con partes frágiles, como agujas quirúrgicas, tubos de pared delgada y estructuras de panel. El proceso ECDG es más rápido que el EDG, pero el consumo de potencia es mayor. El proceso EDG se puede combinar con la rectificación electroquímica. En ese caso, al proceso se le llama **rectificación por descarga electroquímica** (ECDG, por sus siglas en inglés).

El material se retira mediante la acción química (con las descargas eléctricas desde el disco de grafito rompiendo la película de óxido) y se limpia por medio del flujo

de electrolito. La velocidad de remoción de material en el EDG se puede estimar a partir de la ecuación:

$$\text{MRR} = KI \quad (27.3)$$

donde MRR está en mm^3/min , I es la corriente en amperios y K un factor del material de la pieza de trabajo en $\text{mm}^3/\text{A-min}$. Por ejemplo, $K = 4$ para el carburo de tungsteno y $K = 16$ para el acero.

En el **aserrado** con EDM se utiliza un arreglo similar a la sierra de banda o sierra circular (aunque sin dientes) con el mismo circuito eléctrico que para el EDM. Se pueden producir cortes estrechos con altas tasas de remoción de material. Debido a que las fuerzas de corte son despreciables, este proceso también se puede usar en componentes delgados y esbeltos.

27.6 | Maquinado por rayo láser

En el *maquinado por rayo láser* (LBM, por sus siglas en inglés) la fuente de energía es un **láser** (acrónimo en inglés de amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación), que concentra energía óptica sobre la superficie de la pieza de trabajo (fig. 27.14a). La fuente de energía de alta densidad altamente concentrada funde y evapora porciones de la pieza de manera controlada. Este proceso (que no requiere vacío) se utiliza para maquinar varios materiales metálicos y no metálicos.

Existen varios tipos de láseres utilizados en las operaciones de manufactura (tabla 27.2):

CO_2 (por pulsos u onda continua)

Nd: YAG (neodimio: itrio-aluminio-granate)

Nd: vidrio, rubí

Láseres Excimer (de las palabras *excitado* y *dimero*, que significa dos meros o dos moléculas de la misma composición química).

En el LBM, la *reflectividad* y *conductividad térmica* de la superficie de la pieza de trabajo, así como su calor específico y sus calores latentes de fusión y evaporación, son parámetros físicos importantes. Cuanto menores sean estas cantidades, más eficiente será el proceso. La profundidad de corte se puede expresar como:

$$t = \frac{CP}{vd} \quad (27.4)$$

TABLA 27.2

Aplicaciones generales de los rayos láser en la manufactura	
Aplicación	Tipo de láser
Corte	
Metales	PCO_2 , CWCO_2 , Nd:YAG, rubí
Plásticos	CWCO_2
Cerámicos	PCO_2
Taladrado	
Metales	PCO_2 , Nd:YAG, Nd: vidrio, rubí
Plásticos	Excimer
Marcado	
Metales	PCO_2 , Nd:YAG
Plásticos	Excimer
Cerámicos	Excimer
Tratamiento superficial, metales	CWCO_2
Soldadura, metales	PCO_2 , CWCO_2 , Nd:YAG, Nd: vidrio, rubí

Nota: P = Por pulsos, CW = onda continua; Nd: YAG = neodimio: itrio-aluminio-granate

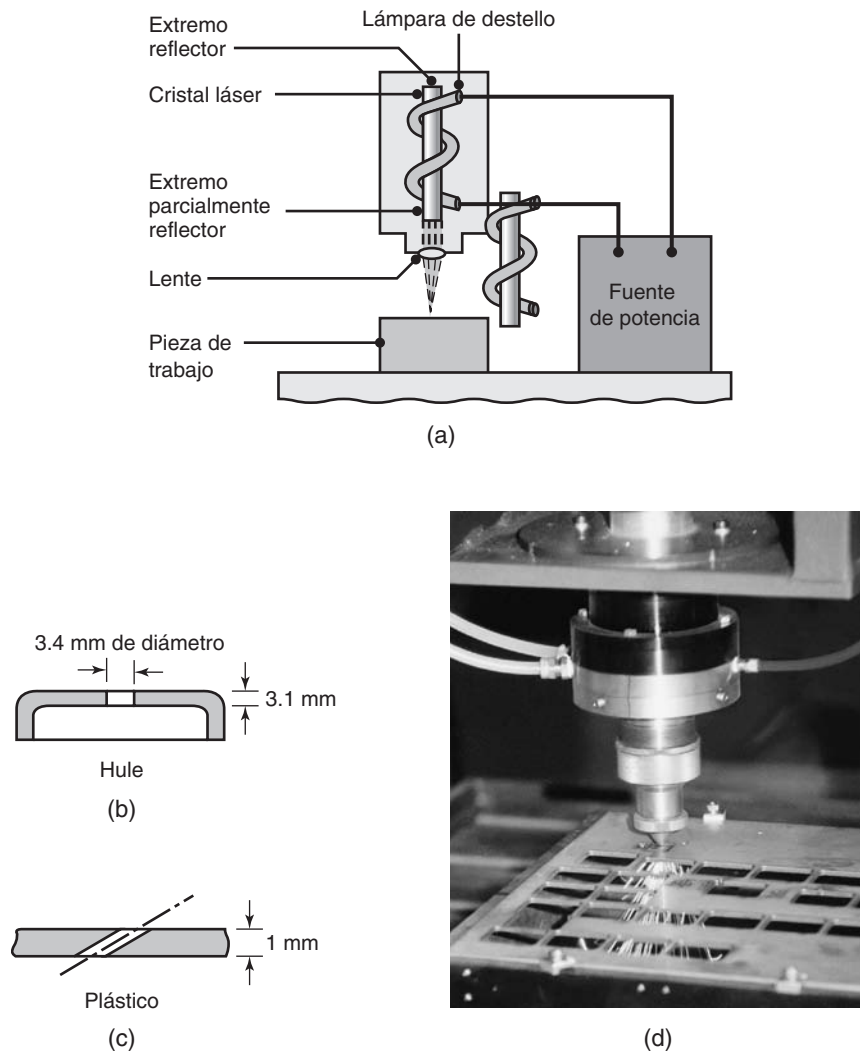


FIGURA 27.14 (a) Esquema del proceso de maquinado por rayo láser. (b) y (c) Ejemplos de orificios producidos en partes no metálicas mediante LBM. (d) Corte de lámina metálica con un rayo láser. Fuente: (d) Cortesía de Rofin-Sinar, Inc.

donde t es la profundidad, C una constante para el proceso, P la entrada de potencia, v la velocidad de corte y d el diámetro del punto del láser. Los picos de densidad de energía de los rayos láser se encuentran en el intervalo de 5 a 200 kW/mm².

Por lo general, la superficie producida por el LBM es rugosa y tiene una *zona afectada por el calor* (como se indica en la sección 30.9), que en aplicaciones críticas tal vez sea necesario retirar o darle tratamiento térmico. La anchura del corte es un factor que debe considerarse; así sucede en otros procesos de corte, como el aserrado, el EDM con alambre y el maquinado por haz de electrones.

Los rayos láser pueden utilizarse en combinación con una corriente de gas (como oxígeno) a fin de aumentar la absorción de energía (*soplete de rayo láser*) para cortar hojas metálicas. El corte por rayo láser asistido por alta presión de gas inerte (nitrógeno o argón) se usa en acero inoxidable y aluminio; deja una arista libre de óxido que

puede mejorar la soldabilidad. Las corrientes de gas también tienen la importante función de retirar por soplado el material fundido y vaporizado de la superficie de la pieza de trabajo.

Capacidades del proceso. El maquinado por rayo láser se utiliza ampliamente para taladrado, trepanado y corte de metales, materiales no metálicos, cerámicos y materiales compósitos (fig. 27.14b y c). La naturaleza abrasiva de los materiales compósitos y la limpieza de la operación han hecho del maquinado por rayo láser una opción atractiva respecto de los métodos tradicionales de maquinado. Se pueden producir orificios tan pequeños como los de 0.005 mm (0.0002 pulgada) con una relación de profundidad a diámetro de 50:1 en diversos materiales, aunque un mínimo más práctico es 0.025 mm (0.001 pulgada). Con los rayos láser se pueden cortar placas de acero tan gruesas como las de 32 mm (1.25 pulgadas).

El maquinado por rayo láser se ha utilizado de manera creciente en las industrias electrónica y automotriz. Por ejemplo, se están taladrando con láser los orificios de purga para cubiertas de bombas de combustible y los orificios de lubricación en los cubos de transmisión. Los orificios de enfriamiento de los álabes, en la primera etapa de producción de los motores de propulsión del Boeing 747, también se producen por medio de láser. Mediante el maquinado por láser se han obtenidos ahorros significativos de costos, de modo que el proceso está compitiendo con el maquinado por descarga eléctrica.

Los rayos láser también se utilizan en las siguientes aplicaciones:

- **Soldadura.**
- **Tratamiento térmico** de pequeña escala, localizado en metales y cerámicos para modificar sus propiedades mecánicas y tribológicas superficiales.
- **Fabricación** de partes, como números, letras, códigos, etc. El marcado también se puede efectuar mediante (a) tinta; (b) dispositivos mecánicos como punzones, pernos, estiletes, rodillos o mediante estampado, y (c) por ataque químico. Aunque el equipo es más costoso que el utilizado en otros métodos, el marcado y grabado con láser se ha vuelto muy común debido a su precisión, reproducibilidad, flexibilidad, facilidad de automatización y aplicación en línea en la manufactura.

La *flexibilidad* inherente del proceso de corte con láser, incluyendo la aplicación del rayo con fibra óptica, la simplicidad de los soportes, los bajos tiempos de configuración y la disponibilidad de máquinas con capacidades eléctricas múltiples y sistemas robóticos tridimensionales de corte con láser controlados por computadora, es una característica atractiva. Por lo tanto, el corte de láminas con rayo láser puede competir exitosamente con los procesos tradicionales de troquelado descritos en el capítulo 16. En la actualidad se realizan esfuerzos para combinar los dos procesos, a fin de mejorar la eficiencia global. (Ver ejemplo 27.1).

Se debe tener extrema precaución con los rayos láser. Incluso los de baja potencia pueden provocar daños a la retina si no se siguen las precauciones apropiadas.

Consideraciones de diseño para el LBM. Los lineamientos generales de diseño para el maquinado por rayo láser son los siguientes:

- Deben evitarse los diseños con esquinas agudas, ya que es difícil producirlas.
- Los cortes profundos producen paredes cónicas.
- La reflectividad de la superficie de la pieza de trabajo es un factor que debe considerarse en el maquinado por rayo láser; se prefieren las superficies mate y sin pulir, ya que reflejan menos.
- Debe investigarse cualquier efecto adverso en las propiedades de los materiales maquinados que haya sido provocado por las altas temperaturas locales y la zona afectada por el calor.

EJEMPLO 27.1 Combinación de corte de rayo láser y punzonado de láminas metálicas

Como se ha visto, los procesos de corte por láser y punzonado tienen sus respectivas ventajas y limitaciones en relación con los aspectos tanto técnicos como económicos. En general, las ventajas del corte con láser son: (a) lotes menores; (b) flexibilidad de operación; (c) una amplia variedad de espesores; (d) capacidad para producir prototipos; (e) materiales y compósitos que sería difícil cortar de otra manera, y (f) las complicadas geometrías que se pueden programar.

Las ventajas y desventajas del punzonado incluyen: (a) se requieren grandes tamaños de lote para justificar económicamente la compra del herramental; (b) partes un tanto simples; (c) una gama pequeña de espesores de partes; (d) geometrías fijas y limitadas (incluso cuando se utilizan torretas); (e) producción rápida, y (f) integración con el proceso posterior después del punzonado.

Es evidente que los dos procesos cubren áreas diferentes pero complementarias. No es difícil visualizar partes con algunas características que se pueden producir mejor mediante uno de los procesos y otras con particularidades que se pueden trabajar mejor con el otro proceso.

Se han diseñado y construido máquinas de modo que los procesos y dispositivos de soporte se puedan utilizar de manera conjunta a su mayor capacidad, aunque sin interferir en los límites operativos de cada uno de ellos. El propósito de combinarlos es aumentar la eficacia global y la productividad de los procesos de manufactura para partes que se encuentran dentro de las capacidades de cada uno de los dos procesos, en forma similar al concepto de los centros de maquinado descritos en la sección 25.2. Por ejemplo, se han equipado prensas de punzonado de torreta con un cabezal láser integrado; la máquina puede punzonar o cortar con láser, pero no puede hacer ambas cosas de manera simultánea.

Deben considerarse muchos factores en dicha combinación, relacionados con las características de cada operación: (1) la variedad de tamaños, espesores y formas a producir, y cómo deben anidarse; (2) los tiempos de proceso y de configuración, incluyendo la carga, fijación y descarga de las partes; (3) la programación para el corte, y (4) las capacidades de proceso de cada método, incluyendo las características dinámicas, vibraciones e impacto del punzonado (y el aislamiento) que pueden alterar los ajustes y alineaciones de los componentes láser.

27.7 | Maquinado por haz de electrones

La fuente de energía en el *maquinado por haz de electrones* (EBM, por sus siglas en inglés) consiste en electrones de alta velocidad, que golpean la superficie de la pieza de trabajo y generan calor (fig. 27.15). Las máquinas utilizan voltajes en el intervalo de 50 a 200 kV para acelerar los electrones a un promedio de entre 50% y 80% de la velocidad de la luz. Las aplicaciones de este proceso son semejantes a las del maquinado por rayo láser, excepto que el EBM requiere vacío. En consecuencia, se usa mucho menos que el maquinado por rayo láser.

El maquinado por haz de electrones puede utilizarse para cortar con mucha precisión una amplia variedad de metales. El acabado superficial es mejor y la anchura de corte es mucho más estrecha que la de otros procesos de corte térmico. (Ver también la sección 30.7 sobre *soldadura por haz de electrones*). La interacción del haz de electrones con la superficie de la pieza de trabajo produce peligrosos rayos X. Por lo tanto, el equipo sólo debe ser usado por personal altamente capacitado.

Corte por arco de plasma. En el corte por arco de plasma (PAC, por sus siglas en inglés), se utilizan *haces de plasma* (gas ionizado) para cortar con rapidez láminas y placas ferrosas y no ferrosas. Las temperaturas generadas son muy elevadas (9400 °C;

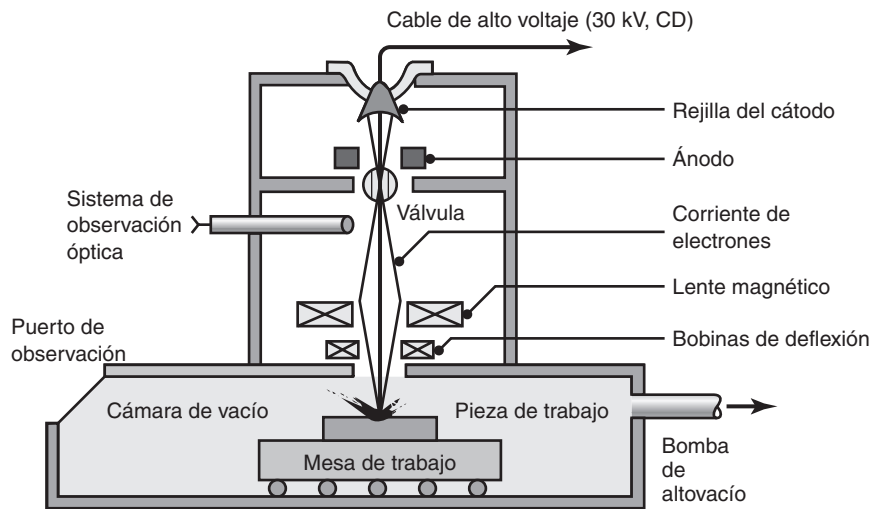


FIGURA 27.15 Esquema del proceso de maquinado por haz de electrones. A diferencia del LBM, este proceso requiere vacío, por lo que el tamaño de la pieza de trabajo se limita al tamaño de la cámara de vacío.

17,000 °F en el soplete con oxígeno como gas de plasma). En consecuencia, el proceso es rápido, la anchura de corte es pequeña y el acabado superficial es bueno. Se pueden cortar partes hasta de 150 mm (6 pulgadas) de espesor. Las velocidades de remoción de material son mucho más altas que las asociadas con los procesos EDM y LBM, y se pueden maquinar partes con gran reproducibilidad. Hoy en día, el corte con arco de plasma está muy automatizado y usa controladores programables.

Consideraciones de diseño para el EBM. En general, los lineamientos para el EBM son similares a los del LBM. Las consideraciones adicionales son:

- Como las cámaras de vacío tienen capacidad limitada, las partes o los lotes deben coincidir lo más posible con el tamaño de la cámara para obtener una alta capacidad de producción por ciclo.
- Si una parte requiere maquinado por haz de electrones sólo en una pequeña porción de la pieza de trabajo, debe considerarse manufacturarla como los componentes más pequeños y ensamblarlos después del maquinado por haz de electrones.

27.8 Maquinado por chorro de agua

Cuando metemos la mano en un chorro de agua o aire, sentimos una considerable fuerza concentrada actuando sobre ella. Esta fuerza es el resultado del cambio de momento de la corriente y, de hecho, es el principio en que se basa la operación de las turbinas de agua o de gas. En el *maquinado por chorro de agua* (WJM, por sus siglas en inglés), (también llamado **maquinado hidrodinámico**), esta fuerza se utiliza en operaciones de corte y rebabeo (fig. 27.16). (Ver también *martillado por chorro de agua*, sección 34.2).

El chorro del agua actúa como una sierra y corta una estrecha ranura en el material. Por lo común se utiliza un nivel de presión de unos 400 MPa (60 ksi) para obtener una operación eficiente, aunque pueden generarse presiones hasta de 1400 MPa (200 ksi). Los diámetros de las boquillas para el chorro varían de 0.05 mm a 1 mm (0.002 a 0.040 pulgada). En la figura 27.16b se muestra una máquina de corte por chorro de agua y su forma de operación. Pueden cortarse varios materiales, incluyendo plásticos, textiles, hule, productos de madera, papel, piel, materiales aislantes, ladrillo y materiales compósitos (fig. 27.16c).

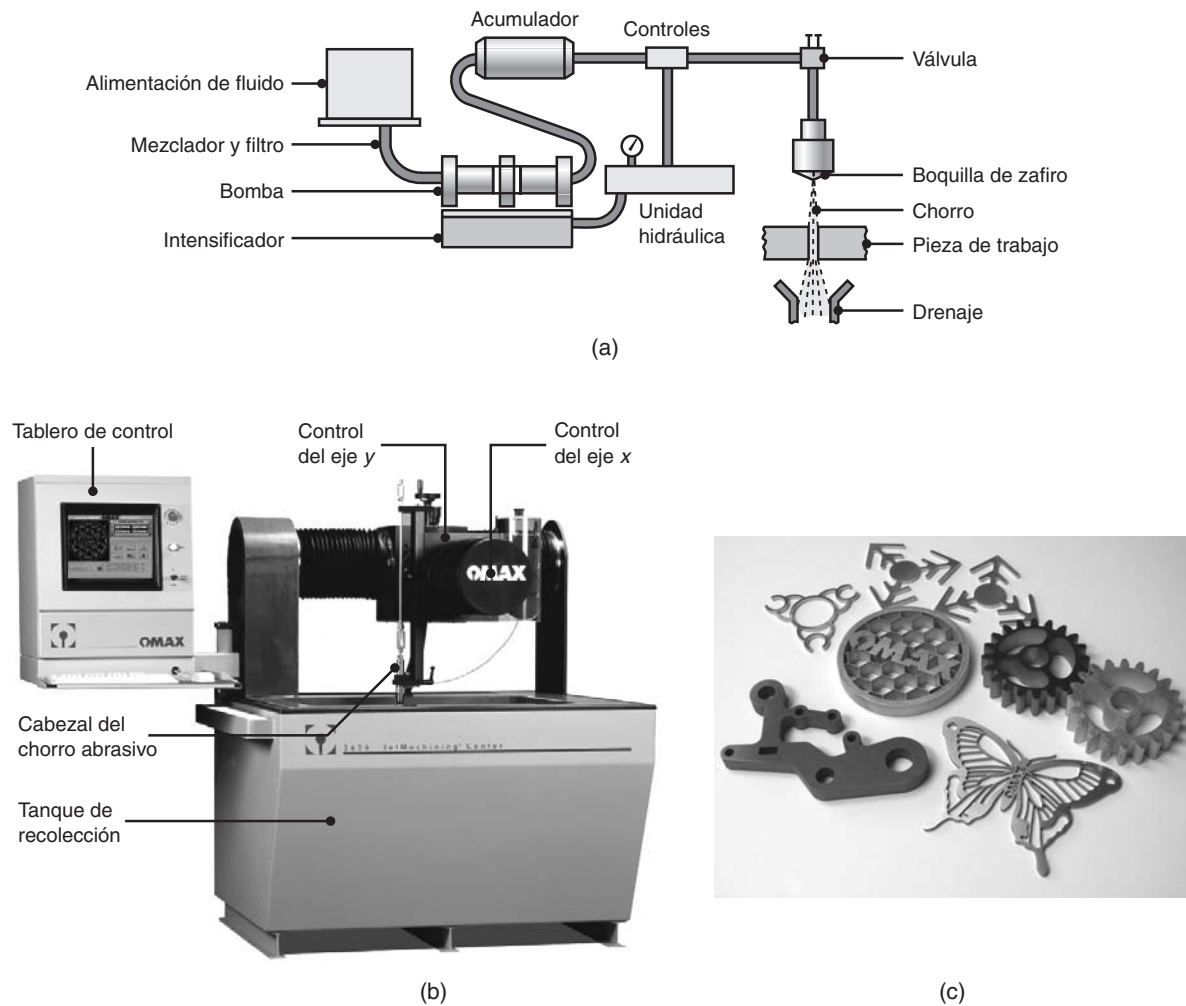


FIGURA 27.16 (a) Esquema del proceso de maquinado por chorro de agua. (b) Máquina de corte por chorro de agua controlada por computadora. (c) Ejemplos de diversas partes no metálicas producidas mediante el proceso de corte por chorro de agua. Fuente: Cortesía de OMAX Corporation.

Dependiendo de los materiales, los espesores pueden ser hasta de 25 mm (1 pulgada) y mayores. Las cubiertas de vinilo y espuma para los tableros automovilísticos (así como algunas piezas de la carrocería) se están cortando con equipo de maquinado por chorro de agua guiado por robot, que utiliza ejes múltiples. Debido a que es una operación eficaz y limpia si se compara con otros procesos de corte, también se usa en la industria de procesamiento de alimentos para cortar y rebanar productos alimenticios.

Las ventajas de este proceso son:

- Los cortes se pueden iniciar en cualquier lugar, sin necesidad de orificios taladrados previamente.
- No se produce calor.
- No ocurre la deflexión del resto de la pieza de trabajo, por lo que el proceso es adecuado para materiales flexibles.
- La pieza de trabajo sólo se moja ligeramente.
- Las rebabas producidas son mínimas.
- Es un proceso de manufactura ambientalmente seguro.

Maquinado por chorro de agua abrasivo. En el *maquinado por chorro de agua abrasivo* (AWJM, por sus siglas en inglés), el chorro de agua contiene partículas abrasivas (como carburo de silicio u óxido de aluminio) que incrementan la velocidad de remoción de material, superando la del maquinado por chorro de agua. Se pueden cortar materiales metálicos, no metálicos y compósitos avanzados de diversos espesores en una o varias capas.

Este proceso es adecuado en particular para materiales sensibles al calor que no pueden maquinarse mediante procesos en los que se genera calor. Las velocidades de corte pueden ser hasta de 7.5 m/min (25 pies/min) para los plásticos reforzados, aunque mucho menores para los metales. En consecuencia, este proceso puede no ser aceptable para situaciones en que se requieren grandes capacidades de producción.

El tamaño mínimo de orificio que se puede producir satisfactoriamente hasta la fecha es de unos 3 mm (0.12 pulgada); la máxima profundidad del orificio es de 25 mm (1 pulgada). Con máquinas de ejes múltiples, controladas por robots, se pueden maquinar partes tridimensionales hasta las dimensiones de acabado. En los sistemas modernos de AWJM, el nivel óptimo de abrasivos en el chorro se controla de manera automática. La vida útil de la boquilla se ha mejorado produciéndola con rubíes, zafiros y materiales compósitos con base de carburo (fig. 27.16a).

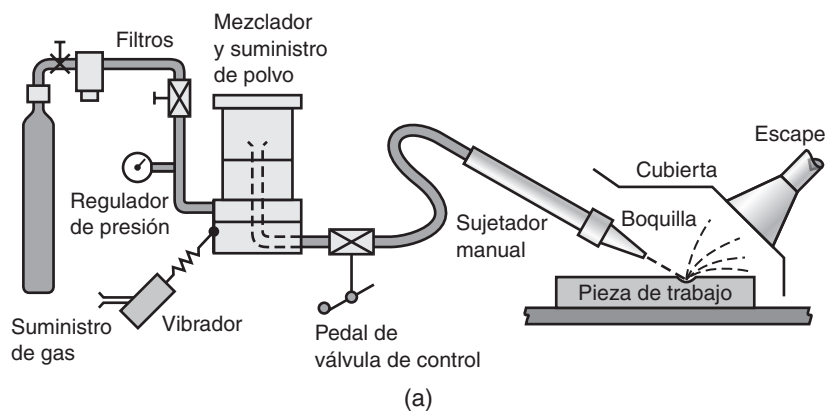


FIGURA 27.17 (a) Esquema del proceso de maquinado por chorro abrasivo. (b) Ejemplos de partes producidas mediante maquinado de chorro abrasivo, fabricadas con acero inoxidable 304 de 50 mm (2 pulgadas) de espesor. Fuente: Cortesía de OMAX Corporation.

27.9 | Maquinado por chorro abrasivo

En el *maquinado por chorro abrasivo* (AJM, por sus siglas en inglés), se dirige un chorro de alta velocidad de aire seco, nitrógeno o bióxido de carbono, que contiene partículas abrasivas, contra la superficie de la pieza de trabajo en condiciones controladas (fig. 27.17). El impacto de las partículas desarrolla una fuerza suficientemente concentrada (ver también la sección 26.6) para realizar operaciones como (a) corte de pequeños orificios, ranuras o patrones intrincados en materiales metálicos y no metálicos muy duros o frágiles; (b) rebabeo o retiro de pequeñas proyecciones de las partes; (c) recorte y biselado; (d) remoción de óxidos y otras películas superficiales, y (e) limpieza general de componentes con superficies irregulares.

La presión del gas de suministro es del orden de 850 kPa (125 psi); la velocidad del chorro abrasivo puede ser hasta de 300 m/s (100 pies/s) y se controla por medio de una válvula. Por lo general, las boquillas se fabrican con carburo de tungsteno o con zafiro, los cuales tienen resistencia al desgaste abrasivo. El tamaño del abrasivo se encuentra en el intervalo de 10 a 50 μm (400 a 2000 μin). Como el flujo de los abrasivos tiende a redondear las esquinas, deben evitarse las esquinas agudas en los diseños para el maquinado por chorro abrasivo. Igualmente, los orificios producidos en las partes metálicas tienden a conificarse. Existe algún riesgo en el uso de este proceso debido a las partículas suspendidas en el aire. Este problema se puede evitar mediante el proceso de maquinado por chorro abrasivo de agua.

27.10 | Economía de los procesos de maquinado avanzado

Los procesos de maquinado avanzado tienen aplicaciones únicas y son muy útiles para materiales difíciles de maquinar y para partes con perfiles complejos, internos y externos. Los volúmenes de producción económicos de un proceso particular dependen de los costos del herramental y del equipo, los costos de operación, la velocidad requerida de remoción de material y el nivel de calificación del operador, así como de las operaciones secundarias y de acabado que puedan necesitarse posteriormente.

En el maquinado químico (que es un proceso lento), factores importantes son el costo de los reactivos, enmascarantes y la disposición de los mismos (junto con el costo de limpieza de las partes). En el maquinado por descarga eléctrica, los costos de los electrodos y la necesidad de reemplazarlos periódicamente pueden ser significativos.

En estos procesos, la velocidad de remoción de material y la capacidad de producción pueden variar de manera significativa, como se puede ver en la tabla 27.1. El costo del herramental y del equipo también varía en forma considerable, así como la habilidad del operador. El alto capital de inversión de las máquinas (como en el maquinado eléctrico y de haces de alta energía, en particular cuando se equipan controles robóticos) tiene que justificarse en términos de los volúmenes de producción y de la viabilidad de manufacturar la misma parte por otros medios, en caso de que sea posible.

ESTUDIO DE CASO 27.2 | Manufactura de “stents”

Los ataques y paros cardíacos, así como otras enfermedades cardiovasculares, cobran una vida cada 33 segundos sólo en Estados Unidos¹. La mayoría se atribuyen a algún padecimiento de la arteria coronaria, en cuya pared se acumula gradualmente grasa (colesterol) que hace que se estreche o bloquee. Esta condición reduce el flujo sanguíneo al músculo del corazón y finalmente lleva a un ataque o paro cardíaco u otra en-

¹2002 Heart and Stroke Statistical Update, American Heart Association, página 4.

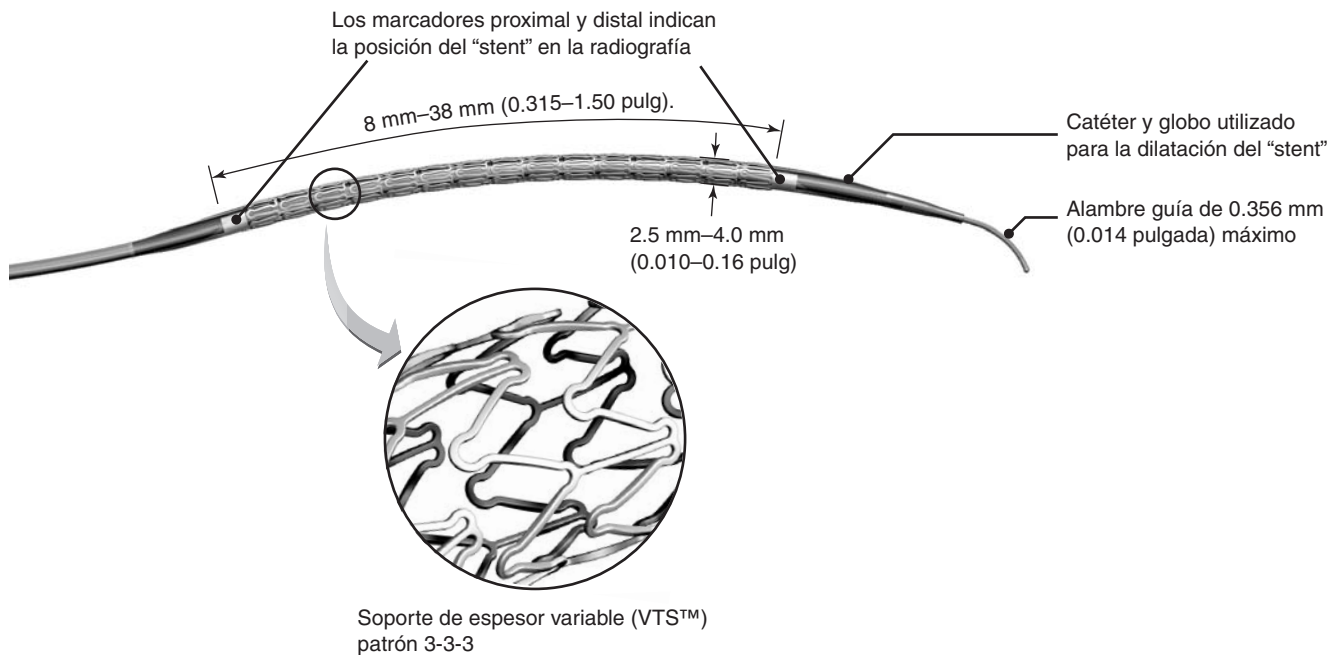


FIGURA 27.18 Sistema de "stent" coronario Guidant MULTI-LINK TETRA™.

fermedad cardiovascular. Uno de los métodos más populares hoy en día para mantener abiertas las arterias bloqueadas consiste en implantar un "stent" dentro de ellas. El MULTI-LINK TETRA™ (mostrado en la fig. 27.18) consta de un tubo diminuto de malla que se dilata utilizando un catéter de dilatación de globo y se implanta dentro de una arteria coronaria bloqueada o parcialmente bloqueada. Un "stent" sirve como marco o soporte mecánico para mantener abierta la arteria. Ofrece al paciente un método mínimamente invasivo para tratar la enfermedad cardíaca coronaria, cuya alternativa es, por lo general, una cirugía de desviación ("bypass") a corazón abierto, un procedimiento con mayor riesgo, dolor, tiempo de rehabilitación y costo para el paciente.

La manufactura de "stents" es demandante en extremo, y la exactitud y precisión de su diseño son de gran importancia para un desempeño apropiado. Dicha manufactura debe satisfacer todas las restricciones de diseño y proveer un dispositivo muy confiable; esto es, tienen que establecerse estrictos controles de calidad a lo largo del proceso de manufactura. Al diseñar un "stent", existen muchos factores de selección de materiales a considerar, como la resistencia radial, la resistencia a la corrosión, el límite de fatiga, la flexibilidad y la biocompatibilidad. La resistencia radial es importante, ya que el "stent" debe soportar la presión que ejerce la arteria sobre el mismo durante la dilatación.

Como el "stent" se implanta dentro del cuerpo, debe ser resistente a la corrosión y capaz de soportar las ondulaciones de esfuerzo provocadas por los latidos cardíacos. En consecuencia, el material también debe poseer una alta resistencia a la fatiga. Además, el "stent" debe tener el espesor de pared apropiado, a fin de ser lo suficientemente flexible para negociar con la tortuosa anatomía del corazón. Sobre todo, el material debe ser biocompatible con el cuerpo, ya que permanecerá dentro de él por el resto de la vida del paciente. Un material normal para "stents" —uno que satisface todos estos requisitos— es el acero inoxidable 316L.

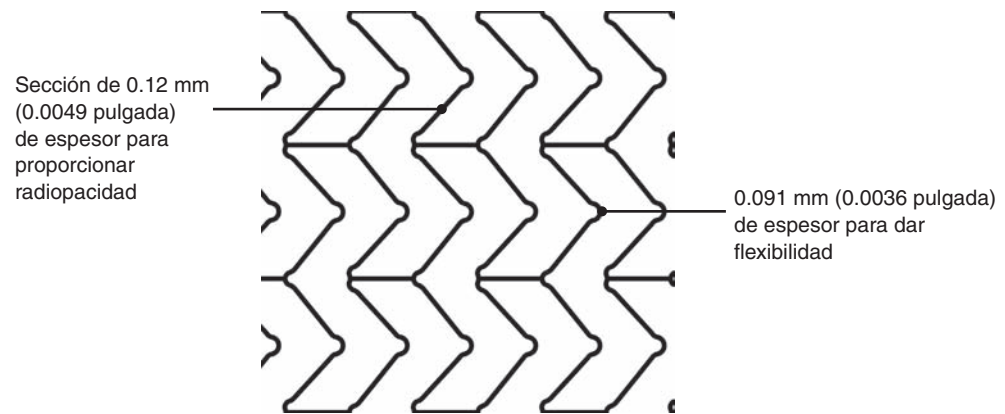


FIGURA 27.19 Detalle del patrón 3-3-3 del MULTI-LINK TETRA™.

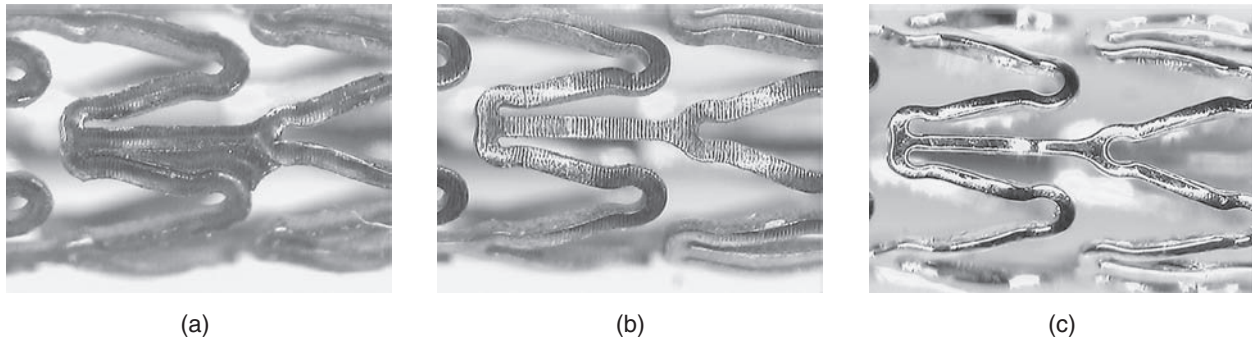


FIGURA 27.20 Evolución de la superficie del “stent”. (a) El MULTI-LINK TETRA™ después de la operación láser. Obsérvese que una pequeña porción de metal todavía es atacada. (b) Después de la remoción de escoria. (c) Luego del electropulido.

El patrón de un “stent” también afecta su desempeño. Primero se realiza un análisis de elementos finitos del diseño del “stent” para determinar cómo se comportará ante los esfuerzos inducidos por el latido cardíaco. El patrón de soporte, el espesor del tubo y la anchura de la pierna de soporte afectan el desempeño del “stent”. Son posibles muchos patrones diferentes, como el del MULTI-LINK TETRA™, que se muestra en la figura. 27.19 y que incluye algunas de sus dimensiones críticas.

Un “stent” se inicia como un tubo estirado de acero inoxidable, con un diámetro exterior que coincide con la dimensión final del “stent” y con un espesor de pared seleccionado para proporcionar una resistencia apropiada cuando se dilata. Después se maquina el tubo estirado a fin de lograr el patrón deseado (fig. 27.20a). Este método ha demostrado ser muy efectivo, debido al pequeño e intrincado patrón y las estrechas tolerancias dimensionales que debe tener. Cuando el láser corta el patrón del “stent”, deja pequeñas porciones de metal que es necesario retirar; por lo tanto, es muy importante que el láser corte a través de toda la pared del tubo. De manera inevitable, se desarrolla una gruesa capa de óxido o de escoria sobre el acero inoxidable debido al ataque térmico y químico del aire. Además, el maquinado láser genera salpicaduras de soldadura, rebabas y otros defectos superficiales. En consecuencia, se requieren operaciones de acabado para retirar las salpicaduras y la capa de óxido.

La primera operación de acabado después del maquinado láser comprende el ataque químico para eliminar del “stent” toda la escoria que sea posible; esta operación

suele efectuarse en una solución ácida y en la figura 27.20b se muestra la superficie resultante. Una vez que se ha retirado la escoria de manera suficiente, es necesario eliminar cualquier rebaba residual del proceso de maquinado por láser y debe dársele acabado a la superficie del “stent”. Es muy importante que este acabado sea liso, a fin de evitar la posible formación de coágulos (trombos) en el “stent”. Para eliminar los puntos afilados, el “stent” se electropule haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una solución electroquímica para asegurar un acabado superficial apropiado (fig. 27.20c), brillante y liso. Después, el “stent” se coloca en un ensamble de catéter de globo, esterilizado, y se empaca para entrega al cirujano.

Fuente: Cortesía de K. L. Graham, Guidant Corporation.

RESUMEN

- Los procesos de maquinado avanzado tienen capacidades únicas y utilizan fuentes de energía química, electroquímica, eléctrica y de haces de alta energía. Las propiedades mecánicas del material de la pieza de trabajo son poco significativas, ya que estos procesos se basan en mecanismos que no implican la resistencia, dureza, ductilidad o tenacidad del material, sino propiedades físicas, químicas y eléctricas.
- Los métodos químicos y eléctricos de maquinado son particularmente adecuados para materiales duros y formas complejas. No producen fuerzas (y, por lo tanto, pueden utilizarse en piezas de trabajo delgadas, esbeltas y flexibles), temperaturas significativas o esfuerzos residuales. Sin embargo, deben investigarse los efectos de estos procesos en la integridad de la superficie, ya que pueden dañarla de manera considerable, reduciendo así la resistencia a la fatiga del producto.
- Los procesos de maquinado con haces de alta energía utilizan básicamente rayos láser, haces de electrones y arcos de plasma. Tienen importantes aplicaciones industriales, poseen una gran flexibilidad de operación con controles robóticos y son económicamente competitivos con distintos procesos.
- Los procesos de maquinado por chorro de agua, maquinado por chorro abrasivo de agua y maquinado por chorro abrasivo se pueden utilizar en operaciones tanto de corte como de rebabeo. Como no usan herramental duro, tienen una flexibilidad de operación inherente.

TÉRMINOS CLAVE

Arco de plasma	Láser	Maquinado por pulso electroquímico
Atacante	Maquinado electrolítico con forma de tubo	Maquinado por rayo láser
Corte por arco de plasma	Maquinado electroquímico	Maquinado químico
Dieléctrico	Maquinado fotoquímico	Reactivo
EDM con alambre	Maquinado hidrodinámico	Rectificación electroquímica
EDM sin desgaste	Maquinado por chorro abrasivo	Rectificación por descarga eléctrica
Electrodo	Maquinado por chorro de agua	Rectificación por descarga electroquímica
Electrolito	Maquinado por chorro de agua abrasivo	Socavación
Estampado de matrices	Maquinado por descarga eléctrica o electroerosionado	Troquelado fotoquímico
Fotoataque	Maquinado por haz de electrones	Troquelado químico
Fotorresistente		
Fresado químico		
Honeado electroquímico		